

Fraunhofer IOSB

visit
[Recycling]

4/2017

www.iosb.fraunhofer.de

ISSN 1616-8240



Fraunhofer
IOSB

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer IOSB

Redaktion
Marion Staub

Layout und grafische Bearbeitung
Ellen Simon

Druck
Kraft Premium GmbH
76275 Ettlingen

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Telefon +49 721 6091-300
Fax +49 721 6091-413
presse@iosb.fraunhofer.de

© Fraunhofer IOSB
Karlsruhe 2017

Ein Institut der Fraunhofer-Gesellschaft
zur Förderung der angewandten
Forschung e. V. München

18. Jahrgang
ISSN 1616-8240

Bildquellen:

Titelbild:
MEV

Seite 4 und 5
ES Konzepte GbR, Dr. Eickhoff

Seite 10
Fraunhofer IML

Seite 13
Fraunhofer FHR

Alle anderen Abbildungen:
© Fraunhofer IOSB

Nachdruck, auch auszugsweise,
nur mit vollständiger Quellenangabe und
nach Rücksprache mit der Redaktion.

Belegexemplare werden erbeten.

INHALT

Gastbeitrag

Seite 4 **Öffentliche Abfallwirtschaft und Recycling**
Dr. Dieter Eickhoff

Themen

Seite 6 **Kunststoffe im Biomüll**
Julius Krause

Seite 8 **Das Licht enthält mehr als nur Farbe**
Jürgen Hock

Seite 10 **BauCycle – durch optische Sortierung von feinkörnigem Bauabbruch zu funktionalen Baumaterialien und Bauteilen**
Robin Gruna

Seite 12 **blackValue – Recycling schwarzer Kunststoffe**
Wolfgang Melchert

Seite 14 **Jeden Schritt verfolgen**
Simulationsgestützte Entwicklung von Trackingverfahren für die optische Schüttgutsortierung
Georg Maier

Liebe Freunde des Fraunhofer IOSB,

»Recycling ist die größte Rohstoffquelle der Welt« – allerdings benötigen hochwertige Produkte zur Vermeidung des Downcyclings eine trennscharfe Materialaufbereitung. Um die Wertstoffkreisläufe nachhaltig zu schließen, ist es daher notwendig, intelligente Sortierprozesse anzuwenden. Am Fraunhofer IOSB werden die hierzu notwendigen Lösungen bereits seit Jahren in der Abteilung »Sichtprüfsysteme« erforscht und umgesetzt. In dieser Lektüre werden verschiedene Innovationen rund um die Sortiertechnologien am Beispiel typischer Stoffströme vorgestellt und diskutiert.

Der Gastbeitrag der Firma ES Konzepte verdeutlicht eindringlich die Notwendigkeit von neuen Recyclingverfahren, um die Quoten im Rahmen eines Kreislaufwirtschaftspaketes der EU für alle Länder zu erfüllen. Ziel ist, die Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen auf mindestens 70 Prozent zu steigern.

Kunststoffe in Bioabfall (z. B. Mikroplastiken) stellen eine unerwünschte Verunreinigung dar, wobei der Fremdstoff wegen des Feuchtegehaltes und der Heterogenität bislang nur unzureichend getrennt werden kann. Der zweite Beitrag beschäftigt sich mit einem neuen Ansatz zur optischen Erkennung von Kunststoffen im Biomüll direkt im Sammelfahrzeug.

Zur materialelektiven Sortierung werden im Recycling unter anderem NIR-Kameras eingesetzt. Der dritte Beitrag beschreibt eine flexibel programmierbare Hyperspektralkamera, die zusammen mit einem Industriepartner entwickelt wurde und eine schnelle Anpassung an neue Aufgabenstellungen ermöglicht.

Die materialelektive Sortierung von feinkörnigen Abfällen ist wegen der Echtzeitbedingungen und des ungünstigen Verhältnisses »Auflösung zu Kosten« bei NIR-Kameras ein schwieriges Problem. Der vierte Beitrag beschreibt eine innovative Lösung und ihre Umsetzung am Beispiel der materialspezifischen Sortierung von Bauschutt kleiner als 2 Millimeter.

Ein unverändert großes Hype-Thema ist die Sortierung von schwarzen Kunststoffen. Im fünften Beitrag berichten wir über die Entwicklung eines neuen hyperspektralen Terahertz-Sensors, der speziell für die Lösung dieser schwierigen Aufgabenstellung ausgelegt ist und in Sortiersysteme des Fraunhofer IOSB integriert wurde.

Das Sortierergebnis steht und fällt mit einer möglichst genauen Materialausschleusung. Der letzte Beitrag beschreibt Innovationen in der Bewegungsprädiktion durch Nutzung einer Flächenkamera, was die Verfolgung von Objekten zu mehreren Zeitpunkten und die hierauf basierende Erstellung eines Bewegungsmodells ermöglicht.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre der Berichte über unsere aktuellen Innovationen rund um das Themengebiet des Recyclings.

Karlsruhe, im Oktober 2017

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer

Prof. Dr.-Ing. Thomas Längle



Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer



Prof. Dr.-Ing. Thomas Längle

ÖFFENTLICHE ABFALLWIRTSCHAFT UND RECYCLING

KREISLAUFWIRTSCHAFTSGESETZ

Produkte, derer sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder muss – so die Definition im Kreislaufwirtschaftsgesetz –, sind Abfälle. Werden diese Abfälle verwertet, so werden sie einem sinnvollen Zweck zugeführt, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem sie so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Dazu zählt unter anderem die Herstellung von Recyclingpapier aus Altpapier (Abb. 1), die Glasherstellung aus Altglas, aber auch die Energieerzeugung aus Abfällen (sofern die Energieeffizienz bestimmte Grenzwerte erreicht) oder die Verwendung von Erdaushub zum Deponiebau. Der Begriff Recycling wird dagegen im Gesetz enger gefasst: Recycling ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen werden (einschließlich der Aufbereitung organischer Materialien), jedoch nicht die energetische Verwertung der Abfälle oder deren Verwendung zur Verfüllung.

