

Abschlussbericht

über das Förderprojekt

„ProViTASK“

Entwicklung einer prozesssicheren Sortier- und Vereinzelungstechnik mittels Tracer-Based-Sorting für Artikel-Ausschuss in der Spritzgussfertigung von Kunststoffverschlüssen aus Polyolefinen

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

DBU-Aktenzeichen: 37711/01

Laufzeit: 01. November 2021 – 31. Oktober 2022

Verbundpartner:

Polysecure GmbH (Projektkoordination)

St. Georgener Straße 19

79111 Freiburg

Projektleitung/Ansprechpartner: Markus Reisacher

und

Georg MENSHEN GmbH und Co. KG

Industriestraße 26

57413 Finnentrop

Ansprechpartner: Ulrich Fleischer

Autor: Markus Reisacher

Januar 2023

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

1 Inhalt

1	INHALT	2
2	GEGENSTAND UND ZIELE DES PROJEKTS	3
2.1	ENTWURF EINER SORT4CIRCLE®-SORTIERANLAGE FÜR VERSCHLUSSKAPPEN	4
2.2	GEPLANTE UNTERSUCHUNGEN IM RAHMEN DIESES PROJEKTS	5
2.2.1	<i>Untersuchung der Vereinzelung</i>	5
2.2.2	<i>Untersuchungen der Sortierquote und der minimalen Tracerkonzentration</i>	5
3	TECHNISCHE UND ORGANISATORISCHE RANDBEDINGUNGEN IN DER FERTIGUNG BEI MENSHEN	5
4	ENTWICKLUNG EINER VEREINZELUNGSLÖSUNG FÜR VERSCHLUSSKAPPEN	6
4.1	GRÖßENKLASSIERUNG	7
4.2	FÖRDERUNG AUS DEM EINGANGSBUNKER.....	7
4.3	VEREINZELUNGSANSATZ 1: KONTINUIERLICHER PROZESS MIT KONVENTIONELLER FÖRDERTECHNIK	8
4.4	VEREINZELUNGSANSATZ 2: KNICKARM-ROBOTER MIT SAUGGREIFER	9
4.5	INTEGRATION DER KONTINUIERLICHEN LÖSUNG IN DIE VERSUCHSANLAGE.....	12
4.5.1	<i>Aufarbeitung der gebrauchten Apfel-Sortiermaschine</i>	12
4.5.2	<i>Detektionskammern</i>	12
4.5.3	<i>Funktionsprinzip und Steuerung</i>	14
4.5.4	<i>Sortierkapazität</i>	15
5	UNTERSUCHUNG DER TRACERSIGNAL-PIGMENTIERUNGS-ABHÄNGIGKEIT	15
5.1	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN.....	15
5.2	PROBENHERSTELLUNG.....	16
5.3	REFLEXIONS- UND FLUORESZENZSPEKTROSKOPIE	17
5.3.1	<i>Spektroskopie-Messplatz</i>	17
5.3.2	<i>Ergebnisse</i>	18
5.4	BESTIMMUNG DER MINIMALEN TRACERKONZENTRATION	20
5.4.1	<i>Proben und Messaufbau</i>	20
5.4.2	<i>Datenanalyse, „Kombinierter“ Tracer</i>	21
5.4.3	<i>Berechnung der minimalen messbaren Tracerkonzentration</i>	22
5.5	INLINE-FARBMESSUNG IM VERGLEICH ZUR SPEKTROSKOPISCHEN MESSUNG.....	24
5.6	MÖGLICHE WEITERE SCHRITTE ZUR VERBESSERUNG DER TRACERKONZENTRATIONS-VORHERSAGE.....	24
6	WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE DER SORTIERLÖSUNG	24
7	FAZIT	26
8	ANHANG: BESTIMMUNG DER SKALIERUNGSFAKTOREN IN ABSCHNITT 5.4.3	28
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	28
10	TABELLENVERZEICHNIS	29

2 Gegenstand und Ziele des Projekts

Dieses Förderprojekt ist vor dem Hintergrund entstanden, dass das Unternehmen MENSHEN, Hersteller von Kunststoffverschlüssen für Consumer-Produktverpackungen, beabsichtigt, einen sog. In-House-Recyclingprozess für ihren bei der Spritzgussfertigung anfallenden Produktionsausschuss einzurichten. Durch die Rückgewinnung des wertvollen Materials können sowohl ökologische als auch betriebswirtschaftliche Vorteile erzielt werden. Für die Gewinnung hochwertiger Rezyklate muss das Material zuvor sowohl nach Farben als auch nach den wichtigen Kunststoff-Unterklassen (z.B. PP-Homopolymer, PP-Random Copolymer oder PP-Block-Copolymer) sortiert werden. Hierfür wird eine leistungsfähige Sortiertechnologie benötigt. Die klassische Nahinfrarot-Technologie, welche z.B. bei der Sortierung von Haushalts-Kunststoffabfall eingesetzt wird, kann eine Sortierung in Kunststoff-Unterklassen aufgrund physikalischer Beschränkungen nicht leisten.

Die Polysecure GmbH hat dafür eine innovative Lösung entwickelt: Tracer-Based-Sorting. Dabei werden dem Material geringste Mengen von speziellen Fluoreszenz-Tracern zugesetzt, um ein zusätzliches Trennmerkmal bereitzustellen, das bei der Sortierung ausgelesen werden kann. Zusätzlich zum Tracer-Based-Sorting entwickelt die Polysecure GmbH ein Verfahren zur Sortierung heterogener Objekte auf beliebig viele Endstellen. Es besteht aus einer vorgelagerten Vereinzelung und separaten Ablage in ein Schalenband o.Ä., sodass jedes Objekt nach der Messung genau verfolgt und an der korrekten Endstelle ausgeschleust werden kann. Polysecure hat für dieses Gesamtkonzept die Bezeichnung SORT4CIRCLE® entwickelt und geschützt.

Ziel dieses Projekts war es, vor der Konstruktion einer speziell an die Anforderungen bei Verschlusskappen angepassten SORT4CIRCLE®-Sortieranlage bestimmte Kernaspekte des Sortierprozesses genauer zu untersuchen. Dies würde die technologischen und betriebswirtschaftlichen Risiken besser kalkulierbar machen und die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Umsetzung des Prozesses bei MENSHEN erhöhen.

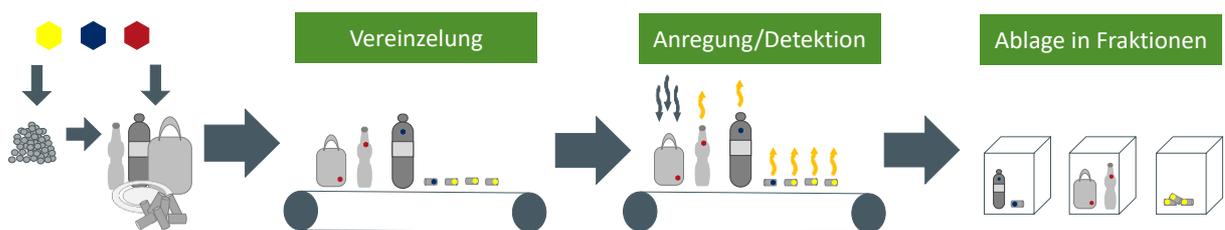


Abbildung 1: Schematische Darstellung des SORT4CIRCLE®-Prozesses für Kunststoffverpackungen: Der Tracer wird entweder in das Kunststoffgranulat eingemischt oder mittels Etiketten oder Druckfarbe auf die Artikel aufgebracht. In der Sortieranlage werden nach der mechanischen Vereinzelung die Tracer zur Fluoreszenz angeregt und vermessen. Entsprechend dem detektierten Fluoreszenzcode werden die Objekte nach Fraktionen getrennt abgelegt.

2.1 Entwurf einer SORT4CIRCLE®-Sortieranlage für Verschlusskappen

Die geplante Sortieranlage folgt dem in Abbildung 2 dargestellten Schema. Zunächst erfolgt in mehreren Schritten die Vereinzelung der Verschlusskappen, dann die Messung von Tracersignal und Farbe und schließlich die Ablage. (Eine ausführlichere Beschreibung folgt in Abschnitt 4.) Der Entwurf sieht die Sortierung in fünf Farbfractionen (rot, grün, blau, weiß und naturfarben/ungefärbt) und in drei Kunststofffractionen vor. Zwei davon werden mit verschiedenen Tracern versehen, die dritte bleibt unmarkiert. Daraus ergeben sich 15 separate Fractionen, zzgl. einer Rest-Fraktion für nicht korrekt erkennbare oder außerhalb der Spezifikationen liegende Objekte.

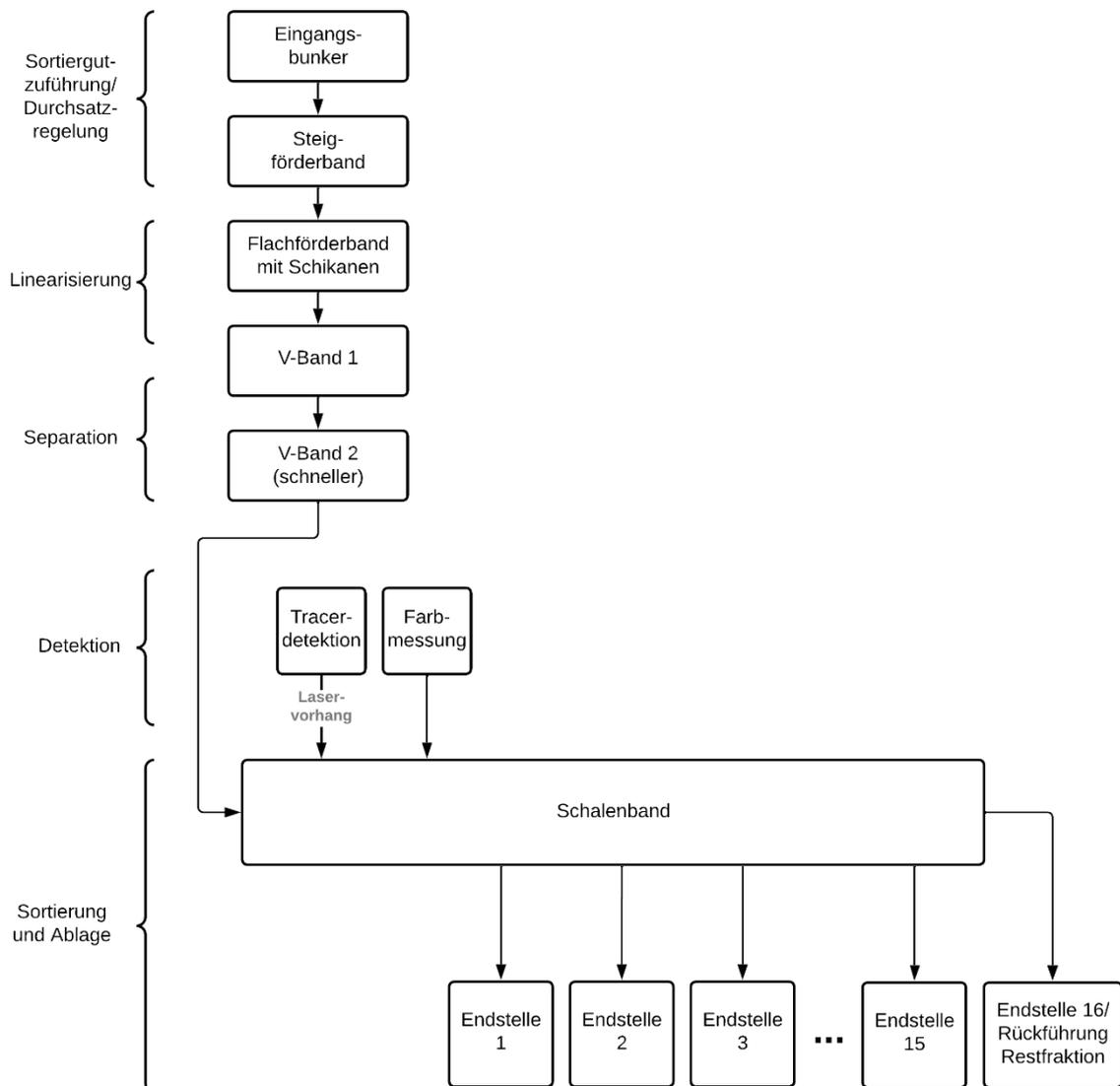


Abbildung 2: Ablaufschema der geplanten Sortieranlage für Verschlusskappen mit Benennung der funktionalen Einheiten (links) und Komponenten (rechts). Die Darstellung der Komponenten der Vereinzelungsstrecke entspricht bereits der im Projektverlauf ermittelten präferierten Lösung.

