



gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht DBU-AZ37088/01

„Prototypanlage zur Felderprobung des hochdynamischen quantifizierten
Metallrecyclings (ready2sort)“

Projektpartner:

OSR GmbH & Co. KG (Bewilligungsempfänger)

Clean-Lasersysteme GmbH

cleansort GmbH

Verfasst von:

Leo Bahr, Veronika Katzy, Oliver Scholz

Herzogenrath, September 2023

Projektlaufzeit: Juni 2021 – Juni 2023

Fördermittel: 536.000 €



Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung.....	10
1. Einleitung.....	12
2. Hauptteil.....	14
2.1. AP1: Aufbau semimobile Prototypanlage	15
2.2. AP2 Aufbau und Erprobung.....	18
2.3. AP3 Forschung und Technologieentwicklung	25
3. Fazit	32

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

„Prototypanlage zur Felderprobung des hochdynamischen quantifizierten Metallrecyclings
(ready2sort)“

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Arbeitsplangliederung	14
Abbildung 2: Modell Gesamtanlage	16
Abbildung 3: Statische FEM-Analyse der Stahlbaukomponenten des Messcontainers mit integrierter Schwingrinne: Umformung (Darstellung gibt die tatsächliche Umformung stark übertrieben wieder)	17
Abbildung 5: Montageplan der mechanischen und elektrischen Installation der Gesamtanlage am Aufstellort	18
Abbildung 6: HMI Einstellungen für Laser-Module	20
Abbildung 7: Video-Überwachung im und am Messcontainer	21
Abbildung 8: (links) Nachgerüstete ausziehbare Fangschale für Kleinstpartikel und Anhaftungen; (rechts) Nachgerüstete Abhängung im Bereich der Schwingförderrinne	21
Abbildung 9: (links) markierte Testcharge aus definiertem Material; (rechts) Materialfraktionen nach der Sortierung (rot markiertes Material sollte aussortiert werden)	23
Abbildung 10: Bildsequenz aus High-Speed-Videoaufnahme des Luftimpulssortierprozesses; Die türkise Kurve stellt die Flugbahn des getriggerten Teils dar	24
Abbildung 11: Weiterentwickeltes clean2sort-Modul inkl. „Plug & Play“-Anschlüssen für 1) Informationsaustausch & Spannungsversorgung, 2) Sperrluftanschluss, 3) Vor- und Rücklauf Kühlmedium, 4) Arretierbolzen	26
Abbildung 12: Automatische Laser-Fokuslagenbestimmung	28
Abbildung 14: Auswahl der auszuwertenden Strahldurchmesser auf der Kamera des Beam Waist Analysers	29
Abbildung 15: Strahlkaustik mit relativer Fokuslage und Fokusdurchmesser jeweils in x- und y-Richtung	30

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

„Prototypanlage zur Felderprobung des hochdynamischen quantifizierten Metallrecyclings
(ready2sort)“

Zusammenfassung

In den DBU-geförderten Projekten COLA I, COLA II und HILDE (AZ 32322/01, AZ 32322/02 und AZ 34709/01) wurde das Verfahren zur laserbasierten Echtzeitanalyse für das Schrottreycling und der Prototyp einer Sortieranlage entwickelt. Das zweischrittige COLA-Verfahren befreit durch eine Laservorbehandlung die Oberfläche von Schmutz und Deckschichten, sodass durch die anschließende laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) der optische Fingerabdruck des Grundmaterials bestimmt wird und eine sortenreine Sortierung erfolgt.

Nachdem in den Vorgängerprojekten das zugrundeliegende Verfahren erfolgreich erprobt, demonstriert und zur Marktreife entwickelt werden konnte, wurde im Projekt ready2sort der Feldeinsatz einer Prototypenanlage erprobt.

Dabei waren insbesondere folgende Aspekte Gegenstand der Untersuchungen: die Konstruktion und der Aufbau einer Sortieranlage, die Funktions- und Belastungserprobung am Bearbeitungsort, die Datenerhebung im Praxisbetrieb, Analyse von Stoff- und Masseströmen, Verbesserung der analytischen Messtiefe, Optimierung der Mensch-Maschine-Interaktion und Servicemaßnahmen.

Die OSR GmbH & Co. KG zählt zwischenzeitlich zu den führenden Streckenhändlern der Schrottbranche in Deutschland und zeichnet sich dort als absoluter Kostenführer aus. Strategische Beteiligungen an Schrottreyclinganlagen runden die Stellung der OSR ab. Die Durchführung des Projektes stellte einen notwendigen Technologiesprung in der ansonsten eher konservativen Recyclingbranche dar. Nur durch den Einsatz dieser innovativen Technologie lässt sich der massive Verlust vieler edler Metalle – wie sie bei konventionellen Aufbereitungsverfahren unvermeidlich sind – verhindern und damit ein drohender Versorgungsengpass stoppen. OSR führte im Rahmen des Projektes die intensive Felderprobung der Prototypanlage durch.

cleansort und cleanLASER, die das Verfahren in den Vorgängerprojekten entwickelt haben, konstruierten und errichteten die Sortieranlage und führten Optimierungen der Technologie, Datenerhebungen sowie weitere Forschungsarbeiten zur Analyse der Stoff- und Masseströme sowie der analytischen Messtiefe durch. Die cleansort GmbH entwickelt und vertreibt die LIBS-basierten Sortieranlagen und verfügt über ein vollausgestattetes Technikum, in dem im industriellen Maßstab Sortierversuche durchgeführt werden können, Kundenwünsche erprobt werden und die weitere Optimierung der Technologie vorangetrieben wird. Clean-Lasersysteme GmbH hat die laserbasierte LIBS-Sensorik in den Vorgängerprojekten entwickelt und fortlaufend optimiert. Die vollintegrierten LIBS-Module werden modular in die Sortieranlage integriert. Durch die Kaskadierung von fünf Modulen ist die Vollabdeckung der Förderbandbreite bei einer Fördergeschwindigkeit von 3 m/s möglich.

Ergebnis des Projektes ist die erfolgreiche Entwicklung und Inbetriebnahme einer Prototypanlage zur Schrottsortierung bei der Firma OSR, die umfassende Felderprobung am Bearbeitungsort und die Umsetzung der geplanten Forschungsarbeiten. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse fließen in die weitere Entwicklung und Optimierung der Technologie ein.

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, die das Projekt ready2sort unter dem Aktenzeichen 37088/01 mit förderfähigen Gesamtkosten i. H. v. 535.998 € im Rahmen der Richtlinien gefördert hat.

1. Einleitung

In der Metallindustrie ist die Wiederverwertung von metallischen Sekundärrohstoffen von hoher Wertschöpfung und einer guten Wirtschaftlichkeit geprägt. Dennoch ist das „verlustfreie“ Recycling eher die Ausnahme, da Rohstoffe vermischt und damit für die qualitativ hochwertige Nutzung oftmals unbrauchbar werden. Eine Weiterverwendung der Schrotte ist dann nur durch den Zusatz wertvoller Legierungsmetalle oder die Einbringung und „Streckung“ mit Primärrohstoffen wieder möglich.

Bislang stand kein analytisches Recyclingverfahren für die Sortierung leichter Metallelemente in großen Massenströmen zur Verfügung. Ein Lösungsansatz zum verlustfreien Recycling durch sortenreine Sortierung der Schrotte stellt das von den Unternehmen cleansort und cleanLASER entwickelte LIBS-basierte Sortiersystem mit integrierter Vorreinigung dar. Mit Hilfe dieser Anlage – die mittlerweile als Funktionsdemonstrator entwickelt wurde – ist es erstmals möglich im industriellen Maßstab eine geschlossene Prozesskette und Recycling ohne Downcycling darzustellen. Der im Projekt entwickelte und realisierte Prototyp ermöglicht den Feldeinsatz und Erprobung im realen industriellen Einsatz. Durch den Einsatz der Technik auf einem realen Schrottplatz konnte eine Validierung der vielversprechenden Kennzahlen des Labordemonstrators erzielt werden und der Grundstein für die technologische Nutzung gelegt werden.

Neben dem Aufbau der Prototypanlage (Investitionsanteil) wurden im Rahmen eines parallelen F&E-Projektes umfangreiche praxisrelevante Erfahrungs- und Stoffstromdaten erfasst sowie weitere Technologieentwicklungen für den späteren robusten Serienbetrieb durchgeführt.

Auf Grundlage dieser Daten wurde der wirtschaftliche und nachhaltige Effekt, der in mehreren Projekten von der DBU bereits unterstützten und geförderten Technologieentwicklung belegt. Somit stellt dieses Projekt einen Markt-Öffner und Initiator für die digitale Prozess- und Wertstoffkette im Bereich des Metallrecyclings ohne Legierungs-Qualitätsverlust dar. Die aus dem Laborbetrieb des Demonstrators gezeigten Möglichkeiten wurden den Risiken der seriennahen Nutzung sachlich gegenübergestellt, um in der konservativen Recyclingbranche für eine reduzierte Risikoaffinität und erhöhte Innovationsbereitschaft ausreichende Belege darzustellen.

