

Steigerung der Qualität und Effizienz der Kunststoffsortierung mit Sort4Circle® und Tracer-Based-Sorting

Eine gemeinsame Machbarkeitsstudie der Hyundai Motor Group, Polysecure GmbH und dem Kunststoff-Zentrum (SKZ)

Die Reduzierung von Abfall und die Erhaltung von Ressourcen durch die Einrichtung eines echten „Close-Loop“ für Kunststoffe ist eine der heutigen großen Herausforderungen. Regulatorische Bemühungen, wie die europäische Altfahrzeugverordnung, sind darauf ausgerichtet, die Recyclingquoten und den Anteil recycelter Kunststoffe in neuen Produkten zu erhöhen. Ein Erreichen dieser Ziele wird nur möglich sein, wenn die Kunststoffrezyklate eine vergleichbare Qualität wie Neumaterialien aufweisen. Es besteht allgemein Konsens darüber, dass dies nur machbar ist, wenn die mechanischen Recyclingprozesse mit hochreinen und definierten Materialfraktionen gespeist werden. In einer Machbarkeitsstudie der Hyundai Motor Group, Polysecure und dem SKZ wurde eine neue Sortiertechnologie untersucht, deren Ergebnisse darauf hindeuten, dass es bereits Lösungen für eine zuverlässige Kunststoffsortierung gibt, um hochwertige Rezyklate zu produzieren.

Einer der größten Herausforderungen unserer Zeit ist die Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks, um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken, was die Reduzierung von Abfall und die Bewahrung von Ressourcen beinhaltet. Seit 1950 ist die weltweite Kunststoffproduktion von 2 Millionen Tonnen auf über 400 Millionen Tonnen gestiegen und soll sich bis 2050 verdoppeln oder verdreifachen. Dieses Wachstum hat zu einem „Take-Make-Waste“-Verhalten geführt, das zu erheblicher Ressourcenverschwendung und Umweltbelastung führt. Etwa 60% aller produzierten Kunststoffe verbleiben in der Umwelt, und die aktuelle Kunststoffproduktion und -entsorgung tragen etwa 4,5% zu den globalen Treibhausgasemissionen bei. Um dem entgegenzuwirken, ist die Einführung einer Kreislaufwirtschaft, in der Ressourcen wiederverwendet werden, entscheidend für den Klimaschutz und die Nachhaltigkeit.

Um entsprechende Entwicklungen voranzutreiben, spielt die Gesetzgebung eine entscheidende Rolle. So zielt die Europäische Kommission in ihrem Vorschlag über die

Kreislaufanforderungen für das Fahrzeugdesign und das Management von Altfahrzeugen darauf ab, dass 25 Prozent des in der Herstellung eines neuen Fahrzeugs verwendeten Kunststoffes recycelt sein müssen, und 25 Prozent dieses Recyclingmaterials aus Altfahrzeugen stammen muss.

Damit diese Ziele erreicht werden, ist eine Kombination von Maßnahmen erforderlich, darunter das Design for Recycling, die Standardisierung von Kunststoffarten, die Organisation umfassender Rücknahme- und getrennter Sammelsysteme und die Verbesserung des Informationsflusses zwischen allen Akteuren. Ein entscheidender Aspekt ist die Verbesserung der Sortierung von Kunststoffen. Durch eine erhebliche Steigerung der Sortierleistung und eine präzisere Sortierung in mehr bzw. definierte Materialfraktionen kann mehr Kunststoff auf CO₂-effiziente Weise recycelt werden. Dieses Prinzip steht hinter der Entwicklung der innovativen Sort4Circle®-Technologie, die eine neue Ära der hochwertigen Sortierung und des Recyclings einleiten soll.

