

Perspektiven der sensorgestützten Sortierung fester Abfallstoffe

Dirk Killmann*, Thomas Scharrenbach**, Thomas Pretz*

*I.A.R. RWTH Aachen; ** AMR RWTH Aachen

Perspectives of Sensor Based Sorting for the Processing of Solid Waste Material

Abstract

Waste is generally collected as a mixture of different solid materials which are fed into the recycling cycle by the waste collecting industry. In waste treatment plants the waste gets crushed, classified and sorted. Among these processes the sorting is the determining step in which materials with the same recycling attributes are concentrated and cleaned from impurities. The accumulation of the materials is done by using single particle attributes as criteria for the sorting process. Sensor based sorting systems offer the opportunity to detect various material characteristics. The I.A.R. and the AMR at the Technical University of Aachen (Germany) are focusing their research on new sorting algorithms and the integration of new sensor systems like 3D cameras, which have rarely been used in the waste processing industry so far, with the aim to increase the efficiency in sorting technologies for solid waste materials and mineral resources.

Zusammenfassung

Abfallstoffe werden häufig gemischt gesammelt und gelangen durch den Entsorger in die Recyclingkette. In der Aufbereitungsanlage werden die Abfallstoffe Zerkleinert, Klassiert und Sortiert. Dabei ist die Sortierung der entscheidende Schritt, bei dem Stoffgruppen mit gleichen Verwertungseigenschaften angereichert und von Störstoffen befreit werden sollen. Die Anreicherung geschieht über Einzelkornmerkmale als Sortierkriterien. Sensorgestützte Sortierverfahren bieten dabei die Möglichkeit zur Detektion zahlreicher Sortiermerkmale. Das I.A.R. und AMR an der RWTH Aachen legen in dieser Thematik den Forschungsschwerpunkt auf die Integration bisher nicht zur Aufbereitung von Abfallstoffen verwendeter Sensortechnik wie Wärmebildzeilensensoren oder 3D-Kameras. An Hochauflösenden Farbbildern werden zudem Verfahren zur Objektisolierung und Texturanalyse auf Ihre Anwendung an unterschiedlichen Abfallstoffen geprüft.

Keywords

Sensor Based Sorting, Sensorgestützte Sortierung, Lasertriangulation, 3D-Kamera, 3D-Camera, Textur Analysis, Texturanalyse, Zeilenkamera, Line Camera, Multisensorik, Sensorfusion

1 Einleitung

In Haushalten, Gewerbebetrieben und Industrieprozessen fallen Stoffströme an, derer sich ihr Besitzer entledigen will oder muss. Diese Abfallstoffe werden häufig gemischt gesammelt und gelangen durch den Entsorger in die Recyclingkette, wo die unterschiedlichen Stoffströme aufbereitet werden. Die Hauptziele sind dabei entweder eine stoffliche oder energetische Verwertung der Inhaltsstoffe oder eine schadlose Beseiti-

gung nicht verwertbarer Bestandteile. Um diese Ziele erreichen zu können, müssen die Abfallströme verfahrenstechnisch behandelt werden. Nach einer Vorklassierung werden in vielen Aufbereitungsanlagen große Störstoffe durch das Anlagenpersonal manuell aussortiert (Handklaubung), noch bevor sie auf die Anlage aufgegeben werden. Dabei wird als Störstoff angesehen, was die Aufbereitungstechnik beschädigen oder Schadstoffe in die Aufbereitungsprodukte einbringen kann.

Nach der Aufgabe des Abfalls auf die Anlage erfolgen, je nach Korngröße und Zusammensetzung des Stoffgemischs und der Zielvorgabe für das Aufbereitungsprodukt Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung. Während die Zerkleinerung und Klassierung vor allem der Auflockerung und Konditionierung des Abfallgemisches dient, ist die Sortierung der entscheidende Schritt, bei dem Stoffgruppen mit gleichen Verwertungseigenschaften angereicht und von Störstoffen befreit werden sollen. Die Anreicherung geschieht dabei über Einzelkornmerkmale als Sortierkriterien. [TIT]

Bei den Sortiertechniken kann zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden werden. Bei den direkten Verfahren findet eine selektive Wechselwirkung zwischen den Einzelkorneigenschaften und einem aufgebrauchten Kraftfeld statt. Die aus der Wechselwirkung resultierende Kraft sorgt für den mechanischen Austrag der Einzelkörner aus dem Stoffstrom. Beispiele für direkte Sortierverfahren sind die Magnetscheidung oder Wirbelstromscheidung.

Sollen jedoch Form, Farbe, Textur oder Volumen eines Einzelkorns als Sortierkriterium dienen, so gibt es hierfür kein ausreichend starkes Kraftfeld aus dessen Wechselwirkung ein Austrag aus dem Stoffstrom möglich wäre. Eine Trennung von Erkennung und mechanischem Austrag ist notwendig und definiert die indirekten Sortierverfahren. Ausgehend von der Handklaubung, bei der mittels des menschlichen Auges Stoffmerkmale über einen Mustervergleich identifiziert, im Gehirn Stoffgruppen zugeordnet und mit den Händen mechanisch ausgetragen werden, wurden Verfahren zur optischen sensorgestützten Sortierung entwickelt. Potentiale für Forschung und Entwicklung liegen hier vor allem in der modularen Kombination unterschiedlicher Sensoren sowie in der Nutzbarmachung bisher unbeachteter Spektralbereiche und Wechselwirkungen von Strahlung und Materie.