2.2 Geplante Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts

Die im Rahmen dieses Förderprojekts geplanten Voruntersuchungen betrafen zwei Themengebiete:

1. die mechanische Vereinzelung der zu sortierenden Artikel
2. die Untersuchung des Produktportfolios von MENSHEN in Bezug auf erreichbare Sortierquoten, notwendige Tracermengen und ggf. weitere Optimierungen der Messtechnik.

2.2.1 Untersuchung der Vereinzelung

Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Artikelvereinzelung sollte untersucht werden, indem bei Polysecure zwei unterschiedliche Vereinzelungssysteme aufgebaut und vergleichend getestet wurden. Dies sind

- a. eine klassische mechanische Vereinzelungsstrecke mit Größenklassierung und förder-technischen Komponenten wie in Abbildung 2 dargestellt, und
- b. eine Vereinzelung mittels Pick&Place-Roboter bzw. Automat mit Saugvorrichtung, der die Artikel einzeln aus einem Vorrat entnimmt und ablegt.

Beide Verfahren sollten in verschiedenen Varianten als Versuchsanordnungen umgesetzt und auf Geschwindigkeit, Effizienz, Skalierbarkeit und Fehlerquote untersucht werden. Dasjenige Verfahren mit der besseren Performance sollte dann in Form einer Versuchsanlage vollständig aufgebaut und für die Sortierung von Produktionsausschuss validiert werden.

2.2.2 Untersuchungen der Sortierquote und der minimalen Tracerkonzentration

Detektionsversuche an markierten Verschlusskappen, die bereits im Rahmen einer dem Projekt vorausgegangenen Machbarkeitsstudie begonnen wurden, sollten auf eine repräsentative Auswahl des gesamten Produktportfolios ausgeweitet werden. Diese Untersuchungen sollten eine möglichst genaue Abschätzung ermöglichen, welche Tracer-Konzentrationen bei welchen Farben, Größen, Geometrien etc. eingesetzt werden müssen, um eine verlässliche Erkennung sicherzustellen. Insbesondere der Einfluss der Farbe, d.h. die Abhängigkeit der Fluoreszenzsignale der Tracer von der Pigmentierung des Matrixmaterials, bestimmt maßgeblich die benötigte Tracermenge. Die Ergebnisse sollten in die Kalkulation der Wirtschaftlichkeit des geplanten Recyclingprozesses einfließen.

3 Technische und organisatorische Randbedingungen in der Fertigung bei Menshen

Die Verschlusskappenproduktion im Stammwerk von Menshen in Finnentrop erfolgt auf ca. 170 Spritzgießmaschinen. Jede Maschine hat ihre eigenen Sammelbehälter für Ausschuss. Teilweise durchlaufen die Teile nach der Herstellung eine Station zur automatischen Qualitätskontrolle, wobei fehlerhafte Teile ausgeschleust werden und folglich ebenfalls Ausschuss gesammelt wird. Aufgrund der Komplexität und Weitläufigkeit der Produktionsanlagen ist es nicht möglich, eine kontinuierliche Zuführung des Ausschusses sämtlicher Maschinen zu einer zentralen Verarbeitungsstation einzurichten. Der Ausschuss einiger Maschinen wird jeweils in

großen Gitterboxen in der Nähe gesammelt und kann von dort per Hubwagen oder Stapler zur Weiterverarbeitung gebracht werden. Die Ausgangssituation für die Sortierung ist demnach die batchweise Anlieferung von Material als loses Schüttgut. Die Sortieranlage muss also einen Eingangsbunker besitzen, der variierende Zuliefermengen puffert und einen kontinuierlichen Betrieb der Sortieranlage ermöglicht.

4 Entwicklung einer Vereinzellösung für Verschlusskappen

Die gestellte Aufgabe war die Entwicklung eines Prozesses, der, ausgehend von einem in loser Schüttung im Eingangsbunker vorliegenden Konvolut von Verschlusskappen verschiedener Geometrie und Größe, zu der getakteten Ablage einzelner Artikel in die Schalen eines Schalenbandes führt. Dieser Prozess lässt sich in vier Schritte unterteilen:

1. Übergang von der dreidimensionalen Schüttung zur zweidimensionalen Verteilung auf einer Ebene
2. Übergang von der zweidimensionalen zur eindimensionalen Anordnung hintereinander
3. Separierung der einzelnen Objekte, Bildung definierter Mindestabstände
4. Übergang vom kontinuierlichen Förderprozess zur getakteten Ablage in Schalen

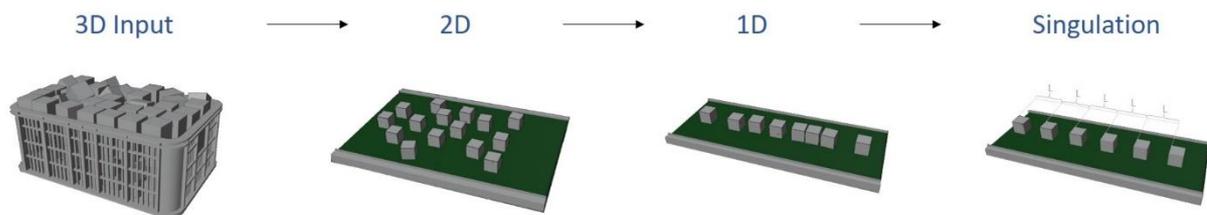


Abbildung 3: Schema des Vereinzlungsprozesses

Für die Förderung spielen die mechanischen Eigenschaften des Sortierguts eine entscheidende Rolle. Die Verschlusskappen im Sortiergut können rund oder eckig sein, leicht oder schwer, elastisch oder eher hart, einen geöffneten Klappdeckel besitzen, aber auch unvollständige Fehlgüsse mit spitzen Ecken oder scharfen Kanten sein. Wegen dieser Bandbreite durften keinerlei Fördertechniken eingesetzt werden, die in irgendeiner Weise auf die Geometrie der Teile abgestimmt sind, wie es bei der Förderung definierter, gleichförmiger Objekte in Produktionsstraßen häufig der Fall ist. Vielmehr musste die eingesetzte Lösung möglichst einfach und robust sein, um bei einer möglichst großen Bandbreite von möglichen Objekten – auch solchen, die nicht im Test-Konvolut enthalten waren – zuverlässig zu funktionieren. Bspw. mussten alle Arten von Kanten auf der Förderstrecke vermieden werden, um ein Verkanten der Teile zu verhindern. So kann wegen des geringen Artikelgewichts bereits eine Lage Tesafilm auf einer Rutschstrecke eine unüberwindliche



Abbildung 4: Verschlusskappenkonvolut für Vereinzlungsversuche

Hürde darstellen. Auch Stöße von Banden müssen sehr exakt angepasst werden, um ein Hängenbleiben zu verhindern.

Für die Vereinzlungsversuche wurde von Menshen ein umfangreiches Konvolut von Verschlusskappen mit einem breiten Spektrum an Größen, Formen und Farben bereitgestellt, um das zu erwartende Sortiergut möglichst repräsentativ abzubilden.

4.1 Größenklassierung

Im Verlauf der Versuche stellte sich schnell heraus, dass ein zu breites Größenspektrum die Aufgabe erheblich erschwert, da große Objekte kleinere überdecken, aufsammeln, blockieren oder ablenken können. Als Faustregel lässt sich festhalten, dass die größten Objekte maximal die dreifache Größe der kleinsten haben sollten. Außerdem ist es vorteilhaft, wenn die Größe der Schalen des Sortierbandes möglichst genau auf die Größe der Objekte abgestimmt ist, da zu große Schalen ungenutzte Bandlänge bedeuten und somit den maximalen Durchsatz limitieren. Aus beidem folgt, dass eine der Vereinzlung vorgeschaltete Größenfraktionierung sinnvoll ist. Bei einer Teilung in bspw. drei Größenklassen können drei parallele Schalenbänder mit unterschiedlichen Schalengrößen eingesetzt werden, um die Bandbelegung zu maximieren.

Die Größenklassierung erfolgt vorzugsweise mit einer Siebtrommel, die zugleich den Effekt hat, ineinander verklemmte Teile zu lockern. Für die Klassierung der Test-Verschlusskappen wurde eine behelfsmäßige Mini-Siebtrommel gebaut, mit der das Test-Konvolut in drei Klassen aufgeteilt werden konnte:

klein	mittel	groß
< 30 mm	30 – 52 mm	> 52 mm

Tabelle 1: Größenklassen für Versuche

In Abstimmung mit Menshen wurde beschlossen, die Kleinfraction zunächst außen vor zu lassen, da der Massenanteil dieser Fraction an der Gesamtproduktion relativ gering ist, der Handhabungsaufwand aber unverhältnismäßig groß wäre. Auch die große Fraction wurde vorerst nicht weiter betrachtet, da sie mit der Schalengröße des vorhandenen Sorters nicht kompatibel ist. Für die Entwicklungsarbeiten wurden deshalb die Artikel der mittleren Fraction verwendet, die den mit Abstand größten Anteil am Sortiergut hatten. Die Vereinzlungsprinzipien sind, geeignet skaliert, jedoch auch für die große Fraction gültig und mit bestimmten Einschränkungen auch für die kleine.

4.2 Förderung aus dem Eingangsbunker

Es wurde ein Stollenförderband mit Bunker beschafft, welches das Sortiergut für die weitere Verarbeitung auf eine Höhe von bis zu 1,80m hochfördert. Da die Größe der Stollen die Fördermenge bestimmt und diese nicht auf den geringen Durchsatz der Versuchsanlage mit nur einer Linie ausgelegt war, wurde die Größe der Fächer durch angepasste Füllkörper reduziert.

Auf diese Weise wurde ein quasi-kontinuierlicher Nachschub geringer Fördermengen eingestellt.

Während der Versuche wurde die Vereinzelungsstrecke zeitweise im kontinuierlichen Umlaufbetrieb gefahren, d.h. am Ende der Vereinzelungsstrecke wurden die Teile wieder in den Eingangsbunker gefördert. Dabei stellte sich heraus, dass bestimmte Kombinationen von Artikeln dazu neigten, sich mit der Zeit ineinander zu arbeiten.



Abbildung 5: Beispiele ineinandersteckender Verschlusskappen

Nach wenigen Umläufen bildeten sich deshalb meist bestimmte Paarungen ineinandersteckender Verschlusskappen, die z.T. nicht mehr zu trennen waren (siehe Abbildung 5). Maßgebliche Ursache dafür waren Press- und Scherbewegungen beim Umwälzen der Teile im Bunker. Beim Design des Eingangsbunkers der Sortieranlage sollte deshalb darauf geachtet werden, dass die Abförderung möglichst wenig Umwälzbewegungen im Schüttgut erzeugt. Außerhalb des Bunkers kommen Verklebungen praktisch nur dann vor, wenn größere Stauungen verursacht werden. Diese müssen immer erkannt und verhindert werden.

Verklebte Teile, die sich im Prozess nicht mehr voneinander lösen, landen nach der Vereinzelung in der gleichen Schale. Wenn Farbe und/oder Material unterschiedlich sind, können diese Kombinationen nicht korrekt sortiert werden. Allerdings kann anhand von Farb- und Tracermessung in vielen Fällen eine Doppelung erkannt und das Objekt in die Rest-Fraktion abgelegt werden, sodass immerhin keine Rezyklatfraktion verunreinigt wird.

Vom Hochförderband wurde das Sortiergut mit geringer Fallhöhe von ca. 20-30 cm auf ein flaches Förderband abgeworfen. Durch die Elastizität der Verschlusskappen wurde beim Aufprall immer eine gute 2D-Verteilung auf dem Band erreicht.

Vom Hochförderband wurde das Sortiergut mit geringer Fallhöhe von ca. 20-30 cm auf ein flaches Förderband abgeworfen. Durch die Elastizität der Verschlusskappen wurde beim Aufprall immer eine gute 2D-Verteilung auf dem Band erreicht.

4.3 Vereinzelungsansatz 1: Kontinuierlicher Prozess mit konventioneller Fördertechnik

Für die Linearisierung und Separierung wurden verschiedene Einzelelemente der Fördertechnik auf ihre Anwendbarkeit bei dem gegebenen Sortiergut untersucht, z.B.