ENTWICKLUNG DES RECYCLINGS

Recycling gibt es bereits seit Jahrhunderten. Auch im Rom des Altertums herrschte Müllnotstand durch die übermäßige Verwendung von Einwegprodukten (z. B. Amphoren), sodass bereits damals Glas, Metalle oder Bauschutt verwertet wurden. Eine zweite Blüte erlebte das Recycling um 1900, als in großen Städten wie Berlin oder Hamburg Sammelsysteme für unterschiedliche Abfallarten eingerichtet und Sortieranlagen gebaut wurden. Durch die Ex- und Hopp-Einstellung der Wirtschaftswunderzeit nach dem Zweiten Weltkrieg gerieten getrennte Sammlungen in Vergessenheit und wurden erst wieder ab etwa 1985 neu entdeckt. 2015 haben die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in Deutschland (meist Landkreise oder kreisfreie Städte) vom gesamten häuslichen Abfall 33 Prozent als Wertstoffe und 26 Prozent als Bioabfälle getrennt gesammelt. Sie führen nur noch 41 Prozent als Haus- und Sperrmüll einer Müllverbrennung oder einer mechanisch-biologischen Abfallbehandlung zu.

VERPACKUNGEN UND VERBUND-MATERIALIEN

Maßgeblich für hochwertiges Recycling ist die sortenreine Bereitstellung der Ausgangsmaterialien für den Recyclingprozess. Bringsysteme wie z. B. Wertstoffhöfe (Abb. 2) oder die Verpflichtung zur getrennten Bereitstellung von Wertstoffen bereits im Betrieb (vgl. verschärfte Gewerbeabfallverordnung seit 1. August 2017) bieten dabei die beste Trennschärfe, während benutzerfreundlichere Holsysteme (z. B. gelber Sack, Wertstofftonnen) meist eine Sortierung nach sich ziehen (Abb. 3). Die Individualisierung aller Produkte und Verpackungen erschwert aber zunehmend die Verwertung. Wurden beispielsweise früher Getränke einfach in grüne Glasflaschen abgefüllt, die aus getrennt gesammelten Scherben hergestellt wurden, fordert heute jeder Getränkehersteller einen ganz bestimmten Grünton für seine Flaschen. Auch die zunehmende Verwendung von Verbundmaterialien, die sich nicht mechanisch einfach trennen lassen, erfordert neue Technologien, verteuert aber insgesamt das Recycling. Aktuelles Beispiel dafür sind Verbundwerkstoffe der Rotorblätter von Windkraftanlagen.

ERHÖHUNG DER RECYCLINGQUOTEN

Der hohe Anteil des Recyclings ist vor allem immer strengeren Gesetzen und Verordnungen, neuen Recyclingverfahren und zum Teil steigenden Rohstoffpreisen zuzuschreiben. Heute spielen vor allem die Energieeinsparung und damit auch der Klimaschutz eine wichtige Rolle. Außerdem sollen die Recyclingquoten im Rahmen eines Kreislaufwirtschaftspaketes der EU für alle Länder deutlich angehoben werden. Ziel ist, die Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen auf mindestens 70 Prozent zu steigern. Ein Baustein dazu ist das neue Verpackungsgesetz, dessen erster Teil im Juli



Abb. 2: sortenreine Sammlung auf einem Wertstoffhof.



Abb. 3: Schrägsortierband zur Trennung von flächigen und rollenden Verpackungen in einer Sortieranlage.



Abb. 1: Anlieferung von Altpapier in einer Kartonagenfabrik.

2017 in Kraft getreten ist. Es löst die Verpackungsverordnung ab und soll außer der Steigerung des Verpackungsrecyclings durch Vorgabe höherer Recyclingquoten auch die dualen Systeme (Grüner Punkt) auf finanziell stabilere Füße stellen.

Literatur:

Statistisches Bundesamt, 2017: GENESIS-Online-Datenbank, Aufkommen an Haushaltsabfällen in Deutschland nach Abfallarten 2014 und 2015, www.destatis.de.
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012.
Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) vom 18. April 2017.
Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz – VerpackG) vom 5. Juli 2017.



Dr. Dieter Eickhoff

ES Konzepte GbR
Pfälzerstraße 29
75177 Pforzheim

Telefon +49 7231 354879
eickhoff@es-konzepte.de
www.es-konzepte.de

KUNSTSTOFFE IM BIOMÜLL



Abb. 1: Auf dem Abladeplatz der Abfallbetriebe wird die Verunreinigung des Bioabfalls deutlich, zahlreiche Plastiktüten und -folien sind zu erkennen.

Plastiktüten und -folien in Bioabfall stellen eine schwerwiegende Verunreinigung dar. Plastik ist nicht biologisch abbaubar und kann auch als Mikroplastik zurück in die Nahrungskette gelangen. Dies bedeutet eine gesundheitliche Gefährdung, da in Plastik auch zahlreiche giftige Stoffe wie z. B. Weichmacher enthalten sind. Ein automatisches Aussieben der Plastikteile ist nicht möglich, da die heterogene Zusammensetzung und eine hohe Feuchtigkeit jedes mechanische Trennverfahren für Bioabfälle verhindern.

Überschreitet die Kontamination von Plastik in Bioabfall den vorgegebenen Grenzwert, bedeutet dies hohe Zusatzkosten für Entsorgungsbetriebe, da der Bioabfall als Restmüll in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt werden muss. In Abb. 1 ist der an einem Tag in Pforzheim gesammelte Bioabfall abgebildet, deutlich zu erkennen ist eine umfangreiche Kontaminierung mit Plastikabfällen.

ERKENNUNG VON PLASTIK DURCH HYPERSPEKTRALE BILDGEBUNG
 Durch Messung der Absorptionen im Lichtspektrum können Rückschlüsse auf das vorliegende Material getroffen werden. Besonders die polaren Bindungen aus CH- und OH-Gruppen absorbieren Licht im Infraroten Spektrum. Hierdurch unterscheiden sich die spektralen Signaturen je nach chemischer Zusammensetzung. Bioabfälle besitzen beispielsweise durch ihren Wassergehalt eine starke Absorption, die sich von Polyethylen unterscheidet. Durch weitere Merkmale können auch andere Plastiksarten oder beispielsweise Papier identifiziert werden.

Kamerasysteme zur hyperspektralen Bildgebung erfassen zusätzlich zur räumlichen Information die spektrale Signatur eines Objektes. Die spektrale Information kann zur Materialidentifizierung verwendet werden, man spricht daher auch von Chemical Imaging (siehe Abb. 2).

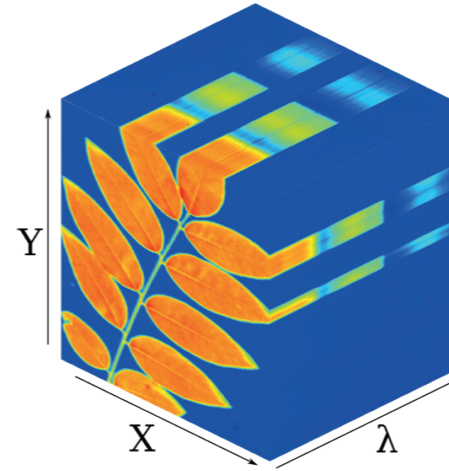


Abb. 2: Eine hyperspektrale Bildaufnahme enthält räumliche und spektrale Informationen. Da sich verschiedene Objekte in ihrer Signatur unterscheiden, wird auch der Begriff Chemical Imaging verwendet.