2 Verfahrensbeschreibung

2.1 Aufbau eines Systems zur sensorgestützten Sortierung

Der Ablauf einer sensorgestützten Sortierung lässt sich grob in die Schritte Vereinzelung, Sensorik, Klassifizierung und Austrag unterteilen. Dabei wird das Material auf einem Förderaggregat durch den Sortierer hindurchbewegt und passiert nacheinander

Sensor- und Austragseinheit. Der zu sortierende Stoffstrom muss schon bei der Aufgabe hinreichend vereinzelt werden, sodass jedes Einzelstück von der Sensorik erfasst und von der Austragseinheit zielsicher ausgeschleust werden kann. Kommen parallel zur Flächennormalen der Förderebene angeordnete Luftdüsen zur Ausschleusung des Material zum Einsatz, so bedeutet Vereinzlung die Herstellung einer Monoschicht mit ausreichendem Abstand zwischen den Einzelkörnern. Die Position der Einzelstücke muss zwischen Sensorik und Austrag prognostizierbar bleiben. Eine weitere Bedingung der Vereinzlung ist somit ein homogenes Feld von Bewegungsvektoren der Einzelkörner.

Durch die Anforderungen an die Vereinzlung, insbesondere in Bezug auf die Forderung nach einer Monoschicht, ist die Belegungsdichte auf dem Förderaggregat gering. Damit dennoch ein hoher Durchsatz erreicht werden kann, müssen Bandbreite und Fördergeschwindigkeit entsprechend hoch sein. Üblich ist eine Bandbreite von 1.200 mm bei einer Bandgeschwindigkeit von etwa 2 m/s. Sehr hohe Förderbandgeschwindigkeiten von über 2.5 m/s wirken sich negativ auf die Homogenität der Bewegungsvektoren der Einzelstücke aus und stellen besondere Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit und Dimensionierung der Sensoreinheit.

Nach der Vereinzlung folgt als zweiter Verfahrensschritt die sensorische Abtastung der Einzelstücke in der Sensoreinheit. Deren Aufgabe ist die geometrisch und radiometrisch hinreichend auflösende Erfassung der spezifischen Sortiermerkmale jedes Einzelkorns. Dabei können die Sensoren in einer oder mehreren Dimensionen ausgeführt sein. Die Auflösung ist ein Maß für die Informationsdichte und wird in Pixel pro mm in jeder relevanten Raumrichtung ermittelt.

2.2 Dimension von Sensoren

Punktsensoren können zu einem Zeitpunkt nur eine Stelle des Förderstroms erfassen. Soll der Förderstrom jedoch lückenlos abgetastet werden, so muss der Messbereich über ein schnell arbeitendes Umlenksystem geleitet werden. Die Informationsdichte in Form von Messpunkte pro Fläche ergibt sich aus der Taktrate des Punktsensors sowie der Geschwindigkeit und Präzision des Umlenksystems. Durch die schnell bewegten mechanischen Komponenten der Umlenkeinheit ergeben sich Grenzen für Realisation sehr hochauflösender Sensorsysteme. Soll beispielsweise ein mit 3 m/s Fördergeschwindigkeit bewegtes und 1.000 mm breites Band mit einer Auflösung von 1 pel/mm in und quer zur Förderrichtung abgetastet werden, so müssen pro Sekunde $3 \cdot 10^6$ Punktmessungen durchgeführt werden. Die hieraus resultierende extrem kurze Sensorbelichtungszeit stellt eine weitere Grenze des Verfahrens zur lückenlosen Stoffstromanalyse dar. Bedingt durch die Umlenkmechanik, hat jeder Messpunkt einen Versatz in Bandrichtung, welcher durch die Recheneinheit kompensiert werden muss. Außerdem

stellt die Umlenkmechanik eine weitere Fehlerquelle dar. Punktsensoren werden daher hauptsächlich zur Unterstützung von Liniensensoren mit gezielt durchgeführten Scans kleinerer Abschnitte eingesetzt.

Liniensensoren scannen in Form eines Feldes von nebeneinander liegenden Sensorzellen den Stoffstrom Zeilenweise ab. Zu einem Zeitpunkt werden also die Messwerte für einen schmalen Abschnitt des Förderstroms gleichzeitig erfasst. Die Auflösung quer zur Förderrichtung ist dabei von der Bauform des Sensors abhängig. Soll der zuvor beschriebene Stoffstrom mit einer Auflösung von 1 mm/pel erfasst werden, so wird eine Sensorzeile mit 1.000 Sensorzellen benötigt. Das Bild des Stoffstroms wird dabei beispielsweise über eine Optik auf den oft nur wenige Millimeter großen Sensor abgebildet. Zeilensensoren können jedoch auch direkt unter dem Stoffstrom in Dimensionen von mehreren Metern Länge unmittelbar zur Messung eingesetzt werden. Durch das parallele Scannen ergeben sich längere Belichtungszeiten der Sensorzellen im Vergleich zu Punktsensoren. Im obigen Beispiel genügen 3.000 Abtastungen pro Sekunde aus, um die gleiche Informationsdichte von 1 mm/pel zu erreichen, was einer Reduktion der Abtastrate um den Faktor 1.000 entspricht.

