



Großtechnische experimentelle Forschung im Digital Waste Research Lab und Digitale Abfallanalytik und -behandlung

Lisa Kandlbauer · Renato Sarc · Roland Pomberger

Angenommen: 13. Oktober 2023
 © The Author(s) 2023

Zusammenfassung Mit dem Digital Waste Research Lab konnte eine neue Forschungsinfrastruktur in Betrieb genommen werden. Die innovative Versuchsanlage für großtechnische experimentelle Forschung im Bereich digitaler Abfallanalytik und -behandlung ist modular aufgebaut und besteht grundsätzlich aus förder- und verfahrenstechnischen Aggregaten, verschiedenen Sensoren, einer Sortiereinheit und einer digitalen Datenmanagementplattform. Die Anlage ist mit folgenden Sensoren zur Partikel- und Stoffstromcharakterisierung ausgestattet: Eine Nahinfrarot-Kamera ermöglicht die Erfassung von Materialarten und eine RGB-Zeilenkamera dient zur farblichen Charakterisierung von Objekten. Mit der Technologie der 3D-Lasertriangulation werden Volumeninformationen detektiert und zur Erkennung von metallischen Objekten ist eine Induktionsleiste installiert. (Semi-)mobile Förder- und Maschinenteknik ermöglichen neben der internen Kreislaufführung auch eine Linienschaltung der Anlage, um diverse Aufbereitungsaggregate im Verfahrensprozess der Sortieranlage vor- bzw. nachzuschalten. In der Anlage wurden bereits erste Untersuchungen durchgeführt, um diese für die Online-Online-Qualitätssicherung zu kalibrieren. Zusätzlich wurde das mobile Modul Nahinfrarot-Sensor in einer realen mechanischen Abfallaufberei-

tungsanlage installiert, um Materialdaten an unterschiedlichen Positionen in der Anlage während des üblichen Betriebs zu messen. Dabei wurden umfangreiche Daten gewonnen, mit denen der digitale Grundstein gelegt wurde, das Prozessverhalten in der Anlage zu beschreiben. Dies ist unter anderem auch Ziel der Forschungsvision „Smart Waste Factory“ für nicht gefährliche gemischte Abfälle, in der unter anderem die gleichzeitige Überwachung der Materialqualität und der Maschinenperformance sowie daraus resultierende dynamische Maschinensteuerung und optimale Abfallbehandlung einen wichtigen Stellenwert haben.

Schlüsselwörter Großtechnische Forschung · Materialcharakterisierung · Digitale Abfallanalytik · Sortierung · Gemischte Abfälle · Sensortechnik · Versuchsanlage · Digitalisierung

Large-scale experimental research in the digital waste research lab and digital waste analytics and treatment

Abstract With the Digital Waste Research Lab, a new research infrastructure was implemented. The innovative test facility for large-scale experimental research in the field of digital waste analysis and treatment has a modular design consisting of conveying and process engineering aggregates, various sensors, a sorting unit, and a digital data management platform. The system is equipped with the following sensors for particle and material flow characterization: a near-infrared camera enables the detection of material types, and an RGB line camera is used for colour characterization of objects. 3D laser triangulation technology detects volume information, and an induction bar is installed to detect metallic objects. (Semi-)mobile conveyor and machine technology allow—in addition to the operating mode “circulation”—the operating mode “line” of

the plant. Here, the research plant can be connected with various processing aggregates in the upstream or downstream process of the sorting plant. Initial tests have already been carried out in the plant to calibrate it for online-time quality assurance. In addition, the mobile near-infrared sensor module was installed in a real mechanical waste processing plant to measure material data at different positions in the plant during regular operation. Extensive data was obtained, with which the digital foundation was laid to describe the process behaviour in the plant. This is also the goal of the research vision “Smart Waste Factory” for non-hazardous mixed waste, in which simultaneous monitoring of material quality and machine performance and resulting dynamic machine control and optimal waste treatment are essential.

Keywords Large-scale research · Material characterization · Digital waste analytics · Sorting · Mixed waste · Sensor technology · Test facility · Digitalization

1 Einleitung

Auch in der Abfallwirtschaft geht seit den letzten Jahren ein Trend in Richtung Digitalisierung (Curtis et al. 2021; Khodier et al. 2019; Kroell et al. 2022a; Sarc et al. 2019), welche unter anderem auch dazu beitragen soll, die ambitionierten Ziele der gesetzlich vorgegebenen Recyclingquoten (European Commission 2018) in den nächsten Jahren zu erfüllen. Einhergehend mit der Digitalisierung sind Daten über Materialien, Maschinen und Prozesse. Wie auch in anderen Industriesparten sind auch im Bereich der Abfallwirtschaft diese Daten ein relevanter Grundstein, um dynamische Betriebslösungen in einem Abfallbehandlungsprozess entwickeln und umsetzen zu können (Curtis and Sarc 2021; Khodier et al. 2021, 2019; Khodier and Sarc 2021; Küppers et al. 2022). Neben der Möglichkeit,

DI L. Kandlbauer ·
 Ass.-Prof. DI Dr. R. Sarc (✉) ·
 Univ.-Prof. DI Dr. R. Pomberger
 Lehrstuhl für
 Abfallverwertungstechnik
 und Abfallwirtschaft,
 Montanuniversität Leoben,
 Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben,
 Österreich
renato.sarc@unileoben.ac.at

DI L. Kandlbauer
lisa.kandlbauer@unileoben.ac.at
 Univ.-Prof. DI Dr. R. Pomberger
roland.pomberger@unileoben.ac.at



Abb. 1 Versuchsanlage Digital Waste Research Lab (© AVAW)

die notwendigen Daten experimentell in repräsentativer großtechnischer Menge zu gewinnen, fehlen oft auch digitale Infrastruktur, Algorithmen sowie der klar definierte wirtschaftliche Nutzen bzw. „Return-on-Investment“ (ROI) für Anlagenbetreiber, was eine Investition in potenzielle Technologien zusätzlich erschwert. Der Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben hat in Sankt Michael in der Obersteiermark die Forschungsanlage Digital Waste Research Lab (DWRL) zur Charakterisierung und Sortierung von Schüttgütern in Betrieb genommen (vgl. Abb. 1). Diese soll unter anderem in den Bereichen digitale Partikel- und Materialcharakterisierung, verfahrenstechnische Maschinenoptimierung und -weiterentwicklung sowie digitale Vernetzung und datenbasierte dynamische Steuerung für die großtechnische experimentelle Forschung in Richtung einer Smart Waste Factory eine wichtige Rolle übernehmen und gleichzeitig auch ermöglichen, zukunftsweisende Synergien zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu stärken. Besonders durch die Weiterentwicklung der Kooperationen zwischen verschiedenen Technologieunternehmen entlang der gesamten Kreislaufwirtschaftskette und

dem AVAW werden gemeinsam neue Technologien, Produkte und Lösungen in der neuen Forschungsanlage entwickelt, welche die zukünftigen Anforderungen der modernen Kreislaufwirtschaft erfüllen.

Im Bereich der digitalen Abfallanalytik werden in der Anlage unter anderem Grundlagen geschaffen und repräsentative Methoden entwickelt. Basierend auf Sensordaten und Maschineneinstellungen wird an der Entwicklung eines definierten Verfahrens zur Bestimmung von diversen Qualitätskriterien eines Materialstroms gearbeitet, um zukünftig gewisse manuelle Analysen (Siebung, Sortierung) sowie Laboranalysen zum Bestimmen von chemischen Parametern zu ergänzen und teilweise zu ersetzen.

