

Christoph Olscher,
Aleksander Jandric,
Christian Zafiu,
Anna Pavlicek*, Florian Part

Zusammenfassung

Kunststoff ist heute ein allgegenwärtiges Material, das gute mechanische, chemische und thermische Eigenschaften aufweist und daher in vielen Industriezweigen eingesetzt wird. Die größte Herausforderung beim Recycling von Kunststoffabfällen besteht darin, die verschiedenen Kunststoffarten in hoher Homogenität zu trennen. Um unterschiedliche Kunststoffe voneinander zu trennen, verwenden Abfallsortieranlagen automatisierte sensorbasierte Sortiersysteme. Viele technische Kunststoffe, wie Polyoxymethylen (POM), gelangen in gemischte Abfallströme, werden von Sortiersystemen nicht erfasst und daher derzeit kaum bis gar nicht recycelt. Ein innovativer Ansatz zur Verbesserung der Recyclingquoten und der Erreichung der Recyclingziele des Aktionsplans für Kreislaufwirtschaft der EU, ist die markerbasierte Sortierung. Hierfür werden die Markermaterialien in Kunststoffe eingearbeitet, welche erst dadurch von automatisierten Sortiersystemen detektiert werden können, um in weiterer Folge eine verbesserte Homogenisierung zu erzielen. Die markerbasierte Sortierung ist jedoch aufgrund der zu erwartenden hohen Implementierungskosten derzeit nicht wirtschaftlich. Daher liegt das größte Potenzial für die markerbasierte Sortierung im Bereich der teuren, technischen Kunststoffe. So könnte beispielsweise POM aus Kunststoffbauteilen von Elektroaltgeräten sortenrein ausortiert und recycelt werden. Dieses Dossier gibt einen Überblick über neuartige Materialien (engl. *Advanced Materials*) mit spektroskopischen „Fingerabdrücken“ sowie über passende Detektionsmethoden, die für die markerbasierte Sortierung verwendbar sind.

* Korrespondenzautorin

Markermaterialien und spektroskopische Methoden für die Sortierung von Kunststoffabfällen

Einleitung

Die Einsatzgebiete von Kunststoffen als Industrie- und Konsumgüter sind sehr vielfältig, da Kunststoffe sehr gute mechanische, thermische und chemische Eigenschaften aufweisen und kostengünstig in großen Mengen hergestellt werden können. Seit 2005 ist die globale Produktion von Kunststoffen von 230 auf 367 Millionen Tonnen in 2020 gestiegen.^{1,2} Kunststoffe werden derzeit vorwiegend im Verpackungssektor (40,5 %), Bausektor (20,4 %), Automobilsektor (8,8 %) und für elektrische und elektronische Geräte (6,4 %) eingesetzt.² Die restlichen 24,1 % fallen auf andere Sektoren, die jeweils weniger als 5 % der gesamten Kunststoffmengen einsetzen.² Die Recyclingquote von Kunststoffverpackungen in der EU (EU27) beträgt 39,7 % (Datenstand 2020).³ Damit ist immer noch Aufholbedarf, um 2030 eine 55 % Recyclingquote von Kunststoffverpackungen (70 % von Verpackungen insgesamt) zu erfüllen. Es wird geschätzt, dass ca. 60 % des gesamten Kunststoffs, der zwischen 1950 und 2015 weltweit produziert wurde, unsachgemäß entsorgt oder deponiert wurde.^{4,5,6} Darüber hinaus führt ein sorgloses Wegwerfen (engl. *littering*) von Alt Kunststoffen durch mechanische und chemische Umwelteinflüsse, wie UV-Strahlung, zur Fragmentierung der Kunststoffe und somit zur Entstehung von Mikro- oder Nanoplastik. Diese Kleinstteile können wiederum diverse Additive (Weichmacher, Flammschutzmittel, Färbemittel und Andere) freisetzen, welche zur Gefährdung der menschlichen Gesundheit und sensibler Ökosysteme führen können.⁷

Als Gegenmaßnahme sind im Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft der EU (engl. *circular economy action plan*) die Überwachung und Behandlung von Kunststoffabfällen – neben dem Verbot von primärem Mikroplastik in Produkten (wie z. B. Peelingkörnern) – die Produktkennzeichnung und die Erhöhung der Recyclingquoten vorgesehen.⁸

Für das stoffliche Recycling von Kunststoffen ist es generell sehr wichtig, dass Alt kunststoffe möglichst sortenrein aufgetrennt werden, um eine ungewünschte Vermischung der Polymere oder auch die Kontamination mit Störstoffen zu vermeiden.⁹ Zudem können Alt kunststoffe teilweise sehr unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen. Für die Trennung von Kunststoffen werden unterschiedliche Sammelsysteme (z. B. „Gelber Sack“) angewandt und eine Vielzahl an unterschiedlichen Techniken in Sortieranlagen eingesetzt. Zum Beispiel werden aus separat gesammelten Leichtverpackungsmaterialien wertvolle Fraktionen wie Polyethylenterephthalat (PET) Flaschen, Polyolefin (PO)-Gemenge, Polystyrol Granulat oder Polyethylen (PE) Granulat mittels einer Kombination aus Luftabscheidern, Zentrifugen, Schwimm-Sink-Verfahren und Nah-Infrarot-basierten Sortiertechniken (kurz NIR) abgetrennt.^{10,11}

