



Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall

ATA - Ad-hoc-Ausschuss

Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen

Version 18, 06.02.2020

Die UMK hat den Bericht im Umlaufverfahren 04/2020 zur Kenntnis genommen und der Veröffentlichung des Berichtes auf der LAGA-Homepage zugestimmt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	6
2.1. Motivation	6
2.2. Arbeitsauftrag.....	7
2.3. Vorgehensweise	7
3. Beschreibung der IST-Situation.....	9
3.1. Stoffstrom.....	9
3.2. Stand der Technik.....	11
3.3. Wirtschaftliche Hemmnisse des Recyclings:	14
3.4. Ableitung von Bewertungskriterien	16
4. Beschreibung und Bewertung der betrachteten Lösungsansätze	18
4.1. Beschreibung von technologischen Lösungsansätzen von maschinenlesbaren Kennzeichnungssystemen	18
4.1.1. Tracer Based Sorting (TBS), am Beispiel der Firma Polysecure.....	18
4.1.2. Digitales Wasserzeichen, am Beispiel des Projekts „HolyGrail“	21
4.1.3. Ergänzende Technologien, die nicht weiter betrachtet wurden	22
4.2. Bewertung	23
4.2.1. Überwindung technischer Grenzen	23
4.2.2. Überwindung wirtschaftlicher Hemmnisse.....	25
4.2.3. Fazit	26
5. Erkenntnisse und offene Fragen	28
Literaturverzeichnis	30
Anhang I: Mitglieder des ad-hoc-Ausschusses.....	31
Anhang II: Umfrage des ATA-ad hoc-Ausschusses	32

1. Zusammenfassung

Die UMK hat auf ihrer 89. Sitzung den Auftrag erteilt, im Austausch mit Industrie, Wissenschaft und Sachverständigen über den technischen Stand der maschinenlesbaren Markierung bzw. Kennzeichnung von Kunststoffen zu berichten und ggf. einen Vorschlag zu erarbeiten, der in europäische Gremien eingebracht werden kann.

Relevante Mengen an Kunststoffabfällen fallen in den vier Bereichen Verpackungen, Bau, Fahrzeuge und Elektro / Elektronik an. Aufgrund der kurzen Lebenszeit von Verpackungen, insbesondere im Consumer-Bereich, des großen Mengenanfalls und geringer hochwertiger Recyclingwege wurde der Verpackungsbereich prioritär behandelt und die anderen Bereiche zurückgestellt.

Als maschinenlesbare Technologien zur Kennzeichnung und Identifizierung von Kunststoffen wurden die Verfahren „Tracer-based-Sorting (TBS)“ und „Digitales Wasserzeichen“ betrachtet.

Beim „Tracer-based-Sorting (TBS)“ werden Additive (z. B. anorganische fluoreszierende Partikel), sog. „Marker“, zur spezifischen Detektion mit Laserlicht zugegeben. Der chemisch inerte Marker kann dem Kunststoff direkt oder der Druckfarbe zugemischt werden. Beim Aufbringen des Markers auf das Produkt (z. B. über die Druckfarbe des Etiketts) besteht die Möglichkeit, diesen Marker im Sortierprozess auszuschleusen. Bei Zugabe im Kunststoff kann er auch nach mehreren Recyclingprozessen im Material erhalten bleiben. Zur Erforschung dieser Technologie läuft derzeit das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt „MaReK – Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ an der Hochschule Pforzheim mit einem geplanten Projektende im März 2020.

Beim „Digitalen Wasserzeichen“ werden unterschiedliche Oberflächeneigenschaften ausgenutzt. So kann auf einer Verpackung ein flächendeckendes Wasserzeichen (Größe der Informationseinheit ca. 1 cm²) durch bewusst herbeigeführte Pixelverschiebung aufgebracht bzw. aufgedruckt werden. Diese Pixelverschiebungen sind für das menschliche Auge nicht sichtbar, können aber technisch ausgelesen werden (z. B. durch Kameras). Alternativ können Oberflächen auch mit einer Oberflächenstruktur versehen werden. Mit einem digitalen Wasserzeichen können Materialinformationen (Zusammensetzung, Materialeigenschaften, Hinweise für das Recycling oder eine Demontage) hinterlegt und diese später ausgelesen werden (auch Anbindung an spezielle Datenbanken möglich). Dieses Verfahren wurde im Rahmen des von der Ellen-MacArthur-Stiftung unterstützten Projekts „HolyGrail 1.0“ betrachtet. Das Projekt wird als HolyGrail 2.0 im Frühjahr 2020 fortgesetzt¹.

Die Markierungen können bei Kunststoffverpackungen zur Positiv- wie auch Negativ-Markierung eingesetzt werden. Bei der Positiv-Markierung werden die markierten

¹ Nähere Angaben zur Laufzeit liegen aktuell nicht vor.

Verpackungen aus dem Stoffstrom mit dem Ziel eines hochwertigen Recyclings (Material wird im Kreislauf gehalten) aussortiert. Bei der Negativ-Markierung werden die Verpackungen gekennzeichnet, die Störstoffe für das Recycling enthalten, mit dem Ziel, sie aus dem Stoffkreislauf auszuschleusen und einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen. Welche Art der Markierung geeignet ist, ist je nach Einsatzbereich und Produkt abzuwägen.

Eine ökologische und ökonomische Bewertung der maschinenlesbaren Markierungstechnologien müsste Bestandteil einer umfassenden Prüfung sein. Hierzu lagen dem ad-hoc-Ausschuss keine ausreichenden Unterlagen vor, daher sind derzeit keine Aussagen möglich.

Die technologische Entwicklung im Bereich der Kennzeichnung von Kunststoffen schreitet aktuell schnell voran. Ebenso ist die Marktsituation in der Verpackungsbranche durch eine hohe Dynamik und Innovationsbereitschaft gekennzeichnet. Es sind Unternehmensnetzwerke aus Inverkehrbringern, Händlern und Entsorgern entstanden, um die Kreislaufwirtschaft im Verpackungsbereich voranzutreiben. Neben den betrachteten Technologien entwickeln sich am Markt derzeit weitere Verfahren (s. Kap. 4.1.3), die in diesem Rahmen jedoch nicht betrachtet wurden.

Zentrale Frage ist, ob maschinenlesbare Kennzeichnungssysteme die Hemmnisse des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten im Bereich der Consumer-Verpackungen und damit das Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage verringern können. Auf der einen Seite stellen die fehlende Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung von hochqualitativen Kunststoffrezyklaten und eine fehlende Akzeptanz Kunststoffrezyklaten gegenüber Hemmnisse dar, auf der anderen Seite stehen eine z.T. ungenügende Verfügbarkeit entsprechenden Rezyklats und fehlende Qualitätszertifizierungen einem verstärkten Einsatz von Kunststoffrezyklaten gegenüber.

Zu beachten ist, dass es auch mit den heute üblichen Aufbereitungs- und Sortierverfahren technisch möglich ist, hochwertige Rezyklate herzustellen. Bestimmender Faktor ist hier die Wirtschaftlichkeit der Verfahren. Allerdings bringen spezielle Verpackungsdesigns (z. B. Multilayer) die Sortiertechnik an ihre technischen Grenzen. Die Markierung mit maschinenlesbaren Markern kann den Sortierprozess unterstützen, unter gewissen Voraussetzungen verbessern und die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Dies kann bei speziellen Stoffströmen vorteilhaft sein und positiven Einfluss auf die Rückgewinnbarkeit von Kunststoffrezyklaten sowie den Einsatz von Kunststoffrezyklat haben.

Trotz alledem und unverzichtbar ist den maschinenlesbaren Markierungstechnologien jedoch Abfallvermeidung und ein recyclinggerechtes Produktdesign voranzustellen. Maschinenlesbare Markierungssysteme können das Recycling nur unterstützen und führen nicht automatisch zu besseren Erfassungs-, Sortier- und Recyclingquoten.

Bei einer Umsetzung eines markerbasierten Recyclings wären Investitionen sowohl seitens der Inverkehrbringer (Markierung der Güter) als auch seitens der Sortierer (Installation der neuen Sortiertechnik) notwendig. Da hier eine gegenseitige Abhängigkeit besteht, wäre eine koordinierte Abstimmung und letztlich eine Festlegung auf gemeinsame Kriterien und Standards (für Sortierkriterien und Verfahren zur Kennzeichnung und Auslesung) notwendig.

2. Einleitung

2.1. Motivation

Das Thema „Kunststoffe“ erfährt zurzeit zunehmend Aufmerksamkeit in der öffentlichen Wahrnehmung. Vielfach werden die Folgen der Umweltverschmutzung durch Kunststoffe aufgezeigt, sei es u.a. durch Vermüllung der Meere, Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt oder des Abriebs von Autoreifen. Erstmals wurde zudem Mikroplastik im menschlichen Darm entdeckt².

Es wird immer deutlicher, dass zum einen der Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt vermieden und zeitgleich die Wiederverwendung von Kunststoffen ansteigen muss. Aus Gründen der Nachhaltigkeit und der Generationengerechtigkeit sind Ressourcen zu schonen und sehr effektiv im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu nutzen.

Das Bundesumweltministerium hat hierzu einen 5-Punkte-Plan für weniger Plastik und mehr Recycling verabschiedet.

Die Kunststoffbranche selbst reagiert auf die öffentliche Beachtung mit verschiedenen Initiativen auf nationaler (z.B. Rezyklat-Forum der Firmen dm, Globus und Rossmann) wie internationaler (z.B. „Alliance to end plastic waste“) Ebene. Anreize für dieses privatwirtschaftliche Engagement bestehen einerseits aufgrund des Image-Verlusts des Materials Kunststoff, andererseits durch die Zielsetzungen in der EU-Kunststoffstrategie sowie rechtlichen Regelungen wie der EU-Einwegkunststoffrichtlinie oder dem Verpackungsgesetz, die auf eine Steigerung des Recyclings und des Rezyklateinsatzes abzielen.

Unabhängig von einer möglichen maschinenlesbaren Kennzeichnung von Kunststoffen ist beim Recycling (von Kunststoffen) ein hochwertiges, werkstoffliches Recycling eine zwingende Voraussetzung, um die daraus gewonnenen Rezyklate zur Substitution von Primärkunststoffen verwenden und damit langfristig Ressourcen einsparen sowie Abfall vermeiden zu können. Die quantitative und qualitative Steigerung der werkstofflichen Verwertung kann (neben der Förderung der Recyclingfähigkeit und des Rezyklateinsatzes durch das Produktdesign) grundsätzlich auf drei Ebenen ansetzen:

1. Durch geeignete Maßnahmen, z.B. zur getrennten Erfassung oder Rückgabe von Abfällen (ggf. mit Anreizsetzung), werden mehr grundsätzlich verwertbare Produktabfälle vom Endverbraucher bereitgestellt.
2. Die bereits jetzt und zukünftig bereitgestellten Produktabfälle werden stärker als bisher einer werkstofflichen Verwertung zugeführt (z.B. durch Quotenvorgaben). Die

² Österreichische Forscher haben nach eigenen Angaben erstmals Mikroplastik in Stuhlproben von Menschen nachgewiesen. Wie die Medizinische Universität Wien und das österreichische Umweltbundesamt mitteilen, wurden die Kunststoffpartikel in den Proben von allen acht Teilnehmern einer Pilotstudie gefunden.

Qualität der werkstofflichen Verwertung, insb. die Sortenreinheit der Rezyklate, wird gesteigert.