Das Funktionsprinzip der Sort4Circle® and Tracer-Based-Sorting Technologien

Im Vergleich zu den derzeitigen Sortierverfahren für Kunststoffabfälle stellt Sort4Circle® einen neuartigen Ansatz sowohl für die Materialhandhabung als auch für die Erkennung dar, in welchem alle Objekte in einem Schritt vereinzelt, identifiziert und sortiert werden. Zusätzlich kann die von Polysecure entwickelte und patentierte Tracer-Based-Sorting (TBS) Methode eingesetzt werden. Bei dieser Methode werden sehr geringe Mengen fluoreszierender Additive (Tracer) auf oder in Objekten angebracht bzw. integriert, die bei geeigneter Anregung mit spezifischen Emissionslinien fluoreszieren. Diese Tracer können in vordefinierten Verhältnissen gemischt werden, wodurch Fluoreszenzcodes entstehen, die als hocheffiziente und zuverlässige Sortiercodes verwendet werden können (z.B. Code 10 enthält Tracer 1: 20%, Tracer 2: 60%, Tracer 3: 20%). Mit diesem Sortiercodesystem lassen sich Kunststoffabfälle genauer in definierte Kategorien einteilen (z.B. PA6 vs. PA6.6 vs. PA12).

Zielsetzung und Aufbau der Studie

Das Ziel dieser Machbarkeitsstudie war es, die Leistung der Tracer- und Sortiertechnologien zu demonstrieren und zu bewerten. Die Ergebnisse wurden durch verschiedene Tests und Messungen verifiziert. Die Studie ermittelte die statistischen Kennzahlen der Tracererkennung und bewertete den Einfluss der Marker auf die technischen Eigenschaften von Komponenten aus Neumaterial und 100% Rezyklaten, die aus Komponenten mit Tracern stammen.

Die in dieser Studie verwendeten Materialien, PP und PA6, wurden von der Hyundai Motor Group zur Verfügung gestellt, welche von Polysecure zu Disken und Zugstäben spritzgegossen wurden. Das Einbringen der Tracer erfolgte während des Spritzgießens mittels eines vorab hergestellten Marker-Masterbatches.

Bewertung der Zuverlässigkeit des Tracer-Detektionssystems

Die Genauigkeit der Tracer-Erkennung wurde mit dem PIDEA-System getestet, einer von Polysecure entwickelten Anlage, die darauf ausgelegt ist, Objekte zur statistischen Auswertung mehrfach zu detektieren und eine zufällige Orientierung der Objekte während der Erkennung zu gewährleisten (siehe Abbildung 1). Die Objekte bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s durch die Detektionseinheit. Dabei wird das Fluoreszenzsignal des Tracers bei jeder Runde gemessen und das System berechnet anschließend das Tracer-Verhältnis und den Code, der als Datenpunkt in einem entsprechenden Diagramm dargestellt werden kann.