Die Zusammensetzung anderer Abfallströme wie zum Beispiel jener von Elektroaltgeräten (EAG) sind im Vergleich komplexer und können bis zu 18 verschiedene Kunststofftypen mit gesundheitsschädlichen Additiven, wie bromierte Flammschutzmittel, enthalten.¹² Im Falle solcher Abfallströme stoßen konventionelle Sortiersysteme an ihre Grenzen, wodurch nur wenige Kunststoffarten recycelt werden können. So enden viele technische Kunststoffe in gemischten Abfallströmen, werden daher nur thermisch verwertet bzw. mit-verbrennt und gehen so für die Kreislaufwirtschaft verloren.¹³ Die markerbasierte Sortierung (engl. *tracer-based sorting*, kurz TBS) ist eine vielversprechende Technik, um die Sortiereffizienz für hochwertige Alt kunststoffströme, wie technische Kunststoffe aus EAG, erhöhen zu können.¹⁴

Markerbasierte Sortierung [TBS]

TBS ist eine technische Möglichkeit, um Kunststoffarten zu identifizieren und auszusortieren, die bisher nicht durch bestehende Sortiersysteme erkannt werden können. Unter TBS versteht man eine Methodik der Materialsortierung bei der sogenannte Markermaterialien bereits in der Produktion auf oder in den zu sortierenden Kunststoff eingearbeitet werden. Diese Markermaterialien verleihen dem Material besondere Eigenschaften und dienen ausschließlich dem Zweck der gezielten Detektion durch spektroskopische Methoden (siehe Tabelle 1). TBS kann also direkt zur gezielten, automatisierten, sensorbasierten Sortierung einer bestimmten Kunststoffart aus Abfallströmen herangezogen werden.^{15,16} Seit über 30 Jahren werden bereits organische Fluoreszenzfarbstoffe als Tracer- bzw. Markermaterialien eingesetzt. So arbeitet das Forscherteam rund um S.R. Ahmad bereits seit 1992 daran, die automatisierte Detektion und Sortierung von Post-Consumer-Kunststoffabfällen zu optimieren, wobei auf Basis der Fluoreszenzsignatur inhärenter Chromophore oder zugesetzter Fluorophore die Detektion wesentlich erleichtert wird.¹⁷ Seither haben sich zahlreiche Forschungsprojekte, wie z. B. „BRITE-EURAM“ oder „MaReK“ (für markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen), intensiv mit der TBS-Anwendung befasst.^{18,19,20}

Tracer- bzw. Markermaterialien

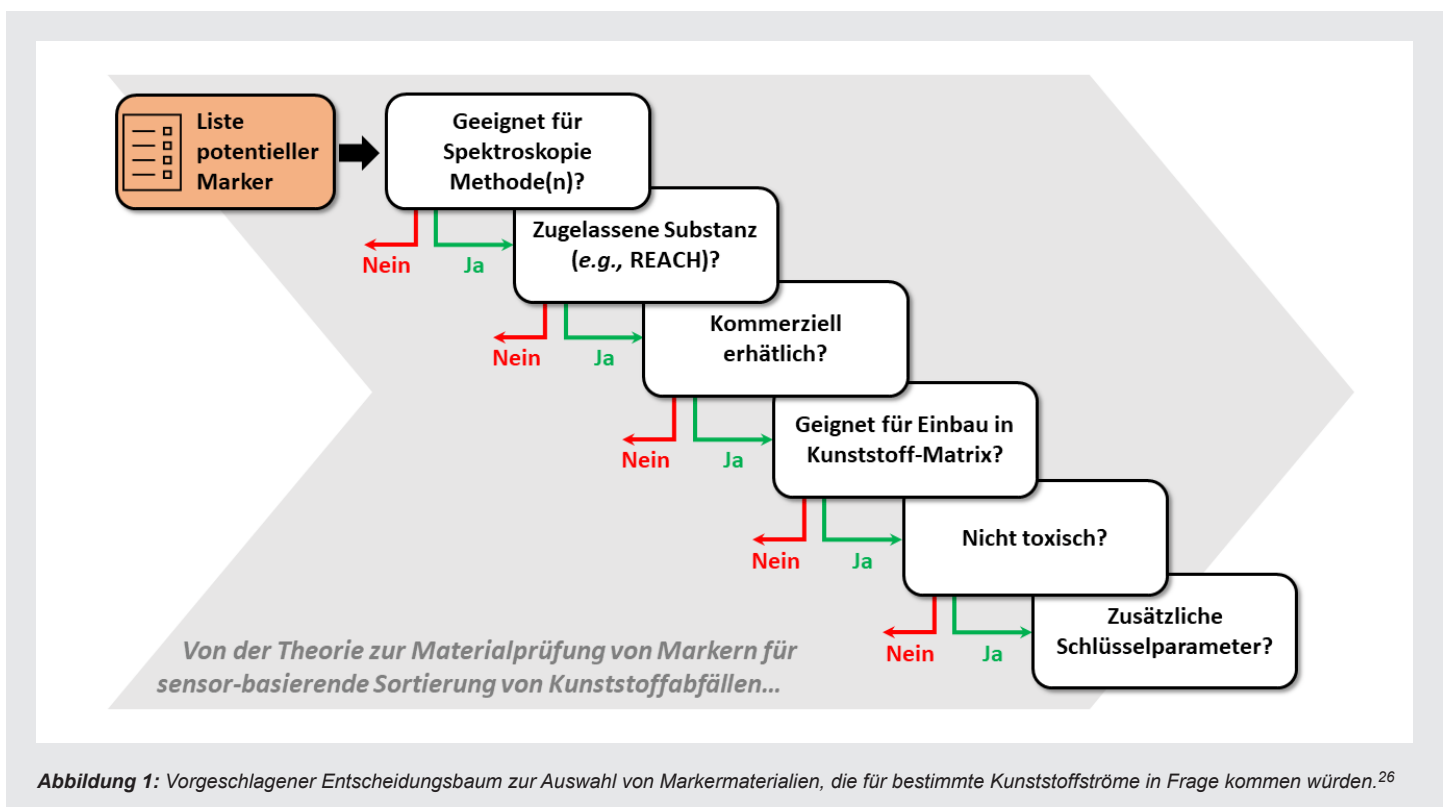
Die wichtigste Komponente des TBS ist der sogenannte Marker. Dabei handelt es sich um organische oder anorganische Substanzen, die die Detektion in der Trägermatrix bzw. in bestimmten Polymeren erleichtert. Eine vielversprechende Substanzklasse, die sowohl mittels Röntgenfluoreszenz als auch mit Nah-Infrarotspektroskopie, Photonen-Hochkonvertierungs-Fluoreszenz (engl. *photon upconversion*) und Laser-induzierter Plasmaspektroskopie (engl. *laser-induced breakdown spectroscopy*, kurz LIBS) detektiert werden kann, sind die Seltenen Erden.^{21,22} Elemente dieser Gruppe werden aufgrund ihrer Fluoreszenz und halbleitenden Eigenschaften immer häufiger in Hightech-Produkten eingesetzt, sind ökonomisch in der EU sehr wichtig und zählen daher zu den kritischen Rohstoffen (engl. *critical raw materials*).^{23,24} Die Grundlage der Fluoreszenz bilden die Valenz-, bzw. Anregungszustände von Seltenen Erden wie Yttrium und Cerium.²⁵