3. Durch geeignete Instrumente und Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage nach dem Sekundärrohstoff wird ein Anreiz zur Bereitstellung von Rezyklaten geschaffen.

Die in dem vorliegenden Bericht betrachteten Ansätze greifen auf der zweiten der genannten Ebenen. Die Kennzeichnung von Kunststoffen stellt eine Maßnahme zur Steigerung der werkstofflichen Verwertung bereitgestellter Produktabfälle durch einfachere und möglicherweise günstigere Sortiertechnik und höherwertigere Sortierqualität dar. Jedoch greifen die betrachteten Technologien in vor- und nachgeordnete Bereiche der Nutzungsphase von Kunststoffen ein, daher gilt es diese auch in den Gesamtkontext einzuordnen.

2.2. Arbeitsauftrag

Auftrag des Ad-hoc Ausschusses ist es, im Austausch mit Industrie, Wissenschaft und Sachverständigen über den technischen Stand der maschinenlesbaren Markierung bzw. Kennzeichnung von Kunststoffen zu berichten und ggf. einen Vorschlag zu erarbeiten, der in europäische Gremien eingebracht werden kann. Dieser Beschluss wurde auf der 89. UMK zu TOP 36 „Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen“ gefasst.

Seitens der Länder Baden-Württemberg, Berlin, Bremen, Hessen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und des Freistaates Thüringen wurde folgende Protokollerklärung hinzugefügt:

Die Länder halten hierzu insbesondere eine maschinenlesbare Markierung zum Transport eines entsorgungsrelevanten Datensatzes von Kunststoffen oder möglicherweise auch Markierungsstoffe im Kunststoff für wünschenswert. Die in der Industrie hierzu angelaufenen Arbeiten sollten mit Blick auf den rechtlichen Rahmen des freien Warenverkehrs und des Ökodesigns auf europäischer Ebene unterstützt und gefördert werden.

2.3. Vorgehensweise

Zur Bearbeitung des oben beschriebenen Auftrags wurden mehrere Expertengespräche durchgeführt, in denen einerseits die relevanten Technologien zur maschinenlesbaren Kennzeichnung von Kunststoffen im Detail vorgestellt wurden, andererseits Akteure der Kunststoff-Wertschöpfungskette um Einschätzung der Vor- und Nachteile einer Kennzeichnung gebeten wurden.

Die Teilnahme an mehreren themenrelevanten Veranstaltungen ergänzt das Bild (MaRek-Stakeholder-Work Shop, Rezyklat-Forum, Plastics Economy Konferenz).

Zudem wurde ein Fragebogen an über 30 Akteure aus der Kunststoffbranche, im Wesentlichen Verbände, versandt. Sechs Antworten, davon vier vollständige, sind eingegangen.

In diesem Fragebogen wurde, wie auch in den Expertengesprächen, um Einschätzung der Vor- und Nachteile einer Kennzeichnung gebeten. Die vollständig eingegangenen Antworten zeigen zwar eine geringe Beteiligung allerdings auch die fundierte Marktkenntnis der Teilnehmer der Umfrage. Dies ist für die Interpretation der Ergebnisse positiv zu werten. Es zeigte sich, dass Wissenschaft und Wirtschaft von Kennzeichnungssystemen Kenntnis erhalten haben und von den Teilnehmern die Technologien als hilfreich zur Verbesserung der Sortierqualität und des Recyclings eingestuft werden.

Ergänzend sind Informationen aus Produktionsstatistiken und anderweitigen Studien sowie Presseberichten etc. in die im vorliegenden Bericht dargestellte Meinungsbildung eingeflossen.

Die so gewonnenen Informationen ermöglichen eine Darstellung der aktuellen Situation (Kapitel 3). Wobei hier zunächst die bestehenden Stoffströme und eingesetzten Sortiertechniken beschrieben und darauf aufbauend Bewertungskriterien abgeleitet werden.

In Kapitel 4 werden die betrachteten Technologien zur Kennzeichnung von Kunststoffen beschrieben (4.1) und anhand der aufgestellten Kriterien bewertet (4.2).

3. Beschreibung der IST-Situation

3.1. Stoffstrom

Informationen über die Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland liefern die im Auftrag der BKV GmbH und weiterer Kunststoffbranchenverbände im zweijährlichen Rhythmus erstellten Studien, deren Angaben für das Bezugsjahr 2017 die wesentliche Datenbasis diesen Abschnitt bilden (Conversio Market & Strategy GmbH, 2018).

In Deutschland wurden im Jahr 2017 insgesamt rund 14,4 Mio. t Kunststoffe in den unterschiedlichen Einsatzbereichen (Verpackungen, Bau, Fahrzeuge, Elektro-/Elektronik und Sonstiges) zur Verarbeitung eingesetzt (davon ca. 1,8 Mio. t Rezyklate). Unter Berücksichtigung ein- und ausgeführter Kunststoffprodukte belief sich der inländische Kunststoffverbrauch im privaten und gewerblichen Bereich auf etwa 11,8 Mio. t, davon sind rund 6,2 Mio. t als Produktabfall in Deutschland angefallen. Bezogen auf die in Deutschland verarbeitete Kunststoffmenge fallen durchschnittlich 43 Massenprozent in Deutschland als Produktabfall an. Die Mengendifferenz aus Kunststoffverbrauch und Kunststoffabfallaufkommen ist dabei im Im- und Export von Kunststoffprodukten, in Lagerbestandsveränderungen sowie in der teilweise sehr hohen Langlebigkeit der Kunststoffprodukte begründet.

Ca. 2,82 Mio. t (ca. 46 Massenprozent) der 2017 in Deutschland angefallenen Produktabfälle wurden werkstofflich und rund 3,24 Mio. t (ca. 53 Massenprozent) energetisch verwertet. Die energetisch verwerteten Mengen beinhalten sowohl den Output aus den Aufbereitungsanlagen (z.B. EBS oder Sortierreste) als auch die Kunststoffabfälle, die über den Restmüll direkt in Müllverbrennungsanlagen entsorgt wurden.

Die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen aus LVP-Sortieranlagen und die Deponierung spielten mit insgesamt ca. 1,4 Massenprozent eine untergeordnete Rolle.

Die Kunststoffabfallmenge stieg im Zeitraum von 1994 bis 2017 von 2,80 auf ca. 6,15 Millionen t. Dies bedeutet einen Anstieg um ca. 3,5 Masseprozent p.a. bzw. rd. 3,35 Mio. t im genannten Untersuchungszeitraum. Von einer weiter steigenden Tendenz ist auszugehen.

Im Jahr 2017 wurde erstmalig die Verwendung von Rezyklaten in der Studie abgefragt. Demnach wurden insgesamt ca. 1,8 Mio. t Rezyklate eingesetzt (ca. 12,3 Massenprozent), davon stammen 0,95 Mio. t aus Produktions- und Verarbeitungsresten und 0,81 Mio. t aus dem Post-Consumer-Bereich.

Einsatzfelder 2017	Abfallaufkommen			Verwertung in kt				Beseitigung in kt		
	in kt	in kg per capita	in %	Total	Werk- stofflich	Roh- stofflich	Ener- getisch	Total	Deponie	MVA ohne Energie- gew.
Verpackungen	3.081	37	59,2%	3.079	1.498	44	1.537	2	2	0
Bau	495	6	9,5%	484	141	0	343	11	11	0
Fahrzeuge	232	3	4,5%	225	70	2	153	7	7	0
Elektro/Elektronik	307	4	5,9%	304	63	3	238	3	3	0
Haushaltswaren, Sport, Spiel, Freizeit	158	2	3,0%	156	8	0	148	2	2	0
Landwirtschaft	277	3	5,3%	273	112	0	161	4	4	0
Sonstiges	651	8	12,5%	645	83	0	562	6	6	0
Total	5.201	63	100%	5.166	1.975	49	3.142	35	35	0
				99,3%	38,0%	0,9%	60,4%	0,6%	0,6%	0,0%

Abbildung 1: Post-Consumer Abfälle nach wesentlichen Einsatzfeldern (Conversio Market & Strategy GmbH, 2018)

Die Studie zeigt deutlich vier Bereiche (Verpackung, Bau, Fahrzeuge und Elektro/Elektronik), in den ca. 72 Massenprozent aller verarbeiteten Kunststoffwerkstoffe verwendet bzw. eingesetzt werden. Aus Sicht des Ad-hoc Ausschusses ist es daher sinnvoll, diese Bereiche im Detail zu betrachten.

Eine differenzierte Betrachtung dieser vier Einsatzfelder von Kunststoffen zeigt weiterhin, dass die Aufteilung in werkstoffliche und energetische Verwertung unterschiedlich ausgeprägt ist. So werden einerseits 48,6 Massenprozent der Verpackungen, andererseits nur jeweils unter 30 Massenprozent der Abfälle aus Bau, Fahrzeuge und Elektro/Elektronik werkstofflich verwertet werden. Anders ausgedrückt zeigen die Werte, dass die werkstoffliche Verwertung mit 76 Massenprozent maßgeblich auf der Verwertung von Verpackungen beruht (Abbildung 1: Post-Consumer Abfälle nach wesentlichen Einsatzfeldern). Die Studie führt hierzu aus, dass „haushaltsnahe Verpackungen im Rahmen der Aktivitäten der Dualen Systeme, das Recycling von PET-Flaschen sowie von Folien aus den Bereichen Transport und Industrie“ die Basis des werkstofflichen Recyclings darstellen. Da die zu untersuchenden Technologien zur Kennzeichnung von Kunststoffen zu einer Verbesserung des werkstofflichen Recyclings beitragen, ist innerhalb der vier gesetzten Schwerpunkt-Bereiche der Verpackungsbereich aufgrund der Mengenverhältnisse priorisiert zu betrachten.

Gemäß der Studie (Conversio Market & Strategy GmbH, 2018) beläuft sich der größte Anteil an Verpackungs-Kunststoffen auf PE-LD/LLD, PE-HD/MD, PP und PET. Eine weitergehende Unterscheidung in die verschiedenen Untergruppen eines Hauptkunststoffes oder nach enthaltenen Störstoffen (z.B. Additive, nicht kompatible Materialkombinationen, bestimmte Barrierschichten) erfolgt nicht. PET wird nach wie vor nahezu ausschließlich im Verpackungsbereich verwendet, mit zunehmender Menge auch im Bereich „Sonstiges“. Für PET-Getränkeflaschen wurde ein Pfandsystem eingerichtet, welches zu einem sortenreinen Rücklauf führt.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Produktlebenszyklen von Kunststoffen in den vier Bereichen sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Durch die teilweise mehrere Jahre andauernde Nutzungsphase entsteht eine Verzögerung zwischen Produktherstellung und Anfall als Produktabfall. Der Einfluss der Produktlanglebigkeit spiegelt sich insbesondere im

Baubereich, aber auch im Fahrzeug- und Elektro-/Elektroniksektor wider. Für Verpackungen eingesetzte Kunststoffe fallen dagegen in der Regel im gleichen Jahr der Verpackungsproduktion wieder als Abfall an; langlebige Verpackungen, wie z.B. Mehrwegverpackungen bilden eher die Ausnahme. Beispiele für kurzlebige Verpackungen stellen Kunststoffverpackungen von Lebensmitteln oder Styropor-Einlagen (ohne Flammschutzmittel) zum Schutz von versandten Produkten dar.

Folglich wurde im Rahmen der Arbeit des Ad Hoc Ausschusses der Verpackungsbereich untersucht. Eine Betrachtung der weiteren Bereiche ist nicht im Detail erfolgt.