Durch die kurze und intensive Projektdurchführung wurde innerhalb von zwei Jahren sichergestellt, dass durch die anschließende vielfache Reproduktion der Technologie die Hebung der Ressourceneinsparung auf breiter Basis erfolgen kann.

Mit dem Einsatz weiterer Anlagen auf deutschen oder europäischen Schrottplätzen ist, mit lediglich rund 5 Anlagen, bereits ein Energieeinsparvolumen von bis zu 1,5 Terrawattstunden möglich. Dies entspricht beim aktuellen deutschen Strommix einer CO₂-Einsparung von bis zu 600.000 t. Diese Anzahl an Anlagen im Feld wird nach aktueller Auftragslage bereits Ende 2024 erreicht sein.

Der Nachweis der Praxistauglichkeit der Technologie und die Überführung des Verfahrens in die industrielle Nutzung wurden durch Erfahrungen im Feldeinsatz ermöglicht. Dies stellt einen wichtigen Schritt dar, um Schrotte als hochwertige Sekundärrohstoffe getrennt nach Legierungselementen der Metallindustrie zur Verfügung stellen zu können. Die angestrebte Kreislaufwirtschaft ist nur mit innovativen Sortiertechniken in der Recyclingwirtschaft umsetzbar. Die Technologie macht eine Nutzung verfügbarer Schrotte entsprechend den Anforderungen der Hochleistungsschmelzprozesse im Inland möglich und eine Steigerung der regionalen Wertschöpfung. Nur durch den Einsatz

verfügbarer Schrotte kann der zukünftige Bedarf der Metallindustrie im Einklang mit den Klimaschutzziele gewährleistet werden.

Die Weiterentwicklung der automatisierten Sortiertechnologie hinsichtlich der quantitativen Massenstromanalyse stellte den nächsten Schritt zur optimierten Nutzung von Sekundärrohstoffen dar. Die gezielte qualitätsgesicherte Bereitstellung quantitativer Daten spezieller Legierungen ermöglicht es den Herausforderungen der zirkulären Kreislaufwirtschaft zu begegnen.

Durch die im Rahmen der Sortierung erfassten Analysedaten ist es somit erstmalig auch möglich, die geschlossene Wertstoffkette vollumfänglich digital zu determinieren. Die gemessenen Legierungszusammensetzungen können komplett erfasst und gespeichert werden und mit dem sortierten Wertstoff per geschlossener Datenverkettung verbunden werden. Vergleicht man die nahezu 100-prozentige Ermittlung der Bauteilanalyse eines jeden einzelnen sortierten Teils mit der aktuell praktizierten stichprobenartigen Analyse weniger Einzelteile aus Lieferchargen zur Verwertung mittels Hand-Analysegeräten, so zeigt sich das sprunghafte Potenzial, das die vollintegrierte LIBS-basierte Sortieranlagentechnik mit sich bringt.

Um den Weg in das industrielle Umfeld umzusetzen, mussten sowohl Bedienkonzepte vereinfacht und weiterentwickelt werden als auch ein wirtschaftlicher und gut vereinzelter Massenstrom bzw. die Skalierung des Sortiergutes erzielt sowie Optimierungen zur Sortierung kleinerer Größenklassen (< 50 mm Objektgröße) dargestellt werden. Zudem war es wichtig, weitere Schritte in Richtung Digitalisierung und Vernetzung für eine zukunftsfähige Technologie zu berücksichtigen und einzubeziehen.

Das Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Funktions-Prototyps, der zur industrienahen Validierung der möglichen Sortierqualitäten und Durchsatzraten im üblichen Industrie-Einsatzfeld dient und die Eignungserprobung der Technologie für eine spätere weiter verbreitete kommerzielle Nutzung erlaubt. Schrotte entstehen an unterschiedlichen Stellen bzw. werden in der Regel dezentral gesammelt. Die diversen Schrottentfallstellen begründen den Vorteil einer semimobilen Sortieranlage. Der Einsatz soll auf Schrottplätzen mit ausreichend hohem Eigenaufkommen ebenso wie in der Industrie bei OEMs und Zulieferern erfolgen.

Hinsichtlich der Einsatzbedingungen im industriellen Umfeld in einer geschlossenen Prozesskette rücken Aspekte wie Sicherheit, Serviceverfügbarkeit, Robustheit der Anlage sowie die einfache Bedienbarkeit der Software in den Vordergrund. Um die Analysequalität bei Erhalt wirtschaftlicher Durchsatzraten weiter zu steigern, wurde der Prototyp auf fünf kaskadierte clean2sort-Messmodule erweitert.

Das Lösungskonzept des Projektes bestand somit neben der

- Realisierung und dem Aufbau einer Prototypanlage auch
- aus einem parallelen Forschungs- und Entwicklungsprojekt zur Planung und technischen Optimierung der Technologie mit Ausrichtung auf die Pilotanlagenrealisierung und
- einer intensiven Erprobungs- und Nutzungsphase auf einem realen Recyclinghof.

2. Hauptteil

Die Arbeiten im Projekt gliederten sich in drei Hauptarbeitspakete, die einerseits den Aufbau des Prototyps und die Erprobungsphase (AP1 und AP2) und parallel dazu die Forschungsarbeiten sowie technologischen Weiterentwicklungen der Materialanalyse und Sortiertechnik (AP3) beinhalteten.

Arbeitspaket 1 – der Aufbau der semimobilen Prototypanlage – erfolgte unterstützt durch die Investition der Firma OSR unter Berücksichtigung einer entsprechenden Investitionsförderung.

In der Validierungsphase (AP2) wurde die Anlagentechnik vor allem von OSR betrieben und unter Serienbedingungen ausgelastet. Diese Phase wurde kontinuierliche durch die Technologie-Entwicklungspartner (cleanLASER und cleansort) begleitet.

Diese vor und zur Aufbauphase parallellaufenden Forschungs- und Entwicklungsleistungen des Arbeitspaketes 3 wurden im Wesentlichen von den Partnern cleansort und cleanLASER erbracht.

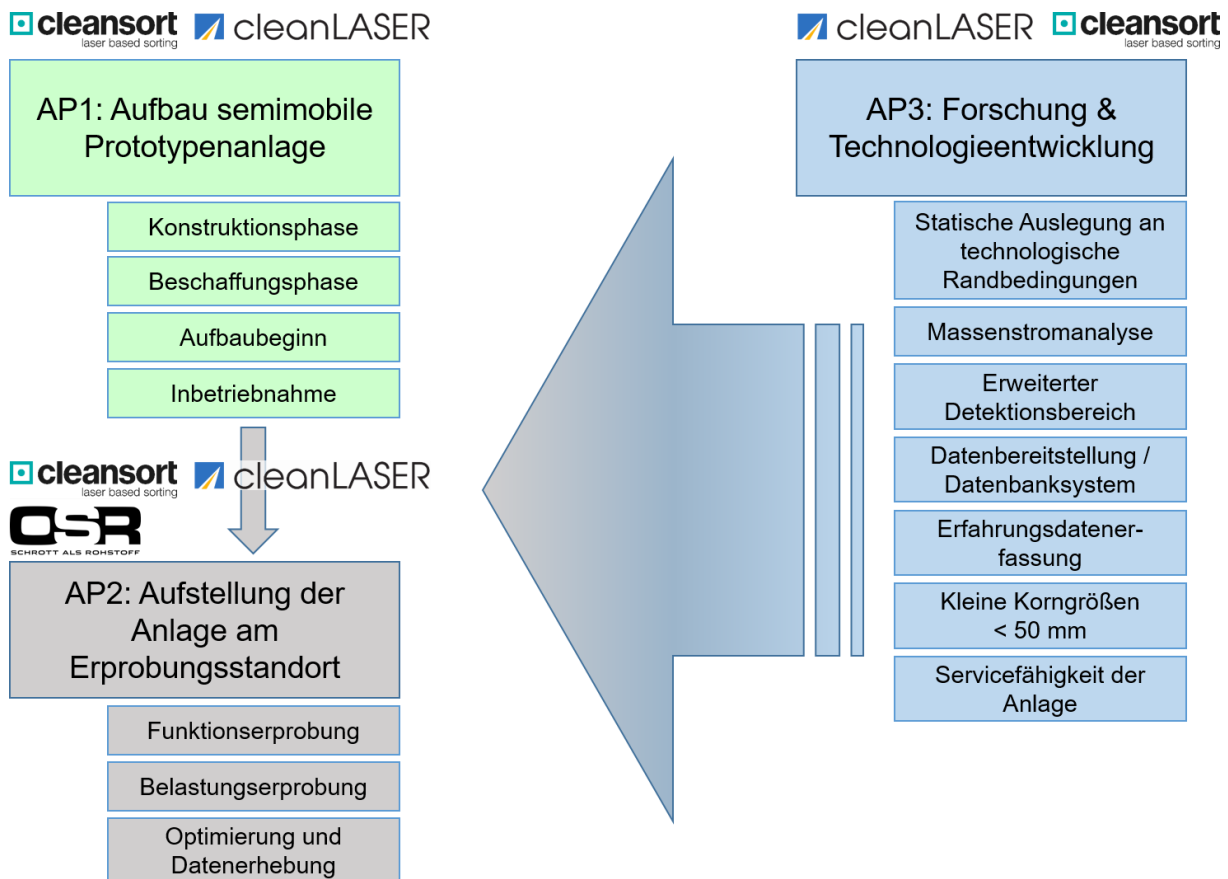


Abbildung 1: Schema zur Arbeitsplangliederung

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und Resultate nach Arbeitspaketen gegliedert dargestellt.