Die modulare, mobile Sensorik des DWRL steht auch für den Einsatz in großtechnischen Anlagen zur Verfügung und ermöglicht, dass gewisse Untersuchungen unter Realbedingungen vor Ort – durch Nachrüsten der geeigneten Sensorik – durchgeführt werden können. Diese Möglichkeit soll die teilweise aufwendige Probenahme vor Ort mit anschließender Analyse obsolet machen. Zusätzlich werden diese Untersuchungen auch Grundlage für die Bewertung der Leistungsfähigkeit ge-

wisser Maschinen in der Anlage liefern und Aufschluss über Maschinen- und Anlageneffizienz bzw. deren optimalen Betriebsbereich geben.

Neben den bereits etablierten sensorischen Möglichkeiten in der Abfallwirtschaft – Nahinfrarottechnologie zur Materialstromüberwachung bzw. -charakterisierung zur anschließenden Sortierung, Farbzeilenkameras zur Detektion/Unterscheidung von farbigen Objekten etc. – sollen in der Versuchsanlage auch neue Sensoren eingesetzt und somit das Themengebiet „sensorische Erweiterung“ und „Sensorfusion“ behandelt werden. Beispielhaft kann hier der Einsatz von Technologien mit dem Messprinzip der Radiofrequenz-Identifikation (RFID) genannt werden. Erste Untersuchungen in der Abfallwirtschaft hinsichtlich Verweilzeiten und Partikelverfolgung wurden in großtechnischem Maßstab bereits durchgeführt und zeigen Potenzial (Rizvan et al. 2023).

2 Hard-, Software und Betriebsmodi

Die folgenden Abschnitte zeigen die hard- und softwaretechnische Ausstattung sowie die möglichen Betriebsmodi der Versuchsanlage.

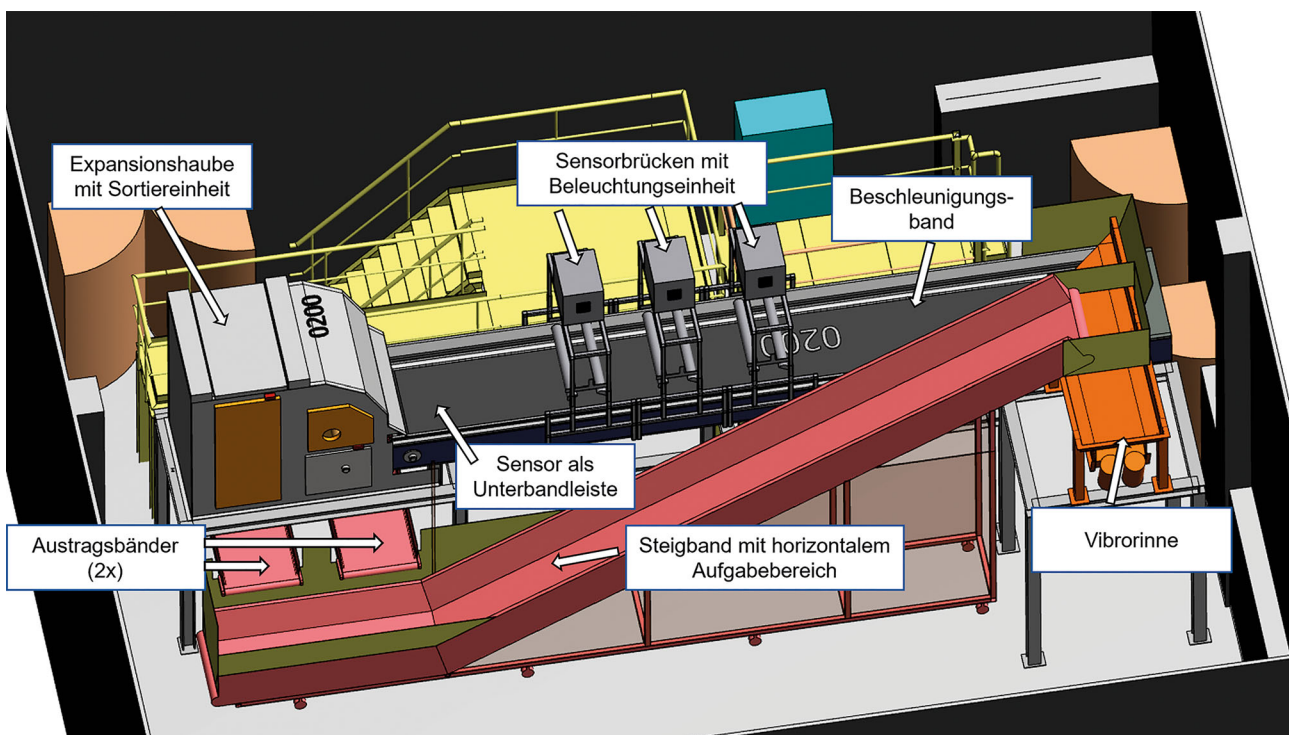


Abb. 2 Schematische Darstellung der Versuchsanlage Digital Waste Research Lab

2.1 Mechanisches Layout der Versuchsanlage

Der schematische Aufbau der Versuchsanlage ist in Abb. 2 dargestellt. Dieser besteht aus einem horizontalen Aufgabebereich, regelbaren Dosiereinrichtungen sowie Bandstrecken und einer pneumatischen Ausschleuseeinrichtung mit der Möglichkeit der (internen) Kreislaufführung. (Semi-)Mobile Fördertechnik und die umfangreiche Ausführung der elektrotechnischen Verschaltung mit mehreren Anschlussmöglichkeiten (sogenannten „docking stations“) erlauben neben einer Kreislaufführung und einem Linienbetrieb („Basisbetrieb“) auch das Integrieren von externen Aggregaten („erweiterter Betrieb“ durch vor- und/oder nachgeschaltete Aggregate, Details siehe Abschn. 2.4) unterschiedlicher Projektpartner für spezielle Fragestellungen. Nachfolgend sind die Komponenten der Fördertechnik sowie der Austrags-einheit näher dargestellt.

2.1.1 Steigband

Die Beschickung der Anlage erfolgt durch ein Steigband, welches als Knickband mit schwarzem Gurt ausgeführt ist. Die nutzbare Bandlänge beträgt

ca. 10 m, wobei der waagrechte Teil am Anfang des Steigbandes ca. 2 m lang und der um ca. 30° geneigte Teil ca. 8 m lang ist. Das Förderband (Fa. Kraus Betriebsausrüstung und Fördertechnik GmbH) hat eine Arbeitsbreite von ca. 0,6 m und ist mit ca. 50 mm hohen Mitnehmern ausgestattet. Die Seitenwände des Förderers sind 0,36 m hoch und ermöglichen so den Transport von Materialschüttungen in einer einstellbaren Geschwindigkeit. Da das Förderband für manche Anwendungspositionen flexibel sein muss, ist die Unterkonstruktion des Bands auf Rollen fixiert und kann dadurch händisch innerhalb der Halle verschoben werden.

2.1.2 Vibrorinne

Die Vibrationsrinne der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH dient als Dosierungs- bzw. Vereinzelungsaggregat und vereinzelt das vom Steigband kommende Material für das Beschleunigungsband. Die Vibrationsrinne hat eine förderwirksame Breite von ca. 0,9 m und durch die schräge Abwurfkante aufgrund der 90°-Stellung zum Beschleunigungsband eine mittlere Länge von ca. 2,7 m. In der Rinne ist ein Verteilerhut angebracht, der das Material auf die gesamte Breite der Rinne verteilt.

Die Schwingintensität der Vibrationsrinne kann mittels Frequenzumrichter verändert werden.

2.1.3 Beschleunigungsband

Das Beschleunigungsband (Fa. Stadler Anlagenbau GmbH) – auch Analyseband genannt – hat eine Arbeitsbreite von 0,94 m und eine nutzbare Länge von ca. 7,5 m. Die Geschwindigkeit kann von 0,2 bis 3,7 m/s eingestellt werden. Am hinteren Teil des Bands sind mehrere Sensoren über/unter dem Band montiert (vgl. Abschn. 2.2), welche zur Materialcharakterisierung dienen.