2.3 Aufbau der Sensoreinheit

Geht man von einem System zur sensorgestützten Sortierung aus, bei dem der Stoffstrom berührungslos abgetastet wird, so besteht die Sensoreinheit aus mindestens einem Emitter und einem Detektor. Der Emitter sendet elektromagnetische Strahlung in Richtung der zu untersuchenden Einzelstücke aus. Diese beeinflussen selektiv die Strahlung hinsichtlich des Spektrums, des zeitabhängigen Verlaufs ihrer Amplitude und der Richtung ihrer Ausbreitung. Die je nach Stoffgruppe charakteristisch veränderte Strahlung trifft auf den Detektor und wird dort gemessen. Die Messdaten werden üblicherweise digitalisiert, softwarebasiert aufbereitet und soweit reduziert, dass eine Sortierentscheidung getroffen werden kann. Nach der Sortierentscheidung erfolgt eine direkte und zeitgenaue Ansteuerung der Austragseinheit.

Bei der Ausrichtung von Emitter und Detektor wird zwischen Reflektions- und Transmissionsmessung, sowie angeregter Eigenemission unterschieden. Bei der Messung von Reflektion sind Emitter und Detektor auf der gleichen Seite des Förderstroms angeordnet. Im sichtbaren Spektralbereich wird dieses Verfahren vor allem bei der Farbsortierung eingesetzt. Bei der Transmissionsmessung liegen Emitter und Detektor einander gegenüber. Mit dieser Anordnung lässt sich beispielsweise die Absorption von Röntgenstrahlung ermitteln [ZEI]. Mit hochenergetischen Lichtquellen kann Materie zu Eigenstrahlung angeregt werden. Dieses Verfahren der stimulierten Emission ermöglicht die Sortierung nach dem Merkmal der selektiven Fluoreszenz.

2.4 Datenverarbeitung

Selbst bei der Verwendung eines einzelnen Sensors fallen immense Datenmengen an, welche zur Ermittlung einer Sortierentscheidung in sehr kurzer Zeit präzise verarbeitet werden müssen. Dabei wird zwischen messpunktbasierter und objektbasierter Datenverarbeitung unterschieden. In jedem Fall wird jedoch aus dem mehrdimensionalen Datenstrom die Information soweit reduziert, dass die Austragseinheit eindeutig angesteuert werden kann. Die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit hängt dabei von der Bandgeschwindigkeit und dem Abstand zwischen Sensorik und Austragseinheit ab. Im oben betrachteten Beispiel eines mit 3 m/s bewegten Förderstroms und einem Abstand von einem Meter zwischen Sensor und Austragseinheit stehen also ca. 300 ms für die Ausführung der gesamten Algorithmik zur Verfügung. Liegen Sensor und Austragseinheit, wie z.B. bei Rutschenmaschinen, nur wenige Zentimeter auseinander, so stehen nur wenige Millisekunden zur Entscheidungsfindung zur Verfügung.

Bei der messpunktbasierter Datenverarbeitung wird jeder Messpunkt direkt klassifiziert und einer Operation zur Steuerung der Austragseinheit zugeordnet. Wird beispielsweise ein Stoffstrom von Glas mit einer Zeilenkamera im Transmissionsverfahren gescannt, so können für Licht undurchsichtige Bereiche anhand der Helligkeit am Messpunkt identifiziert werden. An den entsprechenden Stellen wird dann zum richtigen Zeitpunkt eine Luftdruckdüse geöffnet und trägt die undurchsichtigen Stellen aus dem Stoffstrom aus. Dieses Verfahren arbeitet sehr schnell, allerdings können Form, Länge, Breite oder Helligkeitsverteilung in einer einzelnen Glasscherbe nicht ermittelt werden, da die einzelnen Messpunkte nicht in Bezug zueinander gesetzt, sondern isoliert voneinander verarbeitet werden.

Bei der objektbasierten Datenverarbeitung werden die Messpunkte für einen Abschnitt des Förderbandes laufend in einem Puffer zwischengespeichert. In diesem Puffer befinden sich dabei üblicherweise mehrere hundert Bildzeilen, in denen nach zusammenhängenden Punktmengen gesucht wird. Über die sogenannte Objekterkennung werden möglichst diejenigen Messpunkte zusammengefasst und in einen weiteren Puffer geschrieben, die zu einem Einzelstück auf dem Förderband gehören. Anschließend werden die Daten über Klassifikatoren zu einer Sortierentscheidung reduziert. Dabei können unter anderem auch Verhältnisse von Materialklassen pro Objekt oder geometrische Daten wie Länge und Breite, und je nach Sensorart auch das Volumen ermittelt werden. Zudem bietet die Objekterkennung die Möglichkeit der Zuordnung eines Einzelstücks in ein Koordinatensystem, was den Bezug zu nachfolgenden Sensordaten auch in Form von ergänzenden Punktmessungen ermöglicht.