2.1. AP1: Aufbau semimobile Prototypanlage

Konstruktion und Auslegung der Gesamtanlage

Die Planung und der Aufbau der Prototypanlage wurde hauptverantwortlich durch die cleansort GmbH durchgeführt (Gesamtanlage) und durch cleanLASER im Bereich der Laser- und Sensortechnik (clean2sort-Module) unterstützt.

In der Konstruktionsphase der semimobilen Prototypenanlage für die OSR GmbH & Co. KG wurden eine Reihe von Anpassungen vorgenommen, um den spezifischen Anforderungen von OSR und den Gegebenheiten des Aufstellungsortes gerecht zu werden.

Die Funktions-Prototypanlage wurde für eine Bearbeitungs- bzw. Förderbreite von 1,2 m ausgelegt. Dazu wurde eine Kaskade aus fünf clean2sort Modulen nebeneinander vorgesehen, um Durchsätze von bis zu 8 t/h zu ermöglichen. Das Hauptmodul der Prototypanlage bildet der Messcontainer, in den Abmessungen eines 40-Fuß-Containers (siehe Abbildung 2, Pos. 6), der Teile der Vereinzelungstechnik sowie die gesamte Mess- und Sortiertechnik beherbergt. Dieser sitzt auf einem Stahlunterbau bzw. -podest (Pos. 9). Die erhöhte Anbringung des Messcontainers ermöglicht das Sammeln und Abtransportieren der sortierten Materialfraktionen in großen Boxen oder Gebinden, in die das Material von oben herabfällt.

Unterhalb des Podests sind zusätzlich zwei Versorgungscontainer (Pos. 5) angebracht, welche die Druckluftaufbereitung, die Hauptschaltschränke der Anlage sowie die zentrale Anlagensteuerung enthalten. Durch die integrierte Druckluftaufbereitung sowie der Absauganlage (Pos. 4) reduzieren sich die Anforderungen für mögliche Aufstellorte der Anlage auf die Bereitstellung geeigneter Flächen und Stromversorgung. Auch dies erhöht die Mobilität der Anlage.

Die Beschickung der Anlage mit Material erfolgt mittels eines Schwingförderbunkers (Pos. 1). Dieser stellt einen konstanten Materialaustrag durch eine automatische Regelung sicher. Dazu sind im Bunker Wägezellen installiert, die permanent den Materialaustrag messen und zur Regelung dienen. Über ein Steigband (Pos. 3) wird das Material nach oben zum Messcontainer gefördert.

Die Integration eines Magnetabscheiders (Pos. 2) auf dem Steigband ermöglicht die separate Entfernung magnetischer Stoffe aus dem Massestrom, wenn dies erforderlich ist. Zusätzlich zum Bunker dient die verbaute Schwingrinne (im Messcontainer verbaut) zur Vereinzelung der Schrottteile auf dem Messband.

Durch optische Detektion auf dem Messband, werden die Einzelteile erfasst. Die nachfolgende punktuelle Reinigung und LIBS-Messung der detektierten Teile mittels der clean2sort Module ermöglicht die genaue Bestimmung der Materialzusammensetzung der Schrottteile.

Schließlich erfolgt die Aussortierung von Teilen, deren Zusammensetzung vorher definierten Klassen entspricht, mittels Luftimpulstechnik in zwei Fraktionen (Falltrichter). Über zwei weitere waagerechte Förderbänder (Materialabzug, Pos. 8) werden die beiden Materialfraktionen abtransportiert und fallen in die dafür vorgesehenen Boxen bzw. Mulden.

Da die clean2sort Module für einen besseren Schutz nicht in einem im Messcontainer eingebauten Zustand zum Aufstellort transportiert werden, müssen sie dort separat in den Messcontainer gehoben

werden. Dazu dient der ebenfalls auf dem Stahlpodest installierte Kran (Pos. 7). Gleiches gilt auch im Wartungsfall der Module, bei denen ein Austausch eines Moduls notwendig ist.

Zur Einhaltung der Lasersicherheitsrichtlinien muss die Anlage die Laserschutzklasse 1 erfüllen. Die konzeptionelle und konstruktive Sicherheitsplanung sieht deshalb eine vollständige Einhausung des Laser-Bereichs vor, so dass dieser während des Betriebs von außen nicht einsehbar und komplett geschlossen ist. Auch die industriegerechte Reduktion der Schallemissionen im Rahmen der technischen Möglichkeiten war ein Bestandteil der Arbeiten.

Durch den Vorverarbeitungsprozess (z. B. Shreddern) und die jeweiligen Lagerbedingungen des zu sortierenden Materials kann dieses Staubanhaftungen besitzen. Dieser Staub kann sowohl an den Übergabestellen der einzelnen Förderkomponenten, auf den Schwingförderrinne sowie insbesondere durch die Luftimpulsseparierung in die Luft emittiert werden. Um die Staubbelastung am Aufstellungsort auf ein Minimum zu reduzieren, wurde eine effektive Absaugung implementiert, welche vor allem an den genannten kritischen Stellen entstehende Partikel-aerosole absaugt und filtert.

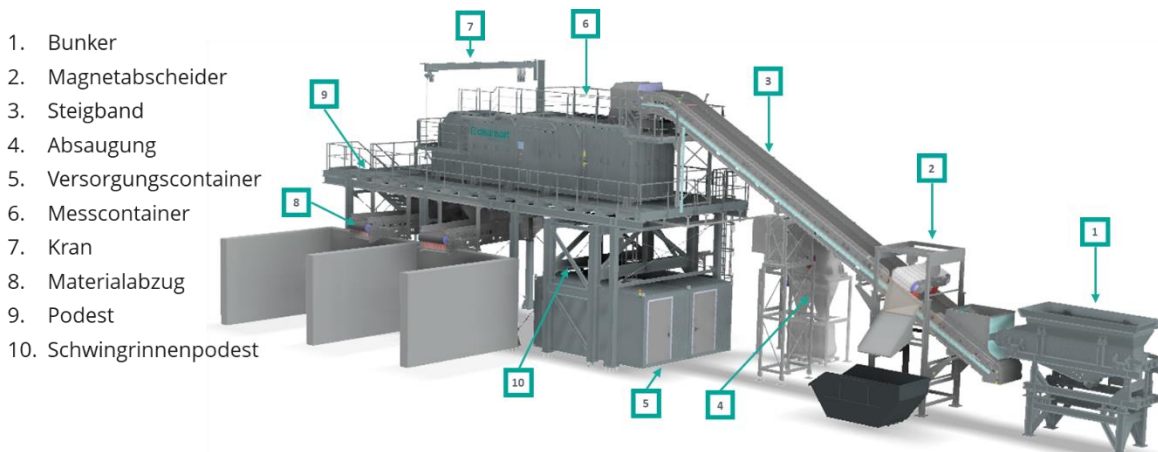


Abbildung 2: Modell Gesamtanlage

Ein zentraler Aspekt der Konstruktion war die statische (siehe Abbildung 3) und dynamische Auslegung der Anlage unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen. Um die Anlage möglichst mobil und flexibel einsetzbar zu halten, wurde im ersten Konzeptentwurf die Schwingförderrinne direkt in den Messcontainer integriert und auf dessen unteren Querträgern befestigt (siehe stark belastete Träger in Abbildung 3).

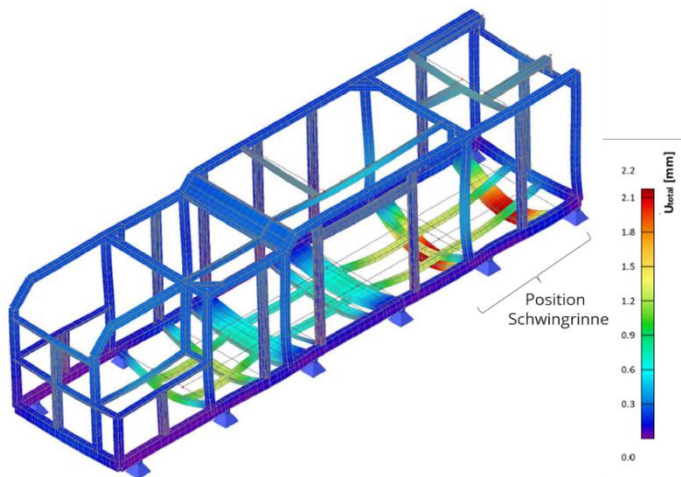


Abbildung 3: Statische FEM-Analyse der Stahlbaukomponenten des Messcontainers mit integrierter Schwingrinne: Umformung (Darstellung gibt die tatsächliche Umformung stark übertrieben wieder)

Dies führt wie dargestellt zu hohen Belastungen und Verformungen im Messcontainer (insbesondere während des Betriebs), die allerdings noch im Rahmen des Möglichen gewesen wären.