- feste oder bewegliche Banden
- Gummiabstreifer
- Übergänge zwischen verschiedenen Bändern mit Rutschen oder Fallstrecken
- Geschwindigkeitsdifferenzen
- verschiedene Arten von V-Bändern
- usw.

Getestet wurde auf Qualität des Ergebnisses, d.h. noch neben- oder übereinanderliegende Teile, Verklebungsgefahr, Pfropfenbildung, Vermögen Staus aufzulösen etc. Die Prozessstabilität bei schwankender Beschickung und variabler Zusammensetzung des Förderguts war von besonderer Bedeutung.

Realisiert wurde schließlich eine Kombination aus zwei diagonalen Bändern, an denen sich die Teile hintereinander anordnen, und danach zwei aufeinanderfolgenden V-Bändern (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7). Durch die V-Form wird die Linearisierung bewahrt (es können keine Teile mehr „überholen“), und an den Übergängen der Bänder können durch Geschwindigkeitsvariation Lücken zwischen den Teilen erzeugt oder verringert werden. Das zweite V-Band erhielt niedrige Stollen, sodass Relativbewegungen zwischen den Objekten und zum Band verhindert werden und sich Abstände nicht mehr verändern. Aus diesem Zustand kann eine getaktete Ablage in das Schalenband erfolgen.

Für die Steuerung der Bänder wurden Lichtschranken montiert, deren Signale von einer SPS ausgewertet werden. Diese steuert alle Bänder so an, dass auf dem letzten V-Band möglichst alle Stollen mit einem Teil bestückt sind. Kommen auf den vorherigen Bändern zu viele Teile nach, werden diese verlangsamt oder angehalten, kommen zu wenige, laufen sie schneller, um die Lücke zu schließen. Auf diese Weise wird eine Durchflusssteuerung „rückwärts“ bis zum Steigförderband aus dem Bunker realisiert.

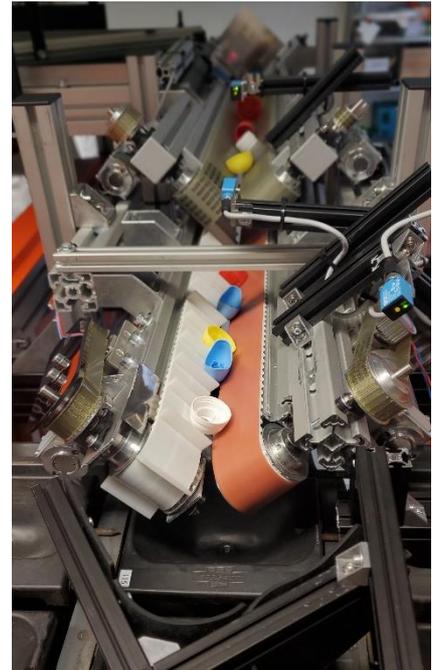


Abbildung 6: Detailansicht der V-Bänder mit Lichtschrankensteuerung

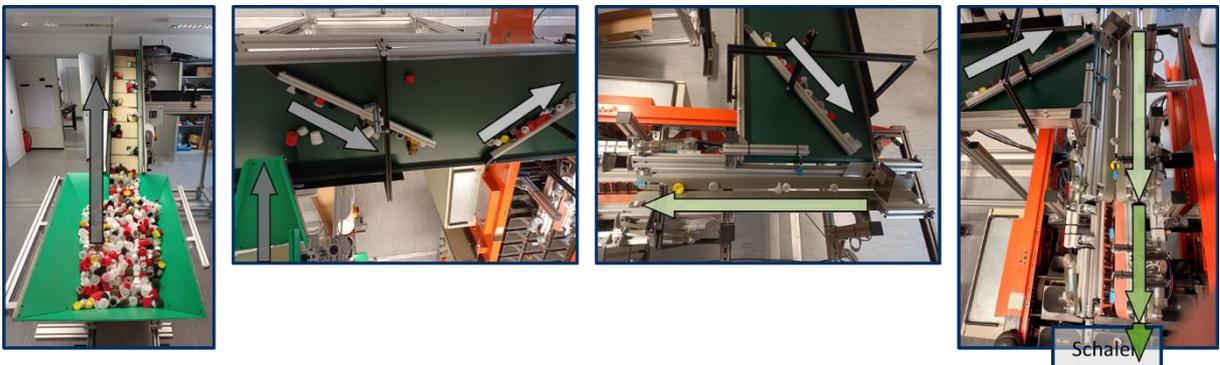


Abbildung 7: Vereinzlungsstrecke: Links: Eingangsbunker mit Hochförderband. Mitte links: Förderband mit Schikanen. Mitte rechts: Abwurf in V-Bänder. Rechts: V-Bänder und Abwurf in Schalenband

4.4 Vereinzlungsansatz 2: Knickarm-Roboter mit Sauggreifer

Ein Roboter, der einzelne Teile aus einer Menge greifen und ablegen kann, kann die oben beschriebenen vier Vereinzlungsschritte teilweise oder komplett in sich vereinen. Der mögliche Vorteil gegenüber der oben beschriebenen kontinuierlichen Lösung ist die geringere Komponentenanzahl und der reduzierte Platzbedarf. Dem gegenüber stehen die hohen Kosten eines schnellen Roboters und die prinzipielle Begrenztheit der Geschwindigkeit des Zyklus von Greifen-Transportieren-Ablegen.

Bei Robotern, die Gegenstände mit unbekannter Geometrie aufnehmen sollen, werden oft Vakuum-Sauggreifer eingesetzt. Diese müssen dicht mit der Oberfläche abschließen, um den

notwendigen Unterdruck aufzubauen. Deshalb muss der Roboter entweder mittels Sensorik und Software (meist KI) Gegenstände voneinander unterscheiden, ansaugbare Oberflächen erkennen und den Greifvorgang entsprechend steuern können. Alternativ benötigt er einen Greifer, der auch bei ungezieltem Pickvorgang genau ein Teil aufnimmt, unabhängig von der genauen Form und Lage.

Wir haben uns aus Gründen der Einfachheit, erreichbaren Zyklusgeschwindigkeit und höheren Flexibilität für letzteren Ansatz entschieden. Für einen bereits vorhandenen Knickarm-Roboter wurde ein spezieller Sauggreifer der Firma FORMHAND beschafft (siehe Abbildung 8). Dieser Greifer besitzt einen flexiblen Saugkopf, in dem sich ein Granulat aus Kunststoffperlen befindet. Beim Ansaugvorgang schließen sich diese Perlen um das Objekt und dichten Undichtigkeiten ab. Durch dieses Funktionsprinzip lassen sich auch Objekte mit unregelmäßiger Oberfläche greifen.

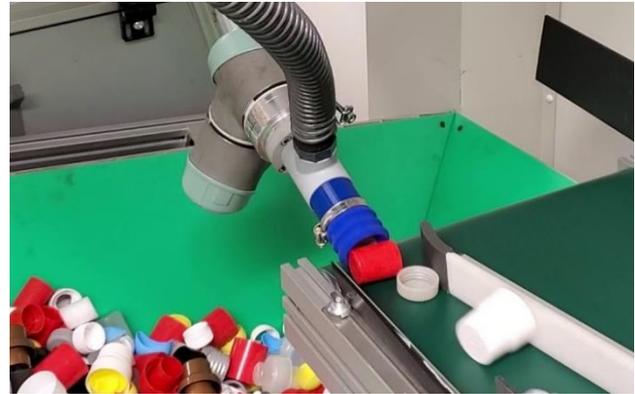


Abbildung 8: FORMHAND-Sauggreifer an einem Roboterarm beim Greifen vom Ende eines Förderbands. Die Objekte werden bei diesem Aufbau kontinuierlich zugeführt. Sobald der Greifer in Position ist und Unterdruck aufbaut, wird das nächste ankommende Teil angesaugt.

Mit dieser Konfiguration wurden verschiedene Greif- und Ablege-Versuche durchgeführt, z.B.

- Greifen aus der 3D-Schüttung direkt im Bunker oder auf dem Hochförderband
- Greifen von dichter 2D-Belegung auf Förderband
- Greifen vom Bandende (horizontal und vertikal) eines linearisierten Stroms mit Stauung oder Überlauf
- Greifen von einem flexiblen (Schaumstoff)-Untergrund unterschiedlicher Form

Die Greifversuche wurden mit Videoaufnahmen und teils durch Zählung der gepickten Teile je Artikelsorte dokumentiert.

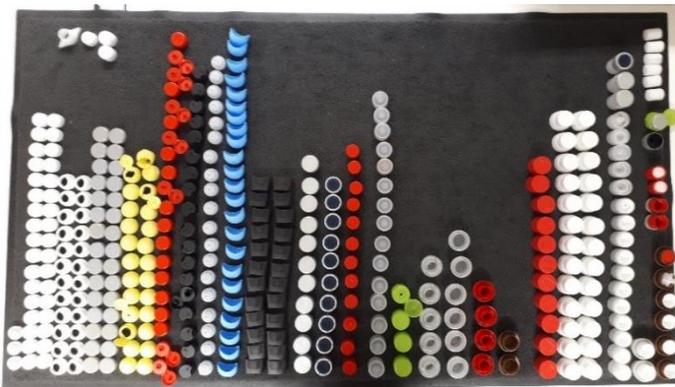


Abbildung 9: Anordnung von Verschlusskappen zur Auswertung nach einem Greifversuch

Bei dieser Art von „blindem“ Greifen, d.h. ohne Sensorik-Unterstützung, ist es essenziell, dass in der Greifzone bei jedem Greifvorgang genau ein greifbares Teil liegt. Dies wurde durch geeignete Zuführung sichergestellt, teils durch Aufstauung von Teilen, teils durch kontinuierliche Beschickung der Greifzone mit Überlauf.

Ansatz	Ge- schwin- digkeit	Leer- pick- Quote	Mehr- fach- pick-Q.	Skalier- barkeit	Bemerkung
Greifen aus tiefer 3D-Schüttung im Bunker	--	0	+	++	Tiefes Eintauchen nötig für sicheres Ansaugen
Greifen aus flacher 3D-Schüttung auf Steigband	-	--	-	-	Zu variable Schüttungshöhe, wenig Gegendruck
Greifen von dichter 2D-Belegung auf Förderband mit Stauung	0	--	0	++	Pfropfenbildung in Stauungszone, Beschädigungsgefahr für Sauger, da Untergrund nicht nachgibt
Greifen vom Bandende (horizontal), linearer Strom, mit Stauung	++	+	+	+	Teileüberlauf mit Staukante schwierig, Pfropfenbildung
Greifen vom Bandende (vertikal) linearer Strom, mit Stauung	+	-	0	+	Gefahr für Sauger, da Untergrund nicht nachgibt
Greifen vom Bandende (horizontal), linearer Strom, mit Überlauf	++	++	+	+	Sehr sicheres Ansaugen, da Teile gg. Greifer gefördert
Greifen vom Schaumstoffkissen mit Stauung und Überlauf	+	-	++	+	Zone wird manchmal durch Überlauf „leergeräumt“
Greifen vom Schaumstoffkissen mit Vertiefung und Überlauf	+	0	++	0	Vertiefung fasst genau ein Teil, weitere abgelenkt

Table 2: Vergleich verschiedener Einsatzszenarien des Sauggreifers

Die Greifversuche waren unterschiedlich erfolgreich: Alle Ansätze funktionierten in den meisten Fällen, jedoch zeigte sich bei allen ein gewisser Anteil an Leerpicks und ein Anteil an Mehrfachpicks, d.h. mehr als einem gegriffenen Teil. Die Leerpicks lassen sich mit geeigneter Sensorik (Lichtschranke am Greifer) leicht erkennen, sodass der Ansaugvorgang wiederholt wird. Dennoch verschlechtern sie die erreichbare Zykluszeit. Außerdem sollte sichergestellt werden, dass sich vor dem zweiten Greifvorgang das Objekt bewegt, um eine ungünstige Positionierung zu verändern und die Ansaugwahrscheinlichkeit zu erhöhen. Mehrfachpicks lassen sich ohne Verwendung eines Kamerasystems nicht einfach detektieren. Hier sind das Design der Greifstelle und die Zuführung der Teile entscheidend, dafür zu sorgen, dass nur genau ein Teil angesaugt werden kann. Es konnten Konfigurationen gefunden werden, bei denen die Erfolgsquote des Greifvorgangs sehr hoch war (diejenigen, bei denen die Teile kontinuierlich gegen den Greifer gefördert wurden). Auch die Roboterlösung konnte somit als technisch einsetzbar bewertet werden.