Abbildung 1: PIDEA-System zur statistischen Auswertung der Tracer-Detektion

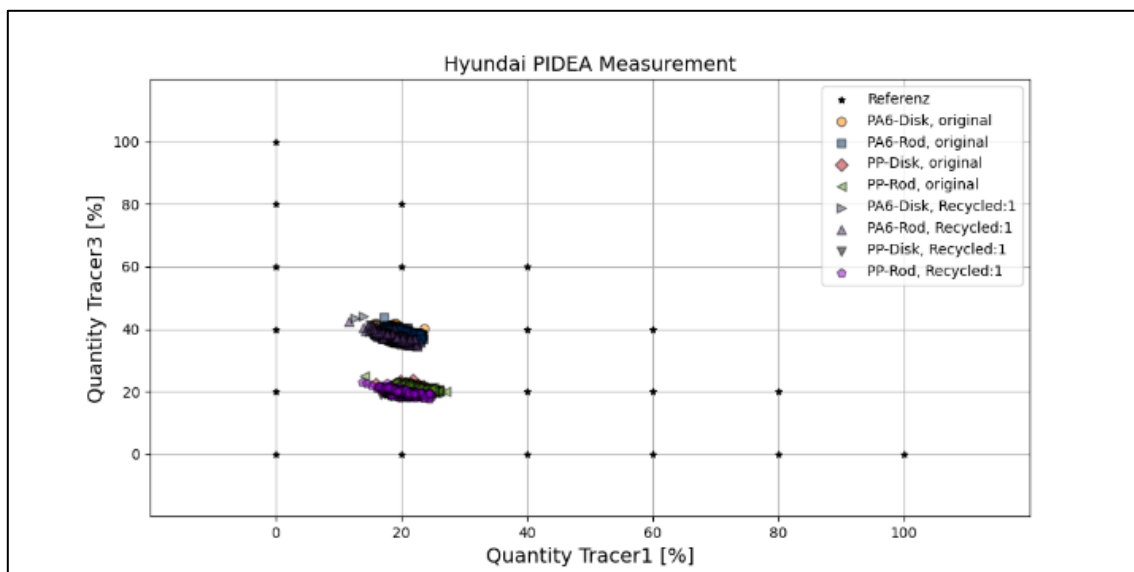


Abbildung 2: Farbkodiertes Diagramm für jede Messung der markierten PA6/PP Disk/Zugstab

In der Machbarkeitsstudie wurde Code 14 (Tracer-Verhältnis: 20/40/40) PA6 zugeordnet, während Code 10 (Tracer-Verhältnis: 20/60/20) PP zugeordnet wurde. Für beide Materialien

wurde die Tracer-Konzentration auf 10 ppm festgelegt. Die Anzahl der Testprobendurchläufe (8 Disken und 8 Zugstäbe pro Material) wurde vorab so festgelegt, dass 500 Datenpunkte pro Material generiert wurden. Die Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 2, zeigen keine Überschneidung zwischen den Datensätzen der beiden Codes, was bestätigt, dass fluoreszierende Tracer und Tracer-Codes, anders als andere Sortiertechnologien (z.B. Wasserzeichen, KI, NIR), eine zuverlässige Erkennung und Unterscheidung sowie eine absolute Abwesenheit von Falschpositiven bieten. Mit dieser statistischen Auswertung konnte nachgewiesen werden, dass eine sehr hohe Reinheit der so sortierten Fraktionen (> 99%) erzielt werden kann. Durch den Einsatz der Tracer wird den Kunststoffen eine zusätzliche Eigenschaft mitgegeben, um auch eine Trennung innerhalb einer Fraktion, z.B. PA6 zu PA 6.6, zu ermöglichen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung zur Erreichung eines echten „Closed-Loop“.

Bewertung des Einflusses von Tracern auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen

Um den potenziellen Einfluss von Tracern auf die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zu bewerten, wurden verschiedene Materialtests am Kunststoff-Zentrum (SKZ) gemäß ISO-Normen vorgenommen.

Die Tests wurden an Proben aus PP und PA6 mit einer Tracer-Konzentration von 10 ppm durchgeführt. Für alle Tests dienten Proben ohne Tracer als Referenz. Um den Effekt von Tracern in recycelten Materialien zu analysieren, wurden dieselben Tests an Proben durchgeführt, die aus sortiertem und wiedervermahlenem, mit Tracern versehenen, PP und PA6 bestehen.

Die Ergebnisse für PP-Proben sind in *Tabelle 1* dargestellt und zeigen im Allgemeinen keine relevanten Unterschiede zwischen Kunststoffproben mit und ohne Marker. Auch die Proben, die einer nochmaligen thermischen Belastung durch Spritzguss unterzogen wurden, zeigten nach der Konditionierung vergleichbare Werte. Die einzige Abweichung stellte der Verlust an Zugfestigkeit bei der wiedervermahlenen, recycelten Probe (Probe Nr. 6, Zeile 3) nach 1000 Stunden Konditionierung bei 140°C dar. Da die recycelte und gemahlene PP-Probe einem zweiten Spritzgussprozess unterzogen wurde, ist die Verschlechterung wahrscheinlich auf diese zusätzliche thermische Belastung zurückzuführen, was darauf hindeutet, dass das Material seinen Kippunkt überschritten hatte.