Auch die berechneten Eigenfrequenzen der Gesamtanlage liegen unterhalb der vorgesehenen Schwingfrequenzen der Schwingförderrinne und würden so theoretisch im Regelbetrieb nicht angeregt. Allerdings durchläuft die Schwingrinne diese Eigenfrequenzen beim Anfahren. Dies kann zu starken Vibrationen im Messcontainer führen, was wiederum die sensible optische Messtechnik beeinträchtigen oder sogar beschädigen würde. Deshalb wurde für die Schwingförderrinne eine eigene schwingungsentkoppelte Tragkonstruktion (siehe Abbildung 2, Pos. 10) entwickelt, die es ermöglicht die Schwingrinne trotzdem innerhalb des Messcontainers zu betreiben. Dies bietet den Vorteil, dass die Schall- und Staubemissionen der Schwingrinne im abgeschirmten Bereich des Messcontainers abgefangen werden können. Der Transport des Messcontainers erfolgt ebenfalls mit der integrierten Schwingrinne, die erst am Aufstellort entkoppelt und auf ihr eigenes Podest gestellt wird.

Aufbaubeginn und Inbetriebnahme

Der Messcontainer der Anlage wurde bei cleansort erfolgreich mit den von cleansort und cleanLASER entwickelten optischen Analyseelementen sowie deren Elektronik bestückt und in Betrieb genommen.

Die anderen Komponenten der Gesamtanlage wie die Bunker, Förderbänder, Podest wurden bei den jeweiligen Zulieferern aufgebaut und getestet. Diese wurden anschließend direkt zum Aufstellort transportiert und dort in die Gesamtanlage integriert (siehe 2.2 AP2).

Die Kalibrierung der fünf Einzelmodule wurde abgeschlossen. Diese Kalibrierungen enthalten die qualitative Analyse von Stahl- und Aluminium Sorten sowie die quantitative Analyse der Hauptlegierungselemente in Stahl und Aluminium (siehe 2.3 AP3 für Details).

Die Werksabnahme (Factory Acceptance Test – FAT) wurde von OSR erteilt.

2.2. AP2 Aufbau und Erprobung

Die erfolgreiche Inbetriebnahme des Messcontainers bei cleansort markierte einen wichtigen Fortschritt in der Realisierung der Gesamtanlage. Im Anschluss daran wurde die Anlage am Erprobungsort installiert, wobei verschiedene Schlüsselschritte durchgeführt wurden, um eine reibungslose Funktionalität zu gewährleisten. Inhalt des Arbeitspaketes sind die Funktionserprobungsphase, die Belastungserprobungsphase und die Optimierungs- und Datenerhebungsphase. In dieser Felderprobungsphase, welche der Erfahrungssammlung und Durchführung von Stoffstromanalysen diente, wurden die technische Praxistauglichkeit sowie Wirtschaftlichkeitsdaten im industrienahen Einsatz ermittelt und Langzeittests sowie Zuverlässigkeitstests auf Modul- und Gesamtebene des Prototyps durchgeführt. Unter Praxisbedingungen wurden die Sortiererergebnisse validiert. In dieser Phase wurde die Belastung im Dauereinsatz erprobt und Erfahrungsdaten zur Verfügung gestellt.

Mechanischer und elektrische Installation der Anlage am Einsatzort

Durch den modularen Aufbau der Gesamtanlage sowie die vorherige Inbetriebnahme der Einzelkomponenten bei allen Zulieferern, konnte wie in Abbildung 4 dargestellt die mechanische und elektrische Integration der Gesamtanlage am Aufstellort innerhalb von nur 5 Wochen erledigt werden.

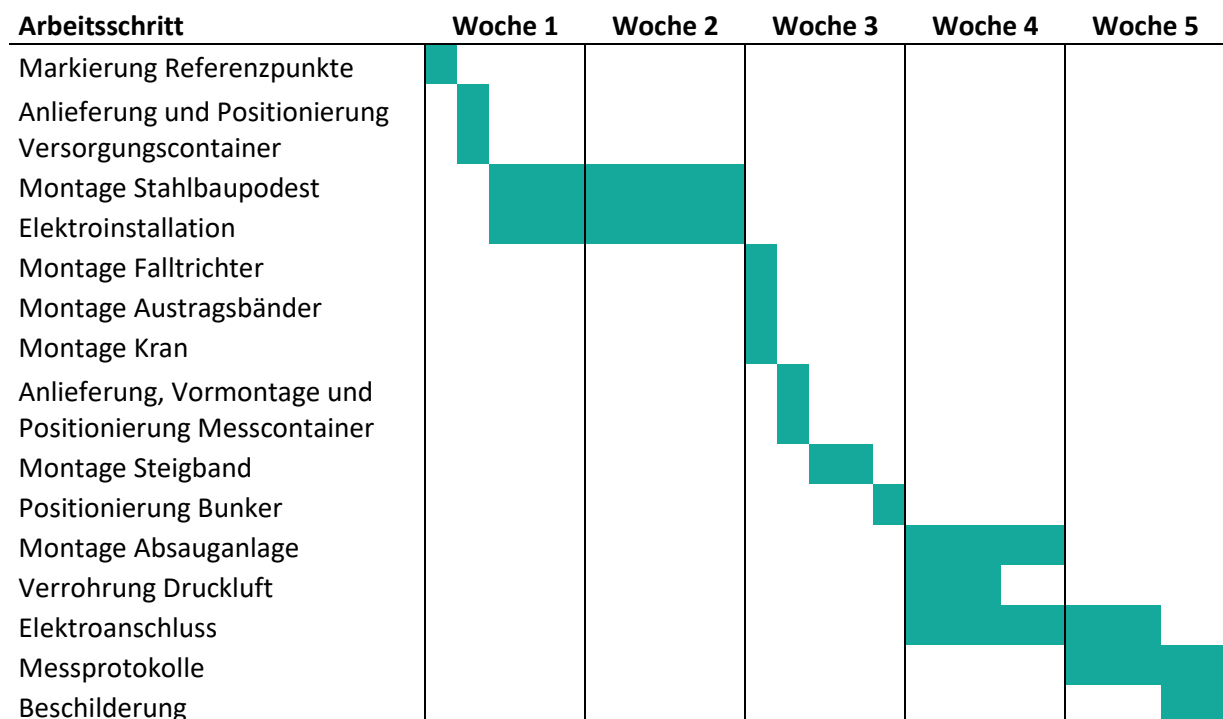


Abbildung 4: Montageplan der mechanischen und elektrischen Installation der Gesamtanlage am Aufstellort

In den ersten beiden Wochen wurden zunächst die beiden Versorgungscontainer aufgestellt und darüber das Stahlbaupodest aufgebaut. Parallel dazu wurde die bei cleansort entwickelte und

aufgebaute Steuerungstechnik in die Versorgungscontainer integriert, in denen vorher nur die Druckluftaufbereitung vorinstalliert war.

Anschließend wurden die Falltrichter und Austragsbänder montiert sowie der Messcontainer auf das Podest gehoben und positioniert. Darauffolgend konnten die Komponenten für die Materialzufuhr (Steigband und Ausgangsmaterialbunkers) installiert werden (Woche 3).

In Woche 4 wurde die Absauganlage sowie die Verrohrung der Druckluftzufuhr in den Messcontainer installiert. Parallel dazu wurde die Verbindung des Containers mit den anderen Komponenten sowie die umfassende Verkabelung aller elektrisch ansteuerbaren Komponenten durchgeführt, um eine effiziente Informationsübertragung innerhalb der Anlage zu gewährleisten.

Die elektrische Vermessung und Prüfung aller Verbindungen sowie deren Beschilderung schlossen die Montagephase ab (Woche 5).

Inbetriebnahme und Funktionserprobungsphase

Nach der erfolgten Installation aller relevanter Komponenten wurde eine umfassende Funktionserprobung der Schrottsortieranlage durchgeführt. Diese verlief erfolgreich, wobei sämtliche geplante Einzelfunktionen reibungslos verfügbar sind.

Diese Funktionen umfassen unter anderem:

- den konstanten Materialaustrag aus dem Ausgangsmaterialbunker mit variabel einstellbarem Massenstrom
- die Vereinzelnung des Materials mittels Bunker und Schwingrinne auf das Messband
- die optische Detektion der Einzelteile
- die punktuelle Reinigung und LIBS-Messung der erkannten Teile mittels der clean2sort Module zur Bestimmung der Materialzusammensetzung der Schrottteile
- die präzise Aussortierung von Teilen nach vordefinierten Klassen mittels Luftimpulstechnik
- die abschließende Trennung der sortierten Fraktionen mittels zweier Förderbänder in separate Materialboxen

Die Integration aller Komponenten in eine zentrale Steuereinheit, einschließlich eines Human Machine Interfaces (HMI), war essenziell für die zentrale Überwachung und Steuerung der Anlage. Dieses Interface ermöglicht es den Bedienern, den Betrieb der Anlage effektiv zu überwachen und bei Bedarf Einstellungen anzupassen. Zudem können hier für bestimmte Sortieraufgaben sogenannte „Rezepte“ von cleansort angelegt werden, in denen alle Betriebsparameter hinterlegt sind. Somit kann nach Auswahl eines Rezeptes die Anlage per Knopfdruck gestartet (und auch wieder gestoppt werden).