Aufgabe der Datenverarbeitung ist neben der Klassifizierung der Messwerte und Extraktion von Merkmalen auch die Unterscheidung der Objekte vom Hintergrund. Der Hintergrund, also beispielsweise die Oberfläche des Förderbandes, muss sich dabei in seinen

Eigenschaften zur Strahlungsveränderung von dem zu sortierenden Material unterscheiden. Bei einer Farbsortierung bedeutet dies, dass die Bandoberfläche sich in Helligkeit oder Farbe von dem zu sortierenden Abfall deutlich unterscheiden muss. Dies stellt insbesondere dann eine große Herausforderung an die Robustheit der Technik dar, wenn sich durch Verschmutzungen die Bandfarbe der Objektfarbe anpasst.

3 Forschungsschwerpunkte am I.A.R. und AMR

Die sensorgestützte Sortierung von Abfällen in Anlagen zur Aufbereitung von Abfällen gehört zum Stand der Technik. Zum Einsatz kommen vor allem monosensorische Systeme zur Sortierung nach dem Merkmal Objektfarbe mit Reflektions- und Transmissionsmessung, Metalldetektoren sowie Spektrometer zur Messung der reflektierten Strahlung im nahen Infrarotbereich. [BEK] Neu am Markt sind Röntgensortierer, die Einzelstücke nach ihrer Kernladungszahl klassifizieren und Sortieren können. Das Institut für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe (I.A.R.) an der RWTH Aachen beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung bestehender Sensortechniken sowie der Erkundung neuer Sensortechniken. Im Mittelpunkt steht hier die Fusion der Signale unterschiedlicher Sensoren zur gleichzeitigen Klassifikation von Einzelstücken. Hierzu wurde im Verbund mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (AMR) der RWTH Aachen der Multisensorprüfstand MiDAS angeschafft.

3.1 Sensorprüfstand MiDAS

Der Sensorprüfstand MiDAS (siehe Abbildung 1) besteht aus einem Förderband zur Materialzuführung, einer Sensoreinheit mit fünf Sensoren und einer Austragseinheit in Form einer Luftdüsenleiste. Die Materialaufgabe erfolgt mittels einer Schwingrinne. Die Förderbandgeschwindigkeit beträgt bis zu drei Meter pro Sekunde.

Durch die Integration einer programmierbaren Bandsteuerung ist ein Reversierbetrieb möglich, der das mehrfache Scannen von Einzelstücken mit wenig zeitlichem Aufwand ermöglicht. Als Förderbandfarbe steht momentan Weiß, Schwarz und Weiß-Transparent zur Verfügung. Hiermit wird die Simulation unterschiedlicher Verfahren zur Isolation der Objekte zum Hintergrund möglich. Die Bandbreite des Fördergurts beträgt 300 mm. Als Sensoren sind eine Farbzeilenkamera, eine Wärmebildzeilenkamera, eine 3D-Kamera, sowie eine hochempfindliche Graustufenzeilenkamera integriert. Ergänzt werden diese bildgebenden Sensoren durch einen Metalldetektor, der mehrstufig ausgelesen werden kann.

Alle Sensoren lassen sich miteinander verknüpfen und synchronisieren, so dass ein vollwertiger Multisensorbetrieb ermöglicht wird. Dabei ist eine optimale Vereinzelnung

des Materials erforderlich, vor allem hinsichtlich eines homogenen und konstanten Feldes von Bewegungsvektoren der Einzelstücke auf dem Förderband.