2.1.4 Expansionshaube und Sortiereinheit

Um Partikel aus einem Materialstrom auszuschleusen, ist die Versuchsanlage mit einer pneumatischen Düsenleiste ausgestattet, welche auf einer Breite von 1 m 80 individuell ansteuerbare Düsen zur Verfügung stellt. Zur Druckluftversorgung wurde ein Schraubenverdichter (Fa. Gross GmbH) mit einem Nenndruck von 11 bar und einem Druckbehälter mit 1000 l Fassungsvermögen installiert. Die Expansionshaube (Fa. Stadler Anlagenbau GmbH) wurde



Abb. 3 Ausschnitt aus Software „SQALAR“ zur Verwertung der NIR-Daten

mit Fenstern und Türen aus Plexiglas sowie einem verstellbaren Trennscheitel ausgestattet.

2.1.5 Austragsbänder

In der Anlage sind zwei semi-mobiler Austragsbänder (Reject-Band: für Material, welches nicht pneumatisch ausgetragen wird; Eject-Band: für Material, welches pneumatisch ausgetragen wird) installiert. Die Bänder (Fa. Kraus Betriebsausstattung und Fördertechnik GmbH) sind unterhalb der Expansionshaube montiert, haben einen dunkelgrünen Gurt und eine Arbeitsbreite von 0,77 m. Durch die Montage der Bänder auf einem Schienen-/Rollensystem ist es möglich, die Abwurfposition am Ende der beiden ca. 3 m langen Austragsbänder unabhängig voneinander zu verändern. Die Geschwindigkeit der beiden Bänder kann zwischen 0,03 und 0,65 m/s verändert werden.

2.2 Sensorik

Die Anlage ist mit versetzbaren und semi-mobilen Messbrücken auf dem Beschleunigungsband ausgestattet, die flexibel verschiedenste Sensoren und Messsysteme für die On-time- und On-

line-Analyse von Abfallschüttgütern sowie einzelnen Abfallobjekten/Partikeln aufnehmen können. Eine detailliertere Auflistung der einzelnen Sensoren mit deren Spezifikationen ist in den nachfolgenden Abschnitten gegeben.

2.2.1 Nahinfrarot Kamera

Zur Aufzeichnung von spektralen Daten im NIR-Bereich wurde eine Kamera im Wellenlängenbereich 900–1700 nm gewählt. Das hyperspektrale Bildgebungssystem zeichnet an jedem der 320 Ortspixel ein komplettes NIR-Spektrum mit einer Auflösung von 9 nm und einer Abtastrate von bis zu 446 Hz auf (EVK 2020a). Als Emittent dient eine Infrarot-Illumination-Halogen-Beleuchtungseinheit (Kerschhagl 2020), welche in der Versuchsanlage dimmbar ausgeführt wurde.

2.2.2 RGB-Zeilenkamera

Für das Erfassen von RGB-Daten wurde eine Zeilenkamera installiert (Teledyne Dalsa 2016). Der Sensor hat eine Auflösung von 4096 * 2 Pixeln. Zur Beleuchtung werden zwei LED-Leisten (MTD GmbH 2021) verwendet, die speziell für Zeilenkameras entwickelt und

in der Versuchsanlage dimmbar ausgeführt wurden.

2.2.3 Laser-Triangulationssensorik

Zur Bestimmung von Volumeninformationen wurde ein Messsystem nach dem Prinzip der 3D-Lasertriangulation (3DLT) installiert. Zur Abdeckung der gesamten Förderbandbreite wurden zwei baugleiche Sensoren (Automation Technology 2021) verwendet.

2.2.4 Induktionsleiste

Zur Detektion von Metallen ist eine Induktionsleiste eingebaut. Diese hat eine Arbeitsbreite von 1 m mit einem Rasterabstand von 25 mm und ist im dafür vorgesehenen Schacht direkt unter dem Beschleunigungsband angebracht (EVK 2020b).

2.2.5 RFID-Sensoren

Für die Messtechnologie der Radiofrequenz-Identifikation ist Hardware (Reader: Type SIMATIC RF650R, Antenne: Type SIMATIC RF660A) für sechs individuelle Messpositionen verfügbar (Siemens 2021). Die Montage der An-