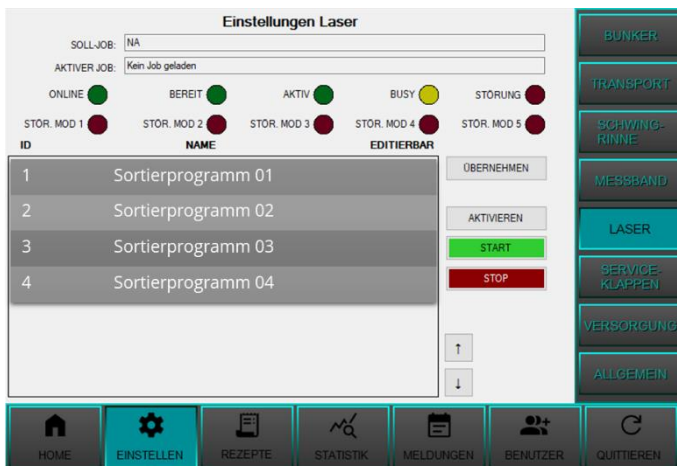


Abbildung 5 zeigt beispielhaft die HMI-Seite für die Einstellung der Laser. Hier können vordefinierte Analyse- und Sortierprogramme ausgewählt und aktiviert werden. Zusätzlich dazu wird der Status der Module sowie mögliche Fehlermeldungen der Lasermodule hier angezeigt.

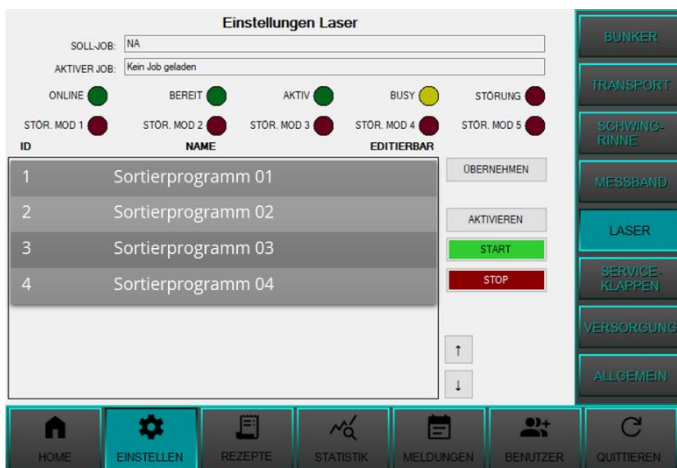


Abbildung 5: HMI Einstellungen für Laser-Module

Das Überwachungskonzept der Anlage beinhaltet darüber hinaus mehrere Videokameras an wichtigen Stellen im und am Messcontainer, um die ordnungsgemäße Funktion der Anlage sicherzustellen. Insbesondere im Messcontainer ist die Überwachung per Video essenziell, da die Bediener während des Betriebs nicht selbst in den Messcontainer blicken können aufgrund des Laserschutzbereiches. Wie in Abbildung 6 sichtbar wird die Luftimpulsleiste (oben links), die Belegung des Steigbandes und des Bunkers (oben rechts), die Vereinzelung auf der Schwingrinne (unten links) sowie die Verteilung des Aufgabeguts auf dem Messband und die Funktion der Lasermodule (unten rechts) per Video überwacht.

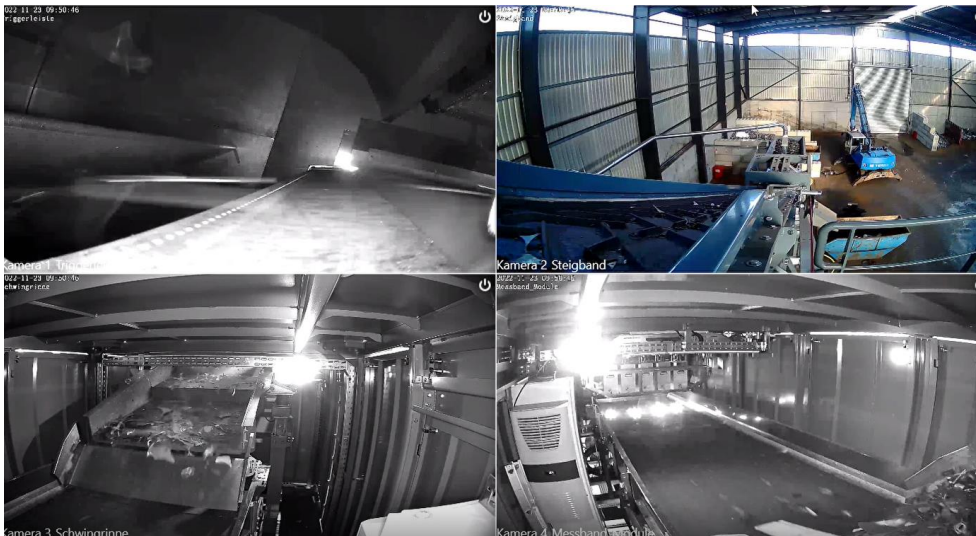


Abbildung 6: Video-Überwachung im und am Messcontainer

Zusätzlich zur Steuerung und Überwachung vor Ort wurde eine Remote-Verbindung zu cleansort und cleanLASER eingerichtet, die eine Ferndiagnose bzw. Fernwartung der Anlage ermöglicht. Dies reduzierte den Service-Aufwand in der Erprobungsphase und bietet auch im weiteren Betrieb die Möglichkeit auf auftretende Probleme schnellstmöglich zu reagieren, um Ausfallzeiten zu reduzieren.



Abbildung 7: (links) Nachgerüstete ausziehbare Fangschale für Kleinstpartikel und Anhaftungen; (rechts) Nachgerüstete Abhängung im Bereich der Schwingförderrinne

Eine weitere Herausforderung, insbesondere bei stark verformten Aufgabegütern, sind verklemmte Teile, ebenfalls an der Schnittstelle zwischen Messband und Luftimpulsleiste. Diese können zudem den Transportgurt des Messbandes beschädigen, wenn sie nicht rechtzeitig entfernt werden. Deshalb wurde an dieser Stelle eine Lichtschranke implementiert, die die Anlage bei verklemmten Teilen stoppt und die Reinigung ermöglicht.

Neben der Fangschale wurde weitere flexible Abdeckungen und Abhängungen installiert, um möglichst wenig ungeplanten Materialaustrag aus der Hauptförderstrecke zu haben. Zudem wurden zusätzliche Abstreifer an den Förderbändern installiert, um klebenbleibende Teile zu entfernen.

Als weitere Maßnahme zur Optimierung der Anlagenstabilität wurde eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) in die Hauptsteuerung des LIBS-Messsystems integriert, um auch bei

Stromausfällen ein kontrolliertes Abschalten der Messtechnik zu gewährleisten. Dies schützt die elektro-optischen Bauteilen vor Beschädigungen durch plötzlichen Ausfall der Spannungsversorgung und die verbauten Steuerrechner vor Datenverlust.

Ermittlung optimaler Betriebsparameter

Während der gesamten Erprobungsphase wurden die Anlagenparameter kontinuierlich optimiert und umfangreiche Daten gesammelt. Die grundlegenden Optimierungen der Anlagentechnik umfassten u.a. die automatische Höhenkalibrierung zur Verbesserung der Objekterkennung, die Reduzierung von Fehlanalysen zur Steigerung des Massenaustrags sowie die Erhöhung der möglichen Analysefrequenz (siehe 2.3 AP3).

Die Ermittlung optimaler Betriebsparameter hingegen sind jeweils auf ein bestimmtes Aufgabegut sowie eine damit verknüpfte Sortieraufgabe abgestimmt und somit meist auch nur darauf anwendbar.

Die wichtigsten veränderbaren Betriebsparameter sind

- Bunkereinstellungen (Frequenz, Neigung, Unwucht)
- Bandgeschwindigkeiten (insb. Messband, aber auch Steigband)
- Schwingrinneneinstellungen (Frequenz, Neigung)
- Filter der Objekterkennung (min./max. Abmessungen der zu erkennenden Teile)
- clean2sort-Modulparameter (Laserleistung, LIBS-Parameter)
- Luftimpulsleistenparameter (Druck, Öffnungsdauer/-zeitpunkt)

Im Testbetrieb wurden diese Betriebsparameter systematisch für verschiedene Aufgabematerialien optimiert. Dazu wurden markierte Testchargen hergestellt, um die Ergebnisse eines Testlaufs unmittelbar an der Anlage in kurzer Zeit bestimmen zu können. Das Einschmelzen von sortierten Fraktionen zwischen Versuchen würde die Auswertung deutlich verzögern und das Einstellen der Anlage für ein Aufgabegut mehrere Wochen oder Monate dauern.