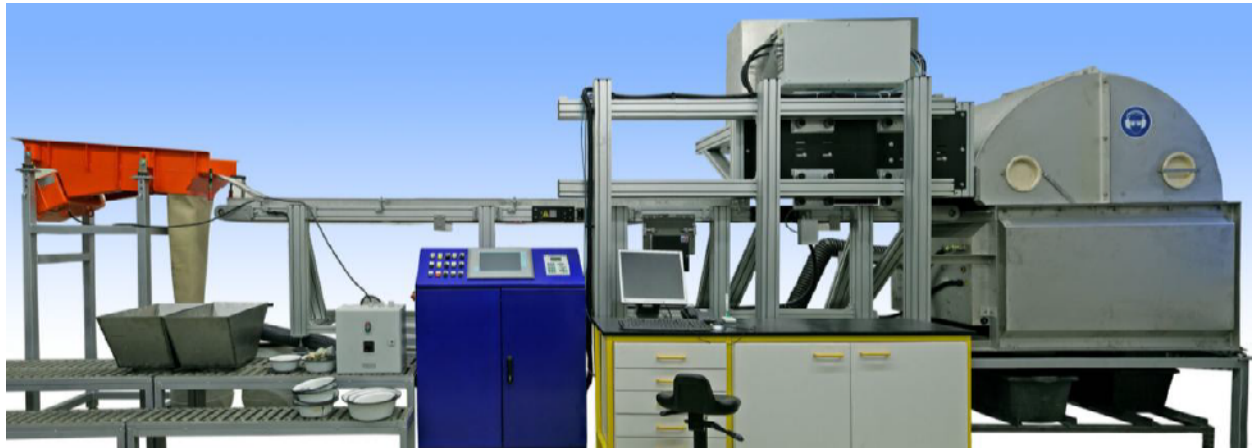


Abbildung 1 MiDAS Multisensorprüfstand

3.1.1 Farbzeilenkamera

Die in MiDAS verbaute Zeilenkamera erreicht eine Auflösung von bis zu 0,3 mm/pel und erzeugt damit eine Datenbasis für ein weites Spektrum von Anwendungen, angefangen von der reinen Farbsortierung bis zur Texturanalyse von Oberflächen. Die Beleuchtung erfolgt dabei über hochfrequente Leuchtstoffröhren sowohl aus Richtung der Kamera im Reflektionsverfahren als auch im Durchlichtbetrieb mit Gegenlicht. Für den letzten Fall ist der Einsatz eines lichtdurchlässigen Bandbelages notwendig. In der Praxis hat sich dieser als äußerst robust gegen Verschmutzungen erwiesen und erlaubt bei der Farberkennung auch nach längerem Einsatz eine einfache Isolation der Objekte vom Hintergrund. Ist der Einsatz eines transparenten Bandbelags mit Gegenlicht nicht möglich, so stellt die Isolation der Objekte vom Hintergrund eine besondere Herausforderung dar.

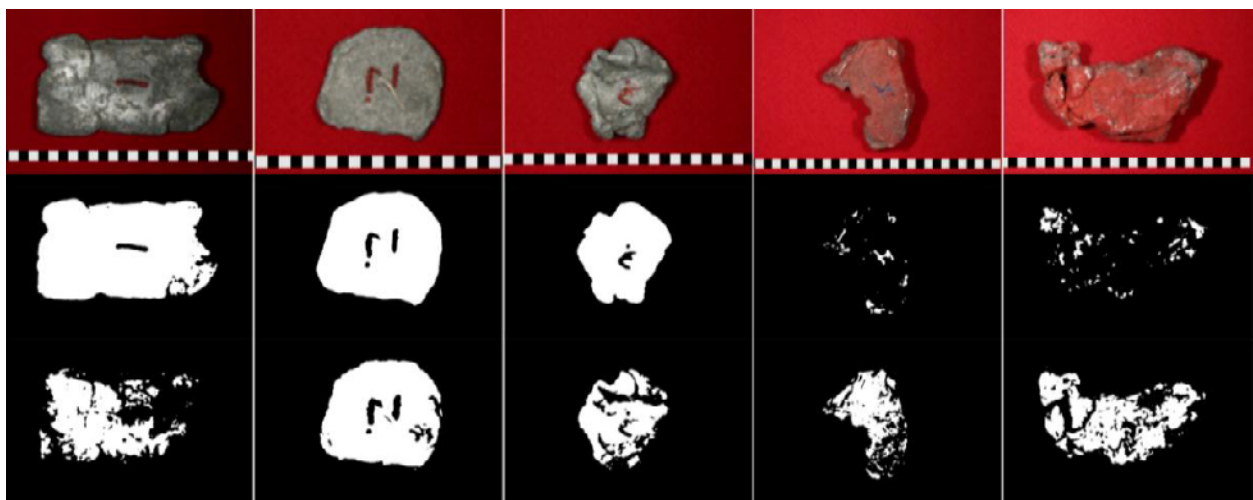


Abbildung 2 Objektklassifizierung mit Helligkeits- und Farbkennzeichnung

In Abbildung 2 sind untereinander jeweils Farbbild, isoliertes Objekt nach Filterung mit einem Helligkeitsschwellwert und mit zusätzlichem Farbfilter dargestellt. Selbst mit Farbfilter lassen sich die rechten beiden Objekte nicht vollständig vom Hintergrund unterscheiden. Das in Kapitel 3.1.3 erläuterte Verfahren mit einer 3D-Kamera liefert hier deutlich bessere Ergebnisse.

3.1.2 Hochempfindliche Graustufenzeilenkamera

Eine hoch lichtempfindliche Graustufenzeilenkamera mit einer Auflösung von bis zu 0,15 mm/pel und einer im Vergleich zu herkömmlichen Sensoren hundertfach stärkeren Lichtempfindlichkeit bietet die Möglichkeit zur Erkennung von schwachen Fluoreszenzeffekten bei mineralischen Rohstoffen und Abfällen gleichermaßen. Die Emission von Eigenstrahlung wird hier durch starke UV-Lampen im Reflektionsverfahren angeregt. Eine weitere Möglichkeit der Anwendung bietet die detaillierte Abtastung des Stoffstroms mit einer Tiefenschärfe von mehreren Zentimetern. Somit können trotz kleiner Blendenöffnung des Objektivs und kurzen Belichtungszeiten ausreichend helle Bilder gewonnen werden, die eine zeitliche scharfe Abbildung von dünnen und dicken Objekten ermöglicht. Da keine Farbinformationen zur Verfügung stehen, jedoch mit sehr hohen Auflösungen gescannt wird, eignet sich diese Betriebsart vor allem zur Detektion von Mustern auf den Objektoberflächen.