Neben der grundlegenden Eigenschaft, durch bereits etablierte Detektionsmethoden erkennbar zu sein, müssen noch weitere Parameter bei der Auswahl von Markern berücksichtigt werden. Zu den wichtigsten Parametern zählen Verfügbarkeit, Materialkosten, Lebensdauer, Umweltverträglichkeit sowie verschiedenste physikalisch-chemische Parameter (z. B.: Thermostabilität, Stoffdichte, Fluoreszenzausbeute, etc.).²¹

Ebenfalls sollte die Möglichkeit der Rückgewinnung bzw. Kreislauffähigkeit des Markers aus der Kunststoffmatrix mitberücksichtigt werden. Auch eine bereits vorhandene Zulassung einer Substanz gemäß europäischem Chemikalienrecht (REACH- und CLP-Verordnung) ist für kunststoffverarbeitende Betriebe relevant, da es die Verwendung der Substanz als Marker vereinfacht. Abbildung 1 zeigt einen möglichen Entscheidungsbaum, der zur Auswahl von möglichen Markern im Rahmen des Forschungsprojekts „PLAST-MARK“ näher ausgearbeitet wurde.^{26,27}

Detektionsmethoden für TBS

Spektroskopische Detektionsmethoden werden schon seit langem zur Identifikation und Trennung unterschiedlicher Materialien verwendet. In mechanischen Recyclinganlagen für Altkunststoffe werden primär NIR-Sensoren eingesetzt. Allerdings können auch Sensoren verwendet werden die im ultravioletten (UV) und im sichtbaren Bereich (UV-Vis) detektieren oder auf RAMAN-Spektroskopie, Photonen Hochkonversions-Fluoreszenz oder Röntgenfluoreszenzanalyse abgestimmt sind.^{14,28} Für das TBS ist eine Detektionsmethode oder die Kombination aus mehreren Sensortechniken notwendig, die in der Lage sind, die in der Kunststoff-Matrix integrierten Marker zu erkennen. Dabei ist wichtig, dass eine ausreichend hohe Durchsatzleistung bzw. Sortiergeschwindigkeit der Recyclinganlage erreicht wird. In Tabelle 1 werden die spektroskopischen Me-



thoden zusammengefasst, die für eine Detektion der Marker- bzw. Tracermaterialien in Frage kommen können. Die hierbei angewandte technologische Bewertung – mögliche Implementierungskosten wurden hierfür nicht berücksichtigt – erfolgte auf Basis des sogenannten Technologiereifegrades (engl. *technology readiness level*, kurz TRL). Das TRL wird auf einer Skala von 1 bis 9 angegeben und wurde in den 1970ern von der NASA als Indikator für das Entwicklungsstadium in der Raumfahrttechnologie entwickelt. Mittlerweile wurde er für eine Vielzahl anderer Sek-

toren adaptiert. Grundsätzlich gilt hierbei: Je höher das TRL einer Technologie ist, umso weiter fortgeschritten ist diese.^{29,30} Mit anderen Worten wird unter einem TRL von 8 ein „System technisch fertig entwickelt, abgenommen bzw. zertifiziert“ verstanden. Als TRL 9 wird dann bereits die Massentauglichkeit bzw. großindustrielle Anwendung verstanden.³¹