Die Arbeitsgeschwindigkeit wird im Wesentlichen von der Art des Roboters bestimmt und von der Zeit, die der Sauggreifer zum Aufbau des Greif-Unterdrucks benötigt. Der eingesetzte (relativ langsame) Knickarm-Roboter kann in einer realen Anlage durch einen sog. Delta-, Scara- oder Portalroboter ersetzt werden, um höhere Bewegungsgeschwindigkeiten zu erzielen.



Abbildung 10: Beispiel für einen Delta-Roboter. © Marc Auledas, [CC BY-SA 4.0](#), via [Wikimedia Commons](#)

Diese Robotertypen sind in ihrem Operationsradius und den Bewegungen limitierter. Da jedoch Greif- und Ablageposition konstant sind, kann der Verfahrweg sehr kurz ausgelegt werden, sodass kurze Zykluszeiten erreicht werden. Limitierend ist jedoch die Ansaugzeit des Greifers, da prinzipbedingt beim Ansaugen und Loslassen relativ große Luftmengen bewegt werden müssen. Zykluszeiten unter einer Sekunde waren deshalb im Test nur schwer erreichbar, auch bei kürzesten Wegen. Für ausreichenden Gesamtdurchsatz müssten deshalb an jeder Sortierlinie mehrere Greifer parallel arbeiten. Diese könnten zwar an einem gemeinsamen Roboterarm angebracht sein, sodass die Mehrkosten nicht allzu hoch wären, doch die benötigten Luftmengen zur Erzeugung des Unterdrucks addieren sich.

Prinzipiell ist bei diesem Vereinzelungsprinzip der Durchsatz bei gegebenem Aufbau durch die Taktzeit limitiert und kann nur durch Umbauten weiter gesteigert werden, während bei einer kontinuierlichen Sortierlösung die Abstimmung der Bandbewegungen und somit die Software eine größere Rolle spielt. Nachträgliche Optimierungen sind hier einfacher möglich.

4.5 Integration der kontinuierlichen Lösung in die Versuchsanlage

Da sich die kontinuierliche Lösung als einfacher realisierbar, weniger fehleranfällig und besser optimierbar darstellte, wurde diese vollständig aufgebaut und an die bestehende Sortieranlage angeschlossen.

4.5.1 Aufarbeitung der gebrauchten Apfel-Sortiermaschine

Als Basis der Versuchsanlage diente eine gebrauchte Sortiermaschine für Äpfel mit sieben Endstellen zzgl. Überlauf am Bandende. Die Schalengröße von ca. 8 cm x 12 cm eignete sich gut für die mittlere Größenfraktion der Verschlusskappen. Alle vorgelagerten Bauteile wie Bürsten und Rollen wurden entfernt und die ursprüngliche Detektionseinheit wurde durch zwei neue Detektionskammern für Tracerdetektion und Farbmessung ersetzt. Auch die gesamte Elektrik inklusive Steuerungseinheit wurde komplett erneuert und eine neue SPS eingebaut.

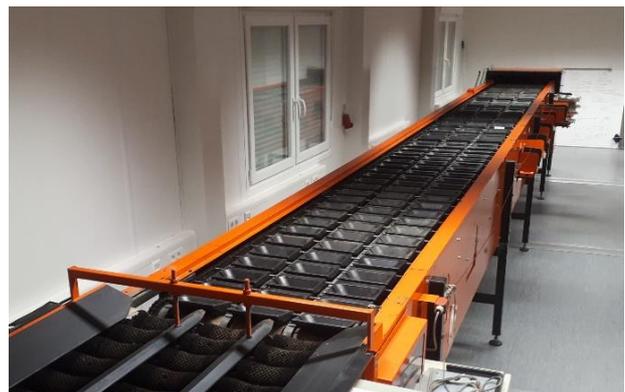


Abbildung 11: Apfelsorter vor Rückbau der Rundbürsten am Bandanfang und Aufbau der neuen Detektionshaube

4.5.2 Detektionskammern

Die Detektion von Fluoreszenzsignal und Farbe erfolgen in zwei getrennten, lichtdicht abgeschlossenen Kammern (siehe Abbildung 13), da die Tracermessung möglichst ohne Fremdlicht

erfolgen sollte, die Farbkamera jedoch ein Blitzlicht benötigt. Durch die Trennung müssen Tracerdetektor und Kamera nicht zueinander synchronisiert werden, sondern können parallel arbeiten.

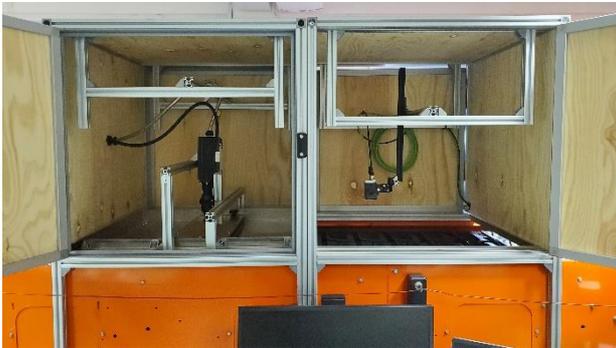


Abbildung 13: Blick in die Detektionskammern der Versuchsanlage. Links: Tracerdetektion mit Laseroptik und Detektorobjektiv. Laser und Detektor sind außerhalb der Kammer untergebracht. Rechts: Farbmessung mit Kamera

In der Tracer-Detektionskammer ist ein fasergekoppelter Infrarot-Diodenlaser verbaut, dessen Optik einen Lichtvorhang quer über eine Schale erzeugt. Das Objektiv des Detektors ist auf die gleiche Stelle ausgerichtet und nimmt das von dem beleuchteten Objekt emittierte Fluoreszenzlicht auf. Der Detektor misst die Fluoreszenzintensität in drei verschiedenen Bereichen des Spektrums, in denen die Haupt-Emissionslinien der verwendeten Tracer liegen. Durch binäre Kombination von drei Tracersubstanzen können bis zu sieben Codes unterschieden werden. Mehr Codes lassen sich erzeugen, indem man die Tracer in festgelegten Verhältnissen mischt und das Verhältnis der Intensitäten

misst. Im vorliegenden Fall ist jedoch lediglich die Verwendung von zwei verschiedenen Tracercodes vorgesehen.

Zur Farbmessung wurde eine spezialisierte Kamera der Firma Sensopart beschafft. Deren Bediensoftware erlaubt das einfache Definieren von Farbklassen, indem in den drei Farbkanälen rot, grün und blau sowie für Sättigung und Helligkeit geeignete Schwellwerte gesetzt werden. Auch komplexere Selektionskriterien wie

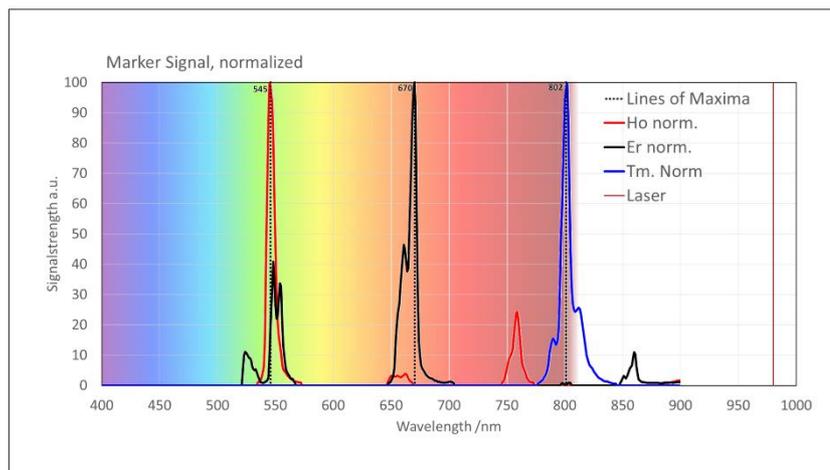


Abbildung 12: Normierte Fluoreszenzspektren der drei verwendeten Basis-Tracer. Die Anregung erfolgt mit einem Infrarot-Laser bei 980 nm, die Emission bei niedrigeren Wellenlängen (grün, rot und nahes infrarot). Die Überlappung der Peaks kann durch Kalibrierung berücksichtigt werden. Der IR-Tracer (blaue Linie) ist zu den anderen beiden disjunkt, sodass für Anwendungen mit nur zwei benötigten Informationsbits i. Allg. der IR- und einer der anderen Tracer genutzt werden sollten.

Kantenerkennung etc. können gewählt werden. Zur Beleuchtung besitzt die Kamera ein integriertes LED-Blitzlicht. Als Ausgangssignal wurde eine einfache Ausgabe von binären Codes auf drei physischen Leitungen genutzt. Diese wurden an Digitaleingänge der SPS angeschlossen, die den Binärcode auswertet. Für komplexere Datenübertragungen sind auch die üblicherweise im Anlagenbau verwendeten Kommunikationsprotokolle (PROFINET etc.) verfügbar. Mithilfe einer breiten Palette von farbigen Test-Verschlusskappen wurden die gewünschten Farbkategorien vordefiniert, d.h. das gesamte Farbspektrum in die fünf Soll-Kategorien rot,

grün, blau, weiß und transparent unterteilt. Die so ermittelten Werte wurden als Parametersatz hinterlegt.

4.5.3 Funktionsprinzip und Steuerung

Die gesamte Funktionalität ist in der zentralen SPS vereint, mit Ausnahme der Farberkennung direkt in der Kamera. An einem analogen Regler kann vom Benutzer die Geschwindigkeit des Schalenbandes eingestellt werden. Dessen Taktgeber (eine Lochscheibe mit Lichtschranke) wird von der SPS ausgelesen, um die Position jeder Schale zu erfassen. Damit kann die SPS den Anregungslaser, die Datenerfassung des Tracer-Detektors und die Kamera zum richtigen Zeitpunkt triggern. Durch die Positionsverfolgung der Schalen werden in der SPS die zeitlich getrennt erfassten Informationen von Tracerdetektor und Farbkamera derselben Schale zugeordnet. Auch die Bandgeschwindigkeiten der Vereinzelungsstrecke werden von der SPS anhand der Lichtschrankensignale an den Bändern gesteuert.

Aus den ausgewerteten und der Schale zugeordneten Messdaten wird die korrekte Endstelle für jedes Teil ermittelt und zum richtigen Zeitpunkt der entsprechende magnetische Aktor zum Abkippen der Schale angesteuert.

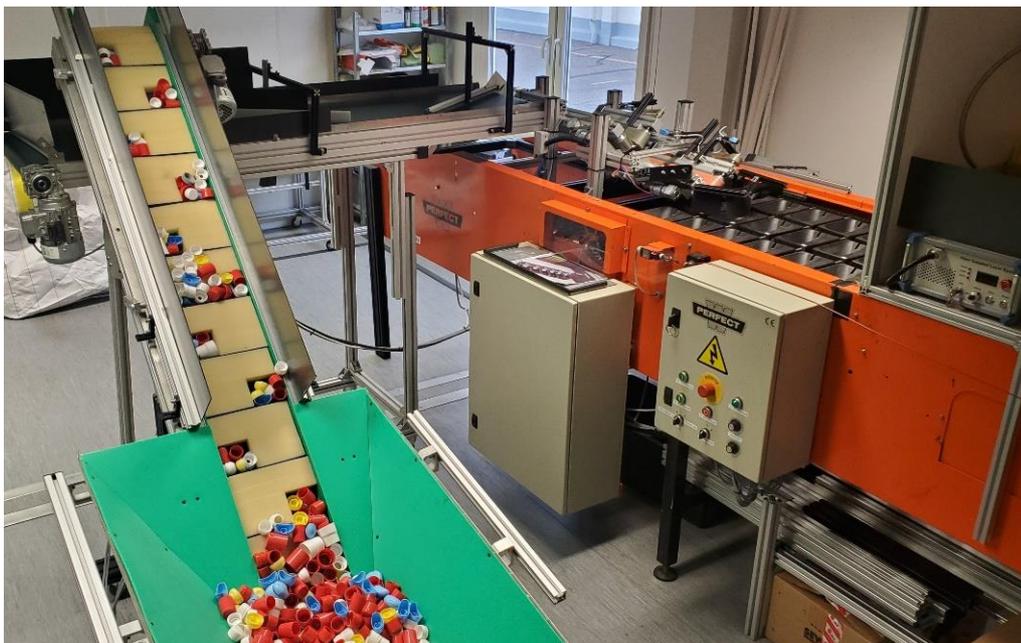


Abbildung 14: Vereinzelungsstrecke der Versuchs-Sortieranlage

Die Anlage arbeitet größtenteils automatisch. Der Benutzer muss nach Betätigen des Hauptschalters lediglich an der Sicherheitsleine ziehen, die entlang der Anlage verläuft, um die Maschine zu starten oder zu stoppen. Außerdem existiert eine einfache Benutzerschnittstelle für die SPS, die per Remoteverbindung vom PC aus erreichbar ist. Diese erlaubt das Umschalten zwischen verschiedenen Betriebsmodi, z.B. kann so zu einem Betrieb mit Handauflage ohne laufende Vereinzelungsstrecke umgeschaltet werden.