3.2. Stand der Technik

Welche Menge eines Stoffstroms, der einer werkstofflichen Verwertung zugeführt wird, letztendlich als Rezyklat zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden kann, ist neben dem Umfang und der Qualität der Erfassung maßgeblich abhängig von der Sortiertiefe sowie der Qualität der sortierten Kunststofffraktionen.

In Sortieranlagen für Leichtverpackungs- (LVP-)Sammelgemische werden unsortierte Abfälle aus privaten Haushaltungen und diesen nach der Art der dort typischerweise anfallenden Verpackungsabfälle vergleichbaren Anfallstellen angeliefert (Gelber Sack/Gelbe Tonne). Nach der Öffnung der Gebinde (Gelbe Säcke, Mülltüten) erfolgt die Klassierung nach verschiedenen Korngrößen (<20 mm, 20-220 mm, > 220 mm). Die nahezu wertstofffreie Feinfraktion (<20 mm) wird als Rest ausgeschleust und großformatige Folien (>220 mm) werden als separate Zielfraktion ausgetragen. Die mittlere Korngröße (20-220 mm) wird über verschiedenste Trennaggregate in einzelne Materialfraktionen sortiert. Dabei erfolgt zunächst die Abscheidung von Eisen- und Nichteisenmetallen, dann die Abtrennung von Flüssigkeitskartonagen (z.B. Getränkkartons) und schließlich die Sortierung der Kunststoffe (in die Standardpolymere Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol, und Polyethylenterephthalat sowie eine Mischkunststofffraktion) sowie die Abtrennung von Papier, Pappe und Karton (PPK). In der Praxis werden meist 10-12 Sortierfraktionen erzeugt, die anschließend einer Verwertung zugeführt werden.

Die Aufbereitung in einem Recyclingbetrieb beginnt mit einer trockenen Vorzerkleinerung, Metallaushaltung und ggf. anschließender Nass-Zerkleinerung und Wäsche (Abtrennung von Etiketten, Sand und anderen Verunreinigungen). Danach werden Kunststoffe unterschiedlicher Dichten im nassen Medium voneinander getrennt. Hierfür kommen überwiegend Zentrifugen, Hydrozyklone sowie Schwimm-Sink-Becken zum Einsatz. Die Dichtentrennung im nassen Medium hat sich insbesondere für die Massenkunststoffe (PP, PE, PS, PVC) bewährt und kommt bereits seit mehr als 30 Jahren zum Einsatz (Bahr et al. 1980).

Die Produktqualität beeinflussende Störstoffe wie Fremdkunststoffe, Papier oder Metalle werden durch diese Verfahrensschritte abgetrennt und einer anschließenden stofflichen

(Metalle) oder energetischen Verwertung (Papieretiketten, andere brennbare Anteile) zugeführt.

Im Bereich der Sortierung von Kunststoffgemischen brachte die Entwicklung von Nahinfrarot-Trennern (NIR-Trennern) einen wesentlichen Fortschritt. Die NIR-Technik macht sich die materialabhängige Reflexionsintensität bei verschiedenen Wellenlängen zunutze. Auf diese Weise werden je nach Zielstellung u.a. verschiedene Kunststoffsorten aus einem Gemisch separiert.

Die NIR-Technologie kann die Hauptpolymere (PP, PE, PET, PS, PVC) erkennen, nicht jedoch die wichtigen Unterklassen bzw. Anwendungs-relevanten funktionalen Spezifikationen (z.B. HDPE mit Sauerstoffbarriere-Additiv versus HDPE mit einem schwingungsdämpfenden Füllstoff). Ferner sind z.B. für Wurst und Käse Multilayer-Verpackungen erforderlich, die aus unterschiedlichen Kunststoffsorten bestehen und mechanisch nicht voneinander trennbar sind. Bei der Sortierung über das NIR-Verfahren sind die Materialeigenschaften der Oberflächenschicht ausschlaggebend für die Trennung in die verschiedenen Sortierfraktionen. Bei Multilayer-Verpackungen kann dies dazu führen, dass sie in die Polymerfraktion der obersten Schicht abgelegt werden. Dort sind die enthaltenen Fremdkunststoffe jedoch Störstoffe, die nicht mechanisch abtrennbar sind und das werkstoffliche Recycling stören können. Es wäre notwendig, diese als eigene Fraktion zu erkennen, abzutrennen und spezifisch weiter zu behandeln (z.B. durch ein Lösemittelverfahren). Ein weiteres Defizit der NIR-Technologie ist, dass sie keine Anwendungsaspekte wie Lebensmitteltauglichkeit berücksichtigen kann.

NIR-Trenner zur Separierung einzelner Kunststoffsorten kommen überwiegend in Anlagen größerer Kapazität zum Einsatz. Trotz der innovativen NIR-Technik zeigen verschiedene Untersuchungen, dass immer noch ein erheblicher Anteil der Kunststoffe in den Mischfraktionen (Ersatzbrennstoff, Mischkunststoffe) ausgebracht wird (Wilts, et al., 2016, S. 94).

Die in den Sortieranlagen erzeugten wertstoffangereicherten Kunststofffraktionen, die aufgrund unvollkommener Trennprozesse neben den Gutanteilen noch Störstoffe und Fremdmaterialien enthalten, müssen für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung weiter aufbereitet werden. Die Aufbereitung der Kunststofffraktionen aus der Erstsortierung in hochwertige Rezyklate ist mit einer zusätzlichen Verfahrenstechnik verbunden. Im Rahmen dieser weiteren Aufbereitung ist in Abhängigkeit von der Kunststoffsorte und der Sortierqualität mit einem Verlust von bis zu 35 Prozent der Menge des Ausgangsmaterials zu rechnen.

Da die aufzubereitenden Kunststoffsorten oder -mischungen in der Regel nicht farbsortiert vorliegen, weisen die Regranulate ein Farbspektrum von grau bis schwarz auf. Durch die Zugabe von Aufhellern und Farbanteilen werden diese dem Kundenwunsch entsprechend aber auch eingefärbt. Eine Sortierung nach Farben ist ebenfalls möglich.

In einem letzten Arbeitsgang werden die hochangereicherten Kunststoffe je nach Absatzmarkt agglomeriert oder auf Extrudern granuliert. Extruder bieten die Möglichkeit, mit Hilfe eines Schmelzfilters eine Feinreinigung vorzunehmen, zudem können mit speziell ausgeführten Aggregaten auf Kundenwunsch auch sogenannte Compounds produziert werden. Hierbei werden Rezyklate mit definierten Werkstoffeigenschaften bezüglich der Fließfähigkeit, Schlagzähigkeit, Steifigkeit oder UV- und Hitzebeständigkeit hergestellt (Interseroh 2013). Diese können teilweise günstiger hergestellt werden als mit Neeware, da die benötigten Additive im Rezyklat bereits enthalten sind.

Expertenaussagen zufolge kann eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet werden, obwohl die Input-Materialien für den Sortierprozess stark differieren können. Dem Sortierprozess immanent ist ein häufiges Vermischen des Aufgabegutes wodurch eine Verstetigung von dessen Eigenschaften erreicht wird. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass technische Parameter im Outputstrom gesichert eingehalten werden. Bestehende Anlagen sind mit Laboren zur Qualitätssicherung ausgestattet.

Hinsichtlich der Anlagenstruktur ist anzumerken, dass die Sortierung der einzelnen Fraktionen kaskadenartig angeordnet ist. D.h. in jedem Sortierschritt kann nur eine Fraktion aussortiert werden. Dies kann Sortieranlagen unflexibel und unwirtschaftlich für die Sortierung weiterer Fraktionen machen. Aufgrund dessen werden Fraktionen, die nur in geringem Umfang in der Aufgabe enthalten sind (z.B. technische Kunststoffe), nicht gesondert aussortiert, obwohl dies technisch möglich wäre. Beispielsweise sind die PET-Anteile in einem LVP-Gemisch qualitativ nicht vergleichbar mit der PET-Fraktion aus dem Pfandflaschensystem. Sogenanntes Misch-PET wird daher nur bedarfsweise aussortiert, falls ein Absatzmarkt für stark vermischte PET-Fraktionen vorhanden ist. Es ist festzuhalten, dass hohe Sortenreinheit und Rezyklatqualität technisch auch heute schon mit den bestehenden Verfahren erzielbar ist. Die Wirtschaftlichkeit bestimmt jedoch maßgeblich die Sortier- und Aufbereitungsverfahren und Qualität des Rezyklats.

Hemmnisse bei der Aufarbeitung und des Recyclings

Folgende Hemmnisse treten im Rahmen der Aufarbeitung und des Recyclings von Kunststoffen auf:

- Geruchsbelastung in Rezyklaten
Rezyklate aus Kunststoffabfällen können eine Geruchsbelastung beinhalten. Nach (Reitz, Alexander; GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, 2019) gibt es bereits Verfahren, die Gerüche um bis zu 80 Prozent reduzieren können. Die Kosten für diese Heißwasch-Verfahren sind ca. 30 Prozent höher als mit Kaltwaschverfahren, laut Aussage der Experteninterviews.

- Fehlsortierung durch Produktdesign
Hierzu zählen z.B. Verpackungen aus mehreren Materialien (z.B. nicht abgetrennte Aludeckel auf dem Kunststoffbehälter), mit großflächigen (Papier-)Etiketten (NIR-Detektion fehlerhaft), aus gerußten (schwarzen) Kunststoffen.
- Nicht-Erkennen des ehemaligen Füllgutes
Für die Inhalte der Verpackung ist keine Detektion möglich. Dies stellt ein Problem dar, sofern Kunststoffverpackungen mit Störstoffen befüllt sind (z.B. Silikonkartuschen) oder ein geschlossener Kreislauf mit besonders hohen Anforderungen angestrebt wird. So ist es beispielsweise technisch nicht möglich, zu unterscheiden, ob eine Verpackung im Food- oder im Non-Food-Bereich eingesetzt wurde. Folglich ist die Wiederverwertung von Verpackungen aus der gemischten LVP-Sammlung im Food-Bereich gemäß aktueller Rechtslage nicht möglich. Ein Einsatz in hochwertigen Non-Food-Anwendungen ist demgegenüber nicht ausgeschlossen.
- Detektion von Flammschutzmitteln
Im Verpackungsbereich von untergeordneter Bedeutung ist das Problem der Detektion von Flammschutzmitteln als Additive im Kunststoff. Flammschutzmittel unterliegen häufig der EU-POP-Verordnung und sind als Schadstoffe aus dem Kreislauf auszuschleusen.
- Detektion von Verbundmaterialien und Additiven
Nach dem aktuellen Stand der Technik können nur Stoffströme mechanisch voneinander getrennt werden, die unterschiedliche physikalische Eigenschaften (z.B. Reflexionsverhalten, Dichte) aufweisen. Dies ist bei Kunststoffen, die mit Hilfe eines Koextrusions-Verfahrens (Multilayer-Verpackungen) erstellt worden sind, nicht möglich. Diese werden im Recycling zu Störstoffen. Zur werkstofflichen Verwertung bedarf es anderweitiger Verfahren.

3.3. Wirtschaftliche Hemmnisse des Recyclings:

Die Experteninterviews zeigten, dass auf dem Markt für Kunststoffzyklus die Angebots- und Nachfrageseite (naturgemäß) zwei gegensätzliche Sichtweisen beschreiben. Es lässt sich feststellen, dass die Potenziale von Kunststoffzyklus i.S. der Kreislaufwirtschaft nicht ausgeschöpft werden.