Es wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Methoden, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind, bereits im Sinne der TBS großtechnisch erfolg-

reich erprobt bzw. angewandt wurden. Entsprechend herrscht hierzu noch hoher Forschungsbedarf. Generell können die verschiedenen Methoden auch untereinander kombiniert werden, um unterschiedliche Stör- oder auch Wertstoffe im Abfallstrom zu detektieren. Derzeit wird bereits an multispektralen Sensoren für eine hyperspektrale Bildgebung (engl. *hyperspectral imaging*) oder andere Detektionsmethoden, wie: RAMAN oder LIBS, intensiv geforscht.^{54,55}

Tabelle 1:
Modifizierte Zusammenfassung verschiedener Spektroskopischer Detektionsmethoden, die für eine Tracer-basierte Sortierung von bestimmten Kunststoffströmen in Fragen kommen würden.²⁶

Detektionsmethode	TRL	Grundprinzip	Vorteile	Nachteile	Referenz
Nah-Infrarot Spektroskopie (NIR)	9	Bei der NIR werden Vibrationen von Atombindungen aufgrund der Änderung des Dipolmoments gemessen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Obertöne und Kombinationsbanden.	Günstig; hohe Durchsatzleistung; kaum Probenvorbereitung notwendig	Schwarze Polymere können nicht sicher identifiziert werden; Probleme mit Polymermischungen	32,33,34
Spektroskopie im mittleren Infrarot (MIR)	9	Auch bei der MIR werden Vibrationen von Atombindungen aufgrund der Änderung des Dipolmoments gemessen. Hierbei werden Deformations- und Streck-Schwingungen gemessen.	Weniger Probleme mit schwarzen Polymeren; besseres Signal-Rausch-Verhältnis als bei NIR	Zusätzliche Probenvorbereitung notwendig, bisher noch höhere Messzeit und Probenkontakt notwendig	35,36,37
Spektroskopie im ultravioletten und sichtbaren Bereich (UV-Vis)	9	Reflexion oder Absorption von ultravioletter oder sichtbarer Strahlung in Abhängigkeit von der Farbe der Probe wird gemessen.	Hohe Durchsatzleistung; Identifikation von Polymeren nach Farbe	Keine Unterscheidung von Polymertypen und Additiven möglich, wenn dieselben Farbstoffe enthalten sind	38,39,40,41
Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	9	Störung der Elektronenkonfiguration durch hochenergetische Strahlung und Messung der Fluoreszenzstrahlung, die bei der Wiederherstellung des Elektronengleichgewichts ausgestrahlt wird.	Hohe Durchsatzleistung; günstig; kann bromierte Flammschutzmittel oder Schwermetalle identifizieren	Kann bisher nur gut zwischen PVC/PVDC und anderen Polymeren unterscheiden; genaue Detektion ist limitiert auf Elemente mit Ordnungszahl > 12, beim Betrieb von RFA müssen zusätzliche Strahlenschutzauflagen erfüllt werden	12,21,42
Fluoreszenz-Spektroskopie	7	Es kann die Energieaufnahme von Elektronen im Grundzustand & Energieemission von Elektronen im angeregten Zustand unter Abhängigkeit der Wellenlänge und Intensität der Anregungsstrahlung gemessen werden.	Hohe Durchsatzleistung; kann für TBS verwendet werden (organische & anorganische Marker)	Keine charakteristischen Spektren für die unterschiedlichen Polymertypen möglich, hochenergetische Strahlung kann die Oberfläche der Zielobjekte beschädigen	22,38,41
RAMAN Spektroskopie	7	Es wird die Vibration von Atombindungen aufgrund von Änderungen der Polarisierbarkeit detektiert.	Hohe Durchsatzleistung; ergänzend zu anderen Methoden	Geringe Intensität der reflektierten Strahlung führt zu niedrigen Signal-Rausch-Verhältnissen	43,44,34
Laser induzierte Plasmaspektroskopie	5	Mit hochenergetischer Strahlung wird an der Oberfläche der Probe ein Plasma generiert, dessen Emissionen detektiert werden können und Element-spezifisch zugewiesen werden können.	Kaum Probenvorbereitung notwendig; ermöglicht genaueste Identifikation von Polymeren inklusive Additiven anhand spezifischer spektraler Linien der vorhandenen Elemente	Die Probe muss beschädigt werden, um das Plasma zu erzeugen; es kann zur Emission von gefährlichen Gasen kommen (e.g. Formaldehyd von POM); bisher limitierte Durchsatzleistung; Probleme bei der Unterscheidung von Kunststoffen mit ähnlicher elementarer Zusammensetzung	45,46,47,48
Zeitgesteuerte Fluoreszenzspektroskopie	4	Hier wird die Lebenszeit der Anregung der fluoreszierenden Farbstoffe gegenüber jener der Autofluoreszenz der Matrixmaterialien gemessen, um Hintergrundrauschen zu reduzieren.	Kann ergänzend zu anderen Methoden das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern	Hardware Upgrade ist teuer; Reduzierte Durchsatzleistung	49,50,51
Photonen-Hochkonversions Fluoreszenz Spektroskopie	4	Kombination von zwei oder mehreren niederenergetischen Photonen um Emission von einem höher energetischen Photon zu bewirken und zu detektieren. Dabei werden Verbundmaterialien verwendet, bei denen 1. Stoff als Aktivator für den 2ten Stoff [den Emitter] fungiert.	Ermöglicht die Verwendung von niederenergetischer Strahlung; ermöglicht gezielte Identifikation von Polymertypen anhand des Marker-Fingerprints, sehr hohes Signal-Rausch-Verhältnis	Marker-Verbindungen können sehr teuer sein; Kreislaufsystem für Marker sollte idealerweise vorhanden sein	34,52,53