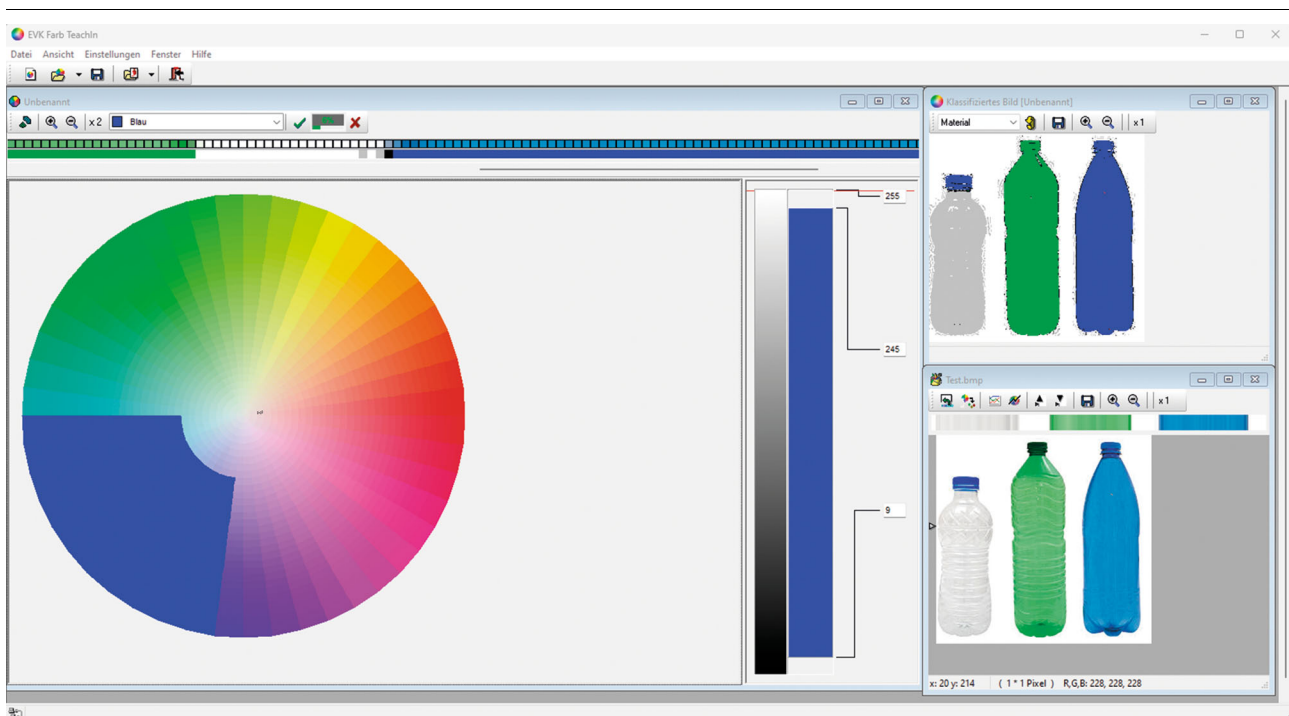


Abb. 4 Ausschnitt aus Software „EVK TeachIn“ zur Verarbeitung der RGB-Daten

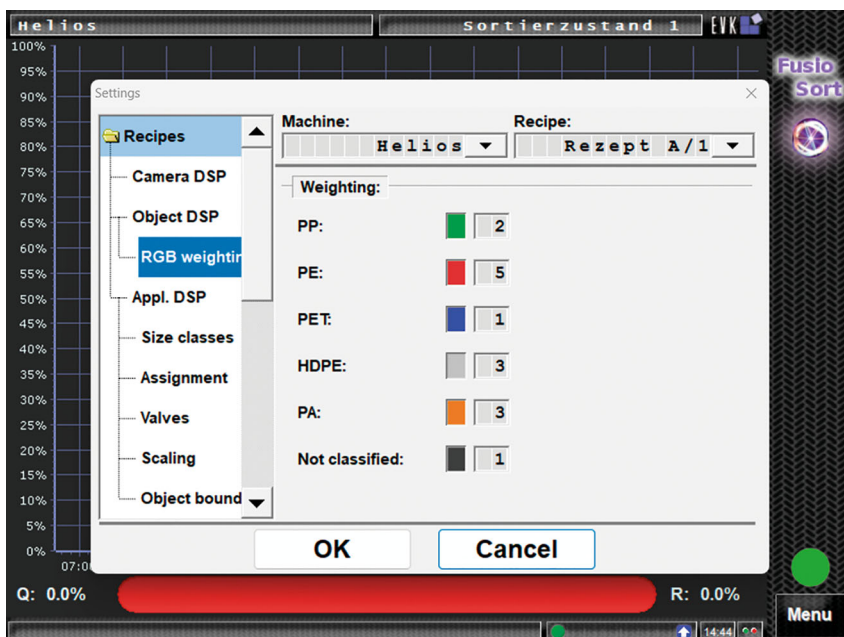


Abb. 5 Ausschnitt aus Software FusioSort MMI zur Einstellung/Auswahl des Sortierrezeptes

tennen kann an beliebigen Positionen über den Förderbändern erfolgen.

2.3 Software und Datenauswertung

Die soeben genannten Sensoren ermöglichen eine Datengewinnung. Je nach Lieferanten sind für die Auswertung

der Daten unterschiedliche Softwarelösungen vorhanden. Die Spektraldaten im NIR-Bereich werden über die Software des Sensorherstellers (EVK 2023) verarbeitet (vgl. Abb. 3). Für die RGB-Kamera steht ebenso ein eigenes Programm zur Verarbeitung zur Verfügung (EVK 2022) (vgl. Abb. 4). Die

Ansteuerung der Düsen zur Sortierung (ausgenommen ist das 3D-Lasertriangulationsmesssystem) erfolgt über ein Sorting-Engine-Modul gemeinsam mit dem Sensor-Interface GigE Vision (vgl. Abb. 5). Zur Sortierung können Daten des NIR- und RGB-Sensors sowie jene der Induktionsleiste herangezogen werden. Zusätzlich steht in der Forschungsanlage die mit Siemens Österreich AG gemeinsam entwickelte „Recycling Analysis Platform“ zur Verfügung, welche die Daten aller Sensoren lokal aufzeichnet, teilweise bereits zur Vor-Ort-Analyse statistisch ausgewertet und grafisch darstellt (vgl. Abb. 6) und dem User zum späteren Download für Auswertungen zur Verfügung stellt. Mit diesen Systemen steht im DWRL eine pneumatische Sortierung sowie eine umfangreiche Charakterisierung von diversen Schüttgütern auf physikalischer und chemischer („chemical imaging“) Ebene zur Verfügung.

2.4 Betriebsmodi

Die positionsflexible Ausführung der Förderbänder am Austrag sowie des Steigbandes ermöglicht unterschiedliche Betriebsmodi der Anlage. Allgemein können die Betriebsarten Basisbetrieb und erweiterter Betrieb unterschieden werden, wobei man vom Basisbetrieb spricht, wenn zu den in Abschn. 2.1

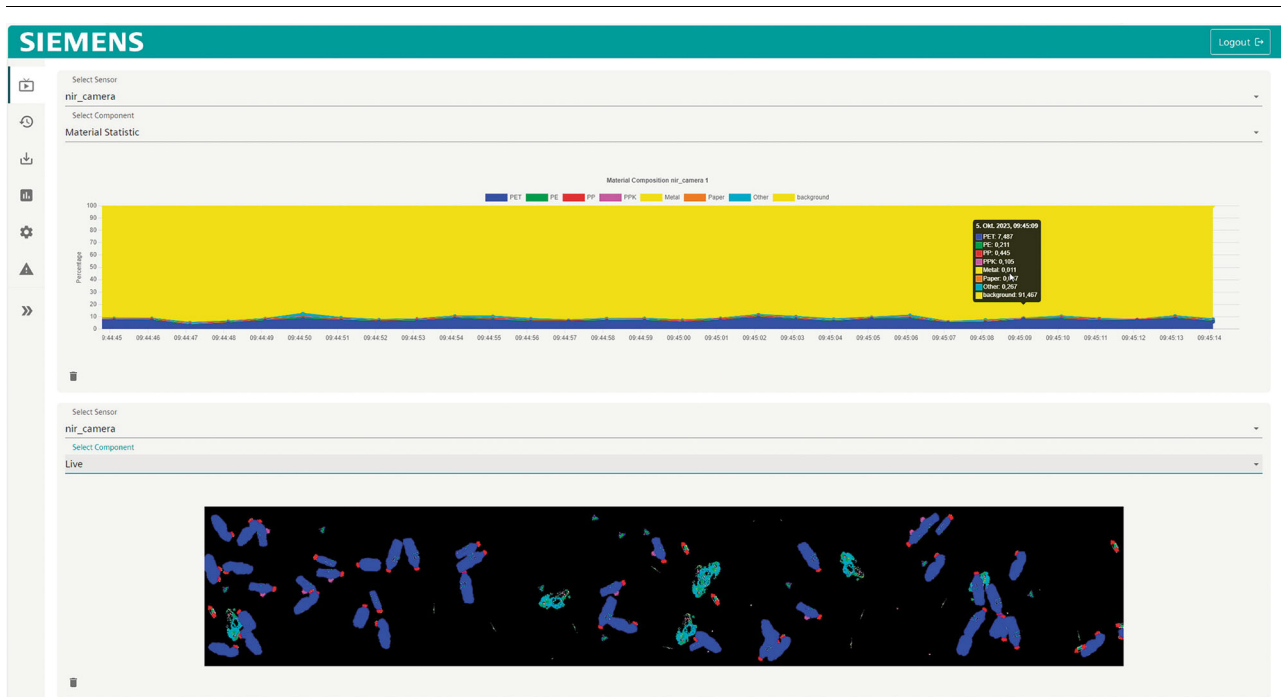


Abb. 6 Ausschnitt aus der Recycling Analysis Platform zur Darstellung und Aufzeichnung der Sensordaten

genannten Aggregaten keine zusätzliche Fördertechnik verwendet wird. Alle Adaptierungen, die dem nicht entsprechen, werden als „erweiterter Betrieb“ verstanden. Eine Gliederung der Betriebsmodi ist in Abb. 7 dargestellt und wird nachfolgend näher beschrieben.

2.4.1 Basisbetrieb

Je nachdem, wie die Materialströme im Basisbetrieb über die Anlage geleitet werden, unterscheidet man zwischen Kreislauf- und Linienbetrieb. Der Kreislaufbetrieb ist durch eine einmalige Aufgabe der Probe definiert, wobei mindestens ein Teilstrom im Kreis gefahren – also erneut dem Steigband zugeführt – wird. Im vollständigen Kreislauf werden beide Output-Ströme zurückgeführt (vgl. Abb. 8a). Sobald ein Teilstrom nach der Sortierung aus der Anlage ausgetragen wird, spricht man – abhängig davon, welcher Strom im Kreis geführt wird – von einem Reject-Kreislauf (vgl. Abb. 8b) oder einem Eject-Kreislauf (vgl. Abb. 8c). Im Linienbetrieb erfolgt keine Rückführung der Materialströme auf das Steigband (vgl. Abb. 8d). Das bedeutet, dass sowohl der Reject- als auch der Eject-Strom dem Kreislauf und der Anlage entzogen und in einem separaten Behälter gesammelt werden.