Aussagen der Angebotsseite:

Recycling (RC)-Produkte würden am Markt nur selten nachgefragt werden. Bei gleicher Qualität werden Produkte aus Rohmaterialien bevorzugt. Hier wird ein Akzeptanzproblem vermutet, welches zumindest teilweise auf dem Mangel an Qualitätsstandards beruht.

- Schlechte Sortierung aufgrund zu hohen Durchsatzes: Beispielsweise wird aufgrund des wirtschaftlichen Drucks mit erhöhten Förderbandgeschwindigkeiten gearbeitet und die Bänder überbelegt, um die Anlagen mit möglichst hohen Durchsätzen auszulasten. Dieses Konzept geht jedoch zu Lasten der Produktqualität, so führen höhere Förderbandgeschwindigkeiten zu Minder- oder Fehlausträgen, letztlich also zu höheren Störstoffgehalten in den sortierten Fraktionen. Die Reduzierung des Durchsatzes von Sortieranlagen um ca. 1/3 könnte die Qualität der Sortierung (z.B. Trennung von Abfallströmen durch Ausblasen von Objekten) deutlich erhöhen. (Quelle: Experteninterview).
- Mengenschwelle für Fraktionen: Grundsätzlich können mittels der NIR-Technik auch weitere Kunststoffe neben den vier Standardpolymeren aus dem Sammelgemisch separiert werden. Aus wirtschaftlichen Gründen erfolgt eine Sortierung von Kunststoffsorten jedoch erst, wenn eine gewisse Mengenschwelle erreicht wird. Bei dem derzeitigen Sortierregime, das auf die genannten vier Standardpolymere (Massenkunststoffe) ausgerichtet ist, verbleiben diese Kunststoffsorten somit eher in der Mischkunststofffraktion oder im EBS-Vorprodukt. Bei einer Öffnung des LVP-Sammelsystems für die stoffgleichen Nichtverpackungen würden ferner Produktabfälle wie beispielsweise Spielwaren (z.B. ABS), CDs / DVDs (PC) und Abdeckungen für Schalter und Steckdosen (z.B. ABS, PA) miterfasst, wodurch diese Mengenschwelle möglicherweise erreicht werden kann.
- Fehlende Qualitätsstandards: Mit Ausnahme der Vorgaben für Verpackungsmaterialien mit Lebensmittelkontakt³ gibt es zum Einsatz von Rezyklaten zurzeit keine gesetzlichen Anforderungen oder Regularien. Da Rezyklate in direkter Konkurrenz zur Neuware stehen, erschweren die fehlenden Standards den Rezyklaten den Zugang zum Markt. Es erscheint deshalb auch die These sehr plausibel, dass Rezyklate oftmals nicht verwendet werden, da viele „Brand Owner“ die Migration von Additiven und Störstoffen in ihre Produkte vermeiden möchten, um evtl. Klagen oder Produkthaftungen vorzubeugen. Die Wirtschaft ist daher gefordert, hierzu eigene Standards zu entwickeln, diese gäbe es u.a. mit einem RAL-Gütezeichen. Regularien und Anforderungen des Staates können die Bestrebungen der Wirtschaft ergänzen und unterstützen.
- Steuerliche Anreize: Der Einsatz von RC-Material ist nahezu ausschließlich über den Preis gesteuert. Um die Verwendung von Rezyklaten zu stärken, könnte der Gesetzgeber Anreize (z.B. Berücksichtigung der CO₂-Bilanz des Produktes, Handel mit CO₂-Zertifikaten) schaffen, um eine Verschiebung der Gewichtung der Faktoren Preis, Qualität und Funktion i.S. einer nachhaltigen Ökologie und der Förderung des Umweltschutzes zu bewirken.

³ Siehe EFSA-Vorgaben: <https://www.efsa.europa.eu/de/topics/topic/plastics-and-plastic-recycling>

Aussagen der Nachfrageseite:

Gleichzeitig stellt aus Sicht der Nachfrageseite (z.B. Verpackungshersteller) die gesicherte Verfügbarkeit ausreichender Mengen an Rezyklat ein Hemmnis dar. Nach der Studie „Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen“ von der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (im Auftrag der Klimaschutzoffensive des Handels und des Handelsverbandes Deutschland - HDE - e.V.) liegt darin sogar das größte Hemmnis (Verpackungsmarktforschung, 2019, S. 14).

- Es ist zu beobachten, dass es seitens der Industrie / Wirtschaft Interesse gibt, Verpackungen entweder im Rahmen des Design-Prozesses bzgl. Recycling-Fähigkeit oder bereits bestehende Verpackungen zu verbessern. Beispielhaft wurde von der Firma Henkel ein entsprechendes Design-Tool erstellt und die Firma Interseroh bietet eine Analyse bestehender Verpackungen mit Verbesserungsvorschlägen an. Seitens großer Handelsketten gibt es bereits Richtlinien für Verpackungen, die sich bereits auf Packmittelhersteller auswirken.

Beide Sichtweisen können nicht pauschal betrachtet werden, sondern hängen von den Anforderungen des jeweiligen Produktes ab und damit von den erforderlichen Kunststoffsorten, Eigenschaften und Qualitäten.

3.4. Ableitung von Bewertungskriterien

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass

- Eine hochwertige Trennung von Kunststoffsorten in einigen Fällen technisch möglich ist, jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht erfolgt.
- In einigen Fällen die Grenzen der heute im Einsatz befindlichen Technik erreicht sind, da für die gestellten Sortierprobleme keine physikalischen Parameter zur Unterscheidung existieren oder die Unterschiede zu klein sind für eine praktische Umsetzung.
- Aus den Gesprächen mit Experten hat sich außerdem gezeigt, dass wirtschaftliche Hemmnisse einerseits nachfrageseitig durch fehlende Akzeptanz, andererseits angebotsseitig durch ungenügende Verfügbarkeit von Rezyklaten in den erforderlichen Qualitäten und Quantitäten sowie fehlende Qualitätszertifizierung bestehen.

Die zu betrachtenden Technologien sollten daher insbesondere dazu geeignet sein, die identifizierten Hemmnisse zu verringern bzw. zu beseitigen. Folgende Kriterien werden daher zur Bewertung herangezogen:

1. Überwindung technischer Grenzen
 - Geruchsbelastung in Rezyklaten
 - Fehlsortierung durch Produktdesign

- Fehlsortierung aufgrund Nicht-Erkennens des Füllgutes
 - Detektion von Flammenschutzmitteln
 - Detektion von Verbundmaterialien
 - Geringe Flexibilität der Anlagen
2. Überwindung wirtschaftlicher Hemmnisse
- Sortier- und Aufbereitungsaufwand (und damit den Rezyklat-Preis) senken
 - Akzeptanz steigern
 - Rezyklat-Verfügbarkeit steigern

4. Beschreibung und Bewertung der betrachteten Lösungsansätze

Im nachfolgenden Kapitel werden innovative technologische Lösungsansätze beschrieben und hinsichtlich des Potenzials zur Stärkung einer Kreislaufwirtschaft bewertet.

4.1. Beschreibung von technologischen Lösungsansätzen von maschinenlesbaren Kennzeichnungssystemen

4.1.1. Tracer Based Sorting (TBS), am Beispiel der Firma Polysecure

Beim Tracer-Based-Sorting (TBS) werden unterschiedliche Tracer in geringen Konzentrationen Materialien zugesetzt, die ansonsten nicht über ihre intrinsischen Eigenschaftsunterschiede zu trennen wären. Durch die fluoreszierenden Tracer, die schnell optisch differenziert werden können, kann ein definierbares, verlässliches und effizientes Sortierverfahren umgesetzt werden.

Die Tracer sind hochgeglühte anorganische Kristallpartikel, die chemisch sehr inert und weitgehend unlöslich sind. Sie verhalten sich daher vergleichbar mit Mineralien und ermöglichen so eine sehr gute Biokompatibilität. Die Partikelgröße liegt deutlich über 100nm. Somit sind die Partikel auch nicht lungengängig. Für eine Materialfamilie wurde als Additiv in Kunststoffen eine Zulassung für den Trinkwasserkontakt erzielt. Aktuell wird in Europa die Zulassung für Lebensmittelkontakt umgesetzt. Toxikologische Untersuchungen gaben keinerlei Hinweise auf eine toxikologische Wirkung der Tracer-Partikel.

Bei Kunststoffverpackungen können die Tracer auf zwei Arten aufgebracht bzw. in die Verpackungen integriert werden:

- Über die Druckfarbe oder das Etikett: Für die Tracer-Erkennung reichen 100 - 500 µg Tracer pro Verpackung, also rund 15 – 45 t Tracer pro Jahr für alle Verpackungen in Deutschland. Ferner genügt auf der Verpackung die Fläche eines Quadratzentimeters (z.B. die weiße Fläche rund um den EAN-Code). Die Tracer-Kosten betragen 15 – 50 Euro pro Tonne Verpackungsmaterial.

Sofern die Tracer auf dem Etikett aufgebracht sind, können sie im weiteren Aufbereitungsprozess nach der Sortierung mit diesen von der Verpackung abgelöst und entsorgt werden. Sind die Tracer mittels Druckfarbe auf dem Produkt aufgebracht, müsste im Aufbereitungsprozess zusätzlich ein Deinking-Prozess etabliert werden, um sie wieder entfernen zu können. Die Tracer könnten durch ihre hohe thermische und chemische Stabilität theoretisch auch wiedergewonnen werden. Die hierfür notwendigen Voraussetzungen sind Bestandteil von aktuellen Forschungsaktivitäten.

- Durch eine homogene Verteilung des Tracers in der Kunststoffmatrix verbleiben sie dauerhaft im Verpackungskunststoff und stehen für weitere Materialkreisläufe ohne Verlust zur Verfügung. Dadurch ergeben sich eine hohe Effizienz und geringe Tracer-Kosten. Ein großer Vorteil der homogenen Tracer-Verteilung ist, dass die Tracer neben der Artikel-Sortierung auch für die Flake-Sortierung genutzt werden können. Allerdings muss der Markt die Rezyklate dann immer wieder entsprechend ihrer Spezifikation in geschlossenen Kreisläufen einsetzen. Ein Einbringen der Rezyklate in andere als die ursprünglichen Anwendungen ist dann nicht möglich. Ansonsten käme es zu Verschleppungen der Tracer mitsamt den zu transportierenden Informationen in Anwendungen, die nicht das gleiche Eigenschaftsprofil aufweisen. Weiterhin könnte es zu Vermischungen der Marker kommen. Dies würde das eigentliche Sortierziel mittels Tracer ad absurdum führen.