Ökonomische Aspekte

Für die großtechnische Umsetzung von TBS-Konzepten sind ökonomische Aspekte hinsichtlich Materialkosten für das Markermaterial, sowie sehr hohe Investitionskosten für die Umrüstung der Recyclinganlagen entscheidend. Die Verwendung einer bereits unter REACH registrierten Substanz als Marker hat den Vorteil, dass die Registrierungskosten (inklusive der notwendigen Toxizitätstests und Dokumentation) entfallen. Diese belaufen sich für eine jährliche Import- bzw. -Produktionsmenge von 100-1.000 Tonnen im Durchschnitt auf rund 800.000 € und mehr.⁵⁶ Einen wirtschaftlich sehr wichtigen Aspekt stellen auch die hohen Investitionskosten für die Detektions- und Sortiereinheiten dar, die für die großtechnische Umsetzung in (bestehenden) Recyclinganlagen nötig wären, insbesondere wenn die Methoden ein derzeit niedriges TRL aufweisen. Das TRL ist auch ein Indikator für die F&E-Kosten zur Weiterentwicklung einer Sortiertechnologie bis zur großtechnischen Implementierung solcher TBS-Systeme. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die F&E-Kosten mit zunehmendem TRL ebenfalls stark zu-

nehmen⁵⁷, dennoch sind TBS-Systeme, die bereits ein hohes TRL aufweisen, ökonomisch betrachtet vorteilhaft, da die weiteren Entwicklungskosten erspart bleiben. Diese durch die TBS-Implementierung entstandenen Mehrkosten, könnten in Anbetracht einer „EU-Kunststoffsteuer“ von derzeit 0,80 € für eine Tonne nicht recyceltem Kunststoff eventuell aufgewogen werden, wofür jedoch nähere Kostenanalysen bzw. Wirtschaftlichkeitsrechnungen durchgeführt werden müssten.

Wie bei fast allen neuen Technologien, müssen auch für das TBS bestehende technische, ökologische, sowie soziale Barrieren überwunden und somit relevante Stakeholder überzeugt werden, um die nötigen Ressourcen zu investieren. So wurden beispielsweise bereits im Rahmen einer Studie relevante Stakeholder zu Markttreibern und Barrieren hinsichtlich TBS befragt.⁵⁸ In dieser Befragung kristallisierten sich „regulatorische und legale Barrieren“, „Verteilung von Aufwand und Nutzen“, „Rentabilität und Wettbewerb“, „Qualitäts- und Sicherheitsaspekte“ und „Verfahren und technische Belange“ als wichtigste Anliegen heraus.⁵⁸

Die oben angeführte Studie stellte auch zwei Szenarien namens „TBS-light“ und „TBS-complete“ näher vor. Im Szenario „TBS-light“ werden TBS-Maschinen am Ende des bereits etablierten Sortierungsprozesses eingeführt, um problematische Stoffe wie Komposite bzw. Verbundwerkstoffe zu entfernen. Im Szenario „TBS-complete“ ersetzen TBS-Maschinen konventionelle Sortierungstechnologien vollständig, um einzelne, hoch sortenreine Kunststoffströme zu ermöglichen. Die Studie räumt der zukünftigen Umsetzung von „TBS-light“ (im Vergleich zu „TBS-complete“) eine höhere Wahrscheinlichkeit ein, da das bereits bestehende Recyclingsystem als zu unflexibel angesehen wurde, um die technisch „radikalen“ Änderungen für „TBS-complete“ tatsächlich zu realisieren. Allerdings wurde auch erwähnt, dass „TBS-light“ nicht ausreicht, um die rechtlich bindenden Recyclingziele und die gewünschte Reduzierung des Kohlenstoff-Fußabdrucks erreichen zu können.^{58,15}

Anmerkungen und Literaturhinweise

- 1 PlasticsEurope. *Plastics – the Facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data*; Association of Plastics Manufacturers: Brussels, Belgium, 2016.
- 2 PlasticsEurope. *Plastics – the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand and waste data*; Association of Plastics Manufacturers: Brussels, Belgium, 2021.
- 3 EuroStat. *Packaging Waste Statistics*. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics (accessed on 25.01.2023).
- 4 Geyer, R.; Jambeck Jenna, R.; Law Kara, L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 2017, 3, doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- 5 Joos, L.; De Tender, C. Soil under stress: The importance of soil life and how it is influenced by (micro)plastic pollution. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 2022, 20, 1554-1566, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.03.041>.
- 6 Kanhai, L.D.K.; Gardfeldt, K.; Krumpfen, T.; Thompson, R.C.; O'Connor, I. Microplastics in sea ice and seawater beneath ice floes from the Arctic Ocean. *Scientific Reports* 2020, 10, 5004, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61948-6>.
- 7 Hüffer, T.; Metzelder, F.; Sigmund, G.; Slawek, S.; Schmidt, T.C.; Hofmann, T. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Sci Total Environ* 2019, 657, 242-247, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.047>.
- 8 European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT; THE COUNCIL; THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS; A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. 2020.