Tabelle 1: Übersicht der Materialprüfungen und Messergebnisse für PP-Proben

	Test	specimen conditioning	test method	number of measurements	unit	PP without Marker	PP with Marker	PP-Regrind with Marker
						Sample No. 1	Sample No. 3	Sample No. 6
1	Specific Gravity	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 1183-1	3	g/cm ³	0,901	0,901	0,89
2	Tensile Strength & Elongation	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 527	5	MPa	25,7	25,7	25,1
3		140°C / 1000h		5	MPa	25,5	25,8	14,0
5	Flexural Strength & Flexural Modulus	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 178	5	MPa	1347,0	1320,0	1290,0
6		90°C / 500h		5	MPa	1432,0	1432,0	1444,0
7		90°C / 95%rH / 500h		5	MPa	1293,0	1293,0	1298,0
8	IZOD Impact	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 180	7	kJ/m ²	8,3	7,8	7,4
9		90°C / 500h		7	kJ/m ²	7,5	8,5	7,5
10		90°C / 95%rH / 500h		7	kJ/m ²	6,8	8,3	7,7
11	Heat Deflection Temperature	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 75	5	°C	54,1	53,0	52,4
12						55,0	52,9	52,7
13	Ball Impression Hardness	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 2039-2	5	N/mm ²	62	64	63
14	Fading Resistance	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 105	3	L*	58,02	58,46	57,25
15	DSC	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 11357		°C	165,9	166,1	166,1
16	TGA	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 11358		%	99,82	99,86	99,80
17	Ash-Content	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 3451		%	17,17	18,23	17,61

Die Ergebnisse für PA6-Proben sind in *Tabelle 2* dargestellt. Die Konditionierung von PA6 bei 140°C für 1000 Stunden führte zur vollständigen Degradation des Materials, egal ob es sich um reine Neuware, markiertes oder recyceltes Material handelte. Dies wurde durch die Ergebnisse des Zugfestigkeitstests deutlich. Bei den Messungen der Zug- und Biegefestigkeit hat sich gezeigt, dass die Proben aus Neuware, die am längsten gelagert wurden, die meiste Feuchtigkeit absorbierten, was die Ergebnisse entsprechend beeinflusste. Dieser hydrolytische Effekt war nach einer Konditionierung von nur einem Tag bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit erkennbar. Nach einer Konditionierung von 500 Stunden bei 90°C wurde dieser Effekt wieder ausgeglichen, was die Ergebnisse für alle Proben vergleichbar machte. Nach einer Konditionierung unter 95% Luftfeuchtigkeit und 90°C für 500 Stunden trat der hydrolytische Einfluss jedoch bei allen Proben wieder auf. Der Schlagfestigkeitstest zeigte einen signifikanten hydrolytischen Effekt bei Teilen, die 500 Stunden bei 95% Luftfeuchtigkeit und unter 90°C konditioniert wurden, was in einer erhöhten Zähigkeit des Materials aufgrund der Wasseraufnahme resultierte.

Insgesamt zeigten die Ergebnisse der Materialtests keinen erkennbaren Einfluss der Marker auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes. Jedoch müssen die Auswirkungen der Alterung durch Verarbeitung oder Nutzung bei recycelten Materialien berücksichtigt werden.

Table 2: Übersicht der Materialprüfungen und Messergebnisse für PA6-Proben

	Test	specimen conditioning	test method	number of measurements	unit	PA6 without Marker	PA6 with Marker	PA6-Regrind with Marker
						Sample No. 2	Sample No. 4	Sample No. 5
1	Specific Gravity	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 1183-1	3	g/cm³	1,129	1,131	1,13
2	Tensile Strength & Elongation	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 527	5	MPa	58,7	61,2	65,2
3		140°C / 1000h		5	MPa	19,5	19,3	23,6
5	Flexural Strength & Flexural Modulus	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 178	5	MPa	1453,0	1574,0	1794,0
6		90°C / 500h		5	MPa	2757,0	2692,0	2733,0
7		90°C / 95%rH / 500h		5	MPa	574,9	560,4	599,9
8	IZOD Impact	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 180	7	kJ/m²	7,5	7,2	7,3
9		90°C / 500h		7	kJ/m²	7	7,4	7
10		90°C / 95%rH / 500h		7	kJ/m²	130	120	157
11	Heat Deflection Temperature	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 75	5	°C	48,3	51,3	51,0
12						48,9	52,1	52,3
13	Ball Impression Hardness	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 2039-2	5	N/mm²	114	126	129
14	Fading Resistance	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 105	3	L*	60,98	62,70	63,05
15	DSC	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 11357		°C	221,5	221,5	221,8
16	TGA	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 11358		%	99,30	99,22	99,35
17	Ash-Content	23°C / 50%rH / 1 day	ISO 3451		%	18,11	19,3	19,45