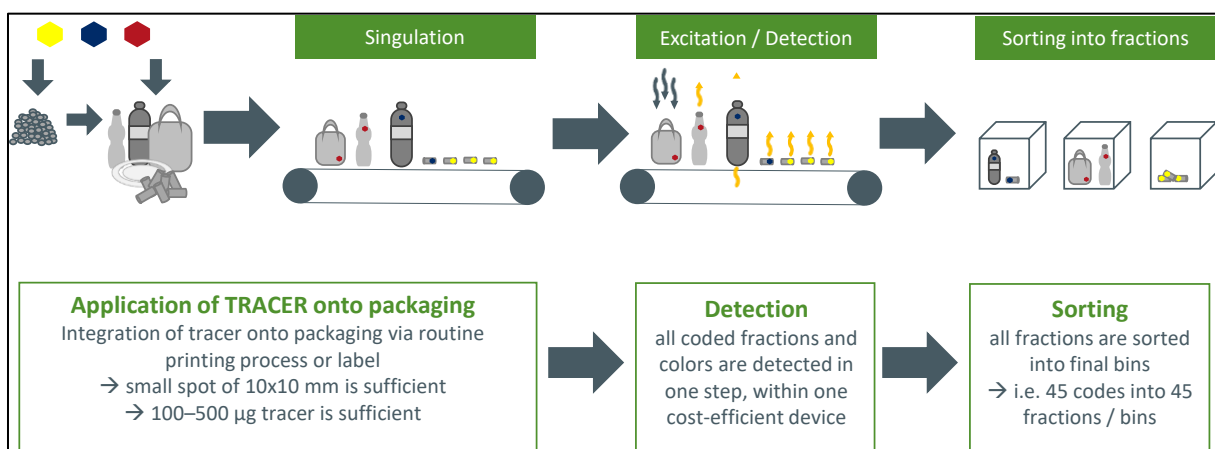


Abbildung 2: Verfahrensablauf TBS complete für Verpackungen

Was das eigentliche Sortierverfahren angeht, so verfolgt Polysecure zwei Ausführungen:

- **TBS „complete“:** Die Verpackungen werden gemäß ihren unterschiedlichen Spezifikationen durch die Tracer markiert. Es wird von 20 – 50 ausgegangen, bis zu 100 unterschiedliche Fraktionen sind möglich. Im Sortierzentrum wird nach der Abtrennung von Weißblech, Alu, sehr großen Folien und kleinen Partikeln die Kunststofffraktion erst vereinzelt und dann durch ein TBS Detektionsrohr geschickt. Im Detektionsrohr wird die Fraktion erkannt, indem der Tracer durch eine Laser-Optik zur Fluoreszenz angeregt wird. Die Fluoreszenz wird über Detektoren differenziert und die Sortierobjekte werden dementsprechend auf einen Fallklappensorter gegeben, der die Verpackungen nach einer zusätzlichen Bilderkennung und Farbmessung in die endgültigen, reinen spezifikations-gerechten Fraktionen ablegt. Durch die Vereinzelung vor der Detektion ist eine Aufteilung in eine Vielzahl von Fraktionen möglich.

Einer Kalkulation des Anbieters zufolge, belaufen sich die kompletten Sortierkosten von 200 Euro pro Tonne Durchsatz. Durch die hohe Qualität der Sortierung entfallen beim nachfolgenden Recycler einige Prozessschritte, so dass durch das TBS

hochwertige, spezifikationsgerechte Rezyklate unter 1.000 Euro pro Tonne angeboten werden können.

- TBS „light“: Das TBS-Verfahren wird bestmöglich an bestehenden Sortiermaschinen angepasst, insbesondere um innerhalb einer Sortierung nach dem Stand der Technik markierte Störstoffe wie Silikonkartuschen, Multilayer-Verpackungen, schwarze Packstoffe u.a. zu separieren. Eine weitere mögliche Anwendung ist die Nachsortierung bestimmter Fraktion und dabei das gezielte Abtrennen von ausreichend relevanten Untermengen einer bestimmten heutigen Fraktion.

Im Rahmen des Detektionsschrittes werden die von Polysecure und vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelten anorganischen Tracer durch Laser angeregt, worauf sie über einen Zwei-Photonen-Prozess im sichtbaren Bereich (VIS) emittieren. Nach Aussagen des Herstellers kann bisher kein anderes natürliches oder synthetisch erzeugtes Material optische Signale im visuellen Bereich erzeugen, wenn es lediglich durch eine Laser-Strahlung bestrahlt wird. Daher sind für die Detektion beim Polysecure-Verfahren nur die Fluoreszenzsignale der Tracer und keinerlei Rauschen vorhanden (dies wird mit dem Begriff Upconversion umschrieben). Hierdurch gibt es keine „Wechselwirkungen“ mit dem sich ständig ändernden Design der Verpackungen oder den unterschiedlichen Pigmenten. Darüber hinaus ist ein solcher Sortiercode robust gegenüber Staub, Schmutz, Deformation und Lage der Verpackungen.

Diese physikalische Effizienz übersetzt sich direkt in geringe Tracer-Mengen, zahlreiche gut differenzierbare Emissionsspektren bzw. Sortiercodes und ein robustes, verlässliches Sortierverfahren, das für alle Verpackungen, ob klein oder groß, gleichermaßen eingesetzt werden kann.

In einer ersten industriellen Anwendung zum Recycling von glasfaserverstärkten PVC-Fensterprofilen wurden Polysecure-Tracer in das glasfaserverstärkte PVC vor der Extrusion der Profile zugemischt, um eine Abtrennung des glasfaserverstärkten PVC von den nicht glasfaserverstärkten PVC-Profilen auf Basis von 2-8mm kleinen PVC-Partikeln zu erreichen.

Um die technischen Potenziale dieser Technologie erforschen zu können, wurde das Projekt „Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen“ („MaReK“) gestartet. Dieses Verbundprojekt startete am 01.07.2017 (Laufzeit bis zum 31.12.2019) und wird vom BMBF gefördert. Die Website lautet www.hs-pforzheim.de/marek.

Projektpartner sind das Institut für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim, die Firma Polysecure GmbH (Freiburg), die Firma Werner & Mertz GmbH (Mainz), der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Köln) und das Institut für Mikrostrukturtechnik des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT). Assoziierter Projektpartner ist ferner die Umwelttechnik BW GmbH (Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg).

Im Rahmen des Projektes fanden Stakeholder-Workshops statt, deren Teilergebnisse in den Bericht eingeflossen sind. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichtes lag der Abschlussbericht des Projektes „MaReK“ noch nicht vor.

Nach Aussagen von Polysecure sind große Brands, Verpackungshersteller, Entsorger konkret interessiert und arbeiten mit Polysecure an der Optimierung und pragmatischen Umsetzung des TBS-Verfahrens. Ebenso sind große Technologie-Unternehmen konkret interessiert, als strategische Investoren innerhalb eines Industriekonsortiums die TBS-Technologie global umzusetzen.

4.1.2. Digitales Wasserzeichen, am Beispiel des Projekts „HolyGrail“

Technischer Hintergrund ist die Ausnutzung unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften. So kann auf einer Verpackung ein flächendeckendes Wasserzeichen (Größe der Informationseinheit ca. 1 cm²) durch bewusst herbeigeführte Pixelanordnung aufgebracht bzw. aufgedruckt werden. Diese Pixelanordnungen sind für das menschliche Auge nicht sichtbar, können aber von Farbkameras wie sie u.a. auch in Smartphones enthalten sind erkannt und ausgelesen werden. Alternativ können Oberflächen auch mit einer Oberflächenstruktur versehen werden. Mit einem digitalen Wasserzeichen können Materialinformationen (Zusammensetzung, Materialeigenschaften, Hinweise für das Recycling oder eine Demontage) hinterlegt und ausgelesen werden. Auch ist eine Anbindung an entsprechende Datenbanken möglich (z.B. ECHA-Datenbank).

So können Verfahrensanweisungen zum Recycling sowie weitere wichtige Informationen (z.B. zur Zusammensetzung) hinterlegt werden. Da das digitale Wasserzeichen wiederholt im gesamten Oberflächenbereich vorhanden ist, ist eine Lageunabhängigkeit und Verschmutzungs- und Beschädigungstoleranz in der Abfallsortierung gegeben. Hier handelt es sich um eine Markierung, die durch den Rezyklierprozess gelöscht wird. Da die Markierung derzeit technisch bedingt eine Mindestfläche von 1 cm² benötigt, ist eine Sortierung von Flakes, die in der Regel kleiner sind, jedoch nicht möglich.

Aussagen von Marketing-Fachleuten zufolge, erschweren die GTIN / EAN-Codes das Design von Verpackungen. Dass diese Informationen in das digitale Wasserzeichen integriert werden könnten, erhöht die Akzeptanz der Technologie. Die GTIN /EAN-Informationen werden von „GS1“, einer Non-Profit-Organisation, verwaltet. Vierteljährig werden die Datenbanken aktualisiert.

Die Technologie kann mit relativ geringem Aufwand in die vorhandene Infrastruktur integriert werden. Im Rahmen des Sortierverfahrens werden zusätzlich Farbkameras zur Detektion des digitalen Wasserzeichens notwendig. Diese könnten die NIR-Sortiersysteme eventuell sogar ersetzen, die Kombination von Farbkameras und NIR ist jedoch wahrscheinlicher. Auch heutige NIR-Aggregate verfügen oftmals schon über Farbkameras.

Das digitale Wasserzeichen kann direkt auf die Verpackung, auf Etiketten oder Full-Sleeves gedruckt oder direkt in die Verpackung graviert werden. Gravuren von Kunststoffen sind aufgrund der statischen Information problematisch.

Das Projekt „Holy Grail 1.0“ wurde im Mai 2019 mit Abschlussbericht abgeschlossen. Ursprünglich wurde in diesem Projekt „Holy Grail 1.0“ auch der Einsatz von Tracern zur Sortierung von Kunststoffen untersucht. Ein Ergebnis dieser Untersuchung war, dass ein damit verbundener Zusatz von weiteren Additiven in Verpackungen von den beteiligten Firmen als kritisch angesehen wird. Hintergrund sind insbesondere die REACH-Regularien (Verordnung (EG) 1907/2006] zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) und die sich hieraus ergebenden Pflichten. Aus diesem Grund wurde dieses Teilprojekt nicht mehr weiterverfolgt. Im Nachfolgeprojekt „Holy Grail 2.0“ wird ausschließlich die Technologie des „Digitalen Wasserzeichens“ berücksichtigt, der Start soll im Frühjahr 2020 erfolgen.

Die offizielle Kommunikation sieht die Technologie bei TRL 3, allerdings wären die TRL-Stufen 4-5 bereits möglich. TRL (= Technology Readiness Level) ist ein internationaler Standard zur Bewertung von Innovationen.

4.1.3. Ergänzende Technologien, die nicht weiter betrachtet wurden

Im Rahmen der Expertengespräche, Fachveranstaltungen und den Ergebnissen der Umfrage konnten weitere Technologien zur Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffabfällen – mit unterschiedlichem Stand der Entwicklung – identifiziert werden:

- eine Detektion der Autofluoreszenz-Abklingzeit (Für eine generelle Übersicht kann beispielsweise <https://www.cup.lmu.de/oc/langhals/Recycling/index.html> herangezogen werden)
- Lösemittelbasierte Verfahren für Verbundkunststoffe
- Projekt KUBA⁴
- Eine stichwortartige Aufzählung weiterer technisch aber größtenteils noch unausgereifter Verfahren kann der Antwort auf Frage 6 der Umfrage im Anhang (S.34) entnommen werden.

⁴ Im Pilotvorhaben „KUBA“ soll erforscht werden, wie Kunststoffe aus der Bauwirtschaft in Kreisläufen genutzt und daraus Sekundärrohstoffe für neue Bauprodukte wiedergewonnen werden können. Ziel ist die Entwicklung eines Konzeptes zur nachhaltigen Kreislaufführung der Kunststoff-Bauprodukte. Das Forschungsprojekt, koordiniert von der Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie (Frankfurt), startete im Dezember 2018 mit einer Laufzeit von 18 Monaten und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

4.2. Bewertung

4.2.1. Überwindung technischer Grenzen

Die marker-basierte Kennzeichnung und Identifizierung von Kunststoffen kann eine Steigerung der Reinheit und Qualität von sortierten Kunststofffraktionen ermöglichen. Insbesondere Sortierprobleme, welche darin bestehen, dass keine physikalische Größe zur ausreichenden Unterscheidung der Materialien gegeben ist, kann eine Markierung den Sortierprozess unterstützen.