2.4.2 Erweiterter Betrieb

Durch Zuschaltung weiterer Aggregate vor oder nach der Sortieranlage kann die gesamte Anlage erweitert werden (vgl. Abb. 8e). Man unterscheidet dabei drei Fälle: Erweiterung des Input-Stroms, Erweiterung des Output-Stroms sowie eine Kombination dieser beiden. Die dabei entstehenden verfahrenstechnischen Linien können sowohl im Kreislauf als auch in einer Linie betrieben werden. Im Falle einer sogenannten Linie-IN-Erweiterung wird dem Steigförderer bzw. gegebenenfalls direkt der Vibrorinne mindestens ein Aggregat vorgeschaltet. Der Output erfolgt dabei unverändert über die beiden Austragsbänder. Bei der Linie-OUT-Erweiterung wird die bestehende Infrastruktur an den Austragsbändern erweitert, wobei die Gutaufgabe in gewöhnlicher Form über den Steigbandförderer ohne vorgeschaltete Aggregate erfolgt. Als grundlegende Optionen für den erweiterten Betrieb sind folgende Aggregate zu nennen: Zerkleinerungsaggregate, Siebe, Windsichter, Metallabscheider (Eisen, Nicht-Eisen), Ballistischer Separator, Förderbänder usw. Die bereits beschriebenen Erweiterungen können ebenso in kombinierter Form erfolgen, was unter IN & OUT-Erweiterung verstanden wird. Für den erweiterten Betrieb kann das auf Rollen montierte

Steigband in eine alternative Position zur Materialaufnahme eines vorgeschalteten Aggregats bzw. Materialabtransport zu einem Nachfolgeaggregat gebracht werden.

3 Einsatzmöglichkeiten der Anlage

Die Flexibilität und Modularität der Anlage ermöglicht unterschiedliche Einsatzgebiete in der Anwendung. Beispielsweise werden in den folgenden Abschnitten zwei konkrete Einsatzgebiete und erste Erkenntnisse beschrieben, wo im ersten Fall Überlegungen und erste Ansätze zur Entwicklung einer Methode zur Echtzeitqualitätssicherung im DWRL umgesetzt, und im zweiten Fall Teile der Sensorik des DWRL als mobile Einheit in einer mechanischen Aufbereitungsanlage eingesetzt worden sind. Beide Anwendungen sind notwendige Untersuchungen, um eine digitale Materialanalyse im DWRL zu ermöglichen.

3.1 DWRL zur stationären Qualitätssicherung

Mechanische Abfallaufbereitungsanlagen für gemischte Abfälle verarbeiten keine qualitätsgesicherten, klar spezifizierten Rohstoffe, sondern Abfälle mit stark schwankenden Eigenschaften. Trotzdem werden diese Materialien teilweise zu qualitätsgesicherten

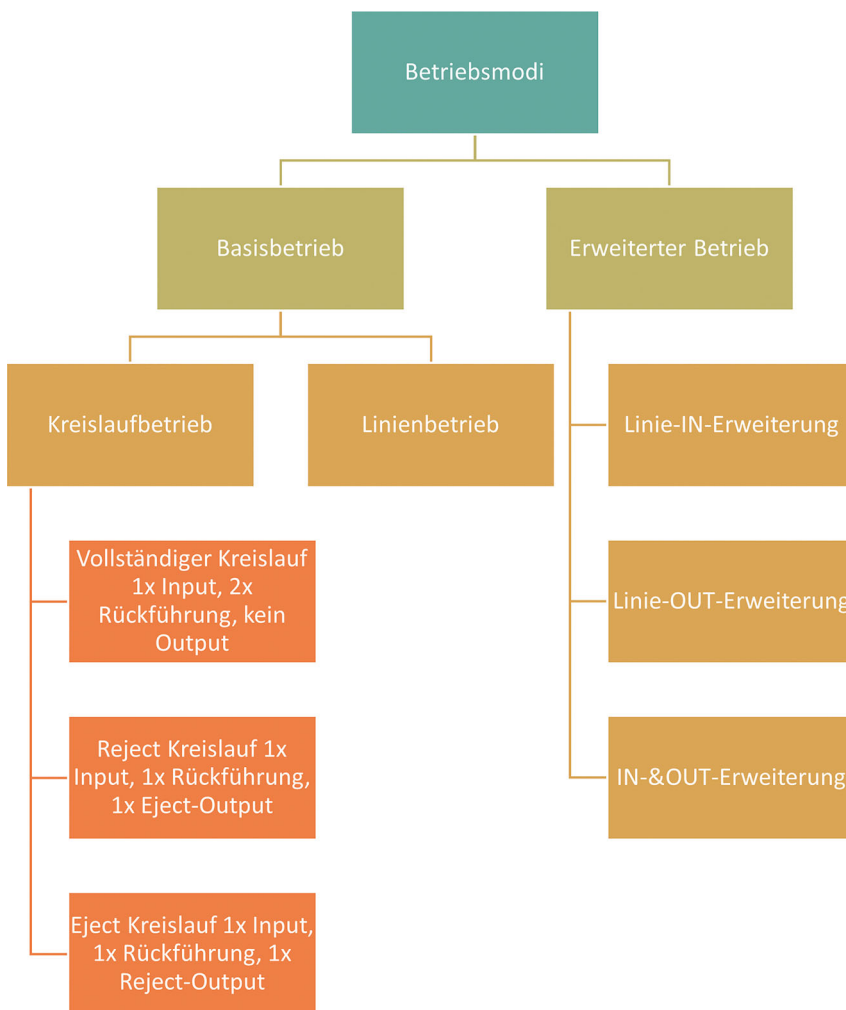


Abb. 7 Gliederung der Betriebsmodi in der Versuchsanlage Digital Waste Research Lab

Konzentraten, zum Beispiel für den Einsatz in Recyclinganlagen oder als Brennstoff in Zementwerken weiterverarbeitet. Üblicherweise werden Qualitätskontrollen mithilfe von Laboranalysen durchgeführt, wobei repräsentative Proben der fertigen Ersatzbrennstoffe entnommen werden (Aldrian et al. 2016). Aufwand und Kosten für Laboranalysen sind ein relevanter Anreiz für ein System zur sensorischen Echtzeitqualitätssicherung. Damit das effektiv und effizient funktioniert, müssen sich Anlagen dorthin entwickeln, Abfälle auf Partikelebene zu charakterisieren (z.B. Korngrößenbestimmung nach Kandlbauer et al. (2021), Massenvorhersage von Partikeln nach Kroell et al. (2021) bzw. Vorhersage von Elementgehalten nach Viczek et al. (2021)), autonom in Echtzeit auf sie zu reagieren und produzierte Qualitäten und auftretende Abweichungen frühzeitig zu erkennen

und zu beeinflussen. Um im ersten Schritt Materialqualitäten an gewissen Kriterien zu definieren, wird im DWRL an der Methodenentwicklung zur Echtzeitqualitätssicherung gearbeitet. NIR-Sensoren erfassen Informationen an der Materialoberfläche, daher ist die Vereinzelung der Partikel während des Messvorgangs ein wesentlicher Punkt, welcher in ersten praktischen Untersuchungen im Fokus stand.