LÖSUNGSANSATZ DURCH ABFALL-TRENNUNG IM SAMMELFAHRZEUG
 Moderne Sammelfahrzeuge sind mit zwei verschiedenen Kammern ausgerüstet. So können in einer Fahrt unterschiedliche Behälter, z. B. Bioabfall und Restmüll, geleert werden. Ein Sensor im Abfallbehälter sorgt aktuell für die richtige Identifizierung und Abrechnung des Abfalls.

In dem am Fraunhofer IOSB untersuchten Konzept wird ein hyperspektrales Kamerasystem zur Detektion von Plastik in Bioabfällen entwickelt. Erkennt die spektrale Kamera eine Verunreinigung durch Plastik, wird der Behälter mit Bioabfall in wesentlich teureren Restmüll umdeklariert und in die Restmüllkammer des Sammelfahrzeugs geleitet. Dies verhindert eine Kontamination der gesamten Beladung, gleichzeitig können finanzielle Anreize zur Mülltrennung geschaffen werden, indem die teure Entsorgung als Restmüll dem Kunden in Rechnung gestellt wird.

KAMERASYSTEM ZUR ERFASSUNG SPEKTRALER MERKMALE

Obwohl der Einsatz von Kamerasystemen im Recycling bereits weit verbreitet ist, entstehen bei der Detektion von Plastik im Sammelfahrzeug diverse Herausforderungen. Der Materialstrom ist sehr unkontrolliert in seiner Ausdehnung und variiert in der Bewegungsgeschwindigkeit. Die Distanz zwischen Kamera und Messobjekt ist ebenfalls variabel und zusätzlich entstehen Schatten.

Am Fraunhofer IOSB sind eine breite Methodensammlung und Erfahrung mit der Identifizierung spektraler Merkmale vorhanden. So kann bereits mit einer minimalen Anzahl von Aufnahmen aus geeigneten spektralen Bereichen ein erhöhter Kontrast zwischen den verschiedenen Materialklassen erreicht werden.



Abb. 3: Untersuchungen im Hyperspektrallabor des Fraunhofer IOSB zeigen den Unterschied zwischen Obst (grün), Papier (blau) und Plastiktüten (rot).

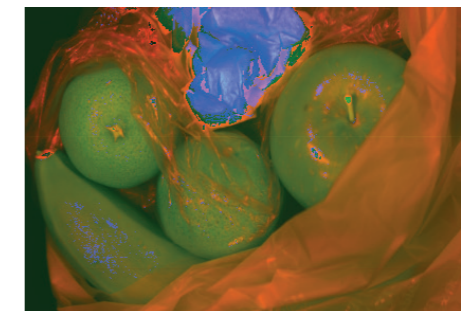


Abb. 4: Die IOSB-Software hat eine Plastiktüte erkannt, der Bereich wurde rot eingefärbt.



In Abb. 3 ist eine Aufnahme aus dem Hyperspektrallabor des Fraunhofer IOSB dargestellt. Zu sehen ist ein Falschfarbenbild mit verschiedenen Obstsorten (grün), Plastik (rot) und Papier (blau). Das Falschfarbenbild wurde aus drei ausgewählten Nahinfrarotkanälen im spektralen Bereich zwischen 1000 und 2500 Nanometer erstellt.

ANWENDUNGSBEISPIEL
 Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden über 100 hyperspektrale Aufnahmen von Bioabfall mit und ohne Plastiktüten erstellt und ausgewertet. In Abb. 4 ist das Ergebnis der Fraunhofer IOSB-Software dargestellt, der Bereich, indem eine Plastiktüte erkannt wurde, ist rot eingefärbt.

Literatur:
 Matthias Michelsburg; Robin Gruna; Kai-Uwe Vieth; Fernando Puente León: Spektrale Bandselektion für das Filterdesign optischer Inspektionssysteme: tm - Technisches Messen 78 Nr. 9, 2011.

KONTAKT

Julius Krause M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)
 Fraunhofer IOSB Karlsruhe

Telefon +49 721 6091-273
 julius.krause@iosb.fraunhofer.de
 www.iosb.fraunhofer.de/SPR

DAS LICHT ENTHÄLT MEHR ALS NUR FARBE

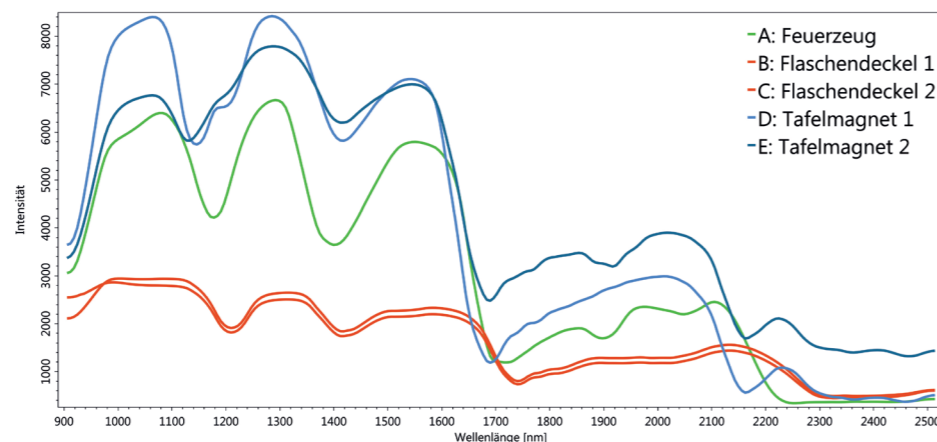
Zur Gegenstandserkennung werden häufig RGB-Farbkameras eingesetzt, die Anteile der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau gleichzeitig erfassen. Dieses Funktionsprinzip ist mit dem menschlichen Auge vergleichbar. Mithilfe solcher Sensoren kann also der Farbton des Prüflings maschinell erfasst werden. Wird der Prüfling außerdem großflächig als ein Bild abgetastet, so können aus benachbarten Bildpunkten Rückschlüsse auf seine Textur gezogen werden.