4.5.4 Sortierkapazität

Der Teiledurchsatz der Anlage konnte bestimmt werden zu 1,27 Teilen/s für eine Sortierlinie. Die Taktzeit betrug 700 ms, was einer Geschwindigkeit von 1,43 Schalen/s entspricht. Der Unterschied resultiert aus einer Rate von nicht belegten Schalen von 8,9% und einer Rate von mehrfach belegten Schalen von 2,3%. Dieser Durchsatz wurde beim optimalen Betriebszustand der Vereinzlungsstrecke erreicht, was nicht der Maximalgeschwindigkeit des Schalenbandes entspricht. Der Durchsatz kann durch Erhöhung der Geschwindigkeit auf bis zu 2,22 Schalen/s, entsprechend einer Taktrate von 450 ms, verbessert werden. Dabei steigt zwar der Anteil leerer Schalen auf 18% und der Anteil mehrfach belegter Schalen auf 3,7%. Trotz mehr Leer- und Fehlbelegungen erhöht sich jedoch der effektive Teiledurchsatz auf 1,75 Teile/s, also um ca. 40%.

Ein wesentlicher Faktor der zunehmenden Fehlerrate bei höheren Geschwindigkeiten sind die größeren Beschleunigungen, die auf die Objekte wirken. Wegen der Massenträgheit und der Elastizität der Verschlusskappen wird das Verhalten in der Vereinzlungsstrecke, besonders beim schnellen Start-Stop-Betrieb der V-Bänder, unberechenbarer. Dem kann mit optimierter Ablaufsteuerung entgegengewirkt werden, indem die Anlage die Verteilung der Verschlusskappen auf dem Band genauer überwacht, nötige Geschwindigkeitsanpassungen früher antizipiert und dadurch mit geringeren Beschleunigungen und „weicheren“ Bewegungsabläufen arbeitet. Weitere Optimierungen sind hier sicherlich möglich.

5 Untersuchung der Tracersignal-Pigmentierungs-Abhängigkeit

5.1 Physikalische Grundlagen

Farbpigmente absorbieren und/oder streuen einen Teil des Lichts, das auf sie fällt. Dies geschieht für verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark, woraus der sichtbare Farbeindruck entsteht. Bei der Detektion der Tracer-Codes tritt das Licht eines Lasers im nahinfraroten Bereich in das Material ein, wird von den Tracer-Partikeln absorbiert und umgewandelt und wird dann mit einer anderen Wellenlänge wieder abgestrahlt. Sowohl auf dem Einfallsweg als auch auf dem Austrittsweg findet Absorption und Streuung in unterschiedlichem Maß statt.

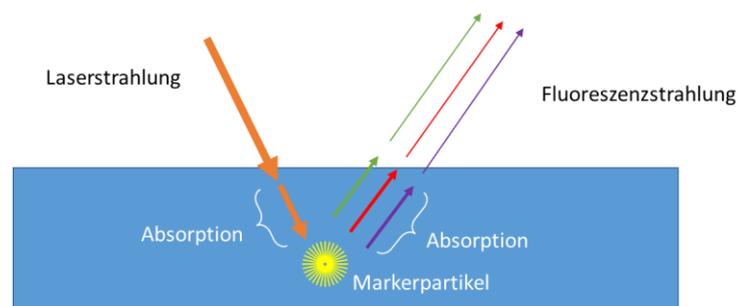


Abbildung 15: Schema der Abschwächung von Laser- und Fluoreszenzstrahlung in absorbierenden Materialien

Anhand der Messung eines Reflexionsspektrums der diffusen Reflexion unter definierter, breitbandiger Beleuchtung kann dieses wellenlängenabhängige Verhalten untersucht werden. Ist der Reflexionsgrad bei der Laserwellenlänge niedrig, dringt das Licht ins Material ein und wird absorbiert. (Wir gehen hier von bei ausreichend dicken und optisch dichten Objekten aus, sodass der Anteil der Transmission zu vernachlässigen ist.) Eine hohe Absorption bewirkt eine geringere auf die Tracerpartikel einwirkende Anregungs-Leistungsdichte. Daher ist in diesem Fall die Fluoreszenz aller Tracerlinien reduziert. Bei hohem diffusem Reflexionsgrad findet viel Streuung und wenig Absorption im Material statt, somit ist die Anregungsdichte höher. Ist bei einer der Fluoreszenzwellenlängen der Reflexionsgrad niedrig, wird das Fluoreszenzlicht des entsprechenden Tracers teilweise absorbiert und die Intensität dieser Linie ist reduziert. Somit sollte ein gemessenes Fluoreszenzspektrum mit dem Reflexionsspektrum skalieren.

5.2 Probenherstellung

Gemäß Projektplan war vorgesehen, die Untersuchungen an einem hinreichend großen Konvolut markierter Verschlusskappen durchzuführen, um eine belastbare Statistik über verschiedene Größen, Geometrien, Oberflächenstrukturen und Farben erstellen zu können. Um vergleichbare Messungen durchzuführen und im Vorfeld einen besseren Anhaltspunkt für die Markierung der Verschlusskappen zu erhalten, wurden jedoch Proben gleicher Oberflächenbeschaffenheit benötigt.

Als schnelle Lösung wurden zunächst Walzfelle aus eingeschmolzenen Verschlusskappen hergestellt. Hierzu wurden einige Teile aus dem Probenkonvolut der Vereinzelungsversuche klein

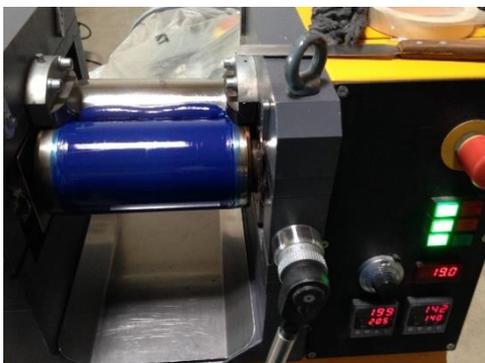


Abbildung 16: Walzenstuhl zur Herstellung von Walzfellen

geschnitten und auf einem Walzenstuhl aufgeschmolzen (siehe Abbildung 16). Zuerst wurden auf Basis von farblosen Artikeln drei sog. Tracer-Batches hergestellt, indem der Schmelze die drei Basis-Tracer in Pulverform in hoher Konzentration zugesetzt wurden. Diese Tracer-Batches wurden dann in unterschiedlichen Mengen den farbigen Ansätzen zugesetzt, um unterschiedlich hoch konzentrierte Proben zu erhalten. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Schmelz- und Fließverhalten unterschiedlicher Artikeltypen aufgrund unterschiedlicher Materialzusammensetzung und Additive zu unterschiedlich für eine reproduzierbare Oberfläche war. Deshalb musste dieser Ansatz wieder verworfen werden. Die Vermessung der Walzfelle konnte jedoch einen ersten Anhaltspunkt für die geeignete Tracer-Dosierung der folgenden Proben geben.

Bei Polysecure ist eine Spritzgießmaschine verfügbar, die mit einem Werkzeug für runde Plättchen mit 39 mm Durchmesser und 3 mm Dicke ausgestattet werden kann. Damit wurden Testplättchen mit verschiedenen Pigment- und Tracerkonzentrationen hergestellt (siehe Abbildung 17). Zunächst wurden dafür Tracer-Batches nach dem bei Polysecure etablierten Produktionsprozess hergestellt. Dabei wird das Tracer-Pulver zusammen mit Haftvermittler auf Kunststoffgranulat aufgetrommelt. Danach wird das Material extrudiert, d.h. aufgeschmolzen und zu einem dünnen Strang gepresst. Bei diesem Prozess werden die Tracerpartikel im Material homogen verteilt. Der Strang wird wiederum zu neuem Granulat zerkleinert. Dieses Tracer-Batch wird zusammen mit dem Farbbatch beim Spritzgießprozess zum Grundmaterial (hier Polypropylen (PP)) zudosiert. Um in allen Kanälen ein Signal zu erhalten, wurden alle drei Tracer zu gleichen Anteilen zudosiert.



Abbildung 17: Testplättchen in verschiedenen Farben und Tracerkonzentrationen

5.3 Reflexions- und Fluoreszenzspektroskopie

5.3.1 Spektroskopie-Messplatz

Für die Messung der Reflexions- und Fluoreszenzspektren wurde ein Messplatz mit Hyperspektralkamera verwendet (siehe Abbildung 18). Die Probe wird mit einer breitbandigen Halogenlampe beleuchtet. Der Winkel der Lampe zur Vertikalen beträgt ca. 8°, die Kamera ist unter einem Winkel von 0° montiert. Damit wird bei einer horizontalen Probenoberfläche nur die diffuse Reflexion ohne gerichtete (spiegelnde) Reflexion aufgenommen. Die Kamera kann orts aufgelöst über eine Linie das Spektrum im sichtbaren und nahinfraroten Bereich an jedem Punkt der Linie messen. Durch Verfahren der Probe ist es möglich, spektral aufgelöste Bilder aufzunehmen. Für die vorliegenden Messungen wurde jedoch nur ein Spektrum pro Probe benötigt, sodass stationär gemessen und über fünf Punkte auf der Linie gemittelt wurde.

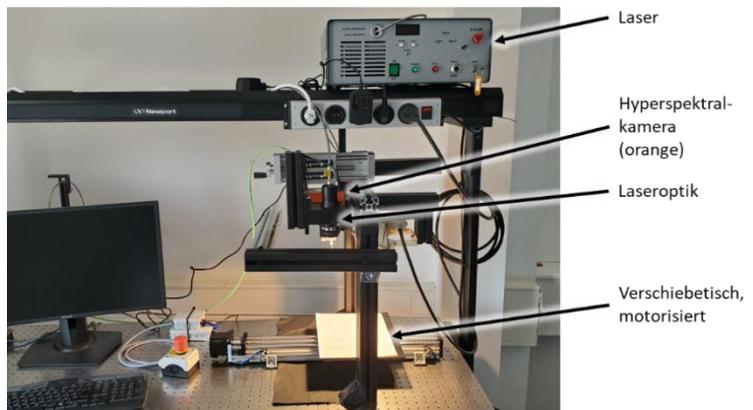


Abbildung 18: Spektroskopie-Messplatz

Die Messung liefert zunächst das Reflexionsspektrum der Halogenlampe auf der Probe. Außerdem werden ein Dunkelspektrum und das Spektrum einer Weißreferenz aufgenommen. Das Dunkelspektrum wird vom Messsignal subtrahiert, um eventuelles Fremdlicht und einen Offset der Kamera zu eliminieren. Zur Bestimmung des Reflexionsgrades wird dann das Verhältnis des korrigierten Signals zur Weißreferenz berechnet. Dies ergibt den Anteil von reflektiertem zu eingestrahlttem Licht, unabhängig von der spektralen Charakteristik der Beleuchtung.

An diesem Messplatz ist außerdem ein Infrarot-Laser angebracht, der genau die Sichtlinie der Kamera beleuchtet. Damit kann mit der Hyperspektralkamera bei ausgeschalteter externer Beleuchtung auch das Spektrum der Tracer-Fluoreszenz aufgenommen werden.