Der Kreislaufbetrieb ermöglicht die wiederholte Charakterisierung desselben Materials auf dem Beschleunigungsband, da das Material von den Austragsbändern automatisch wieder auf das Steigförderband gefördert wird (vgl. Abschn. 2.4.1). In den praktischen Versuchen wurden die Informationen des NIR-Sensors zur Bewertung der Vereinzelung des Materialstroms verwendet. Vorzerkleinerte Proben gemischten Gewerbeabfalls (max.

400 mm) wurden gesiebt, und Siebschnitte der Kornklassen 40–60 mm, 60–80 mm und 80–100 mm wurden für die Versuche verwendet. Zusätzlich wurde eine Mischprobe hergestellt, die die Kornklassen zwischen 40 und 100 mm in einem Massenverhältnis von gemischtem Gewerbeabfall enthält. Alle Proben hatten ein Volumen zwischen 0,5 und 0,6 m³. Verschiedene Proben- und Korngrößen wurden mit unterschiedlichen Maschineneinstellungen und Transportgeschwindigkeiten im DWRL kombiniert, um Einflüsse auf die Vereinzelung des Materialstroms zu untersuchen. Da Voruntersuchungen den signifikanten Einfluss des Steigbands und der Vibrorinne auf die Materialverteilung zeigen, wurden bei den verschiedenen Versuchsdurchläufen die Geschwindigkeit des Steigbands und die Intensität der Vibrorinne verändert. Literaturwerte deuten auf einen konstanten Vereinzelungsgrad bei einer Bandbelegung zwischen 10 und 20% hin (Kroell et al. 2022b), weshalb dieser Wert angestrebt wurde. Die Proben wurden der Maschine char- genweise zugeführt. Die Zeitdauer für einen Durchlauf wurde manuell gemessen, indem mehrere einzelne Partikel im Materialstrom über mehrere Runden beobachtet und die Zeit für einen Durchlauf gestoppt wurde. Zusätzlich wurde der mittlere Durchsatz gemessen, indem der fallende Materialstrom am Austragsband manuell entnommen und anschließend mit dem abgeschätzten Volumen im Auffangbehälter mit bekannten Abmessungen und kombiniertem Wiegen notiert wurde. Erste Ergebnisse zeigen Auswertungen an einer Probe im Korngrößenbereich 40–60 mm (38 kg, ca. 0,5 m³). Auf der Grundlage der NIR-Daten wurde die Bandbelegung über die Zeit für drei Maschineneinstellungen¹ berechnet. Es wurde festgestellt, dass eine zu niedrige Geschwindigkeit des Zuführbands (5%) keine Vergleichmäßigung des Materials ermöglicht, selbst nach ca. 30 min ist die Materialhäufung in jeder Runde in den Daten noch sichtbar (vgl. Abb. 9a). Eine höhere Bandgeschwindigkeit (50%) führt zu einer Anhäufung des Materials auf dem Analyseband und führt dadurch zu einer nicht erwünsch-

¹ Prozentwerte der Geschwindigkeitseinstellung beziehen sich auf 213 min⁻¹ für den Antrieb des Zuführbands und 96 min⁻¹ für den Antrieb der Vibrorinne.

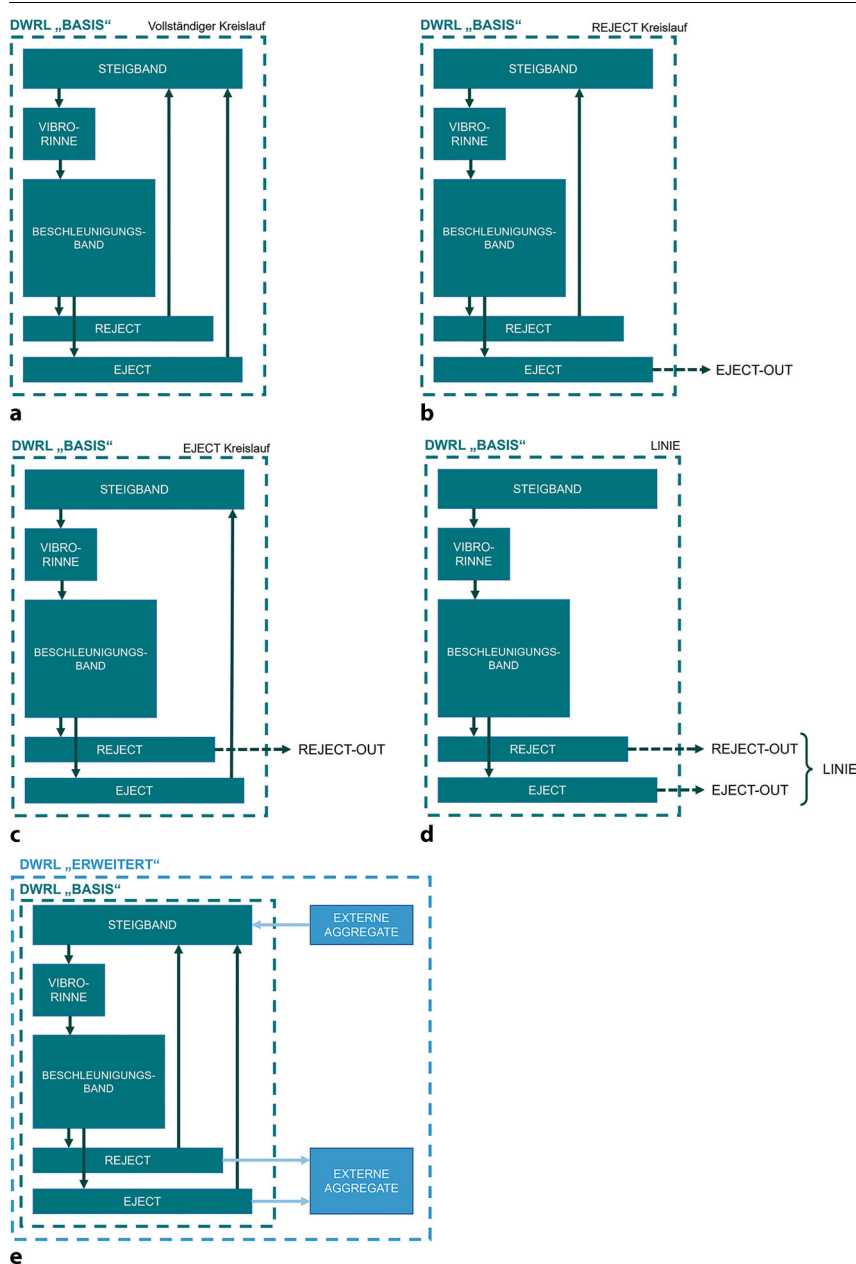


Abb. 8 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Betriebsmodi in der Versuchsanlage Digital Waste Research Lab

ten Überbelegung (vgl. Abb. 9b). Bei einer Geschwindigkeit des Steigbands von 18% konnte eine Vergleichmäßigung des Materials nach ca. 14 min erreicht werden. Außerdem konnte die gewünschte Bandbelegung von 10 bis 20% in fast 75% der Zeit erreicht werden. Nur 6% der Werte lagen über dem angestrebten Bereich. Für die Einstellungen konnte eine durchschnittliche Rundendauer in der Anlage von ca. 70 s ermittelt werden (vgl. Abb. 9c). Bei dieser Einstellung wurde eine mittlere

Durchsatzleistung von ca. 2t/h und 28 m³/h gemessen (Radkohl 2023).