In einem Aufgabenkontext, bei dem es lediglich auf Merkmale wie Farbe, Form oder Textur ankommt, ist eine Farbkamera nach wie vor das Mittel der Wahl. Darüber hinaus gibt es auch Aufgabenstellungen, bei denen die Beschränkung auf drei Farbkanaäle dazu führt, dass eine eindeutige Aussage nicht möglich ist. Als Mensch versucht man dann, zusätzliche Sinne, z. B. den Tastsinn einzusetzen. Einem Farbsensor fehlt diese Ergänzungsmöglichkeit. Das Licht enthält jedoch mehr Informationen als nur die Farbe.

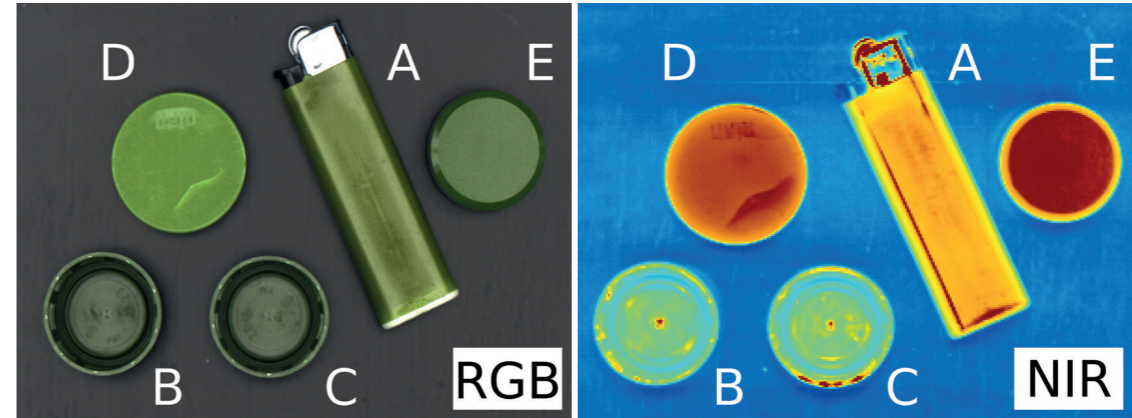
UNSIHTBARE MERKMALE

Ein Prüfling reagiert auch abseits des visuellen Spektrums und erzeugt spezifische Reflexionen im Nahinfrarotbereich (NIR, engl. »SWIR«). Diese für den Menschen unsichtbare Reflexion ist je nach Materialeigenschaft in bestimmten Wellenlängen unterschiedlich stark ausgeprägt. Gelingt es, die Reflexion mit sehr hoher spektraler Auflösung (»hyperspektral«) zu erfassen, so kann unter Umständen auf die Materialzusammensetzung des Prüflings geschlossen werden.

Zur Veranschaulichung wurden diverse Kunststoffprüflinge aufgenommen; sie sind im RGB-Farbbild und im NIR-Falschfarbbild dargestellt. Alle Prüflinge bis auf einen haben eine runde Form und alle Prüflinge weisen einen teils ähnlichen Grünstich im RGB-Farbbild auf. Dagegen sind im komprimierten NIR-Falschfarbbild eindeutige Intensitätsunterschiede sichtbar, welche aus die charakteristischen NIR-Spektralverläufe der jeweiligen Prüflinge hervorgehen.



Hochaufgelöste NIR-Reflexionsspektren je Beispielprüfling.



Gegenüberstellung der Beispielprüflinge als RGB-Farbbild sowie NIR-Falschfarbbild.

Erst durch die Auswertung der spektralen Merkmale kann auf die jeweilige Materialklasse geschlossen werden. Da die messbare NIR-Reflexion materialspezifisch ist, gilt sie für Prüflinge beliebiger Form.

Die hyperspektrale NIR-Sensorik ist im Bereich Recycling sehr gefragt, da für eine effiziente Abfallwiederverwertung möglichst reine Materialien gefordert werden. Dies lässt sich mit automatischen Sortieranlagen erreichen, wenn eine Sensorik zur Verfügung steht, die eine sichere Materialidentifikation mit hohen Durchsätzen erlaubt.

HYPERSPEKTRALKAMERA HyperCam

Die Idee der hyperspektralen Sensorik ist nicht neu – daran wird bereits seit Jahrzehnten geforscht. Im Zuge des technischen Fortschritts sind mittlerweile NIR-Sensorkomponenten in verschiedenen Ausführungen für den industriellen Einsatz erschwinglich geworden. Die Variantenvielfalt erstreckt sich von separaten NIR-Sensorchips bis hin zu NIR-Sensormodulen mit integriertem Materialklassifikator.

Die bloßen NIR-Sensorchips bieten den höchsten Flexibilitätsgrad für eine vielseitig einsetzbare NIR-Kamera, erfordern jedoch die Entwicklung einer sensorspezifischen Schnittstellenanbindung und auch die Entwicklung der entsprechenden Optik.

Im Rahmen einer Entwicklungskooperation mit dem langjährigen Industriepartner Binder+Co AG hat die Abteilung Sichtprüfsysteme des Fraunhofer IOSB Karlsruhe eine hochauflösende, modulare und flexibel einsetzbare NIR-Kamera mitentwickelt – die HyperCam. Im Wesentlichen zeichnen folgende Merkmale die HyperCam aus:

- Schnittstelle zu mehreren relativ preisgünstigen Indiumgalliumarsenid-Sensorchips für jeweils unterschiedliche NIR-Arbeitsbereiche.
- Echtzeitdatenverarbeitungsmodule zwecks anpassbarer spektraler Signalaufbereitung, Prüflingerkennung und Materialidentifikation.
- Schnittstellenanbindung an ein industrielles Materialsortiersystem mit hohen Durchsatzraten.

BESONDERE HERAUSFORDERUNGEN

Die Nutzung einer hyperspektralen NIR-Kamera unterscheidet sich generell von der RGB-Farbkamera und stellt eine besondere Herausforderung dar. Das Kamerasignal ist diversen Störeinflüssen optischer und technischer Art unterworfen. Die Störeinflüsse können jedoch modelliert und in ihrer Wirkung reduziert werden. Im Gegensatz zu einer RGB-Farbkamera, die pro Bildpunkt drei Intensitätswerte enthält, liefert die

HyperCam rund das Hundertfache an spektralen Intensitätswerten. Ein solch großes Datenaufkommen erfordert spezielle Datenverarbeitungstechniken, um die Echtzeitfähigkeit der Signalverarbeitung zu gewährleisten. Erst die Berücksichtigung aller Einflussfaktoren ermöglicht den Dauereinsatz der HyperCam in einer Materialsortierumgebung.

Die HyperCam ist inzwischen im Bereich Recycling zur Kunststofferkennung erfolgreich im industriellen Einsatz. Dank ihrer flexiblen Datenverarbeitung wird sie sich für eine große Vielzahl von Aufgabenstellungen einsetzen lassen.