Das Ausschleusen von „Problem-Stoffen“, die das Recycling erschweren oder verhindern, mittels Markierung stellt eine Möglichkeit dar, die Qualität des Recyclingmaterials zu erhöhen („Negativ-Sortierung“). Als Praxisbeispiel kann das PVC-Altfensterrecycling herangezogen werden. Hierbei werden glasfaserverstärkten Teilen des Fensters ein Marker als Additiv zugesetzt, so dass diese auf Flake-Ebene aussortiert und vom übrigen PVC-Strom getrennt werden können.

- a. Geruchsbelastung in Rezyklaten
 - keine Verbesserung durch Markierung
- b. Fehlsortierung durch Produktdesign
 - Verpackungen aus mehreren Materialien (z.B. Joghurtbecher mit Alu-Deckel) können auch mit Markierstoffen nicht vollständig sortenrein getrennt werden, solange die Materialien miteinander verbunden sind (beide Materialien landen gemeinsam in einer Materialfraktion, ein Material geht dem Recycling verloren; z.B. Alu-Deckel landet in Kunststofffraktion). Jedoch wäre bei Verwendung eines Tracers und Detektion im Fallrohr eine eindeutige Zuordnung zur Fraktion des hauptsächlich verwendeten Materials möglich unabhängig von der Ausrichtung der Verpackung.
- c. Fehlsortierung aufgrund von Nicht-Erkennung des ehemaligen Füllgutes
 - Als ein möglicher Anwendungsbereich der Markierungstechnologien könnte die Trennung von PET-Verpackung aus dem Food-Bereich von PET-Verpackungen aus dem Non-Food-Bereich gesehen werden. Food-Verpackungen könnten so im Rahmen einer Positiv-Sortierung in einen „Closed-Loop“ überführt und die daraus resultierenden Rezyklate wieder bei der Herstellung von Verpackungen mit Lebensmittelkontakt eingesetzt werden. Nicht möglich ist jedoch nach wie vor, das Erkennen von verunreinigten Verpackungen (z.B. aufgrund nicht sachgemäßen Gebrauchs wie das Befüllen von PET-Getränkeflaschen mit Motoröl etc.).
 - Weitere anwendungsbezogene Kategorien mit unterschiedlichen strengen Hygieneanforderungen wären denkbar (Verpackungen nur für Lebensmittel, nur für Kosmetika, für sonstiges). Diese wären im Zusammenschluss von mehreren

Unternehmen zu definieren. Hierfür muss bei der Ausgestaltung des Verfahrens, darauf geachtet werden, dass eine Verschleppung der Markierung ausgeschlossen wird.

- Im Rahmen einer Negativ-Sortierung könnten mit Störstoffen befüllte Verpackungen (z.B. Silikonkartusche) vor dem Inverkehrbringen gekennzeichnet werden.

d. Detektion von Flammschutzmitteln / Detektion von Verbundmaterialien

- Im Rahmen einer Negativ-Sortierung könnten mit Flammschutzmitteln behandelte oder mit CFK/GFK-verstärkte Kunststoffe sowie Coextrudate und andere nicht recycelbare Verbünde vor dem Inverkehrbringen spezifisch gekennzeichnet und entweder aus dem Recyclingpfad ausgeschleust oder auch einem speziell angepassten Recyclingverfahren zugeführt werden.

Zu den genannten Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Negativ-Sortierung sind zwei Hindernisse anzumerken:

1. Der Inverkehrbringer selbst hat keinen Anreiz zur Markierung. Hier muss ggf. durch staatliche Regelung das Verursacherprinzip durchgesetzt werden.
2. Um sicherzustellen, dass alle Störstoffe vollständig entfernt würden, müssten alle mit Störstoffen behafteten Produkte gekennzeichnet werden, auch aus dem Ausland importierte oder vor Einführung der Markierung in den Markt gebrachte. Hier sind Einzelfall spezifische Lösungen zu erarbeiten⁵.

e. Flexibilität der Anlagen:

- Mit dem aktuellen Stand der Forschungen können mit TBS 40-50 Merkmale bzw. Codes ausgeprägt werden, theoretisch wären auch bis zu 100 verschiedene Merkmale möglich. Mit dem digitalen Wasserzeichen können unbegrenzt viele Codes erstellt werden. Dies würde eine Vielzahl von Fraktionen im Sortierprozess ermöglichen. Diese könnten eindeutig in definierte Fraktionen getrennt werden.
- Im Rahmen der Forschungsarbeiten zu den hier beschriebenen Markierungstechnologien ist bei der TBS-Technologie eine Vereinzelung der zur sortierenden Stoffströme vorgesehen (s. Kap.4.1). Diese kann theoretisch auch bei anderweitigen Markierungstechniken verwendet werden. Eine der Detektion vorgeschaltete Vereinzelung verhindert eine Fehldetektion durch eine Überlagerung des Sortiergutes. Nach der Detektion wird zur Beförderung der getrennten Abfälle ein Fallklappensorter eingesetzt, der die Sortierung in eine beliebige Anzahl von Fraktionen nach nur einem Detektionsschritt ermöglicht. Dies eröffnet die Möglichkeit kurzfristig und flexibel Zielfraktionen hinzuzufügen und abzuändern.

⁵ Abweichungen wären möglich, sofern die Kennzeichnungsverfahren additiv zu den etablierten Verfahren eingeführt werden und im Falle einer Nichtkennzeichnung eine Sortierung nach bisherigem System erfolgen kann.

- Generell ist festzuhalten, dass bestehende Anlagen nur bedingt zusätzliche Platzkapazitäten für die Ausweitung der Sortierfraktionen haben. Daher wird ein genaues Abwägen notwendig sein, welche weiteren Sortierkriterien für die qualitative Verbesserung des Recyclings wesentlich und sinnvoll und letztlich auch wirtschaftlich darstellbar sind. Weiterhin wäre bei einer Anpassung/Umstellung des etablierten Systems zu überlegen, an welcher Stelle im Prozess dies am besten erfolgen sollte (in der Sortieranlage oder erst im Recyclingbetrieb).

Der grundsätzliche Vorteil eines der Kunststoffmatrix zugesetzten Markers ist es, dass dieser auch nach einer Zerkleinerung des Materials auf Flake-Ebene sortiert werden könnte. Weiterhin könnte der Gefahr des Verlustes der Markierung etwa durch Etikettenverlust vorgebeugt werden.

4.2.2. Überwindung wirtschaftlicher Hemmnisse

- f. Zusätzliche Kosten für Inverkehrbringer der Kunststoffverpackung bzw. -produkte:
- Die Mehrkosten wie auch möglicher Zusatznutzen einer Markierung sind sehr schwer abzuschätzen
 - Bei einer TBS müssten die Markierstoffe gekauft und zugesetzt werden
 - Beim digitalen Wasserzeichen ist lediglich eine Anpassung des Druckbildes auf dem Produkt oder dem Etikett vorzunehmen. Ggf. kann der obligatorische Barcode ersetzt werden, was einen Zusatznutzen beim graphischen Design darstellen würde.
 - Ein Zusatznutzen der Anwendung von Kennzeichnungssystemen bestünde möglicherweise in der Möglichkeit zum Product-Tracing (z.B. Product-ID / Fingerabdruck). Durch eine geeignete Markierung könnte der Status von Produkten während des gesamten Lebenszyklus nachvollzogen werden. Beispielsweise wäre es möglich, seitens des Verbrauchers beim Kauf Informationen aus der Produktion abzurufen. Dies wird insbesondere bei Chargenproduktionen und wechselnden Materialzusammensetzungen von Produkten als sinnvoll angesehen. Auch könnten Verbraucher über die Informationen der Verpackung weiterführende Informationen erhalten und (personalisierte) Produkte manipulationssicher hergestellt werden (z.B. Medizinbereich). Die fluoreszierenden Partikel, die Polysecure für das TBS einsetzt, erzeugen in Kunststoffen ein zufälliges, für jedes Objekt individuelles Muster, das gleichzeitig zur TBS-Funktion als eine solche Product-ID genutzt werden kann. Sie wäre im Gegensatz zu Etiketten oder Bedruckungen lebenslang und robust im Produkt verankert und kaum manipulierbar.
 - Ferner wäre bei ausreichender Anzahl von Codes eine produktspezifische Sortierung möglich, wodurch insbesondere große Inverkehrbringer oder Gruppen von Inverkehrbringern ihre spezifischen Verpackungen zurückbekommen könnten, damit sie diese mit wenigen Aufbereitungsschritten wiederverwenden könnten. Eine Markierung könnte somit Anreize für eine hochwertige Mehrweg-Verpackung setzen, die ggf. nicht recycelt, sondern wiederverwendet werden kann.

- Eine produkt- oder markenspezifische Markierung lohnt sich ggf. erst, wenn die nötige Sortiertechnik eine ausreichende Verbreitung erreicht hat. Es besteht somit eine Abhängigkeit von den Sortieranlagen. Dies gilt auch umgekehrt, denn nur wenn alle Marktteilnehmer entsprechend kennzeichnen, kann die Sortierung sinnvoll umgesetzt werden.

g. Investitionsbedarf bei Sortieranlagen

- Ein Teil der bereits vorhandenen Infrastruktur (Gebindeöffnung, Magnet- und Wirbelstromscheider, Aggregate zur Vereinzelung der Abfallteile, usw.) könnte weiterverwendet werden. Die NIR-Sensoren wären entweder vollständig verzichtbar oder müssten ggf. aufgerüstet werden (durch Farbkameras im Falle digitaler Wasserzeichen). Bei zusätzlichen Sortierfraktionen wären dementsprechend auch zusätzliche NIR-Aggregate bzw. Farbkameras nötig.
- Die Anlagentechnik zur Detektion der Markierungen ist relativ günstig (Kameratechnik für Wasserzeichen, Laser für TBS), weiterhin ist die entsprechende Software zur Verarbeitung der Informationen nötig (Anbindung an Datenbank zur Identifikation der Codes). Im Fall des TBS-Systems ist in eine geeignete Fördertechnik zur Vereinzelung des Sortiergutes zu investieren (Detektions-Fallrohr und Sortierbandtechnik mit Einzel-Ablage der detektierten Abfallteile und spezifischer Zuführung zu den verschiedenen Sortierfraktionen, sog. „Split Tray Sorter“).
- Sortieranlagen könnten durch die höhere Flexibilität Ziel-Fraktionen hinzufügen oder entfernen, je nach Zusammensetzung des Aufgabegutes. Auch die Aussortierung kleiner Fraktionen könnte dadurch wirtschaftlich werden.
- Durch die bessere Qualität, welche durch eine Markierung erreicht werden könnte, sind höhere Preise am Markt zu erzielen. Die Akzeptanz für Recyclingkunststoffe könnte steigen.
- Die Qualitätssteigerung kann erst erreicht werden, wenn ein hinreichendes Volumen des Sortiergutes tatsächlich gekennzeichnet ist. Es besteht somit eine Abhängigkeit der Investitionsentscheidung von den Inverkehrbringern.

4.2.3. Fazit

Durch eine Markierung und entsprechende Sortierung kann die Qualität von Rezyklaten verbessert werden. Sowohl das Schließen von Produkt-Kreisläufen durch Positiv-Markierung als auch das Ausschleusen von Stör- und Schadstoffen durch Negativ-Markierung ist denkbar. Jedoch sind auch hier Grenzen gegeben.