Sort4Circle®: Single-Step Sortierung und kombinierte Detektion

Um die Anforderungen eines echten „Closed-Loop“ zu erfüllen, reicht es nicht aus, Kunststoffe nach einzelnen Polymerarten zu sortieren (d.h. PP von PE, von PA usw. zu unterscheiden). Es muss auch innerhalb einer Polymerart (d.h. PA6 von PA6.6 von PA12 usw.) sowie nach Zusatzstoffen und Füllstoffen und gegebenenfalls nach Füllstoffgehalten unterschieden werden. Ziel muss es sein, die recycelten Kunststoffe für gleichwertige Produkte wiederzuverwenden. Dies bedeutet jedoch auch, dass beim Sortieren eine größere Anzahl an Fraktionen unterschieden werden muss. Um diese Herausforderung zu bewältigen, wurde die innovative Sortiertechnologie Sort4Circle® entwickelt.

Der aktuelle Stand der automatischen Sortierung von Kunststoffabfällen umfasst einen mehrstufigen Prozess, der an den Eingangsstrom (z.B. Industrie- oder Haushaltsabfälle) und die Zielfraktionen zugeschnitten ist. Beginnend mit Shreddern, Zerkleinern und Klassifizieren, werden geeignete Objektgrößen erzeugt. Für die Sortierung werden verschiedene Methoden verwendet: Windsichtung trennt leichte Folien von schwereren Gegenständen, magnetische und Wirbelstromabscheider entfernen Eisen- und Nichteisenmetalle, und sensorbasierte optische Methoden unterscheiden verschiedene Hauptpolymere. Die Nahinfrarotspektroskopie (NIR), die gängigste Methode zur Sortierung von Leichtverpackungen, identifiziert bestimmte Kunststoffe wie Polypropylen (PP) durch das Erkennen charakteristischer Absorptionsbänder. Identifizierte Kunststoffe werden dann über Druckluftventile ausgeblasen und vom Reststrom getrennt. Folglich ist für jede neue zu sortierende Polymerfraktion ein weiterer Sortierer erforderlich.

Im Vergleich zum Status quo der Sortierung von Kunststoffabfällen verfolgt Sort4Circle® einen neuen Ansatz sowohl in Bezug auf die Materialhandhabung als auch auf die Erkennung (siehe Abbildung 3). Im innovativen einstufigen Sortierprozess werden alle Objekte zunächst einzeln erfasst, dann einmal vollständig identifiziert und, vergleichbar mit der Briefsortierung, in einem Schritt sortiert.