Abbildung 8 zeigt die Herstellung einer markierten Testcharge (links) sowie beispielhaft das Ergebnis einer damit durchgeführten Testsortierung (rechts).

Markierte Testcharge



Abbildung 8: (links) markierte Testcharge aus definiertem Material; (rechts) Materialfraktionen nach der Sortierung (rot markiertes Material sollte aussortiert werden)

Für die Herstellung der Testchargen sind zwei getrennte Chargen Material mit jeweils einer bekannten Legierung notwendig. Diese wurden entweder aus Neumaterial hergestellt oder, wie in diesem Fall, im cleansort Technikum aus einer gemischten Charge zweier bekannter Legierungen sortiert. Die Sortierung erfolgte dabei in mehreren Sortierschritten, um eine nahezu hundertprozentige Reinheit der beiden Chargen zu garantieren. Anschließend wurde eine der beiden Chargen lackiert (siehe Abbildung 8 link). Hierbei ist es wichtig sicherzustellen, dass auch alle Teile dieser Charge lackiert sind. Nicht-lackierte Teile würden später die ermittelten Reinheiten verschlechtern. Die zweite Charge bleibt unbehandelt. Anschließend werden beide Chargen wieder homogen miteinander vermischt.

Anhand dieser Test-Chargen können nun direkt nach jedem Versuchsdurchlauf die jeweils falsch sortierten Teile direkt optisch ermittelt, manuell separiert und verwogen werden. Unmarkierte Teile in der getriggerten Fraktion stellen somit Verunreinigungen in der sortierten Fraktion dar, markierte Teile im „Drop“ Verunreinigungen in der nicht-sortierten Fraktion. Somit ist direkt die Auswirkung von verschiedenen Parameteranpassungen sichtbar.

Zudem können die markierten Teile direkt für die Einstellung der Triggerparameter der Luftimpulstechnik verwendet werden. Hierbei wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera im Bereich der Luftimpulsleiste angebracht und die Luftimpulssortierung während des Betriebs beobachtet (siehe Abbildung 9). Daraus können zum einen die Flugbahn der Teile in Abhängigkeit von Druck und Düsenöffnungsparametern ermittelt und optimiert werden. Zum anderen ist direkt erkennbar, ob es sich bei einem aussortierten Teil, um einen korrekten Ausschuss oder um einen Fehlschuss handelt, was nur mit unmarkierten Teilen nicht sichtbar wäre. Fehlschüsse können zum Beispiel dann auftreten, wenn Teile nahe beieinander liegen und der Düsendruck zu stark eingestellt ist. In diesem Fall würden ein markiertes sowie ein unmarkiertes Teil gemeinsam ausgeschossen werden. Der Düsendruck sollte bei häufigem Auftreten dieses Falles dann niedriger eingestellt werden.

Der Einfluss des Düsendruckes auf die Reinheit ist signifikant: Im Falle des in Abbildung 8 gezeigten Blech-Shreddermaterials konnte die Reinheit nur durch die Anpassung des Düsendruckes von ca. 89 % auf 94 % erhöht werden. Der Austrag blieb dabei konstant.

Diese Art von Tests wurde sowohl an der Prototypenanlage sowie für grundlegende Tests auch im cleansort Technikum durchgeführt.

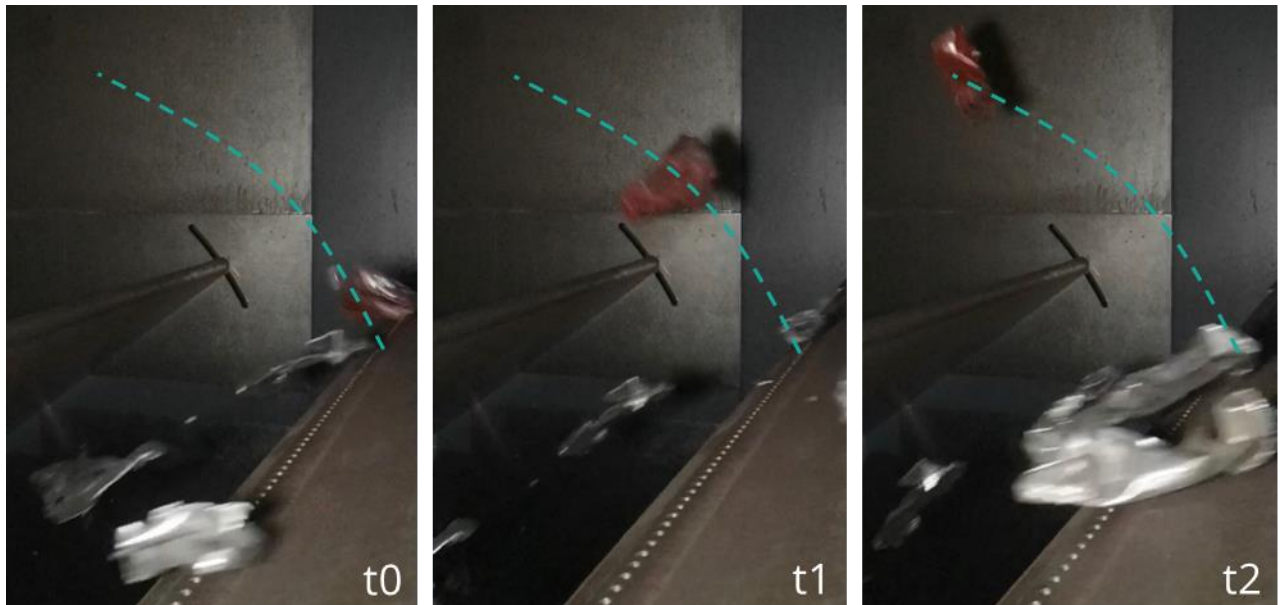


Abbildung 9: Bildsequenz aus High-Speed-Videoaufnahme des Luftimpulssortierprozesses; Die türkise Kurve stellt die Flugbahn des getriggerten Teils dar

Des Weiteren wurde eine Feinjustierung der Sortiergrenzen für die jeweiligen Sortieraufgaben durchgeführt. Diese dient der Erhöhung des Austrags, welcher durch die geringfügige Erweiterung der Sortiergrenzen erhöht werden kann. Gleichzeitig muss die Reinheit des Zielprodukts weiterhin eingehalten werden (könnte durch zu starke Erweiterung der Sortiergrenzen abfallen), weshalb hier eine differenzierte Optimierung erforderlich ist.

Darüber hinaus wurde mit Mono-Legierungschargen (Aufgabechargen, die nur aus einer Legierung bestehen) der Anteil an Analysefehlern und darauf basierenden inkorrekten Legierungserkennung/Sortierungen ermittelt. Dieser betrug 0,3 %.

Ein weiterer wichtiger Fortschritt betrifft die prozesssichere Detektion von Stahllegierungselementen. Elemente wie Mn, Ni, Cr, Sn, Cu und Mo wurden erfolgreich detektiert und quantifiziert. Dies ermöglicht eine zuverlässige Analyse und Klassifizierung der Materialzusammensetzung der Schrottteile, was wiederum die Effizienz der Sortierprozesse erheblich steigert.

Für die korrekte Analyse der Schrottteile ist neben den Parametereinstellungen eine erschütterungsfreie Bewegung der Teile auf dem Messband ein entscheidender Faktor, da beispielsweise eine Vibration der Teile im Bereich der Objekterkennung bzw. der LIBS-Analyse fast immer zu fehlerhaften Messungen führt, die keine Legierungserkennung ermöglicht (Teile landen in Restfraktion/Drop). Um das Aufbringen der Teile auf dem Messband zu verbessern, wurde eine optimierte Rutschen Geometrie getestet und anschließend fest verbaut. Diese verringerte die Anteile an nicht analysierbaren Teilen um 5 – 7 % abhängig vom Aufgabegut. Dies entspricht einer Erhöhung der Wertstoffausbringung um den gleichen Wert und ist somit sehr wichtig im Hinblick auf den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage.

Datenerhebungsphase bzw. Produktionsbetrieb

Im Produktionsbetrieb werden kontinuierlich Daten erhoben und die produzierten Fraktionen stichprobenartig mittels Hand-LIBS-Systemen überprüft. Diese Stichproben sichern die Qualität der produzierten Fraktionen, welche konstant bei über 95 % Reinheit liegt.

2.3. AP3 Forschung und Technologieentwicklung

Parallel zu den ersten beiden Arbeitspaketen werden im dritten Paket technologische Weiterentwicklungen und Forschungsthemen adressiert. Die Ergebnisse fließen in realisierbarem Umfang in die Optimierung des Funktions-Prototyps ein.

Vor und während der Realisierungsphase beinhalten diese Arbeiten sowohl mechanische und elektrotechnische sowie konstruktive Umfänge als auch weitere Auslegungen, z. B. zur statischen Auslegung, oder schwingungsanalytische Untersuchungen bei der Auslegung der Anlage. Auch die verbesserte Visualisierung und eine bedienergerechte Mensch-Maschine Interaktion ist unter anderem Bestandteil dieses Arbeitspaketes. Software-Entwicklungen stellen darüber hinaus die datenbankkonforme Speicherung der Mess- und Analysedaten sicher. Somit ist die umfassende Stoffstromanalyse sowohl während des laufenden Betriebes als auch im Nachgang möglich.