5.3.2 Ergebnisse

Die erwartete Korrelation zwischen Reflexions- und Fluoreszenzspektrum konnte gezeigt werden. Insbesondere bei den Tracerlinien im sichtbaren Bereich (rot und grün) ist der abschwächende Effekt mancher Farbpigmente wie zu erwarten sehr stark (Beispiel siehe Abbildung 19). Die Linie im IR-Bereich (802 nm) ist im Allgemeinen deutlich weniger betroffen. Außerhalb des sichtbaren Bereichs nimmt die Absorption vieler Pigmente offenbar deutlich ab. Bei vielen Farben ist nur eine der beiden VIS-Tracerlinien stark betroffen, nur selten beide. Daraus folgt, dass eine Kombination zweier Tracer mit gemeinsamer Auswertung beider Linien den Absorptionseffekt bei vielen Farben teilweise ausgleichen kann (siehe Abschnitt 5.4.2, Datenanalyse, „Kombinierter“ Tracer).

Allerdings waren die Ergebnisse nicht geeignet, quantitative Beziehungen mit einer Genauigkeit herzuleiten, die eine direkte Vorhersage der benötigten Tracermengen ermöglichen würde. Es ist lediglich möglich, eine ungefähre Abschätzung zu treffen. Insbesondere „kritische Fälle“, d.h. Farbpigmente, die besonders hohe Konzentrationen für bestimmte Tracer erfordern, können identifiziert werden. Eine Messung binärer Tracercodes ist mit einer so abgeschätzten Konzentration möglich, die Feineinstellung kann dann davon ausgehend anhand der im Betrieb gemessenen Tracerintensität erfolgen.

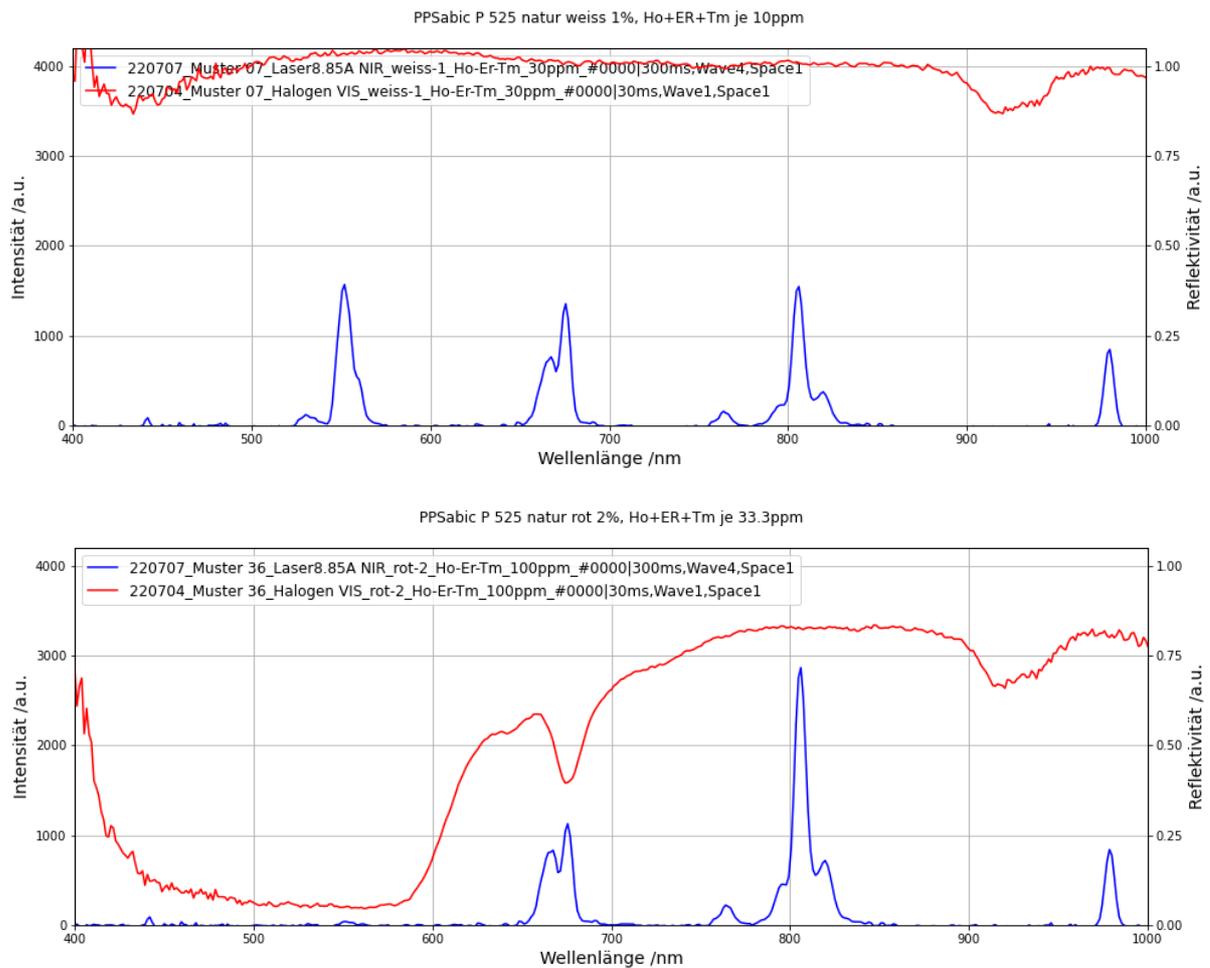


Abbildung 19: Reflektivitäts- (rot) und Fluoreszenzspektrum (blau) einer weißen Probe (oben) und einer roten Probe (unten). Die grüne Fluoreszenzlinie (545 nm) wird stark unterdrückt, die rote (670 nm) teilweise, die infrarote (802 nm) kaum. Peak rechts: gestreute Strahlung des Anregungslasers

Für die Ungenauigkeit der Messung kommen mehrere Ursachen in Betracht: Die Verteilung sowohl der Farbpigmente als auch der Tracer im Material ist nicht zwingend völlig homogen. Die Abweichungen hängen von der Konzentration der Batche, der Menge der Zudosierung und von Größe, Form und Materialeigenschaften der Granulate ab. Somit unterliegen sowohl Reflexions- als auch Fluoreszenzspektrum einer gewissen intrinsischen Ungenauigkeit. Außerdem registriert die Hyperspektralkamera nur das in den Winkelbereich des Objektivs gestreute Licht und integriert nicht über den gesamten Raumwinkel, wie es bei einer Messung mit Ulbrichtkugel der Fall wäre. Deshalb sind die Ergebnisse nur bei einer hinreichend Lambert'schen Abstrahlcharakteristik korrekt. Bei einem stark winkelabhängigen Streuquerschnitt können Abweichungen auftreten. Der Einfluss der genannten Störgrößen wird von Polysecure weiter untersucht, um die Methode der Konzentrationsvorhersage zu verbessern.

Die Messmethode mit Hyperspektralkamera statt Ulbrichtkugel wurde vor dem Hintergrund gewählt, dass diese Art der Messung meist in konventionellen Sortieranlagen für Verpackungsabfälle implementiert ist (hier im NIR-Bereich), um die Kunststoffsorten (Hauptpoly-

mere) voneinander zu trennen. Ein solches System könnte auch in einer SORT4CIRCLE-Sortieranlage ergänzend zum Tracer-Based-Sorting eingesetzt werden, sodass dann ein System zur Inline-Messung von Reflexionsspektren bereits vorhanden wäre. Anhand der Messdaten könnten iterativ Optimierungen der Tracerkonzentration erfolgen und/oder die Auswertung der Fluoreszenzsignale für genauere Ergebnisse kalibriert werden.

5.4 Bestimmung der minimalen Tracerkonzentration

5.4.1 Proben und Messaufbau



Abbildung 20: ausgewählte Testplättchen und Verschlusskappen für die Messungen

Um die minimal erforderliche Tracerkonzentration je Farbe mit belastbarer Genauigkeit zu bestimmen, wurden die Testplättchen an einem Laboraufbau vermessen, an dem die gleiche Anregungs- und Detektions-Messtechnik installiert ist, die auch in der Pilotanlage zum Einsatz kommt. Hier kommt kein Spektrometer als Detektor zum Einsatz, sondern ein System aus hochempfindlichen Fotodioden und vorgeschalteten optischen Filtern. Die Filter selektieren die Spektralbereiche der drei Tracerwellenlängen,

sodass die Detektoren die Intensität je eines Tracersignals registrieren. Detektorsensitivität und -charakteristik dieses Aufbaus sind mit der späteren Sortieranlage vergleichbar. Es wurde lediglich ein zusätzlicher ND1-Filter (Neutraldichtefilter mit Faktor 10 Abschwächung) benutzt, da die Helligkeit mancher Proben den Messbereich überschritt. Die Proben wurden auf einer Drehscheibe montiert, um die Messung in Bewegung analog zur Sortieranlage durchzuführen. Zum Vergleich wurde diese Messung auch für einige markierte Verschlusskappen durchgeführt, die noch von der vorausgegangenen Machbarkeitsstudie vorhanden waren.



Abbildung 21: Messaufbau mit Drehscheibe. Linkes Bild: Verschlusskappen. Rechtes Bild: Farbplättchen, rechts oben: Laseroptik mit Lichtleitfaser. Rechts, Mitte: Objektiv des Detektormoduls

5.4.2 Datenanalyse, „Kombinierter“ Tracer

Die Daten dieser Messung zeigen analog zur spektralen Messung in Abschnitt 5.3.2 die starke Farbabhängigkeit der Tracersignale, insbesondere im VIS-Bereich. Bei vielen Farben ist entweder die rote oder die grüne Linie stark unterdrückt, nur bei blau und lila sind beide Linien be-

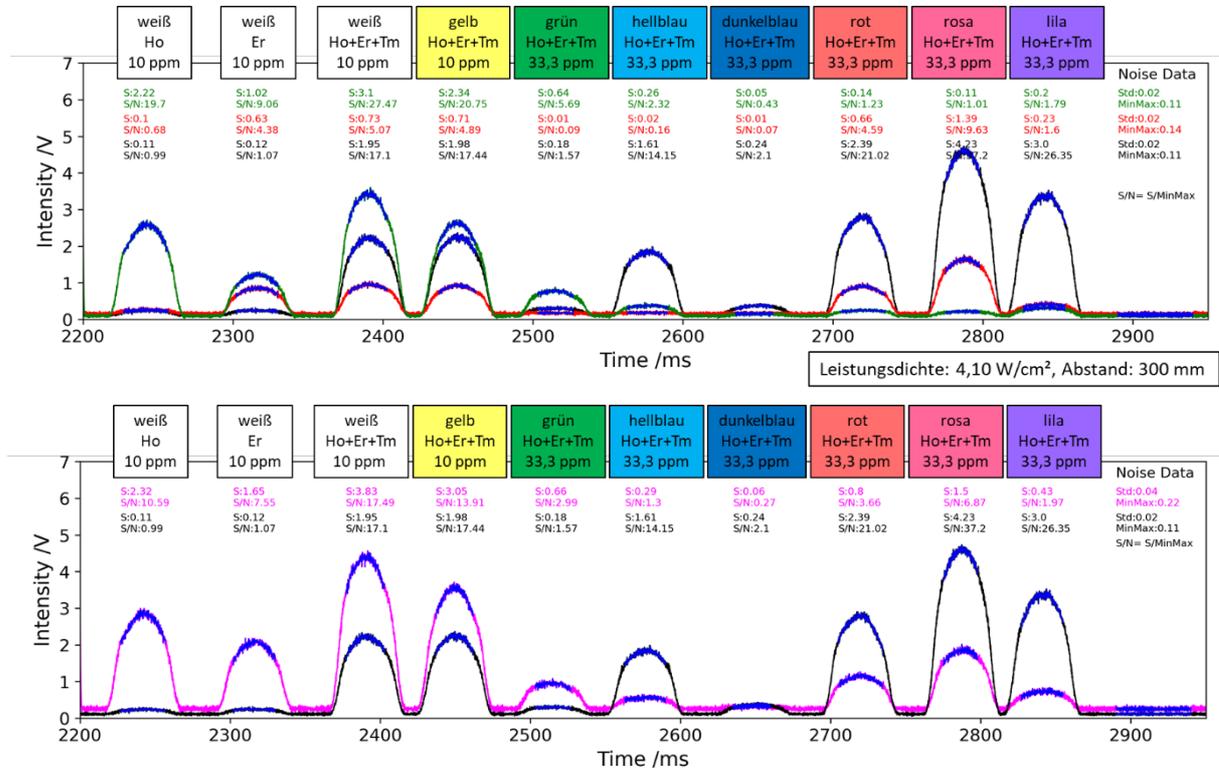


Abbildung 22: Oben: Intensitätsverlauf einer Fluoreszenzmessung an Testplättchen auf der Drehscheibe. Beim Durchlaufen des Laservorhangs entsteht für jede Probe ein Puls auf der Zeitachse, für die drei Messkanäle grün, rot und IR (schwarze Linie). Für jeden Puls sind Signalstärke (mittlere Intensität über den jew. blau markierten Bereich, nach Abziehen des Untergrunds) und S/N-Verhältnis angegeben. Das Untergrund- und Rauschniveau wurde in dem markierten Bereich ganz rechts gemessen. Unten: gleicher Intensitätsverlauf, jedoch mit rotem und grünem Kanal addiert (pinkfarbene Linie). Signalstärken und S/N-Werte sind für das kombinierte Signal berechnet.