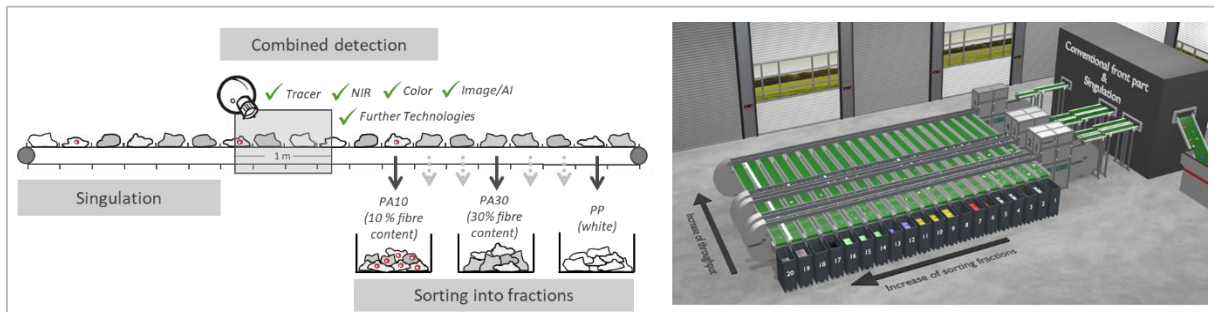


Abbildung 3: Funktionsprinzip der Sort4Circle®-Technologie (links) und Darstellung einer Sort4Circle®-Anlage mit mehreren parallelen Sortierlinien (rechts).

Die Vorbehandlung und Vereinzeln erfolgt über mehrere synchronisierte Förderbänder und/oder andere Komponenten, die für den Transport und die Ausrichtung des Sortiergutes geeignet sind. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Teile gereiht an den Sorter übergeben werden. Der Sorter selbst ist ein Schalen-Sorter, bei dem jede Schale ein einzelnes Teil enthält. Am vorderen Ende des Sorters, direkt nach der Übergabe der sortierten Gegenstände in die Schale, ist die Detektion positioniert. Hier wird jedes Objekt durch eine Reihe von Messverfahren charakterisiert (kombinierte Detektion) und per Algorithmus nach den für den jeweiligen Sortiereingang festgelegten Kriterien klassifiziert. Auf der Grundlage dieser Klassifizierung wird jedes einzelne Objekt einem bestimmten Sammelbehälter zugewiesen. Diese Zuordnung wird von der Steuerungssoftware nachverfolgt, die für eine fehlerfreie Ablage des jeweiligen Objekts in den entsprechenden Sammelbehälter sorgt. Im Gegensatz dazu erzeugen heutige konventionelle pneumatische Sorter erhebliche Fehler, so dass reine Sortierfraktionen nicht möglich sind.