Fazit

Die Tracer-basierte Sortierung (TBS) ist ein vielversprechendes Konzept bzw. technische Maßnahme, welche das Potenzial hat, die Recyclingziele spezieller Abfallströme, wie technische Kunststoffe aus Elektroaltgeräten, mittels innovativer Detektionsmethoden, erfüllen zu können. Dabei können Spektroskopie-basierte Methoden, wie Nah-Infrarotspektroskopie (NIR), Spektroskopie im ultravioletten und sichtbaren Bereich, Photonen Hochkonversions-Fluoreszenz oder Röntgenfluoreszenz, für eine vollautomatisierte sensorgestützte Sortierung von Alt-Kunststoffen eingesetzt werden. Die Markermaterialien mit sogenannten Fingerprints* würden direkt im Polymer integriert werden. Hier stellt sich die Herausforderung einen standardisierten Markierungscode – analog zum Resin Identification Code (RIC) – zu entwickeln um eine einheitliche Markierung und Sortierung bei mehreren Produzenten, Anbietern und Sortierern zu ermöglichen. Für einen Marker-Einsatz eignen sich laut unserer Studie²⁶ Seltene Erden, wie Cerium- oder Yttriumoxid, für welche mit Hinblick auf das EU Chemikalienrecht (REACH- und CLP-Verordnung) eine gute Datengrundlage zu relevanten physikalisch-chemischen Parametern und der potenziellen Toxizität vorliegt. Des Weiteren könnte auch der organische Farbstoff Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic-dianhydride in Kunststoffprodukte eingearbeitet werden, da dieser Marker einen spezifischen Fingerprint im NIR-Spektrum aufweist. Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung solcher TBS-Konzepte müsste jedoch im Rahmen von Machbarkeitsstudien ausführlicher untersucht werden. Es sollte speziell auf die Verschleppung bzw. Weiterführung der Markermaterialien während multipler Recyclingzyklen aus umwelttechnischer, sicherheitstechnischer und ökonomischer Sicht Rücksicht genommen werden. Zusammenfassend sollte es das Ziel sein zu belegen, dass TBS die Homogenität eines Alt-Kunststoffstroms wesentlich verbessert und somit die Materialqualität sowie die Ausbeute hochwertiger Rezyklate erhöht. Dabei müssen unerwünschte Kreuzkontaminationen in andere Kunststoffsorten vermieden und die Rückführbarkeit der Marker gewährleistet werden. Am Ende muss auch die Wirtschaftlichkeit im Falle einer großtechnischen TBS-Implementierung näher untersucht werden, um die TBS-Technologie zukünftig erfolgreich umzusetzen.

* *Einzigartige Kombination an Markern. Durch die Zuordnung von Marker-Fingerprints an einzelne Kunststoffprodukte mit gleicher Zusammensetzung kann das Vermischen von Kunststoffen mit unterschiedlicher Zusammensetzung vermieden werden und ein hoher Reinheitsgrad erzielt werden.*