Literatur:

- M. Bosling; T. Pretz: "Quality and Assurance through Hyperspectral NIR-Imaging in Plastic Waste Recycling". In: 2nd Optical Characterization of Materials (OCM), 2015, Karlsruhe.
- S. Irgenfried; J. Hock: "Acquisition and storage of multispectral material signatures". In: 2nd Optical Characterization of Materials (OCM), 2015, Karlsruhe.
- A. Plaza et al.: "Recent advances in techniques for hyperspectral image processing". In: Remote Sensing of Environment 113, 2009.



Jürgen Hock M. Sc.

Sichtprüfsysteme (SPR)
Fraunhofer IOSB Karlsruhe

Telefon +49 721 6091-306

juergen.hock@iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de/SPR



BauCycle – DURCH OPTISCHE SORTIERUNG VON FEINKÖRNIEM BAUABBRUCH ZU FUNKTIONALEN BAUMATERIALIEN UND BAUTEILEN



Anfallende Abbruchmaterialien beim Abriss eines Gebäudes.

Der Bausektor gehört in Deutschland zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren. Er setzt jährlich rund 550 Millionen Tonnen an mineralische Baurohstoffe ein. Der Gesamtbestand an Bauwerken ist mit rund 100 Milliarden Tonnen inzwischen ein bedeutendes Rohstofflager, das nach Nutzungsende wieder dem Recycling zugeführt werden kann. Speziell für die im Bauschutt anfallenden Feinfraktionen mit Partikeln kleiner als zwei Millimeter gibt es derzeit jedoch kein geeignetes Recyclingverfahren. Gängige Praxis ist, die jährlich in Deutschland anfallenden 5 Millionen Tonnen auf Bauschuttdeponien zu entsorgen. Die aktuelle Situation wird sich zukünftig verschärfen, wenn die als Teil einer neuen Mantelverordnung zum Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken geplante Ersatzbaustoffverordnung in Kraft tritt. Bisher im Bereich Straßen- und Deponiebau eingesetzte Materialien dürfen dann nicht länger als Baustoff verwendet werden, wodurch der Bauwirtschaft zukünftig eine große Rohstoffquelle fehlen wird.

Das Fraunhofer-interne Forschungsprojekt BauCycle hat sich als Ziel gesetzt, für die heute nicht nutzbaren Feinfraktionen

mineralischer Bauabfälle neue und wirtschaftlich attraktive Verwertungsoptionen zu entwickeln. Aufgrund der stofflichen Heterogenität und den mit der Feinkörnigkeit verbundenen technischen und sicherheitsseitigen Herausforderungen dieses Stoffstroms sind Aufbereitungstechniken, Logistikkonzepte und Produktinnovationen erforderlich, die deutlich über den heutigen Stand hinausgehen.

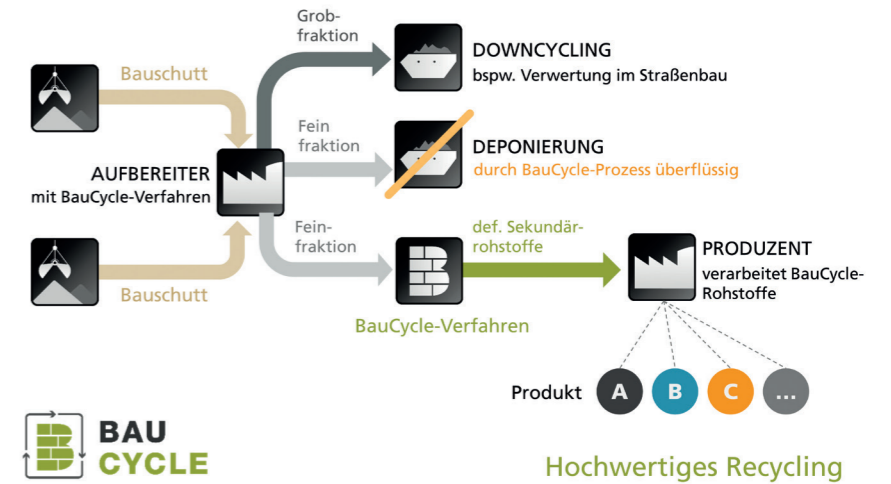
Im Rahmen des Projekts wird eine ganzheitliche technologische wie auch logistische Lösung für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen verfolgt. Ein Kernvorhaben stellt die Entwicklung eines neuartigen optischen Sortierverfahrens für feinkörnigen Bauabbruch dar. Hierfür werden spezielle optische Spektralfilter konzipiert und eingesetzt, die chemische Materialunterschiede in den Partikeln für eine Kamera im kurzwelligen Infrarotbereich sichtbar machen. Eine zentrale Aufgabe ist diesbezüglich die optische Erkennung und Abtrennung von Gipspartikeln aus dem Bauschutt, da für die Wiederverwertung der Betonfraktion kein Gips enthalten sein darf.

Mit den nach der Sortierung erhaltenen Fraktionen werden verschiedene Ansätze zur Herstellung von Bauteilen umgesetzt, um die möglichen Recyclingwege und Verwertungspotenziale darzustellen und die Realisierbarkeit nachzuweisen. Neben der Herstellung von Granulaten für den Einsatz in akustisch aktivierten Bauteilen und der Nutzung als Zementrohstoff wird auch die Entwicklung zementfreier Bindemittel angestrebt.

Da die aus den BauCycle-Prozessen entstehenden Produktwertschöpfungsketten sich von den bisher im Bausektor vorhandenen Modellen deutlich unterscheiden, wird begleitend eine Marktplattform entwickelt. Sie unterstützt bei der Markteinführung der Produkte, indem sie der veränderten Komplexität der neuen Wertschöpfungsketten Rechnung trägt und diese transparenter und zugänglicher für die Akteure gestaltet. Der wirtschaftliche Kern dieses Geschäftsfeldes ist eine dynamische, echtzeitfähige Marktplattform im Sinne einer Rohstoffbörse, die das Angebot von Recyclingfirmen und den Bedarf von Recyclingmaterial produzierenden Unternehmen erfasst.

Vier Fraunhofer-Institute bündeln ihre Kompetenzen für drei Jahre, um die erfolgreiche Umsetzung der Ziele bis 2019 zu realisieren. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP zeigt sich verantwortlich für die Verwertung des sortierten Bauschutts. Dabei sollen neben klassischen Betonanwendungen auch funktionale Bauteile wie Schallschutzelemente und zementfreie Bindemittel entwickelt werden.

Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML hat die nötige Kompetenz, um sämtliche Analysen und Simulationen



Das BauCycle-Projekt im Überblick.



Herausforderungen und Lösungsansätze durch das BauCycle-Projekt.

durchzuführen, die eine funktionierende Marktplattform erfordern. Dabei muss neben dem Materialaufkommen und dem Materialbedarf auch die regionale Verfügbarkeit berücksichtigt werden. Das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB entwickelt im Laufe des Projekts eine wirtschaftliche Sortierlösung, welche die Realisierung des Recyclings

von feinkörnigem Bauabbruch erst ermöglicht. Das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT verfügt über die nötigen Kompetenzen im Bereich nachhaltigkeitsorientierter Bewertung von Ressourcen und Prozessen sowie das technologische Know-how zu einzelnen Werkstoffen.



Dr.-Ing. Robin Gruna

Sichtprüfsysteme (SPR)
Fraunhofer IOSB Karlsruhe

Telefon +49 721 6091-263
robin.gruna@iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de/SPR



blackValue – RECYCLING SCHWARZER KUNSTSTOFFE

CHIC, ABER SCHWIERIG ZU RECYCLEN

Schwarze Kunststoffe gelten als chic und pflegeleicht und werden in großen Mengen in modernen Elektronikgeräten und Automobilen verbaut. Am Ende der Nutzungsphase fallen entsprechend große Mengen von schwarzen Kunststoffabfällen an. Diese Kunststoffe stellen wertvolle Sekundärrohstoffe dar, man möchte sie deshalb möglichst wertstofflich verwerten und nicht nur zur Energiegewinnung verbrennen. Da für sortenreines Material höhere Erlöse möglich sind als für gemischtes Material, besteht die Aufgabe, die verschiedenen Kunststoffsorten (ABS, PP, PE usw.) zu trennen. Bei schwarzen Kunststoffen wird dies allerdings durch die schwarze Farbe erschwert, denn der für die Schwarzfärbung verantwortliche Kohlenstoff absorbiert sowohl sichtbares Licht als auch Infrarotstrahlung, sodass übliche optische Erkennungsverfahren versagen.

Teilweise werden für die Sortierung elektrostatische Verfahren eingesetzt, die allerdings als Voraussetzung trockenes, sauberes und fein (wenige Millimeter) gebrochenes Material erfordern. Gewünscht wird stattdessen ein Sensor, der auch gröberes (einige Zentimeter) und verschmutztes Material sicher erkennen kann. Außerdem soll der Sensor leicht in ein übliches Sortiersystem integrierbar sein, bei dem das Material über ein Förderband zugeführt wird, unter einem Sensor hindurchfliegt und anschließend mittels elektronisch angesteuerter Druckluftdüsen in die gewünschten Fraktionen getrennt wird.

NEUARTIGER SENSOR IM TERAHERTZ-FREQUENZBEREICH

Im Projekt blackValue haben die Fraunhofer-Institute FHR, IAIS und IOSB ein industrietaugliches Sortiersystem für schwarze Kunststoffe entwickelt. Das Herzstück des

Systems ist ein neuartiger hyperspektraler Sensor, der im Terahertz-Frequenzbereich (THz) arbeitet [1, 2, 3]. Es handelt sich um einen Zeilensensor, der quer zur Bewegungsrichtung des Materials angeordnet wird und aus einem Sender und einem Empfänger besteht, die sich gegenüberliegen. Zwischen ihnen fliegt das Material hindurch und wird mit einem Raster von ca. 1 Zentimeter abgetastet. Der zunächst implementierte Prototyp hat acht Sensorelemente, das endgültige System 32 Sensorelemente, womit dann Förderbänder von 30 Zentimeter Breite komplett abgedeckt werden. THz-Sensoren haben einige Vorteile für den industriellen Einsatz:

- THz-Wellen durchdringen das Material komplett. Sie lassen sich nicht durch Oberflächeneigenschaften wie Beschichtungen oder Verschmutzungen täuschen.
- THz-Wellen sind für Menschen unschädlich. Es sind deshalb, im Gegensatz zu Röntgensensoren, keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen am Sortiersystem erforderlich.
- THz-Wellen können über Wellenleiter (spezielle transparente Kunststoffbänder) von der Sender- und Empfängerelektronik an die Stelle geleitet werden, an der die Aufnahme erfolgen soll. Man benötigt deshalb an der Aufnahmestelle wenig Raum und kann die Elektronik in einiger Entfernung montieren.

Jedes Sensorelement des THz-Sensors liefert als Ergebnis ein komplexes Spektrum (Betrag und Phase) über 128 Frequenzbänder. In diesen Frequenzspektren steckt die Information über das Material. Allerdings ist ein Mensch nicht in der Lage, diese hochdimensionalen Spektren zu beurteilen, weshalb zur Klassifikation Methoden des maschinellen Lernens wie das »Gaussian Mixture Model« eingesetzt werden.

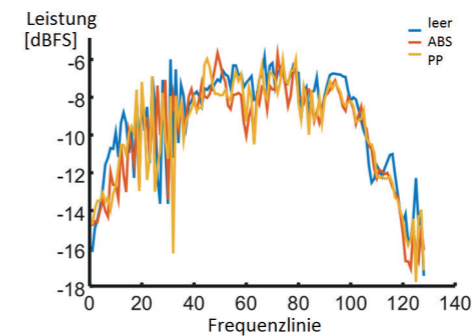
KOMBINATION MIT KAMERA IM SICHTBAREN BEREICH

Um die Sortierqualität zu steigern, wurde der THz-Sensor durch eine im sichtbaren Bereich arbeitende Kamera ergänzt, die mit



Einsatz des THz-Sensors in einem Sortiersystem. Unten der THz-Sender, oben der THz-Empfänger. Die rechts anschließende Trenneinheit mit den Druckluftdüsen wurde für das Foto entfernt.

einer höheren Auflösung die genaue Form und Position der Materialteile erfasst. Damit kann man feststellen, wie weit die THz-Aufnahmepunkte auf das zu prüfende Material oder auf den Hintergrund schauen, und dann nur die zuverlässigen THz-Aufnahmepunkte auswerten, die mit einem hohen Flächenanteil auf Materialteile schauen. Mit den Bildern der höher auflösenden Kamera können außerdem die Druckluftdüsen für die Trennung der Materialien präziser angesteuert werden und sie ermöglichen auch eine optionale zusätzliche Sortierung nach der Form der Materialteile.



THz-Spektren von zwei Kunststoffsorten (ABS und PP).