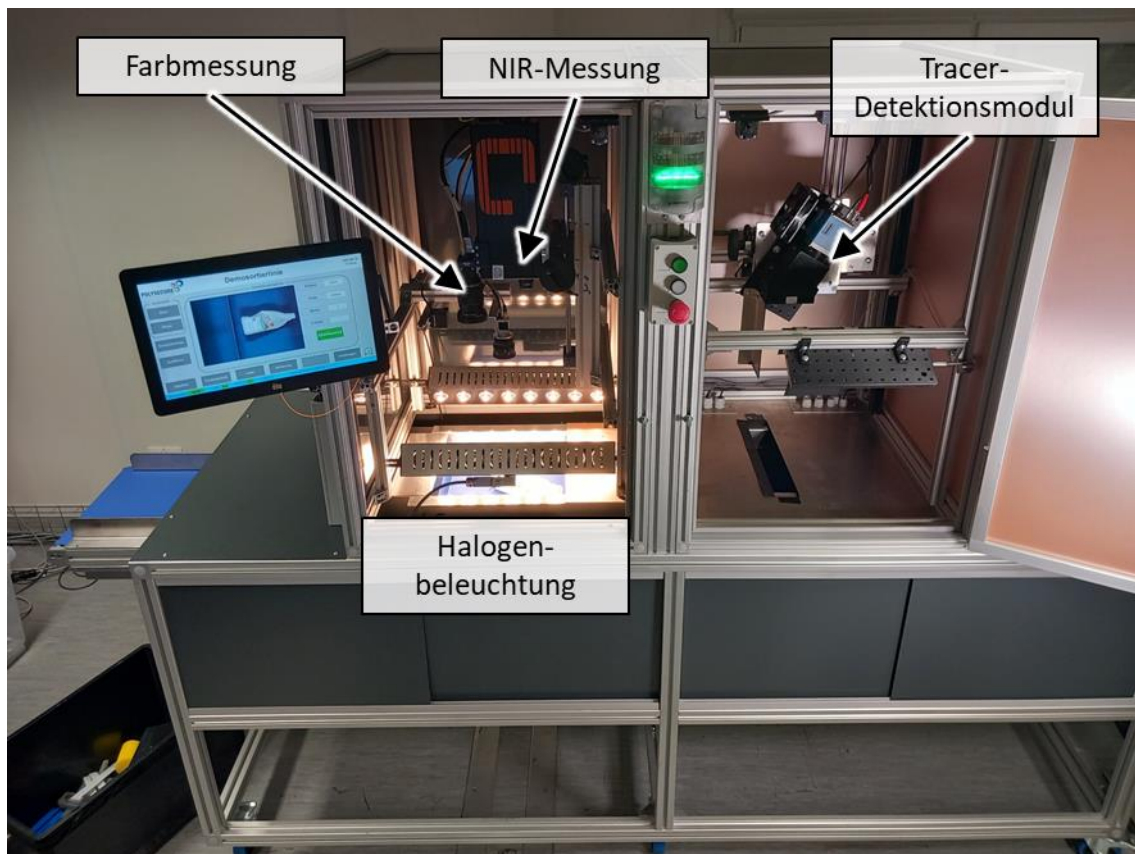


Abbildung 4: Der kombinierte Detektor, der jedes Materialstück nach Farbe, Polymer (NIR) und Tracer-Code klassifiziert

Die Schlüsselkomponente und das Herzstück der Sort4Circle®-Technologie ist der kombinierte Detektor (s. Abbildung 4). Dieser analysiert jedes zu sortierende Objekt, indem er eine Vielzahl physikalischer Eigenschaften misst: Polymermaterial durch NIR-, Farbe und Bild durch VIS-Detektion sowie die Erkennung von Tracercodes durch laserbasierte Fluoreszenzmessung. Die Zuordnung zu vordefinierten Fraktionen erfolgt anschließend auf Grundlage der Kombination aller gesammelten Messdaten. Zusätzliche Messeinheiten für LIBS, MIR-Spektrometrie (schwarze Kunststoffe), KI und andere Messverfahren können ohne größere mechanische Anpassungen integriert werden.

Um die Zuverlässigkeit des einstufigen Sortiermechanismus von Sort4Circle® zu bewerten, wurden markierte Kunststoffproben mit unmarkierten geschredderten Polymeren gemischt und dem System zugeführt. Von 1.212 Objekten, die als PP identifiziert wurden, und 1.024 Objekten, die als PA6 identifiziert wurden, wurde nur ein Objekt pro Fraktion falsch klassifiziert, was zu einer Reinheit der sortierten Fraktionen von 99,9 % führte. Darüber hinaus lag die Sortierausbeute, d. h. der Prozentsatz der tatsächlich identifizierten und sortierten Sortierobjekte, deutlich über 90 %.

Schlussfolgerung

Diese Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass die Tracer-Based-Sorting-Technologie den Kunststoffen ein zusätzliches Unterscheidungskriterium für eine verbesserte Sortierung bietet. Tracer-Codes, die auf vordefinierten Mischverhältnissen basieren, können zuverlässig

identifiziert werden, ohne dass es zu falsch-positiven Ergebnissen kommt. Mit dem einstufigen Sort4Circle®-System konnte gezeigt werden, dass markierte und nicht markierte Objekte mit hoher Ausbeute und Reinheit in die gewünschten Fraktionen sortiert werden können. Darüber hinaus zeigten die in der Studie durchgeführten Materialtests keinen erkennbaren Einfluss der Markierungen auf die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe und Rezyklate. Die innovative Sort4Circle®-Technologie bietet einen grundlegend neuen Ansatz zur Sortierung von Kunststoffen in mehrere Fraktionen. Verbessert durch Tracer-Based-Sorting ermöglicht sie eine präzise Differenzierung und bringt uns einem echten „Closed-Loop“ näher.

Von Reiner Just, Robin Just, Jochen Moesslein (all Polysecure), Riyaz Mohammed (Hyundai Motor Europe Technical Center) and Chaehwan Hong (Hyundai Motor R&D)