Die im Technikum der Firma cleansort verfügbare Demonstrator-Anlagentechnik war auf Materialkorngrößen von 100 – 800 mm optimiert. Ein wesentlicher Anteil des relevanten (Shredder-) Schrottgutes liegt im kleinen und mittleren Korngrößenbereich < 50 mm. Um einen effizienten Materialfluss und eine flexible Materialbeschickung zu gewährleisten, mussten die Geometrie sowie die Einstellmöglichkeiten und -parameter des Schwingbunkers an die geringe Größe angepasst werden. Ebenso musste für eine funktionierende Sortierung die Düsenleiste verändert und adaptiert werden und mit kleineren Ventilabständen (< 10 mm) ausgestattet werden. Die Rinnengeometrie wurde beibehalten und Parameter-Setups des Schwingbunkers in Parameterstudien ermittelt und an die geringere Größe angepasst.

Weiterentwicklung & Aufbau LIBS-Module

Die in vorangegangenen Projekten entwickelten LIBS-Module wurden im vorliegenden Projekt weiter optimiert. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Robustheit und Messstabilität, der Servicefähigkeit sowie der Konstanz der Signalintensität der Module, was essenzielle Merkmale für einen erfolgreichen Langzeiteinsatz im Feld sind.

Für den Einsatz in staubigen Umgebungen ist das Gehäuse hermetisch abgedichtet und wird zusätzlich mit einem Überdruck/Luftdurchfluss betrieben. Diese Maßnahme erhöht nicht nur die Sicherheit der Anlage, sondern schützt sie auch vor äußeren Einflüssen, die den Betrieb beeinträchtigen könnten.

Mobile Steuerung & Überwachung

Mittels eines mobilen Rechners inkl. „Touch“-Bedienung wurde eine mobile Applikation entwickelt, mit der sich die Hauptparameter der Sortieranlage einstellen lassen. Gleichzeitig können die eingesetzten Überwachungskameras auf dem Gerät angezeigt werden. Letzteres könnte in Zukunft auch für den Einsatz im Produktionsbetrieb eignen, bei dem z.B. der Beschicker des Bunkers ein solches Gerät in seinem Bagger installiert, um stets auch die anderen Anlagenteile optisch kontrollieren zu können. Die Steuerung der Anlage über ein solches „Tablet“ im Produktionsbetrieb ist derzeit aus Sicherheitsgründen noch nicht vorgesehen, da die aktuelle drahtlose Verbindung zur Anlage noch nicht den Anforderungen in Punkto Zuverlässigkeit entspricht. Insbesondere sicherheitsrelevante Funktionen wie der „NOT-AUS“ müssen störungsfrei realisiert werden.

Modulwechsel und Justage

Schnelle Servicemaßnahmen und die Optimierung der Möglichkeiten zur vorbeugenden Instandhaltung (technical preventive maintenance /TPM) sowie die Remoteservicefähigkeit sind im industriellen Umfeld erforderlich, um längeren Anlagenstillstand zu vermeiden. Schnellwechselkonzepte für einzelne Komponenten und Module, insbesondere verschleißbehafteter Komponenten, werden entworfen und konstruktiv umgesetzt.

Im ersten Schritt wurden Strahlquelle und Rechner in das Gehäuse der Module integriert, was sie nahezu "Plug & Play"-Messsystemen machen. Somit konnte die Anbindung eines jeden Moduls zur Gesamtanlage über einen elektrischen Stecker sowie Zu- und Abgänge für das Kühlmedium und Sperrluft realisiert werden (siehe Abbildung 10). Mittels eines Arretierbolzens wird sichergestellt, dass das Modul nach einem Wechsel in die gleiche Position gesetzt wird. Diese einfache Integrations- und Wechsellmöglichkeit vereinfacht die Implementierung erheblich und minimiert potenzielle Stillstandzeiten beim Austausch von Modulen. Die Fokussierung auf eine benutzerfreundliche Integration trägt maßgeblich zur Steigerung der Gesamteffizienz des Systems bei und unterstützt das Ziel einer reibungslosen und effektiven Nutzung der Anlage.



Abbildung 10: Weiterentwickeltes clean2sort-Modul inkl. „Plug & Play“-Anschlüssen für 1) Informationsaustausch & Spannungsversorgung, 2) Sperrluftanschluss, 3) Vor- und Rücklauf Kühlmedium, 4) Arretierbolzen

Im Projektzeitraum wurde der Wechsel eines Moduls mehrmals durchgeführt und die Vorgehensweise getestet und optimiert. Das Vorgehen beim Modultausch erfolgt wie folgt:

- 1) Abwahl & Abschaltung des entsprechenden Moduls in der Steuerungs-Software
- 2) Entkoppeln des elektrischen Steckers
- 3) Entkoppeln der Luftzufuhr
- 4) Entkoppeln der Kühlmittleitungen (selbstschließend)
- 5) Entriegeln des Arretierbolzens
- 6) Öffnen der Messcontainerklappen und Einhängen des Moduls in den Kran der Anlage
- 7) Lösen der Verschraubungen zwischen Modul und Modulhalterung
- 8) Herausheben des Moduls aus der Anlage

Beim Wiedereinbau werden die Schritte in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt. Insgesamt werden für einen kompletten Modulwechsel weniger als 60 min benötigt und die Anlage kann weiter produzieren. Sollte kein Wechselmodul bereitstehen, wurde die Software im Projekt weiterentwickelt und die Möglichkeit geschaffen, dass die Anlage auch mit einem ausgebauten Lasermodul weiterbetrieben werden kann, jedoch dann mit 20 % reduzierter Ausbringung.

In der Erprobungsphase zeigte sich, dass nach dem beschriebenen Modulwechsel ohne weitere Justage die Anlage weiter betrieben werden konnte. Allerdings wurde festgestellt, dass die Analyseeffizienz nach dem Modulwechsel durch eine geringfügige Feinjustage noch erhöht werden kann. Hintergrund ist, dass die Positionsjustage beim Modulaufbau jeden einzelnen Moduls nicht zu 100 % identisch ist. Somit sollte durch die Feinjustage das interne Koordinatensystem des Moduls auf das Koordinatensystem des Gesamtsystems gebracht werden.

Dafür wurden im Rahmen des Projekts eine Justage-Routine entwickelt, die es ermöglicht diese Feinjustage bzw. die Justage der Fokusslage in Z-Richtung (senkrecht zur Messbandoberfläche) möglichst effizient und genau durchzuführen.

Für die Justage der Z-Fokusslage des Moduls wird ein Blech mit definierter Stärke im Messbereich unterhalb des Moduls auf dem Band platziert. Mittels eines eigens dafür entwickelten Justage-Programmbausteins in der Hauptsoftware wird dann die automatische Justage gestartet. Dabei wird auf dem Blech ca. 100 LIBS-Analysen in einem definierten Raster durchgeführt, bei denen die Fokusslage jeweils leicht angepasst wird. Anschließend wird aus dem Verlauf der Intensitäten die bestmögliche Fokusslage (maximale Intensität) bestimmt (siehe Abbildung 11) und diese automatisch auf dem Modul implementiert. Dieser Vorgang dauert ca. eine Minute. Dies kann auch auf allen Modulen parallel durchgeführt werden, um die Fokusslage bei Bedarf zu optimieren.

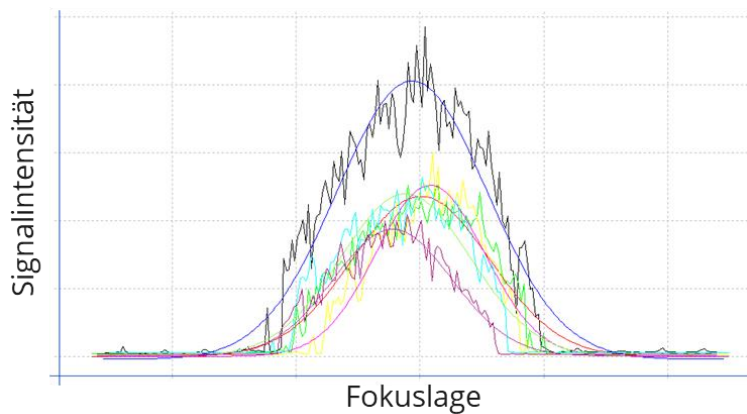


Abbildung 11: Automatische Laser-Fokuslagenbestimmung

Die Justage erhöht den Anteil der Teile, die vom jeweiligen Modul mit ausreichend hoher Intensität analysiert werden. Die genaue Verbesserung hängt immer vom Grad der Verschiebung im Ausgangszustand ab. Für die im Projektzeitraum durchgeführten Modulwechsel betragen die Verbesserungen zwischen 5 % und 30 %. Diese Reduzierung von Fehlanalysen trägt zur Steigerung des Massenaustrags und somit zur Wirtschaftlichkeit der Anlage bei.