Für eine Positiv-Sortierung spricht die Technologie des digitalen Wasserzeichens, da hier eine unbegrenzte Anzahl an Codes zur Verfügung steht und die Markierung im Zuge der Aufbereitung wieder entfernt wird, eine Verschleppung des Markers in neue/andere

Anwendungen also ausgeschlossen ist. Auch bei der Verwendung von Tracern auf dem Etikett ist eine Entfernung der Markierung durch die Aufbereitungsprozesse gegeben, allerdings müssen bei jeder Kennzeichnung neue Marker eingesetzt werden, was einen erhöhten Rohstoffbedarf mit sich bringt. Um bei der Negativ-Sortierung sicherzustellen, dass auch beschädigte Produkte/Verpackungen bzw. Verpackungen, bei denen die Gefahr einer Ablösung des (markierten) Etiketts besteht, detektiert werden können, erscheint eine Markierung über die Integration des Tracers in die Kunststoffmatrix geeigneter.

Trotz alledem und unverzichtbar ist den maschinenlesbaren Markierungstechnologien jedoch Abfallvermeidung und ein recyclinggerechtes Produktdesign unter Berücksichtigung des Standes der Technik voranzustellen. Maschinenlesbare Markierungssysteme können das Recycling nur unterstützen.

Eine ökologische und ökonomische Bewertung der maschinenlesbaren Markierungstechnologien ist aufgrund fehlender Informationen nicht erfolgt, wäre jedoch Bestandteil einer umfassenden Prüfung.

Zur Umsetzung eines markerbasierten Recyclings wären Investitionen sowohl seitens der Inverkehrbringer (Markierung der Güter) als auch seitens der Sortierer oder ggf. der Recycler (Installation der neuen Sortiertechnik) notwendig. Da hier eine gegenseitige Abhängigkeit besteht, wäre eine koordinierte Abstimmung und letztlich eine Festlegung auf gemeinsame Kriterien und Standards (für Sortierkriterien und Verfahren zur Kennzeichnung und Auslesung) notwendig.

5. Erkenntnisse und offene Fragen

Kennzeichnungssysteme können dazu beitragen, die Sortierqualität von Kunststoffabfällen bei Verpackungen im Consumerbereich zu erhöhen und somit das Recycling von Kunststoffabfällen qualitativ (hochwertiges Recycling) und quantitativ (Erhöhung der Recyclingquoten) zu verbessern. Dadurch können die bestehenden Sortierverfahren ergänzt werden.

Die technologische Entwicklung im Bereich der Kennzeichnung von Kunststoffen schreitet aktuell schnell voran. Die Marktsituation in der Verpackungsbranche ist derzeit durch eine hohe Dynamik und Innovationsbereitschaft gekennzeichnet. Unternehmensnetzwerke aus Inverkehrbringern, Händlern und Entsorgern haben sich gebildet, um explizit die Kreislaufwirtschaft im Verpackungsbereich voranzutreiben. Zur Umsetzung eines markerbasierten Recyclings sind Investitionen sowohl seitens der Inverkehrbringer (Markierung der Güter) als auch seitens der Sortierer und ggf. der Recycler (Installation der neuen Sortiertechnik) notwendig. Eine koordinierte Abstimmung sowie eine Festlegung auf gemeinsame Kriterien und Standards (für Sortierkriterien und Verfahren zur Kennzeichnung und Auslesung) wären sinnvoll.

Seitens des Staates besteht ein Interesse an einer Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft im Verpackungsbereich, um folgende Risiken zu vermeiden bzw. Chancen zu nutzen:

- Neben der Einhaltung abfallrechtlicher Verpflichtungen trägt eine funktionierende Kreislaufwirtschaft maßgeblich zum Ressourcen- und Klimaschutz bei.
- Maschinenlesbare Kennzeichnungssystemen für Kunststoffabfälle können unter bestimmten Umständen für eine Lenkung von Stoffströmen im Sinne der Kreislaufwirtschaft genutzt werden.
- Die Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Stoffkreislauf (z.B. POPs) kann durch eine Kennzeichnungspflicht mit anschließender Negativsortierung unterstützt werden ohne die stoffliche Verwertung unbelasteter Kunststoffe zu behindern.
- Die Sortiercodes könnten Bestandteil einer Lizenzierung sein, wodurch Trittbrettfahrer, die keine Lizenz bezahlen und entsprechend keine Markierung haben, im Sortierprozess automatisch erkannt werden.
- Zur erfolgreichen Etablierung eines Kennzeichnungssystems wäre eine koordinierte Abstimmung und Festlegung auf gemeinsame Kriterien und Standards (für Sortierkriterien und Verfahren zur Kennzeichnung und Auslesung) notwendig, ggf. sind ordnungsrechtliche Vorgaben erforderlich. Sofern eine Kennzeichnung nicht additiv zu bestehenden Verfahren genutzt werden soll, sondern als alleiniges Sortierkriterium, setzt dies eine Umsetzung der Anforderungen durch alle beteiligten Akteure voraus.

Offene Fragen

In welcher Form Kennzeichnungssysteme eingeführt werden können, konnte nicht geklärt werden, da zu viele Faktoren den Erfolg beeinflussen. Es gibt unterschiedliche Kennzeichnungstechnologien, eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten auf unterschiedlichen Ebenen (z.B. Kunststoffsortenspezifische oder Brand-Owner-spezifische Markierung), sowie die Option der Positiv- oder Negativ-Sortierung.

Die grundlegende Frage, ob eine aktive Begleitung der Industrie bei der Einführung von Kennzeichnungstechnologien notwendig ist, konnte im ad-hoc-Ausschuss zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt werden.

Neben der Einführung des Kennzeichnungssystems mit einer möglichst zentralen Verwaltung der Markierungscodes wären Investitionen in die Infrastruktur der Entsorgungsbranche notwendig, um ein funktionsfähiges System aufzubauen. Hier besteht ein Allokationsproblem zwischen Kosten und Nutzen der Einführung.

Insbesondere bei einer Negativ-Sortierung hätten die, die kennzeichnen müssten, keinen Vorteil von der Kennzeichnung. Anlass für eine solche Kennzeichnungspflicht könnte beispielsweise das Ausschleusen von Störstoffen oder Schadstoffen (z.B. POPs, CFK) in Form einer „Negativ-Sortierung“ sein.

Innovative Sortierverfahren sollten die bestehende Infrastruktur berücksichtigen. In Deutschland besteht eine große und flächendeckende Infrastruktur, daher wären Kennzeichnungssysteme in einem ersten Schritt als Zusatztechnologie für bestehende Sortieranlagen denkbar.

Kunststoffe werden weltweit hergestellt und verarbeitet. Aufgrund des globalen Handels fallen in Deutschland auch importierte hergestellte Kunststoffe/Kunststoffprodukte als Abfall an. Die mit einer Markierung verbundene Zielstellung könnte nur dann vollständig realisiert werden, wenn importierte Produkte ebenfalls eine Kennzeichnung aufweisen würden. Regelungen auf nationaler Ebene zur Kennzeichnung von Kunststoffen würden daher keine international übertragbare Lösung für eine bessere Sortierung von Kunststoffabfällen herbeiführen. Es wäre wünschenswert, Standards auf europäischer (ideal: weltweiter) Ebene zu etablieren, die für alle Kunststoffhersteller/-verarbeiter gelten.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Umwelt, N. u. (22. Mai 2019). *Höhere Recyclingquoten für EU*. Von Höhere Recyclingquoten für EU: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/hoehere-recyclingquoten-fuer-eu/> abgerufen

Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH. (2016). *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015*. BKV GmbH.

Conversio Market & Strategy GmbH. (2018). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017*. BKV GmbH.

Probst, Thomas; Bundesverband für Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse). (August 2019). Mischkunststoffe: Raus aus der Schmutzdecke. *UmweltMagazin*, S. 2.

Reitz, Alexander; GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH. (9 2019). Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen. *Müll und Abfall*, S. 4.

Verpackungsmarktforschung, G. f. (März 2019). Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen. Mainz.

(2019). *VinylPlus Progress Report 2019*. Brüssel: <https://vinylplus.eu/>.

Wilts, H., von Gries, N., Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Buschow, N., & Sanden, P. (2016). *Texte 65/2016: Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und nukleare Sicherheit.

Anhang I: Mitglieder des ad-hoc-Ausschusses

Der Vorsitz der Arbeitsgruppe wurde gemäß Beschluss der 91.ATA-Sitzung TOP 3.12 „Einrichtung eines Ad-hoc-Ausschusses „Kennzeichnung / Identifizierung von Kunststoffen“ (Vollzug 89. UMK, TOP 36)“ dem Land Rheinland-Pfalz übertragen.

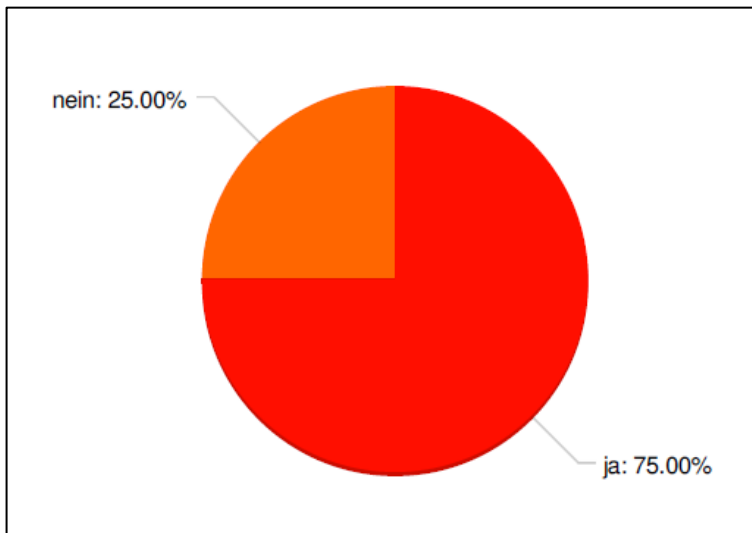
An der Arbeitsgruppe beteiligt waren Vertreter des Landes Bayern sowie vom Umweltbundesamt.

Land	Ansprechpartner
Bund	
Bayern	
Baden-Württemberg	
Rheinland-Pfalz	Herr Kurt-Christian Adenau Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten kurt-christian.adenau@mueef.rlp.de Tel.: 06131/16-4448
	Frau Dr. Rebecca Ilsen (ab 01/2019) Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten rebecca.ilsen@mueef.rlp.de Tel.: 06131/16-2378
	Herr Hans-Walter Schneichel (ab 12/2018) Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten hans-walter.schneichel@mueef.rlp.de Tel.: 06131/16-2233

Anhang II: Umfrage des ATA-ad hoc-Ausschusses

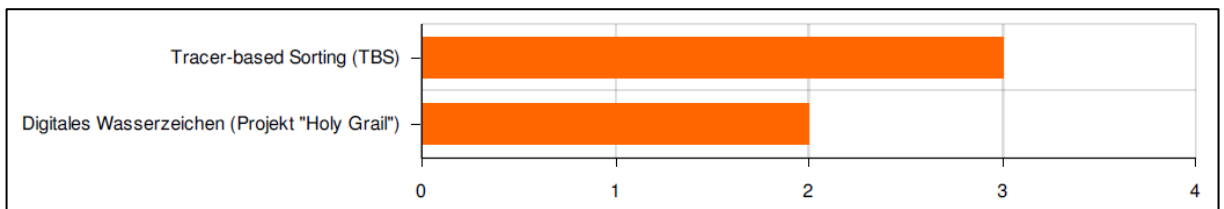
1. Haben Sie bereits Kenntnisse zu den Technologien „Tracer-based Sorting“ (TBS) oder „Digitales Wasserzeichen“?