- 9 VDI. *Recycling of electrical and electronic equipment – Material and thermal recycling and removal*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Platz 1, Düsseldorf, Germany, **2014**; p. 44.
- 10 Martens, H.; Goldmann, D. *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*, 2. Auflage ed.; Springer Vieweg: Wiesbaden, Germany, **2016**.
- 11 Lim, J.; Ahn, Y.; Cho, H.; Kim, J. Optimal strategy to sort plastic waste considering economic feasibility to increase recycling efficiency. *Process Safety and Environmental Protection* **2022**, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.022>.
- 12 Jandric, A.; Part, F.; Fink, N.; Cocco, V.; Mouillard, F.; Huber-Humer, M.; Salhofer, S.; Zafiu, C. Investigation of the heterogeneity of bromine in plastic components as an indicator for brominated flame retardants in waste electrical and electronic equipment with regard to recyclability. *J Hazard Mater* **2020**, 390, 121899, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121899>.
- 13 Roosen, M.; Mys, N.; Kleinhans, K.; Lase, I.S.; Huysveld, S.; Brouwer, M.; Thoden van Velzen, E.U.; Van Geem, K.M.; Dewulf, J.; Ragaert, K.; et al. Expanding the collection portfolio of plastic packaging: Impact on quantity and quality of sorted plastic waste fractions. *Resources, Conservation and Recycling* **2022**, 178, 106025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106025>.
- 14 Neubauer, C.; Stoifl, B.; Tesar, M.; Thaler, P. *Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich Status 2019*; Report REP-0744. Wien **2021**, 2. korrigierte Auflage; Umweltbundesamt; p. 158.
- 15 Woidasky, J.; Lang-Koetz, C.; M., H.; Wiethoff, S.; Sander, I.; Schau, A.; Moesslein, J.; Fahr, M.; Richards, B.; Turshatov, A.; et al. Tracer Based Sorting – Innovative Sorting Options for Post Consumer Products. *Recy & DepoTech 2018: VORTRÄGE-Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz* **2018**, 105-110.
- 16 Woidasky, J.; Sander, I.; Schau, A.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Wacker, D.; Gao, G.; Kirchenbauer, D.; Kumar, V.; Busko, D.; et al. Inorganic fluorescent marker materials for identification of post-consumer plastic packaging. *Resources, Conservation and Recycling* **2020**, 161, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104976>.
- 17 Ahmad, S.R. Marking of products with fluorescent tracers in binary combinations for automatic identification and sorting. *Assembly Automation* **2000**, 20, 58-65, doi: <https://doi.org/10.1108/01445150010311617>.
- 18 Brite-Euram; <https://cordis.europa.eu/article/id/3479-briteeuram-final-projects/de> (Zugriff: 28.07.2022).
- 19 BMBF. MaReK – Mit Leuchtstoffen das Kunststoffrecycling verbessern. **2018**, 3, Verfügbar unter: https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2018-12/Infoblatt_MaReK_2018_p.pdf, (Zugriff: 02.08.2022).
- 20 Ahmad, S.R. A new technology for automatic identification and sorting of plastics for recycling. *Environ Technol* **2004**, 25, 1143-1149, doi: <https://doi.org/10.1080/0959332508618380>.
- 21 Bezati, F.; Froelich, D.; Massardier, V.; Maris, E. Addition of X-ray fluorescent tracers into polymers, new technology for automatic sorting of plastics: Proposal for selecting some relevant tracers. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, 55, 1214-1221, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.014>.
- 22 Maris, E.; Aoussat, A.; Naffrechoux, E.; Froelich, D. Polymer tracer detection systems with UV fluorescence spectrometry to improve product recyclability. *Minerals Engineering* **2012**, 29, 77-88, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.016>.
- 23 Alonso, E.; Sherman, A.M.; Wallington, T.J.; Everson, M.P.; Field, F.R.; Roth, R.; Kirchain, R.E. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ Sci Technol* **2012**, 46, 3406-3414, doi: <https://doi.org/10.1021/es203518d>.
- 24 Europäische Kommission, Critical Raw Materials. Verfügbar unter: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en (Zugriff 05.09.2022).
- 25 Gschneidner, Karl A. Jr. Rare earth element. Verfügbar unter: <https://www.britannica.com/science/rare-earth-element> (Zugriff 04.08.2022).
- 26 Olscher, C.; Jandric, A.; Zafiu, C.; Part, F. Evaluation of Marker Materials and Spectroscopic Methods for Tracer-Based Sorting of Plastic Wastes. *Polymers* **2022**, 14, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14153074>.
- 27 BOKU, PLASTMARK. Verfügbar unter: https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=de&menue_id_in=300&id_in=14208 (Zugriff 05.09.2022).
- 28 Kusch, A.; Gasde, J.; Deregowski, C.; Woidasky, J.; Lang-Koetz, C.; Viere, T. Sorting and Recycling of Lightweight Packaging in Germany – Climate Impacts and Options for Increasing Circularity Using Tracer-Based-Sorting. *Materials Circular Economy* **2021**, 3, doi: <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00022-6>.
- 29 Olechowski, A.L.; Eppinger, S.D.; Joglekar, N.; Tomaschek, K. Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering* **2020**, 23, 395-408, doi: <https://doi.org/10.1002/sys.21533>.
- 30 Frerking, M.; Beauchamp, P. JPL technology readiness assessment guideline. In Proceedings of the 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 30.06.2016, 2016; pp. 1-10.
- 31 Dragan, J. Technology Readiness Levels (TRL) Worauf sie achten müssen! FFG **2018**, 9.
- 32 Bassey, U.; Rojek, L.; Hartmann, M.; Creutzburg, R.; Volland, A. The potential of NIR spectroscopy in the separation of plastics for pyrolysis. *Electronic Imaging* **2021**, 143-143, doi: <https://doi.org/10.2352/issn.2470-1173.2021.3.Mobmu-143>.
- 33 Wu, X.; Li, J.; Yao, L.; Xu, Z. Auto-sorting commonly recovered plastics from waste household appliances and electronics using near-infrared spectroscopy. *Journal of Cleaner Production* **2020**, 246, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118732>.
- 34 Schrader, B.; Bougeard, D. Infrared and Raman spectroscopy : methods and applications; Weinheim [u.a.] : VCH-Verl.-Ges.: Weinheim, Germany, 1995; p. 787.
- 35 Becker, W.; Sachsenheimer, K.; Klemenz, M. Detection of Black Plastics in the Middle Infrared Spectrum (MIR) Using Photon Up-Conversion Technique for Polymer Recycling Purposes. *Polymers* **2017**, 9, doi: <https://doi.org/10.3390/polym9090435>.
- 36 Rozenstein, O.; Puckrin, E.; Adamowski, J. Development of a new approach based on mid-wave infrared spectroscopy for post-consumer black plastic waste sorting in the recycling industry. *Waste Management* **2017**, 68, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.023>.
- 37 Ian Robertson. FT-IR and NIR spectroscopy. **2015**, 1-5. Zu finden auf: https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/app_mid-ir_polymer-recycling-011780_01.pdf (Zugriff am 10.11.2022).
- 38 Perkampus, H.-H. UV-VIS spectroscopy and its applications : with 21 tables; Springer: Berlin/Heidelberg, Deutschland, **1992**; pp. 3-75.
- 39 Safavi, S.M.; Masoumi, H.; Mirian, S.S.; Tabrizchi, M. Sorting of polypropylene resins by color in MSW using visible reflectance spectroscopy. *Waste Manag* **2010**, 30, 2216-2222. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.023>.
- 40 Peršak, T.; Viltušnik, B.; Hernavs, J.; Klančnik, S. Vision-based sorting systems for transparent plastic granulate. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 4269. <https://doi.org/10.3390/app10124269>.
- 41 Hinderer, F. UV/Vis-Absorptions- und Fluoreszenz-Spektroskopie: Einführung in Die Spektroskopische Analyse Mit UV- und Sichtbarer Strahlung; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH: Wiesbaden, Germany, **2020**.
- 42 Bezati, F.; Froelich, D.; Massardier, V.; Maris, E. Addition of tracers into the polypropylene in view of automatic sorting of plastic wastes using X-ray fluorescence spectrometry. *Waste Manag.* **2010**, 30, 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.011>.
- 43 Kawazumi, H.; Tsuchida, A.; Yoshida, T.; Tsuchida, Y. High-performance recycling system for waste plastics using Raman identification. In Progress in Sustainable Energy Technologies; Dincer, I., Midilli, A., Kucuk, H., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2014; Volume II, pp. 519-529.
- 44 Tsuchida, A.; Kawazumi, H.; Kazuyoshi, A.; Yasuo, T. Identification of shredded plastics in milliseconds using Raman spectroscopy for recycling. In Proceedings of the 2009 IEEE Sensors, Christchurch, New Zealand, 25-28 October **2009**; pp. 1473-1476.
- 45 Gregoire, S.; Boudinet, M.; Pelascini, F.; Surma, F.; Detalle, V.; Holl, Y. Laser-induced breakdown spectroscopy for polymer identification. *Anal. Bioanal. Chem.* **2011**, 400, 3331-3340. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4898-2>.
- 46 Stefan, D.; Gyftokostas, N.; Bellou, E.; Couris, S. Laser-induced breakdown spectroscopy assisted by machine learning for plastics/polymers identification. *Atoms* **2019**, 7, 79. <https://doi.org/10.3390/atoms7030079>.