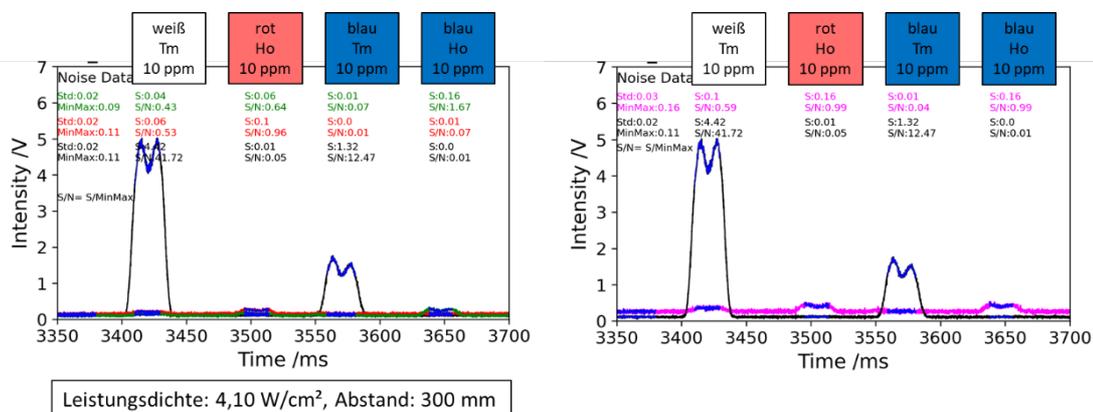


Abbildung 23: Fluoreszenzintensität für die in Abbildung 20 gezeigten Verschlusskappen. Links: Originaldaten. Rechts: Grüner und roter Kanal addiert. In diesen Proben ist jeweils nur ein Tracer enthalten. Trotzdem hat die Addition einen Effekt, da der hauptsächlich „grüne“ Ho-Tracer auch im roten Kanal einen niedrigen Nebenpeak hat.

troffen. Bei blau und grün ist außerdem die IR-Linie relativ stark abgeschwächt. Über die absoluten Signalstärken, d.h. die Frage der Messbarkeit kann hier noch keine Aussage getroffen werden, hierfür siehe nächsten Abschnitt.

Wegen der variablen Abschwächung im VIS-Bereich ist weder der grüne noch der rote Tracer dazu geeignet, Artikel aller Farben mit niedriger Konzentration zu markieren. Um das Problem zu umgehen, können die beiden Tracer mit roter und grüner Haupt-Fluoreszenzlinie gemischt und als „kombinierter“ Tracer verwendet werden. Der rote und grüne Kanal würden dann addiert ausgewertet. Dies kann durch einfache Änderung der Filterkonfiguration des Sensormoduls geschehen. Da bei der vorgesehenen Anwendung nur zwei der drei vorhandenen Informationsbits benötigt werden, ist dieses Vorgehen möglich. Bei diesem Verfahren ist bei fast allen Farben das S/N-Level so weit verbessert, dass die Tracerkonzentration nicht oder nur wenig erhöht werden müsste. Lediglich bei sehr dunklen Blau- und Grüntönen sind beide Linien so stark unterdrückt, dass die Tracerkonzentration erheblich erhöht werden muss. Technisch noch effektiver wäre die Herangehensweise, nur den jeweils weniger beeinflussten Tracer zu verwenden und den stärker unterdrückten ganz wegzulassen. Dieses Verfahren würde das S/N-Verhältnis weiter verbessern und damit Tracerkosten einsparen, erzeugt aber zusätzlichen logistischen Aufwand, da stets ein weiteres Tracer-Batch vorgehalten und je nach Farbe das Richtige zudosiert werden muss. Die Verwendung eines gemischten Batchs dürfte hier die bevorzugte Lösung sein.

5.4.3 Berechnung der minimalen messbaren Tracerkonzentration

Um Vergleichbarkeit zwischen dem Labormessplatz und der Sortieranlage herzustellen, müssen die gemessenen Werte zunächst geeignet skaliert werden. Die Konzentration von Tracer 1 (der „kombinierte“ Tracer) ist die Summe aus den Konzentrationen des „grünen“ und „roten“ Tracers und muss daher verdoppelt werden. Die S/N-Werte werden mit einem Skalierungsfaktor von 18 beaufschlagt. Dessen Herleitung ist im Anhang beschrieben. Als Kriterium für ausreichende Detektierbarkeit wurde ein minimales Signal-zu-Rauschen-Verhältnis (S/N) von 4 angesetzt. Dies berücksichtigt einen gewissen Puffer für veränderte Messbedingungen oder Dosierungsschwankungen im späteren Einsatz. Aus den gemessenen Signalstärken (S/N-Verhältnissen) bei bekannter Konzentration können dann nach der Formel

$$\text{Ziel-Tracerkonzentration} = \frac{\text{Ziel-S/N-Wert} \cdot \text{Proben-Tracerkonzentration}}{\text{skaliertes gemessenes S/N-Wert}}$$

die Grenzkonzentrationen für ein Ziel-S/N von 4 berechnet werden (siehe Tabelle 3).

Für Tracer 2 – und bei hellen, schwach absorbierenden Farben auch für Tracer 1 – ist die noch verlässlich messbare Tracerkonzentration mit unter 1 ppm so niedrig, dass die praktisch realisierbare minimale Konzentration durch die Zudosierung im Spritzgießprozess limitiert werden dürfte, ab der noch eine ausreichend homogene Verteilung im Material sichergestellt werden kann. Ob Konzentrationen unter 3 ppm verlässlich realisiert werden können, ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Farbe	Tracerkonz. Tracer 1	S/N Tracer 1 (skaliert)	Ziel-Konz. Tracer 1	Tracerkonz. Tracer 2	S/N Tracer 2 (skaliert)	Ziel-Konz. Tracer 2
weiß	20 ppm	314,82	0,3 ppm	10 ppm	307,80	0,1 ppm
gelb	20 ppm	250,38	0,3 ppm	10 ppm	313,92	0,1 ppm
grün	66,6 ppm	52,82	4,9 ppm	33,3 ppm	28,26	4,7 ppm
hellblau	66,6 ppm	23,40	11,4 ppm	33,3 ppm	254,70	0,5 ppm
dunkelblau	66,6 ppm	4,86	54,8 ppm	33,3 ppm	37,80	3,5 ppm
rot	66,6 ppm	65,88	4,0 ppm	33,3 ppm	378,36	0,4 ppm
rosa	66,6 ppm	123,66	2,2 ppm	33,3 ppm	669,60	0,2 ppm
lila	66,6 ppm	35,46	7,5 ppm	33,3 ppm	474,30	0,3 ppm
Mittelwert			8,6 ppm			1,4 ppm
Mittelwert Tracer 1 und 2				5,0 ppm		

Tabelle 3: Minimal messbare Tracerkonzentrationen, aus Messungen an Testplättchen

Die analoge Auswertung für die markierten Verschlusskappen ist in Tabelle 4 dargestellt. Diese Proben sind nur mit je einem Tracer markiert und mit geringerer Konzentration. Der Skalierungsfaktor beträgt hier 2, siehe ebenfalls im Anhang.

Farbe	Tracerkonz. Tracer 1	S/N Tracer 1 (skaliert)	Ziel-Konz. Tracer 1	Tracerkonz. Tracer 2	S/N Tracer 2 (skaliert)	Ziel-Konz. Tracer 2
weiß	0 ppm	1,18		10 ppm	83,44	0,5 ppm
rot	10 ppm	1,98	20,2 ppm	0 ppm	0,10	
blau	0 ppm	0,08		10 ppm	24,94	1,6 ppm
blau	10 ppm	1,98	20,2 ppm	0 ppm	0,02	
Mittelwert			20,2 ppm			1,0 ppm
Mittelwert Tracer 1 und 2				10,6 ppm		

Tabelle 4: Minimal messbare Tracerkonzentrationen, aus Messungen an Verschlusskappen

Zur Vereinfachung wurden aus den Daten über alle Farben und beide Tracer gemittelte Tracerkonzentrationen berechnet. Allerdings können diese nur als grober Richtwert betrachtet werden. Die tatsächliche mittlere Konzentration im Sortierbetrieb und damit der Tracerbedarf hängt stark von der Zusammensetzung des Sortierguts ab. Für eine genauere Aussage müssten die Farben der zu sortierenden Artikel und deren relative Massenanteile am Sortiergut bekannt sein. Hinzu kommt wie oben erwähnt eine durch die Mischbarkeit definierte, ebenfalls nicht genau bekannte Untergrenze. Auf der anderen Seite sind bereits weitere Verbesserungen der Messtechnik in der Entwicklung, die die Sensitivität der Detektion weiter erhöhen werden und damit den Tracerverbrauch besonders bei dunklen Farben reduzieren werden.

Die folgende Schätzung der mittleren Tracerkonzentration, die auch in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einging, beruht daher nicht auf mathematischen Berechnungen, sondern berücksichtigt die obigen Überlegungen, sowie Erfahrungen mit Markierungskampagnen aus anderen Projekten.

Die mittlere Tracerkonzentration konnte anhand der Projektergebnisse im Vergleich zur vorherigen Schätzung nach unten korrigiert werden. Für ein „buntes“ Portfolio inklusive dunkler Farbanteile wurde sie zuvor mit 15 ppm abgeschätzt. Nach Auswertung der Messdaten konnte der Wert auf 10 ppm reduziert werden. Unter Bewertung weiterer Entwicklungen bis zum Bau der Pilotsortieranlage ist eine **weitere Reduzierung auf 8 ppm realistisch**.

5.5 Inline-Farbmessung im Vergleich zur spektroskopischen Messung

Im Gegensatz zur obigen Aufgabenstellung wird für die reine Messung einer Farbe keine spektral aufgelöste Messung benötigt. Die in der Versuchsanlage eingebaute Farbmesskamera enthält deshalb nur einen klassischen Siliziumchip mit Bayer-Filter, der in den drei Farbbereichen rot, grün und blau orts aufgelöst Intensitäten detektiert. Für die Farbdarstellung und somit auch für die Sortierung nach Farben reicht dieses sog. Dreibereichsverfahren völlig aus. Die Zusammenfassung in Farbkanälen ermöglicht vielmehr ein einfacheres Festlegen von Intervallgrenzen. Diese Kamera hat den Vorteil eines sehr viel niedrigeren Preises, eignet sich aber nicht für die oben beschriebenen Kalibrierungsmessungen.

5.6 Mögliche weitere Schritte zur Verbesserung der Tracerkonzentrations-Vorhersage

Da mit den Testplättchen eine einfache Möglichkeit gefunden wurde, Erkenntnisse zur Pigment-Tracer-Korrelation zu gewinnen, wurde die im Projektantrag vorgesehene umfangreiche Kampagne zur Herstellung markierter Verschlusskappen zunächst zurückgestellt. Auf Basis der Testplättchen-Messungen sollte die Produktionskampagne mit optimierten Tracerkonzentrationen durchgeführt werden. Ein Produktionsplan wurde zwar bereits aufgesetzt und abgestimmt, jedoch kam es aufgrund von Kapazitätsengpässen nicht mehr zur Umsetzung innerhalb der Projektlaufzeit. Das Unternehmen wurde jedoch nicht aufgegeben und wird möglicherweise in reduzierter Form noch umgesetzt. Die Verschlusskappen würden einen realen Demobetrieb und die Erstellung einer Sortierstatistik ermöglichen.