HOHE SORTIERQUALITÄT

Auf einem Prototyp des Sortiersystems konnte nachgewiesen werden, dass eine Materialerkennung mit hoher Güte möglich ist. Für die Trennung von ABS und PP/PE wurde beispielsweise folgendes Ergebnis erreicht:

- ABS wurde zu 93 Prozent richtig als ABS erkannt (zu 7 Prozent falsch als PP/PE).
- PP/PE wurde zu 96 Prozent richtig als PP/PE erkannt (zu 4 Prozent falsch als ABS).

Mit dem blackValue-System steht eine industriereife Lösung für das schwierige Recycling von schwarzen Kunststoffen zur Verfügung.

Literatur:

- [1] Ch. Brandt; M. Kieninger; C. Negara; R. Gruna; T. Längle; A. Küter; D. Nüßler: "Sorting of black Plastics using statistical pattern recognition on terahertz frequency domain data". In: 7th Sensor-Based Sorting & Control (SBS), 2016, Aachen.
- [2] D. Nüßler; R. Gruna; C. Brandt; A. Küter; T. Längle; M. Kieninger; N. Pohl: "Innovative Technologies as Enabler for Sorting of Black Plastics". In: 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT), 2016, München.
- [3] A. Küter; S. Reible; T. Geibig; D. Nüßler; N. Pohl: "THz Imaging for Recycling of Black Plastics". In: 3th Optical Characterization of Materials (OCM), 2017, Karlsruhe.



Schwarzer Kunststoff ist heute allgegenwärtig.



Dr. rer. nat. Wolfgang Melchert

Sichtprüfsysteme (SPR)
Fraunhofer IOSB Karlsruhe

Telefon +49 721 6091-264
wolfgang.melchert@iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de/SPR

JEDEN SCHRITT VERFOLGEN

Simulationsgestützte Entwicklung von Trackingverfahren für die optische Schüttgutsortierung

Automatische Prüfverfahren haben längst Einzug in zahlreiche Industriezweige gehalten und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung. Eine wichtige Ausprägung solcher Systeme stellen optische Schüttgutsortieranlagen dar. Sie dienen der Trennung eines Materialstroms, der aus kornartigen Produkten wie z. B. Saatgut, Mineralien oder Recyclingmaterialien besteht, in verschiedene Fraktionen, z. B. eine Gut- und eine Schlechtfraktion. Die Aufgabenstellungen sind vielfältig und reichen von der Aussortierung von bleihaltigem Glas über die Erkennung von krankheitsbefallenen Samen bis hin zur Sortierung von Mineralien nach Eisengehalt.

WIE FUNKTIONIERT DIE OPTISCHE SCHÜTTGUTSORTIERUNG?

Optische Schüttgutsortiersysteme verfügen i. d. R. über einen Transportmechanismus, z. B. ein Förderband oder eine Rutsche, durch die das Material in das System gelangt. Dort wird es von einem Sensor erfasst. Gemäß dem Stand der Technik kommen hierfür scannende Sensoren, z. B. Zeilenkameras, zum Einsatz. Die erhobenen Daten werden daraufhin ausgewertet und für die einzelnen Objekte im Materialstrom wird eine Sortierentscheidung abgeleitet. Die physikalische Trennung geschieht, insbesondere für kleine Materialien, mithilfe eines Arrays aus Druckluftdüsen.

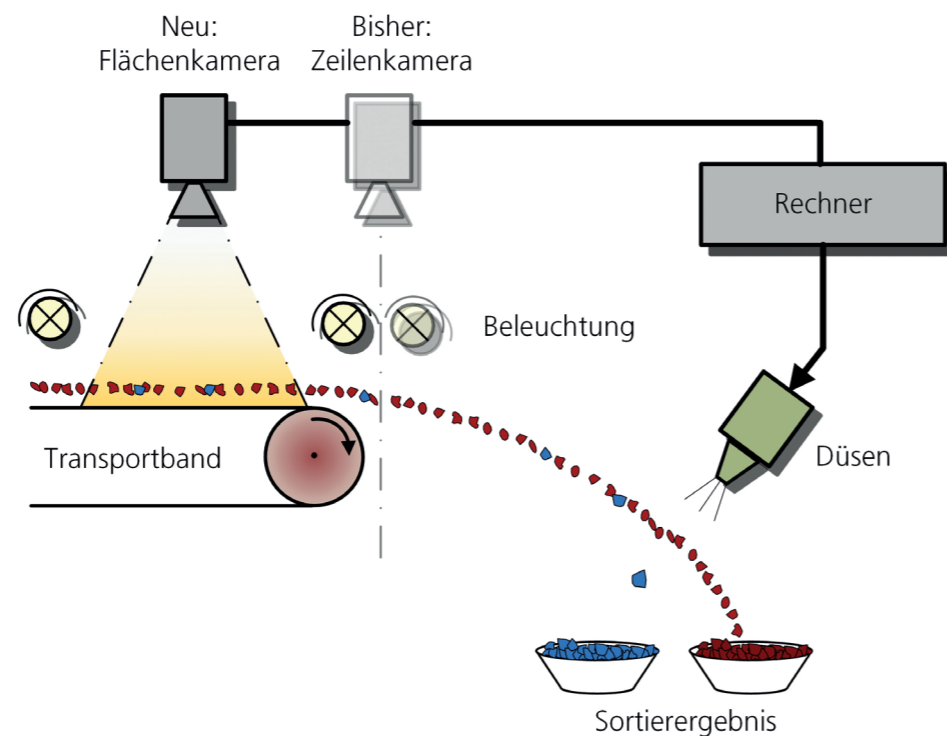


Abb. 1: schematische Darstellung eines optischen Schüttgutsortierers mit Zeilen- und alternativ Flächenkamera.

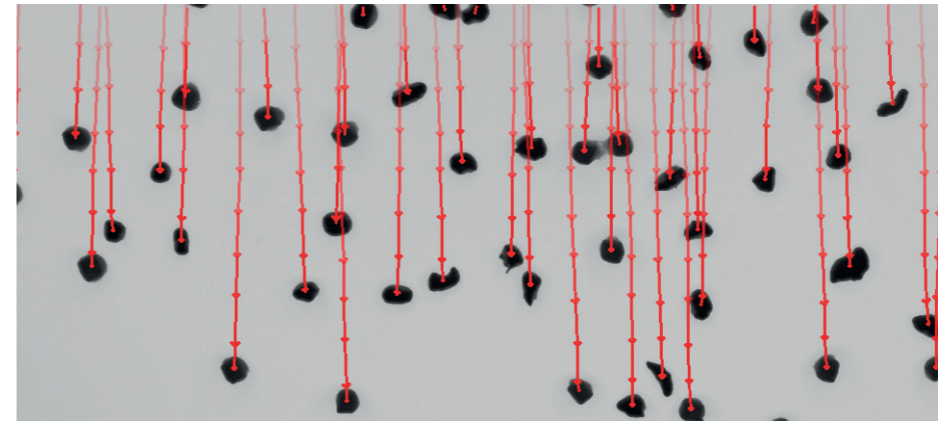


Abb. 2: Die Bewegung des Schüttguts (hier: Granulat) wird, wie anhand der Pfeile dargestellt, verfolgt.