Anzahl Teilnehmer: 4



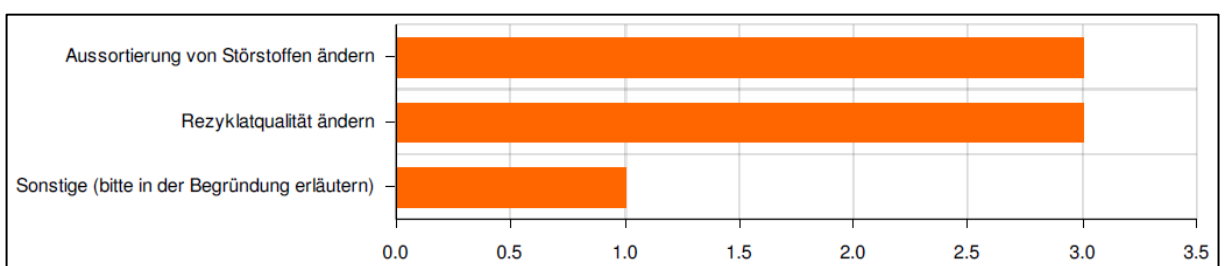
Mit welcher Technologie haben Sie bereits Erfahrungen?

Anzahl Teilnehmer: 3



2. Was sind aus Ihrer Sicht die maßgeblichen verfahrenstechnischen/stofflichen Probleme im Bereich der Kunststoffaufbereitung insb. der Sortierung?

Anzahl Teilnehmer: 4



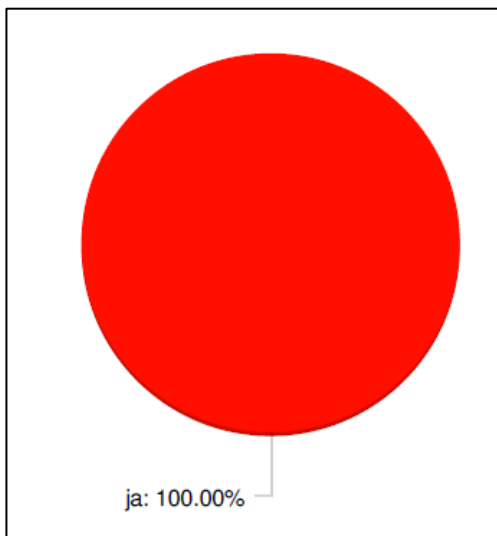
Begründung zur zweiten Frage:

Anzahl Teilnehmer: 3

- Hochwertiges Recycling-Material muss erheblich mehr als 95 Prozent rein sein.
- Derzeit kann in den haushaltsnahen Wertstoffsammlungen nicht zwischen lebensmitteltauglichen und anderen Qualitäten unterschieden werden. Ein Rezyklat aus dieser Quelle geht daher wegen der gesetzlichen Bestimmungen immer nur in den "non-Food"-Bereich, und stellt praktisch ein Downcycling dar.
- Die Infrarot-Erkennung der Kunststoffart kann durch großflächige Etikettierung oder Mehrschicht-Verbunde fehlerhaft sein. Zudem kann es von Bedeutung sein, das Füllgut der Verpackungen zu kennen: Zum einen ist es notwendig, Silikonkartuschen zuverlässig auszusortieren (Silikon ist im Recycling eine unerwünschte Kontamination). Zum anderen muss für besonders hochwertige Aufbereitungsverfahren, insbesondere für Lebensmittelkontaktanwendungen, bekannt sein, welches Füllgut die Verpackung hatte. Insbesondere muss zwischen Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen unterschieden werden.

3. Würde aus Ihrer Sicht eine Kennzeichnung von Kunststoffen dazu beitragen, die unter 2. dargestellten Probleme zu lösen?

Anzahl Teilnehmer: 4



Begründung zur dritten Frage:

Anzahl Teilnehmer: 4

- Effiziente Kennzeichnung erhöht die Sortier-Sicherheit.
- Eine Durchgängige Markierung von Food-Grades gegenüber Non-Food qualifiziert Verpackungen aus dem Gelben Sack zu einer Kreislaufführung. Eine Verpackung kann wieder eine Verpackung werden. So kann erstmals ein lebensmitteltaugliches Rezyklat aus dem Gelben Sack gewonnen werden.

- Bei der Vielfalt der vorliegenden Kunststoffe inklusiver Additivierungen, etc. führt eine genaue Kennzeichnung dazu, dass Sekundärkunststoffe für spezifische und hochqualitative Anwendungen besser wiederaufbereitet werden können.
- Eine Kennzeichnung des Kunststoffabfalls könnte die Treffsicherheit der bislang auf Infrarot-Detektion basierenden Sortierung verbessern und somit dazu beitragen, die Ausbeuten und die Qualitäten im werkstofflichen Recycling zu verbessern. Außerdem könnte die Kennzeichnung Informationen über das Füllgut (Lebensmittel / Nicht-Lebensmittel) miteinschließen.

4. Für welche Produkte oder Stoffgruppen wäre die Anwendung von Kennzeichnungssystemen sinnvoll, z.B. zur Herstellung von Closed-Loop-Kreisläufen? *

Anzahl Teilnehmer: 4

- Massenkunststoffe für Verpackungen, insbesondere PE, PP, PS und PET.
- siehe Frage 3
- Für alle Produkte!
- Insbesondere für alle bei den Dualen Systemen beteiligungspflichtigen Haushaltsverpackungen. Darüber hinaus evtl. auch bei den pfandpflichtigen Getränkeverpackungen sowie bei Industrieverpackungen.

5. Wie schätzen Sie die Anwendbarkeit (Vorteile, Nachteile, Nutzen, Grenzen) von Kennzeichnungssystemen ein?

Anzahl Teilnehmer: 4

Vorteile und Nutzen sind für Recycling-Zwecke hoch: Nachteile entstehen durch zusätzlich Prozess-Schritte und Einbringen von Fremdstoffen. Grenzen sind durch Abbau gegeben.

Um die Recycling-Quoten des VerpackG zu erreichen muss dringend lebensmitteltaugliches Verpackungsmaterial gekennzeichnet werden, um mit diesem Material ein hochwertiges Recycling auf Anwendungsebene zu erreichen. Aus unserer Sicht muss diese Kennzeichnung über eine Regulierung definiert werden, damit die notwendigen Investitionen auch tatsächlich getätigt werden.

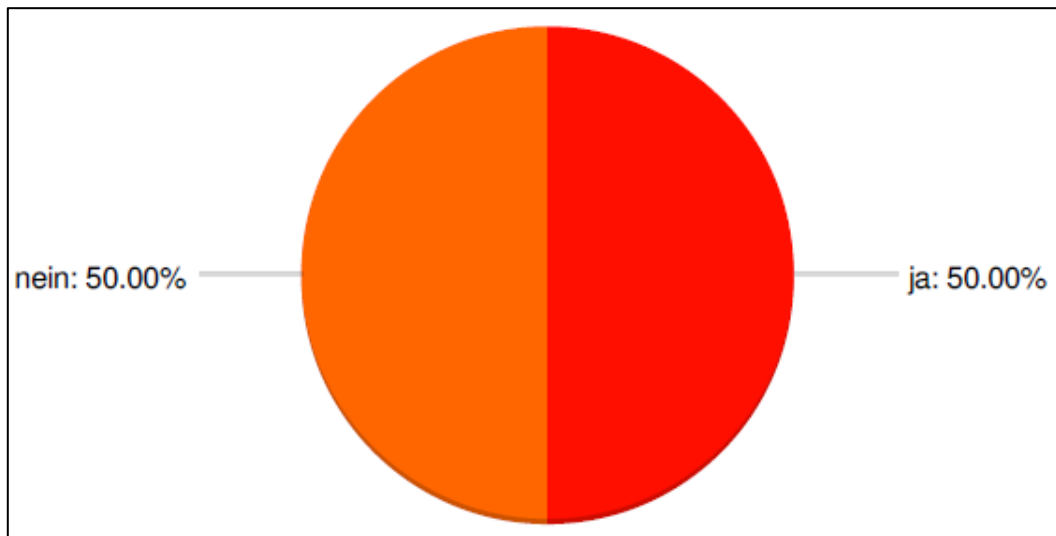
Sehr gut, die Lieferketten sind überschaubar, die Daten müssen nur konsequent erfasst und weitergegeben werden

Die Investitionskosten für die Industrie sind mir nicht bekannt. Nach meinem Kenntnisstand hat der Handel ein weiteres Interesse an der Einführung von digitalen Wasserzeichen, da sie eine schnellere Abfertigung an der Supermarktkasse erlauben. Die Codierung mit Informationen zum Recycling der Verpackung wäre aus dieser Sicht ein Zusatznutzen und nicht der treibende Grund für die Einführung der Technologie.

Die Ausrüstung der Sortieranlagen mit einer Kamera, die digitale Wasserzeichen lesen können, wäre nach meinen Marktinformationen ein überschaubarer Invest. Bei stofflichen Markern ist es wichtig, dass diese im Recyclingprozess entfernt/zerstört werden und nicht zu einer Kontamination des Rezyklats führen.

6. Kennen Sie weitere neue technologische Ansätze / Konzepte und Projekte, die aus Ihrer Sicht zukünftig für das Kunststoffrecycling relevant sind (z.B. aus anderen Staaten oder Branchen)?

Anzahl Teilnehmer: 4



Bitte benennen und beschreiben Sie die neuen technologischen Ansätze / Konzepte und Projekte und erläutern Sie ebenfalls, für welche Stoffströme, Produkte und Stoffe diese aus Ihrer Sicht geeignet wären:

Anzahl Teilnehmer: 2

- Neue Möglichkeiten sind durch die Detektion der Autofluoreszenz-Abklingzeit von technischen Kunststoffen gegeben, die eine Markierung überflüssig machen: <https://www.cup.lmu.de/oc/langhals/Recycling/TauForPlastics.html>. Eine unsichtbare Markierung kann mit Fluoreszenzfarbstoffen erfolgen, bei denen fluoreszierende Nanopartikel von besonderem Vorteil sind: http://www.ijestr.org/IJESTR_Vol.%201,%20No.%207,%20July%202013/Binary%20Fluorescence.pdf. Für eine generelle Übersicht siehe: <https://www.cup.lmu.de/oc/langhals/Recycling/index.html>.
- Zu den vielfältigen, technisch aber größtenteils noch unausgereiften Verfahren, die derzeit in der Industrie erprobt werden, zählen:
 - Thermochemische Recyclingverfahren für gemischte / verschmutzte kunststoffreiche Abfälle (derzeit von verschiedenen Kunststoffherstellern in Erprobung)

- Lösungsmittelbasierte Verfahren für Verbundfolien (z.B. Verfahren der Firma APK für PE/PA-Verbundfolien, derzeit in Erprobung mit Post-Industrial-Abfällen)
- Verschiedene polymerspezifische Aufbereitungsverfahren, z.B. für PS/EPS-Abfälle
- Projekte zur Herstellung von Lebensmittelkontaktmaterialien aus PE und PP durch werkstoffliches Recycling von Gelbe-Sack-Abfällen (Projekt von DSD in Planung)
- IK-Projekt zum werkstofflichen Recycling von PET-Schalen aus dem Gelben Sack zu Lebensmittelkontaktmaterial