3.1.3 3D-Kamera

Über einen in MiDAS integrierten Lichtschnittsensor, welcher nach dem Prinzip der Lasertriangulation arbeitet, kann die Topologie des Stoffstroms erfasst werden. Dabei wird eine Laserlinie senkrecht von oben und quer zur Förderrichtung auf den Stoffstrom projiziert. Eine schräg zur Ebene des Lasers ausgerichtete Kamera mit Graustufenflächensensor erfasst die Auslenkung der Laserprojektion an jeder Breitenkoordinate des Lichtschnitts und ermittelt so ein Höhenprofil für einen Abschnitt des Stoffstroms. Durch die hohe Bildfrequenz von bis zu 10 kHz ergibt sich bei einer Bandgeschwindigkeit von 3 m/s eine Auflösung von unter 0,3 mm in Förderrichtung. Die Auflösung quer zur Bandlaufrichtung erreicht bei einer Arbeitsbreite von 300 mm bis zu 0,2 mm/pel, in Richtung der Objekthöhe je nach Triangulationswinkel bis zu 0,1 mm/pel.

Durch die hochpräzise Erfassung der Stoffstromoberfläche lassen sich bereits etablierte Farbsortierprozesse ergänzen und verbessern. So kann beispielsweise das Volumen jedes Einzelkorns abgeschätzt werden, ebenso ist eine Bestimmung von Formmerkmalen möglich. Abbildung 3 zeigt den 3D-Scan eines Schrotstückes in mehreren Positionen (obere Zeile).

Objekt und Hintergrund haben dabei die gleiche Farbe. Eine Isolation ist anhand der Höhenwerte in jeder Lage eindeutig durchführbar (untere Zeile). Dabei ist insbesondere

anzumerken, dass die Abtastung weitestgehend unabhängig von Oberflächenverschmutzungen durchgeführt werden kann.

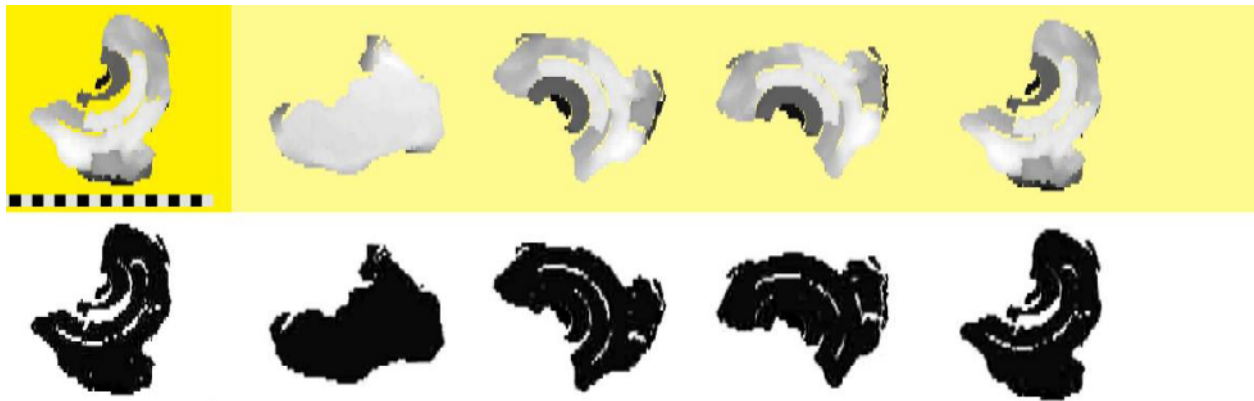


Abbildung 3 3D-Scan eines Guss-Aluminium Schrottstücks

Jede Oberfläche, die den Laserstrahl ausreichend hell und diffus Richtung Kamera zurückreflektiert, eignet sich zur Messung. Begrenzt wird der Einsatz dieser Technologie durch spiegelnde und mattschwarze Oberflächen und eine erhöhte Staubkonzentration in der Luft zwischen Laserdiode und Förderbandoberfläche.

Durch das Prinzip der Lasertriangulation kommt es zu systembedingten Abschattungen der Objektoberfläche. Diese nehmen zu, je steiler der Triangulationswinkel gewählt wird. Die Fläche neben steilen Erhebungen und Kanten kann nicht immer komplett erfasst werden, da sie die Reflektion des Laserstrichs zur Kamera verhindert. Dieser Effekt der Cavität kann durch geschickte Anordnung der Lichtquellen und Kamerasysteme verringert werden. In einer Studie am I.A.R. wurde ermittelt, wie stark die Cavität die Isolation der Objektgrenzen beeinflusst. Dabei wurden Verfahren mit Helligkeitsschwellwert bei Transmissionsmessung einer Farbzeilenkamera, Farberkennung bei Reflektionsmessung einer Farbzeilenkamera und Triangulationsverfahren mit der in MIDAS verbauten 3D-Kamera verglichen.