Aus Abb. 1 wird deutlich, dass ein zeitlicher Versatz zwischen Erfassung und Trennung des Materials besteht. Soll ein Teilchen ausgeschleust werden, müssen Annahmen über den Zeitpunkt und den Ort, an welchem die entsprechenden Druckluftventile aktiviert werden sollen, getroffen werden. Hierfür stehen jedoch nur statische Informationen vom Zeitpunkt der Erfassung zur Verfügung. Entsprechend müssen global gültige, simple Annahmen hinsichtlich des Bewegungsverhaltens getroffen werden. Insbesondere für Materialien, die keine heterogene Bewegung aufweisen, ist dies jedoch problematisch. Abhilfe schaffen lediglich Worst-Case-Annahmen. Konkret werden die Ausblasfenster sowohl zeitlich als auch örtlich so groß gewählt, dass ein sicheres Ausschleusen gewährleistet werden kann. Dies vergrößert jedoch den Produktverlust, d. h. die ungewollte Ausschleusung von Gutmaterial.

ERFASSEN DER BEWEGUNGEN: EINE FLÄCHENKAMERA MACHT ES MÖGLICH

Das Fraunhofer IOSB forscht derzeit zusammen mit dem Lehrstuhl für Intelligente Sensor-Aktor-Systeme (ISAS) des Karlsruher Instituts für Technologie sowie dem Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) der Ruhr-Universität Bochum an einer Möglichkeit, diesen Nachteil zu überwinden. Basis hierfür ist es, anstelle einer Zeilenkamera einen zweidimensionalen Sensor zu verwenden. Durch

zeitlich hochaufgelöste Aufnahmen werden Objekte im Materialstrom zu mehreren Zeitpunkten erfasst. Durch den Einsatz von Multiobjekt-Trackingverfahren ist es dann möglich, die Trajektorien der Objekte über den Beobachtungsraum hinweg zu verfolgen [1].

Für jedes im Materialstrom enthaltene Objekt wird hierfür ein individuelles Bewegungsmodell geführt. Durch die Realisierung eines prädiktiven Verfahrens kann für individuelle Objekte die Position zu einem späteren Zeitpunkt akkurat geschätzt werden. Auf diese Weise können präzise Annahmen über den Ort und den Zeitpunkt für die Ausschleusung abgeleitet werden. Neben der Identifikation geeigneter Bewegungsmodelle besteht eine Herausforderung darin, die Algorithmen so effizient zu gestalten, dass das feste Echtzeitkriterium für die Ableitung einer Sortierentscheidung eingehalten werden kann [2].

BEWEGUNGSINFORMATION ERMÖGLICHT ERWEITERTE CHARAKTERISIERUNG

Neben einer präzisen Ausschleusung von Objekten stehen Informationen über die Objekte zu mehreren Zeitpunkten zur Verfügung, die für deren Klassifizierung verwendet werden können. Neben klassischen Merkmalen, wie sie häufig in der optischen Schüttgutsortierung Anwendung finden, wie z. B. Farbe und Form, besteht die Möglichkeit, integrale Merkmale, d. h.

Merkmale, die für Zeitintervalle bestimmt werden, für die Charakterisierung heranzuziehen. Beispielsweise kann die Geschwindigkeit und Beschleunigung von Objekten abgeleitet werden [3].

FÖRDERGEBER

Das IGF-Vorhaben 18798 N der Forschungsgesellschaft Verfahrens-Technik e. V. – GVT, Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur:

- [1] F. Pfaff; C. Pieper; G. Maier; B. Noack; H. Kruggel-Emden; R. Gruna; U. D. Hanebeck; S. Wirtz; V. Scherer; T. Längle und J. Beyerer: "Improving optical sorting of bulk materials using sophisticated motion models," *tm-Technisches Messen*, pp. 77-84, 28 2 2016.
- [2] G. Maier; F. Pfaff; C. Pieper; R. Gruna; B. Noack; H. Kruggel-Emden; T. Längle; U. D. Hanebeck; S. Wirtz; V. Scherer und J. Beyerer: "Fast multi-target tracking via strategy switching for sensor-based sorting," in *2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Baden-Baden, 2016.
- [3] G. Maier; F. Pfaff; F. Becker; C. Pieper; R. Gruna; B. Noack; H. Kruggel-Emden; T. Längle; U. D. Hanebeck; S. Wirtz; V. Scherer und J. Beyerer: "Improving Material Characterization in Sensor-Based Sorting by Utilizing Motion Information," in *OCM 2017 - Optical Characterization of Materials - conference proceedings*, Karlsruhe, 2017.

Karlsruhe

Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe
Telefon +49 721 6091-0
Fax +49 721 6091-413
info@iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de

Ettlingen

Fraunhofer-Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Gutleuthausstraße 1
76275 Ettlingen
Telefon +49 7243 992-0
Fax +49 7243 992-299
www.iosb.fraunhofer.de

Ilmenau

Fraunhofer IOSB, Institutsteil
Angewandte Systemtechnik AST
Am Vogelherd 50
98693 Ilmenau
Telefon +49 3677 4610
Fax +49 3677 461-100
info@iosb-ast.fraunhofer.de
www.iosb-ast.fraunhofer.de

Görlitz

Fraunhofer IOSB, Institutsteil
Angewandte Systemtechnik AST
Außenstelle Görlitz,
Abteilung Energie
Brückenstraße 1
02826 Görlitz
Telefon +49 3581 7925354
joerg.laessig@iosb-ast.fraunhofer.de

Lemgo

Fraunhofer IOSB, Institutsteil
für industrielle Automatisierung INA
Langenbruch 6
32657 Lemgo
Telefon +49 5261 94290-22
Fax +49 5261 94290-90
juergen.jasperneite@iosb-ina.fraunhofer.de
www.iosb-ina.fraunhofer.de

Beijing

Representative for Production and
Information Technologies
Unit 0610, Landmark Tower II
8 North Dongsanhuan Road
Chaoyang District
100004 Beijing, PR China
Telefon +86 10 6590 0621
Fax +86 10 6590 0619
muh@fraunhofer.com.cn