3.2 Sensorik als mobile Einheit in einer realen Aufbereitungsanlage

Für die Echtzeitcharakterisierung von Abfallströmen wurde ein Prototyp eines „Waste Scanners“ entwickelt und in einer realen mechanischen Abfallaufbereitungsanlage in der Steiermark an unterschiedlichen Positionen installiert. Je nach Aufgabenstellung kamen

dafür verschiedene Sensoren – Farbkameras, NIR-Sensoren, Volumenstromsensoren – parallel zum Einsatz, um unterschiedliche Materialcharakteristika zu erfassen. Um die Wirkung einzelner Aggregate im Normalbetrieb der Anlage zu bewerten, wurden zeitgleich sowohl der Input- als auch die beiden Outputströme eines Aggregats (Bsp: Input, Eject und Reject einer Sortiermaschine) sensorisch aufgezeichnet. Für den Waste Scanner wurde die NIR-Kamera inkl. Beleuchtungseinheit des DWRL verwendet. Ein mechanischer Aufbau der Sensorikeinheit auf Profilschienen ermöglicht eine einfache und positionsflexible Montage über dem Förderband und kann dadurch an unterschiedliche Förderbandbreiten angepasst werden. Der Einsatz des Waste Scanners in der Aufbereitungsanlage ist in Abb. 10 dargestellt. Ein Ausschnitt der aufgezeichneten Materialdaten des NIR-Sensors ist in Abb. 11 dargestellt.

4 Erweiterungsmöglichkeiten und Ausblick

Ausgehend von den soeben beschriebenen Betriebsmodi und Einsatzmöglichkeiten der Forschungsanlage, werden aktuell mehrere Ansätze im DWRL geplant und geprüft. Im Rahmen der sogenannten „sensorischen Erweiterung“ ist die Einbindung zusätzlicher Sensoren und die Untersuchung der Sensorfusion geplant. Neben zusätzlichen Videokameras zur Gewinnung von Bildmaterial, wird auch die Installation von Infrarotsensoren, welche in anderen Wellenlängenbereichen als übliche NIR-Sensoren zur Materialcharakterisierung im Abfallbereich arbeiten, angestrebt. Fokus dieser Aufgabenstellung ist die Untersuchung der Detektionsmöglichkeiten spezieller Materialfraktionen (z.B. PVC) im Bereich der Materialstromüberwachung.

Zusätzlich wird auf Softwareentwicklungsebene daran gearbeitet, jegliche Sensordaten aus der Anlage zu fusionieren. Dies soll eine verbesserte Materialcharakterisierung ermöglichen, indem man Informationen der unterschiedlichen Sensoren für ein konkretes Objekt gleichzeitig betrachtet (konkretes Beispiel: Signal von NIR ergibt Material „PET“, Signal von RGB ergibt „grün“, Signal von 3DLT ergibt „30 cm Länge“). Hier ist besonders der zeitliche Abgleich der unterschiedlichen Sensordaten aufgrund der zeitlich versetzten Messung

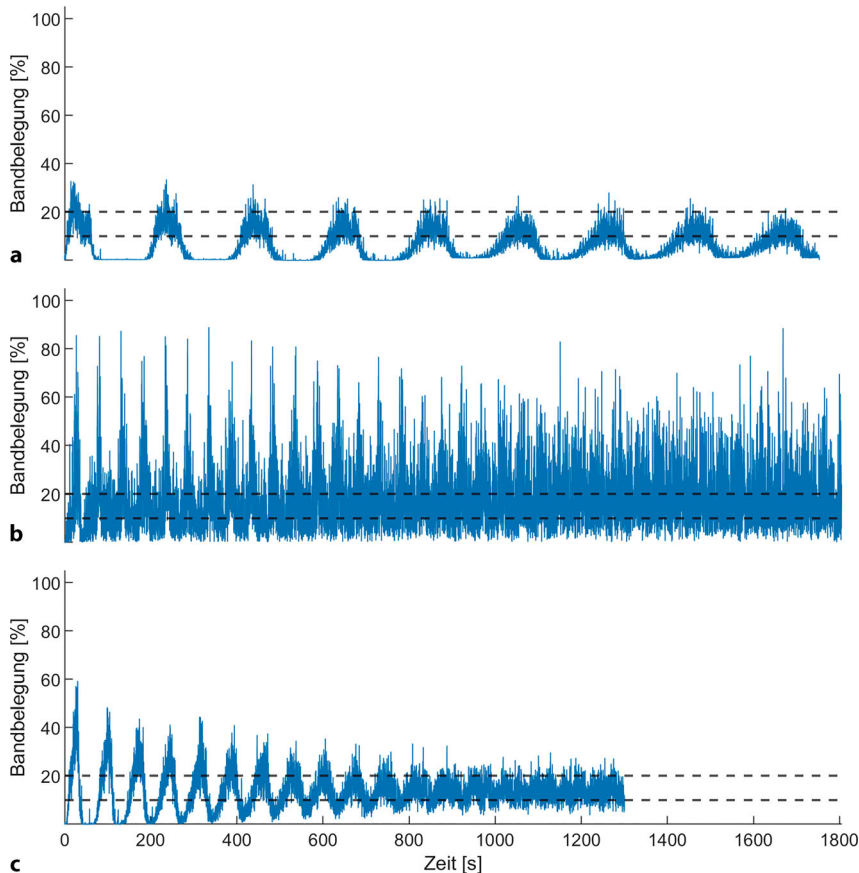


Abb. 9 Darstellung der Bandbelegung der Probe in der Kornklasse 40–60 mm. Es gelten folgende Geschwindigkeiten/Intensitäten im DWRL: **a** 5 % Steigband, 93 % Vibrorinne; **b** 50 % Steigband, 80 % Vibrorinne; **c** 18 % Steigband, 77 % Vibrorinne. Die *strichlierten horizontalen Linien* stellen den gewünschten Zielbereich zwischen 10 und 20 % dar. Prozentwerte der Geschwindigkeitseinstellung beziehen sich auf 213 min^{-1} für den Antrieb des Zuführbandes und 96 min^{-1} für den Antrieb der Vibrorinne



Abb. 11 Beispieldaten des NIR-Sensors aus der Anlage. Die unterschiedlichen Farben stellen die verschiedenen Materialien dar

am Förderband ein kritischer Punkt sowie die unterschiedliche Auflösung (Pixelgröße) der diversen Sensoren.

Im Rahmen großtechnischer Versuche wird für Herbst 2023 sowie Frühjahr 2024 die Einbindung des DWRL in ein verfahrenstechnisches Gesamtkonzept geplant. Die unter dem Namen „ReWaste Prototype“ stattfindenden Versuche werden zum einen den erweiterten Betrieb (siehe Abschn. 2.4.2) des DWRL mit mehreren vorgeschalteten Aggregaten testen, wobei konkret

die Aufbereitungsaggregate Zerkleinerer und ein Ballistischer Separator der Versuchsanlage vorgeschaltet werden. Zusätzlich stehen bei diesem Großversuch die Einbindung und Verschaltung von Maschinen unterschiedlicher Hersteller im Fokus, wobei der Standard Module Type Package (MTP) verwendet wird. Die Daten werden Basis zur Entwicklung einer digitalen Plattform sein, welche herstellerunabhängig Informationen unterschiedlicher Maschinen miteinander verknüpft. Um die