Als Referenz wurde die Schattenrissmessung im Transmissionsverfahren betrachtet. Als Kriterium für eine erfolgreiche Objekterkennung wurde die Objektfläche definiert. Im Idealfall sollte sich für die Objekte ein linearer Zusammenhang zwischen der Flächenmessung von zwei unterschiedlichen Verfahren ergeben. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Flächenmesswerten von 250 Aluminiumschrott Proben trotz zum Teil spiegelnder und stark zerklüfteter Oberflächen mit einem Bestimmtheitsmaß R von 99 % vorhanden.

Es ist also davon auszugehen, dass die verwendete Methode zur Objektisolierung im Schrottbereich verwendet werden kann. Durch die Objektisolierung anhand der Objekthöhe kommt es zudem zu keinen Beeinträchtigungen durch Verschmutzungen auf dem Bandbelag.

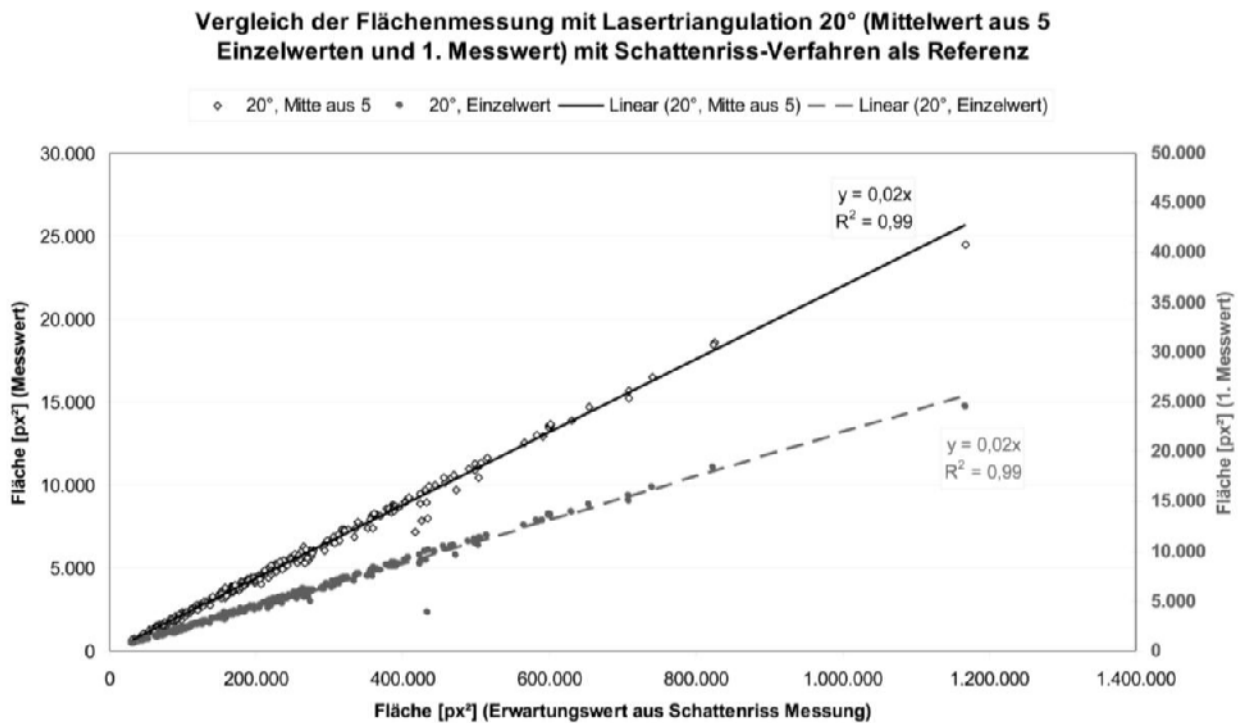


Abbildung 4 Vergleich von Schattenriss und Lasertriangulation zur Flächenmessung

3.2 Verfahren zur Objektisolierung

Zur Objektisolierung geeignete Sensoren sind die 3D-Kamera sowie die Farbkamera. Da beide als Zeilenkamera ein Einzelbild des Bandes liefern, kommen einzelbildbasierte Verfahren zum Einsatz.

Beim Einsatz einer Farbkamera müssen sich Objekte und Hintergrund hinreichend unterscheiden, um eine Trennung von Objekt und Hintergrund zu ermöglichen. Bei Rutschen-Sortierern ist dies in der Regel aufgrund des weit entfernten Hintergrunds unproblematisch, während bei Bandsortierern das Band dazu tendiert, die Farbe des Aufgabematerials anzunehmen. Bei solchen Sortierern kommt die 3D-Kamera zum Einsatz, da sie nicht auf Farbunterschiede angewiesen ist. Das von ihr gelieferte Höhenbild kann als Graustufenbild aufgefasst werden, so dass die eingesetzten Verfahren zur Objektisolierung identisch mit denen einer Farbkamera sind.

Die größten Herausforderungen für die Erkennung sind Verunreinigungen auf dem Band und den Sensoren, die als Rauschen im Bild aufgefasst werden. Robuste Verfahren zur Objektisolierung müssen in der Lage sein, solchen Störungen zu eliminieren und gleichzeitig die zu erkennenden Objekte beizubehalten. Im Folgenden werden einige in Sortieranlagen implementierte Verfahren zur Objektisolierung vorgestellt.