- ⁴⁷ Stepputat, M.; Noll, R. On-line detection of heavy metals and brominated flame retardants in technical polymers with laser-induced breakdown spectrometry. *Appl. Opt.* **2003**, *42*, 6210-6220. <https://doi.org/10.1364/AO.42.006210>.
- ⁴⁸ Araujo-Andrade, C.; Bugnicourt, E.; Philippet, L.; Rodriguez-Turienzo, L.; Nettleton, D.; Hoffmann, L.; Schlummer, M. Review on the photonic techniques suitable for automatic monitoring of the composition of multi-materials wastes in view of their posterior recycling. *Waste Management & Research* **2021**, *39*, 631-651, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X21997908>.
- ⁴⁹ Fomin, P.; Kargel, C. Performance evaluation of a time-gated fluorescence spectroscopy measurement system for the classification and recycling of plastics. *Appl. Spectrosc.* **2019**, *73*, 610-622. <https://doi.org/10.1177/0003702819831278>.
- ⁵⁰ Fomin, P.; Zhelondz, D.; Kargel, C. Optimized time-gated fluorescence spectroscopy for the classification and recycling of fluorescently labeled plastics. *Appl. Spectrosc.* **2017**, *71*, 919-928. <https://doi.org/10.1177/0003702816664104>.
- ⁵¹ Kögler, M.; Heilala, B. Time-gated Raman spectroscopy—A review. *Measur. Sci. Technol.* **2020**, *32*, 012002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abb044>.
- ⁵² Gao, G.; Turshatov, A.; Howard, I.A.; Busko, D.; Joseph, R.; Hudry, D.; Richards, B.S. Up-conversion fluorescent labels for plastic recycling: A review. *Adv. Sustain. Syst.* **2017**, *1*, 1600033. <https://doi.org/10.1002/adsu.201600033>.
- ⁵³ Mahata, M.K.; Hofsäss, H.C.; Vetter, U. Photon-upconverting materials: Advances and prospects for various emerging applications. In *Luminescence – An Outlook on the Phenomena and Their Applications*; IntechOpen: London, United Kingdom, **2016**; Chapter 6, pp. 109-131, <https://doi.org/10.5772/65118>.
- ⁵⁴ Shameem, K.M.M.; Choudhari, K.S.; Bankapur, A.; Kulkarni, S.D.; Unnikrishnan, V.K.; George, S.D.; Kartha, V.B.; Santhosh, C. A hybrid LIBS-Raman system combined with chemometrics: An efficient tool for plastic identification and sorting. *Anal. Bioanal. Chem.* **2017**, *409*, 3299-3308. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0268-z>.
- ⁵⁵ Bonifazi, G.; Di Maio, F.; Potenza, F.; Serranti, S. FT-IR Analysis and Hyperspectral Imaging Applied to Postconsumer Plastics Packaging Characterization and Sorting. *IEEE Sensors Journal* **2016**, *16*, 3428-3434, doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2015.2449867>.
- ⁵⁶ Fleischer, M. Testing Costs and Testing Capacity According to the REACH Requirements – Results of a Survey of Independent and Corporate GLP Laboratories in the EU and Switzerland. *J Bus Chem* **2007**, *4*, 96-114.
- ⁵⁷ Smoker, R.E.; Smith, S. System Cost Growth Associated with Technology-Readiness Level. *Journal of Parametrics* **2011**, *26*, 8-38, doi: <https://doi.org/10.1080/10157891.2007.10462276>.
- ⁵⁸ Gasde, J.; Woidasky, J.; Moesslein, J.; Lang-Koetz, C. Plastics recycling with tracer-based-sorting: Challenges of a potential radical technology. *Sustainability* **2020**, *13*, 258. <https://doi.org/10.3390/su13010258>.

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Bäckerstraße 13, A-1010 Wien; www.oew.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oew“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 060, Jänner 2023:
epub.oew.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier060.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de