6 Wirtschaftlichkeitsanalyse der Sortierlösung

Um die Wirtschaftlichkeit von Installation und Betrieb einer SORT4CIRCLE-Sortierung zu berechnen, konnten die im Projekt ermittelten Daten zur Tracerkonzentration und die Kosten der Vereinzelungslösung herangezogen werden. In Abstimmung von Menshen und Polysecure wurden mehrere Szenarien für eine Pilotanlage entwickelt:

- 1) Sortieranlage auf Basis eines Schalenbands mit 3, 4 und 5 parallelen Linien
- 2) Sortieranlage auf Basis eines Stollenbands mit einer Linie, aber höherem Durchsatz
- 3) Aufrüstung der vorhandenen Versuchsanlage für den industriellen Einsatz, 3 Linien

Alle Szenarien wurden mit einer mittleren Tracerkonzentration von 8 ppm berechnet.

Für die Sortiergüte, d.h. den Anteil des korrekt sortierten und somit recyclebaren Materials wurden 95% angesetzt. Die Ausschussquote der Sortierung wird hauptsächlich durch mehrfach belegte Schalen bestimmt, deren Anteil in Abschnitt 4.5.4 zu 2,3% bestimmt wurde. Außerdem geht die Fehlerquote der Tracermessung ein, die aber bei richtig eingestellter Tracerkonzentration erfahrungsgemäß bei <1% liegt. Zur Qualität der Farbmessung kann keine genaue Aussage getroffen werden, da diese von der späteren Zusammensetzung des Sortierguts (Farbanteile) und der Optimierung der Klassifizierungskriterien auf dieses Sortiergut abhängt. Eine Worst-Case-Abschätzung von 2% erscheint aufgrund der Erfahrungen im Testbetrieb realistisch. Bei der Sortierung selbst, d.h. der Ausschleusung der Teile, können bei einem Schalenband praktisch keine Fehler mehr passieren. Damit ergibt sich eine Gesamt-Fehlerquote von ca. 5%.

Bei der Durchsatzberechnung wurde vorgesehen, den Rest-Anteil von 5% ein zweites Mal durchzusortieren. Dies reduziert den Gesamtdurchsatz entsprechend um 5%, aber dafür kann ein erheblicher Teil der Fehler durch Nachmessen behoben werden. Dennoch wurde die Sortiergüte bei 95% belassen, da keine Aussagen über den Anteil behebbarer Fehler vorliegen. Für genauere Aussagen zur Sortiergüte müsste eine repräsentative Sortierstatistik mit realen Teilen durchgeführt werden.

Für die Schätzung der Investitionskosten der Lösungen wurde sowohl eine Bottom-Up-Kalkulation der Kosten für Komponenten und Entwicklungsaufwand aufgestellt als auch Gespräche mit einem Anlagenbauunternehmen aufgenommen mit dem Ziel, die gesamte Fördertechnik für die Pilotanlage aus einem Guss konstruieren und fertigen zu lassen.

Bei der technischen Umsetzung von Szenario 1 und 3 wurde von einem um 20% steigerbaren Durchsatz im Vergleich zum erreichten Projektstand ausgegangen. Dies entspricht einem ef-



Abbildung 24: 3D-Entwurf einer SORT4CIRCLE®-Sortieranlage für Verschlusskappen, bestehend aus Hochförderung aus dem Bunker, Vereinzelungsstrecke mit Teilparallelisierung, zwei Detektionskammern und Sortierband mit Druckluftdüsen zum Abblasen der Teile in Sammelboxen

effektiven Durchsatz von 1,52 Teilen/s pro Linie oder ca. 125 t/a. Szenario 2 umfasst eine alternative Lösung für das Sortierband: Statt kippbaren Schalen kommt ein flaches Stollenband zum Einsatz, in dessen Unterteilungen die Objekte gefördert werden (siehe Abbildung 24). Aus dem Band können die Teile mit Druckluft sehr schnell in Auffangtrichter abgeblasen werden. Im Gegensatz zur langsamen Mechanik der Schalen, welche die Maximalgeschwindigkeit begrenzt, könnte eine Abblas-Lösung wesentlich schneller gefahren werden. Die mögliche Geschwindigkeit wurde hier mit bis zu 5,0 Teilen/s abgeschätzt, oder 410 t/a.

Um die avisierte Jahresmenge von 350 t sortieren zu können, wären bei Szenario 1 mindestens 3 parallele Sortierlinien erforderlich, während Szenario 2 mit einer einzigen Linie auskäme.

Die Szenarien 1 und 2 wurden jeweils mit 15 Endstellen berechnet, gemäß der geforderten Anzahl an Fraktionen. Bei Szenario 3 müssten, da die Versuchsanlage nur 7 Endstellen hat, für eine vollständige Sortierung nach allen 15 Fraktionen drei aufeinanderfolgende Durchgänge durchgeführt werden, wobei bei jedem Durchgang nach anderen Kriterien sortiert wird. Wird dabei zuerst nach den häufigsten Fraktionen sortiert, sodass der Materialstrom für Durchgang 2 und 3 möglichst klein wird, muss mit einer Mehrbelastung der Linie von ca. 50% gerechnet werden. Da die effektiv sortierbare Tonnage entsprechend sinkt, wäre Szenario 3 nur in der Lage, ca. 56% der geschätzten anfallenden Ausschussmenge zu verarbeiten. Unter der Voraussetzung, dass trotzdem die gesamte Artikelproduktion markiert werden muss, ist deshalb mit dieser Variante kein wirtschaftlicher Betrieb darstellbar. Trotzdem kann diese Lösung sinnvoll anwendbar sein, falls z.B. bestimmte Teilströme besonders wertvoller Materialien identifiziert werden können, und falls es organisatorisch möglich ist, nur diese zu markieren und der Sortierung zuzuführen. In diesem Fall wäre die Anlage ein günstiger Einstieg in die Technologie.

Die beiden „Vollausstattungs“-Szenarien sind bei den angenommenen Randbedingungen beide wirtschaftlich betreibbar. Szenario 1 mit 3 Linien hat eine Amortisationszeit (Return-of-Invest, ROI) von 8,2 Jahren. Mit zusätzlichen Linien steigt die Kapazitätsreserve, der ROI (bei gleichbleibender Tonnage) steigt jedoch ebenfalls. Den besten ROI hat Szenario 2 mit nur 6,4 Jahren, bei zusätzlich etwas geringeren Investitionskosten.

Allen Berechnungen liegen Annahmen über die zu sortierenden und zu markierenden Mengen, die Neumaterialpreise und die erzielbaren Preise beim Recycler für den Ausschuss zugrunde. Starke Änderungen bei diesen Randbedingungen können die Ergebnisse trotz der durch dieses Projekt verbesserten Kenntnis über technologische Risikofaktoren deutlich verschieben.

7 Fazit

Ziel des Förderprojekts war es, eine Grundlage für die betriebswirtschaftliche Entscheidung zu legen, die SORT4CIRCLE®-Technologie für das In-House-Recycling von Produktionsausschuss einzusetzen. Hierfür wurden technische und wirtschaftliche Risikofaktoren untersucht und ausgeräumt oder besser einschätzbar gemacht. Somit konnte das Ziel erreicht und die Basis für weitere Schritte zur Umsetzung gelegt werden.

Mit der Integration von Vereinzelung, Tracerdetektion, Farbmessung und gesteuerter Ablage anhand der gemessenen Informationen konnte der gesamte für Menshen vorgesehene Sortierprozess im Technikumsmaßstab demonstriert werden. Eine Hochskalierung ist problemlos möglich.

Die Projektarbeiten konnten innerhalb des Zeitrahmens von 12 Monaten erfolgreich abgeschlossen werden. Lediglich die Validierung von Tracerkonzentrations-Berechnung und Sortiergüte an realen Artikeln und der optional geplante Test einer Beimischung von Tracern in die üblicherweise verwendeten Farbbatche direkt beim Hersteller wurden nicht mehr durchgeführt. Für eine betriebswirtschaftliche Bewertung der Sortiertechnologie ist beides jedoch nicht zwingend erforderlich. Das Projekt konnte im Rahmen des geplanten und bewilligten Budgets bearbeitet werden. Aufgrund der entfallenen Verschlusskappen-Herstellungskampagne fiel der finanzielle Aufwand bei Menshen sogar geringer aus als geplant.

Im Falle einer Beauftragung der avisierten Pilot-Sortieranlage durch Menshen kann diese Anlage als Referenz für die erste industrielle Anwendung des SORT4CIRCLE-Prinzips dienen. Von der Demonstration einer Anlage im Industriemaßstab erwarten wir weitere Impulse und einen Schub für die Verbreitung der Technologie in weiteren Märkten, insbesondere im Bereich der Sortierung von Verpackungsmüll aus den Dualen Systemen. In wissenschaftlich-technischer Hinsicht hat das Projekt viele Fortschritte, Erkenntnisse und neue Ideen hervorgebracht, die die Weiterentwicklung der Technologie bei Polysecure voranbringen. So entwickelt Polysecure derzeit in Kooperation mit ZEISS eine SORT4CIRCLE®-Sortieranlage im Technikumsmaßstab für Verpackungsabfälle aus dem Gelben Sack. Die Vereinzelung und Sortierung dieses noch viel heterogeneren Materialstroms ist eine Herausforderung, in die auch die gesammelten Erfahrungen bei der Vereinzelung und Sortierung von Verschlusskappen einfließen und weiterverwendet werden.

8 Anhang: Bestimmung der Skalierungsfaktoren in Abschnitt 5.4.3

Für Testplättchen:

- Messung mit ND1-Filter (Abschwächung um eine Größenordnung) → Faktor 10.
 Durch den Filter wird nicht nur das Signal, sondern auch das Rauschniveau etwas abgeschwächt (jedoch nur der Teil, der durch Falschlicht verursacht wird, nicht der Offset durch die Verstärkerelektronik).
 Reduziere daher den Faktor auf **9**.
 - Der Messabstand betrug am Labormessplatz aus geometrischen Gründen 300 mm. In der Anlage kann dieser auf 150 mm halbiert werden. Die Anregungsdichte verdoppelt sich dadurch (näherungsweise). → Faktor **2**.
- Skalierungsfaktor: **18**

Für Verschlusskappen:

- Nur Kompensation des Messabstands wie oben
- Skalierungsfaktor: **2**

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des SORT4CIRCLE®-Prozesses für Kunststoffverpackungen	3
Abbildung 2: Ablaufschema der geplanten Sortieranlage für Verschlusskappen	4
Abbildung 3: Schema des Vereinzelnprozesses	6
Abbildung 4: Verschlusskappenkonvolut für Vereinzelnversuche	6
Abbildung 5: Beispiele ineinandersteckender Verschlusskappen	8
Abbildung 6: Detailansicht der V-Bänder mit Lichtschrankensteuerung	9
Abbildung 7: Vereinzelnstrecke	9
Abbildung 8: FORMHAND-Sauggreifer an einem Roboterarm	10
Abbildung 9: Anordnung von Verschlusskappen zur Auswertung nach einem Greifversuch ..	10
Abbildung 10: Beispiel für einen Delta-Roboter	12
Abbildung 11: Apfelsorter vor Umbau	12
Abbildung 12: Blick in die Detektionskammern der Versuchsanlage	13
Abbildung 13: Normierte Fluoreszenzspektren der drei verwendeten Basis-Tracer	13
Abbildung 14: Vereinzelnstrecke der Versuchs-Sortieranlage	14
Abbildung 15: Schema der Abschwächung von Laser- und Fluoreszenzstrahlung	15
Abbildung 16: Walzenstuhl zur Herstellung von Walzfellen	16
Abbildung 17: Testplättchen in verschiedenen Farben und Tracerkonzentrationen	17
Abbildung 18: Spektroskopie-Messplatz	17
Abbildung 19: Reflektivitäts- und Fluoreszenzspektren	19
Abbildung 20: ausgewählte Testplättchen und Verschlusskappen für die Messungen	20
Abbildung 21: Messaufbau mit Drehscheibe	20

Abbildung 22: Intensitätsverlauf einer Fluoreszenzmessung an Testplättchen	21
Abbildung 23: Intensitätsverlauf einer Fluoreszenzmessung an Verschlusskappen	21
Abbildung 24: 3D-Entwurf einer SORT4CIRCLE®-Sortieranlage für Verschlusskappen	25

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Größenklassen für Versuche	7
Tabelle 2: Vergleich verschiedener Einsatzszenarien des Sauggreifers	11
Tabelle 3: Minimal messbare Tracerkonzentrationen, aus Messungen an Testplättchen	23
Tabelle 4: Minimal messbare Tracerkonzentrationen, aus Messungen an Verschlusskappen	23