3.2.1 Farbquantisierungsverfahren

Nach der Einteilung des Farbraumes in Vordergrund und Hintergrund liegt ein Binärbild vor. Dieses wird üblicherweise noch mittels morphologischer Bildoperatoren, wie z.B. Erosion und Dilatation gefiltert, um Rauscheinflüsse möglichst gering zu halten. Ausgehend von der Definition von Nachbarschaften auf dem Bildraster werden die zusammenhängenden Vordergrundbildpunktmenge nun als Objekte betrachtet. Klarer Vorteil dieses Verfahrens ist seine hohe Geschwindigkeit. Nachteil ist die hohe Anfälligkeit gegenüber Bildstörungen. Ausserdem lassen sich die Objektgrenzen nur recht grob mit einer Varianz von 1-2 Pixeln bestimmen.

3.2.2 Morphologische Verfahren

Morphologische Verfahren [SOI] nutzen lediglich lokale Strukturen der Bildelemente und nicht deren Farbwerte. Ein zur Objektisolierung gerne herangezogenes Verfahren ist die sogenannte morphologische Wasserscheidetransformation [DEK]. Diese liefert direkt ein Binärbild mit geschlossenen regelmäßigen Objekten. Vorteil dieses Verfahrens ist die Ausnutzung von Struktur im Bild. Nachteile sind die Empfindlichkeit gegenüber Rauscheinflüssen und Änderungen in der Beleuchtung, sowie die Erkennung von irregulären Objekten.

3.2.3 Gradientenbasierte Verfahren

Die Objektgrenzen zeichnen sich durch Unterschiede in der Farbintensität gegenüber dem Hintergrund aus. Fasst man das Bild als Abbildung $R^2 \rightarrow R$ auf, so kann man einen solchen Intensitätsübergang als eine Stelle der Funktion mit sehr hoher Steigung orthogonal zur Objektgrenze und sehr niedriger Steigung parallel dazu betrachten. Das wohl bekannteste Verfahren stellt dabei die Kantenextraktion nach Canny dar [CAN]. Hier wird das Bild erst geglättet, um Rauscheinflüsse zu eliminieren. Anschließend werden an jedem Bildpunkt die Beträge der Gradienten in beide Richtungen bestimmt und mittels eines Hysterese-Verfahrens entschieden, ob ein Bildpunkt zur einer Kante gehört oder nicht. Weitere Verfahren bestimmen Kanten durch den Vergleich lokaler Varianzen [FOR], welche den Filter an die jeweilige Bildsituation anpassen. Beide Verfahren bieten die Möglichkeit der Lokalisierung der Objektkontur auf Subpixelgenauigkeit.

Aus dem so gewonnenen Kantenbild müssen jetzt noch die Objekte zusammengesetzt werden. Da sich Rauscheffekte i.d.R. nicht vollständig eliminieren lassen, sind die Objektgrenzen im Kantenbild nicht optimal. So können beispielsweise Lücken in Objektkonturen auftreten, welche man durch morphologische Operatoren aber auch durch die Hinzunahme von Farbinformation schließen kann.

Vorteile der Gradientenbasierten Verfahren sind die hohe Genauigkeit und die Möglichkeit einer adaptiven Filterung. Dem gegenüber stehen wesentlich höhere Rechenzeiten. Da allerdings nahezu alle genannten Operationen eine Implementierung in Hardware (z.B. auf einem FPGA) bieten, sind diese auch für den harten Realzeiteinsatz geeignet.

4 Literatur

- [CAN] 1986 Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8:679-714, 1986
- [FOR] 1987 W. Förstner, E. Gülch. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In Proc. ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, pages 281305, Interlaken, Switzerland, June 1987
- [DEK] 1992 Marcel Dekker, The Morphological approach of segmentation: The watershed transformation, Mathematical Morphology in Image Processing, New York, 1992
- [SOI] 1999 P. Soille, MORPHOLOGICAL IMAGE ANALYSIS -Principles and Applications, Springer-Verlag, 1999
- [BEK] 2006 Ernie Beker, Quantensprung in der Sortier-Analytik, WLB Ausgabe 6/2006, Seite 50ff.
- [ZEI] 2006 Eckhard Zeiger, Sortierung von Baumischabfall – Röntgenmaschine trennt wirtschaftlich organische und anorganische Bestandteile, WLB Ausgabe 5/2006
- [TIT] 2004 TiTech Visionsort GmbH, Abfälle automatisch sortieren, Sekundär-Rohstoffe 10/2004

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Dirk Killmann
I.A.R. RWTH Aachen
Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe
Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz
Wüllnerstr. 2
52062 Aachen

Telefon +49 (241) 80 – 957 04
Email: killmann@ifa.rwth-aachen.de
Website: www.ifa.rwth-aachen.de

Dipl.-Inform. Thomas Scharrenbach

AMR RWTH Aachen

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe

Lochnerstr. 4-20

52064 Aachen

Telefon +49 (241) 80 – 968 83

Email: scharrenbach@amr.rwth-aachen.de

Website: www.amr.rwth-aachen.de