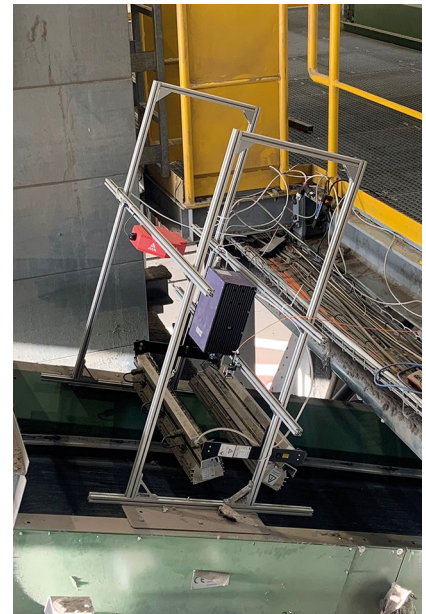


Abb. 10 Einsatz des Waste Scanners in einer mechanischen Aufbereitungsanlage

gesamte Aufbereitungsline mit Daten zu beschreiben, werden mehrere Sensoren an unterschiedlichen Positionen installiert. Aktuell vorgesehen sind die zusätzliche Installation von jeweils fünf RGB-Kameras und Volumenstromsensoren, jeweils sechs NIR-Kameras und RFID-Messstellen sowie einem kombinierten Volumen- und Massstrommessgerät. Im Rahmen dieser Versuche wird die daten- und verfahrenstechnische Verschaltung ums DWRL großtechnisch über einen längeren Zeitraum experimentell getestet. Auch das zeitliche Abgleichen der Sensordaten für den gesamten Prozess steht im Fokus, um Datensätze an einem bestimmten Speicherort als modellierungstechnische Basis für intelligente Regelungen zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich werden die gesammelten Daten im Weiteren auch als Trainingsdaten für Machine-Learning-Algorithmen genutzt werden. Die Versuchsreihe wird damit die Entwicklung einer Smart Waste Factory – also einer intelligenten, autonomen Anlage – vorantreiben und das Konzept eines ersten Prototyps einer solchen großtechnisch untersuchen.

Im Rahmen der „ReWaste Prototype“-Versuche werden auch die Untersuchungen im Bereich digitaler Abfall- bzw. Materialanalytik (vgl. Abschn. 3.1) weiterverfolgt, welche das Ziel haben, definierte und einheitliche Bedingun-

gen zur Qualitätsbestimmung von diversen Qualitätsparametern festzulegen, um langfristig händische Analysen sowie Laboranalysen bis zu einem gewissen Grad zu ersetzen.

Großtechnische experimentelle Infrastruktur ermöglicht praxisnahe kooperative Forschung und verbindet somit neben Theorie und Praxis auch Wissenschaft und Wirtschaft. Die neue großtechnische Versuchsanlage Digital Waste Research Lab ermöglicht zukunftsorientierte Forschung im Bereich der partikel-, sensor- und datenbasierten Abfall-, Recycling- und Umwelttechnik sowie im Bereich der Digitalisierung. Des Weiteren steht die neue Infrastruktur Studierenden der Montanuniversität Leoben als Methodenzugriff zur praxisnahen Ausbildung von Ingenieur:innen im Bereich Umwelt, Recycling, Abfall und Kreislaufwirtschaft – getreu nach dem Universi-

tätsmotto: Wo aus Forschung Zukunft wird! – zur Verfügung.

Danksagung Das COMET-Projekt Recycling and Recovery of Waste for Future – ReWaste F – (882512) wird im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies durch BMK, BMAW und Land Steiermark gefördert. COMET wird durch die FFG abgewickelt.

Funding Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle

ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

Aldrian, A., Sarc, R., Pomberger, R., Lorber, K.E., Sipple, E.-M. (2016): Solid recovered fuels in the cement industry—semi-automated sample preparation unit as a means for facilitated practical application. *Waste Manag Res* 34, 254–264. <https://doi.org/10.1177/0734242X15622816>.

Automation Technology (2021): CS Series: High-Speed 3D Compact Sensors with Ultra HD Resolution.

Curtis, A., Sarc, R. (2021): Real-time monitoring of volume flow, mass flow and shredder power consumption in mixed solid waste processing. *Waste Manag* 131, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.024>.

Curtis, A., Küppers, B., Möllnitz, S., Khodier, K., Sarc, R. (2021): Real time material flow monitoring in mechanical waste processing and the relevance of fluctuations. *Waste Manag* 120, 687–697. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.037>.

European Commission (2018): Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L0851> (accessed 4 October 2023).

EVK (2023): EVK SQLAR: Software Tool for the qualitative and quantitative analysis. <https://www.evkbiz/en/products/analysis-software-tool/evk-sqalar/> (accessed 3 January 2023).

EVK (2020a): Data sheet V1.0.0: EVK HELIOS NIR G2-320: 0.9–1.7 µm hyperspectral imaging system.

EVK (2020b): EVK ABAS TL: smart metal scanner. Data Sheet.

EVK (2022): EVK TeachIn: Benutzerhandbuch. **MTD GmbH (2021)**: MTD-LED CPS Linienbeleuchtung: Betriebsanleitung.

Kandlbauer, L., Khodier, K., Ninevski, D., Sarc, R. (2021): Sensor-based Particle Size Determination of Shredded Mixed Commercial Waste based on two-dimensional Images. *Waste Ma-*

nag 120, 784–794. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.003>.

Kerschhaggl, P. (2020): Betriebsanleitung: IRIL Beleuchtungseinheit InfraRed Illumination, Dokument Version 1.5. EVK GmbH.

Khodier, K., Sarc, R. (2021): Distribution-Independent Empirical Modeling of Particle Size Distributions—Coarse-Shredding of Mixed Commercial Waste. *Processes* 9, 414. <https://doi.org/10.3390/pr9030414>.

Khodier, K., Curtis, A., Sarc, R., Lehner, M., O’Leary, P., Pomberger, R. (2019): Smart Solid Waste Processing Plant Vision and Pathway. Conference Contribution ISWA world congress 2019.

Khodier, K., Feyerer, C., Möllnitz, S., Curtis, A., Sarc, R. (2021): Efficient derivation of significant results from mechanical processing experiments with mixed solid waste: Coarse-shredding of commercial waste. *Waste Manag* 121, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.015>.

Kroell, N., Chen, X., Maghmoumi, A., Koenig, M., Feil, A., Greiff, K. (2021): Sensor-based particle mass prediction of lightweight packaging waste using machine learning algorithms. *Waste Manag* 136, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.017>.

Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., Feil, A. (2022a): Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste management (New York, N.Y.)* 149, 259–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.015>.

Kroell, N., Dietl, T., Maghmoumi, A., Chen, X., Küppers, B., Feil, A., Greiff, K. (2022b): Assessment of sensor-based sorting performance for lightweight packaging waste through sensor-based material flow monitoring: Concept and preliminary results, in: Greiff, K., Wotruba, H., Feil, A., Kroell, N., Chen, X., Gürsel, D., Merz, V. (Eds.), *SBSC 2022: 9th Sensor-Based Sorting & Control*. Shaker Verlag GmbH, Düren, pp. 35–53.

Küppers, B., Schloegl, S., Kroell, N., Radkohl, V. (2022): Relevance and challenges of plant control in the pre-processing stage for enhanced sorting performance, in: Greiff, K., Wotruba, H., Feil, A., Kroell, N., Chen, X., Gürsel, D., Merz, V. (Eds.), *SBSC 2022: 9th Sensor-Based Sorting & Control*. Shaker Verlag GmbH, Düren, pp. 17–33.

Radkohl, V. (2023): Entwicklung von Methoden zur sensorischen Echtzeit-Qualitätssicherung in der Versuchsanlage Digital Waste Research Lab. Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.

Rizvan, A., Khodier, K., Sarc, R. (2023): RFID – Tool zur Partikelverfolgung in der Abfallwirtschaft. Posterbeitrag DGAW-Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ an der TU Hamburg, 9–10.3.2023.

Sarc, R., Curtis, A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Lorber, K.E., Pomberger, R. (2019): Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management—A review. *Waste Manag* 95, 476–492. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.035>.

Siemens (2021): SIMATIC Ident: RFID-Systeme SIMATIC RF600 Systemhandbuch.

Teledyne Dalsa (2016): High Performance Color GigE Camera with TurboDrive: Linea Color 2K and 4K GigE Vision. Datenblatt.

Viczek, S.A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Aldrian, A., Sarc, R. (2021): Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part II: particle size-dependent element determination. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03567-w>.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.