Optimierung des optischen Designs

Die Optimierung des Strahlengangs stellt ebenfalls eine entscheidende Weiterentwicklung dar. Hierdurch konnte die Signal-Ausbeute der Anlage signifikant verbessert werden, was wiederum zu genaueren Messergebnissen führt.

Durch die Vereinfachung und Standardisierung der optischen Justage wird die Montage der Anlage effizienter gestaltet. Ein modularer Aufbau der Strahljustage ermöglicht zudem einen schnellen Austausch von Teilen, die anfällig für Verschleiß sind. Dies reduziert die Stillstandzeiten der Anlage und trägt zur kontinuierlichen Verfügbarkeit bei.

Die Strahlquellen werden extern in einem separaten Justagestand vorjustiert und anschließend in die Module eingebaut. Das hat den Vorteil, dass die Strahlquellen gegeneinander ausgetauscht werden können, ohne Nejustage des restlichen Moduls.

Für die Einrichtung der einzelnen Messmodule wurde ein Justageverfahren entwickelt, das Schritt für Schritt abgearbeitet wird und so eine reproduzierbare und vergleichbare Justage der Sensormodule ermöglicht und zu einer optimierten Signalausbeute führt.

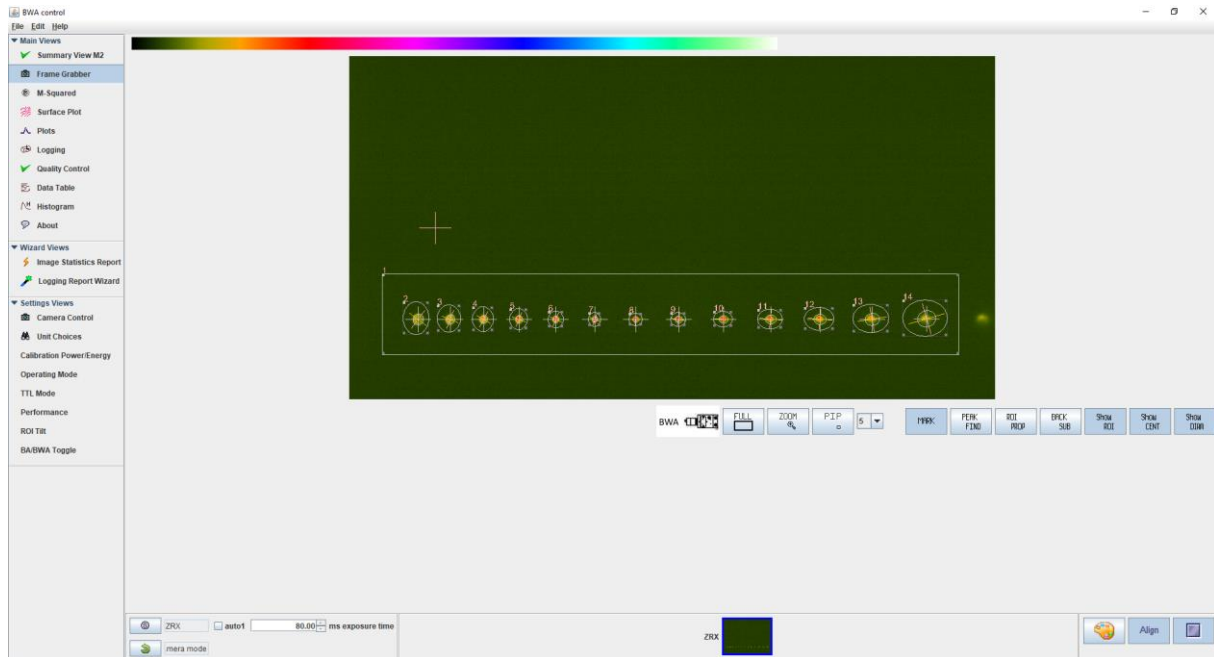


Abbildung 12: Auswahl der auszuwertenden Strahldurchmesser auf der Kamera des Beam Waist Analysers

Alle fünf Module werden für die Justage mit einer Fabry-Perot-Kamera (Beam Waist Analyser, s. Abbildung 12) vermessen. Eine Herausforderung stellen dabei die unterschiedlichen Fokusbereiche von 72 μm bis 82 μm der Module dar, die durch die Toleranzen zwischen den eingesetzten Strahlquellen und optischen Komponenten resultieren. Die Abweichungen der Strahldurchmesser auf der Oberfläche erzeugen unterschiedliche Intensitätswerte bei den aufgenommenen Spektren und müssen mithilfe einer geeigneten Kalibrierung und ggf. einer Parameteranpassung angeglichen werden.

Mithilfe der Fabry-Perot-Kamera werden neben den Fokusbereichen auch die Fokusbereiche (z-Lagen) vermessen und können so überprüft und ggf. korrigiert werden (s. Abbildung 13).

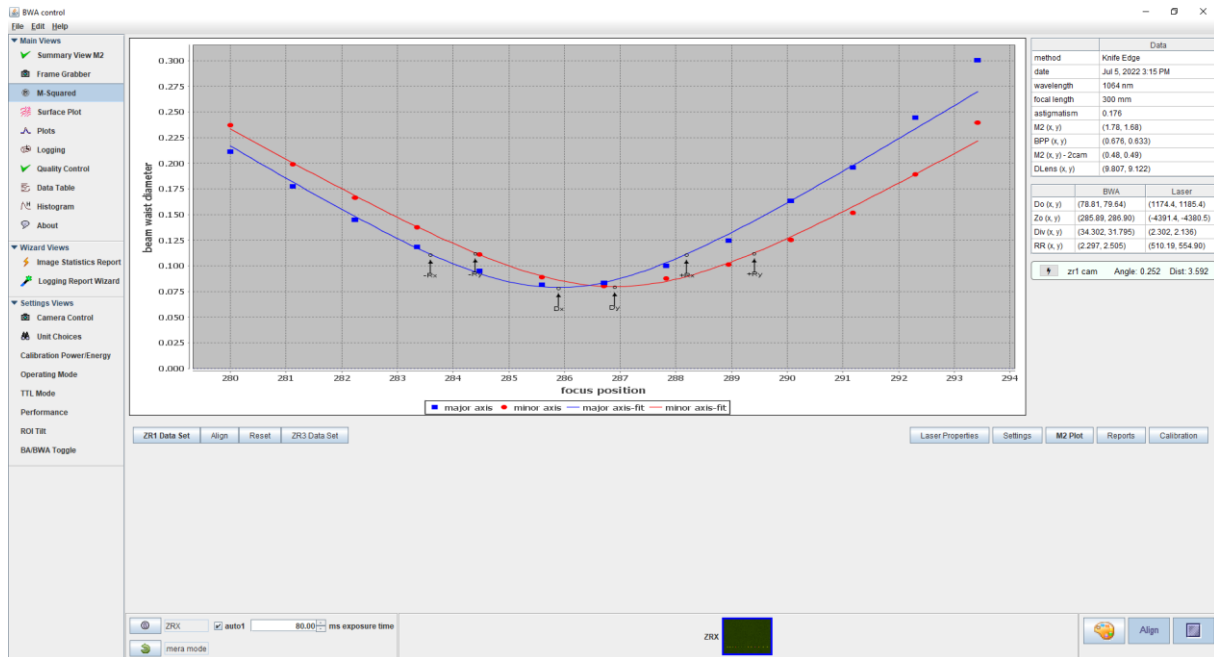


Abbildung 13: Strahlkaustik mit relativer Fokusslage und Fokussdurchmesser jeweils in x- und y-Richtung

Einen Bestandteil zur Prozessüberwachung der Anlage stellt die Integration verschiedener Sensoren wie Feuchtigkeits- oder Durchflusssensoren dar, so dass der Betriebszustand in Echtzeit überwacht und Parameter gegebenenfalls angepasst werden können.

Die neu hinzugefügten Schnittstellen zur online-Strahlendiagnose des Moduls eröffnen die Möglichkeit zur kontinuierlichen Überwachung des Strahlungszustands, was wiederum die Wartung und den Betrieb der Anlage optimiert. Zur Erhöhung der Servicefähigkeit wurde z. B. für das Messband ein Schnellwechselkonzept umgesetzt und erprobt, welches es ermöglicht den Gurt innerhalb von 2 – 3 h zu tauschen.

Eine weitere technische Verbesserung ist die erreichte Reinigungs- und Analysezeit, die unter dem Zielwert von 10 ms liegt. Die mögliche Analysefrequenz pro Modul steigt dadurch auf ca. 15 Teile / Sekunde, was hohe Massendurchsätze auch bei geringeren Teilegrößen bzw. -massen ermöglicht.

Kalibration & Massenstromanalyse

Eine verknüpfende Massenstromanalyse aus Massestrom und Legierungselementanalyse wurde erstmals entwickelt und getestet. Der Massestrom des Aufgabeguts wird mittels der im Bunker verbauten Wägezellen kontinuierlich vermessen. Die beiden resultierenden Masseströme werden in der Anlage nicht kontinuierlich vermessen. Allerdings zeigten Tests, dass das Verhältnis von sortierten Teilen zu nicht sortierten Teilen das Verhältnis der resultierenden Masseströme bei den eingesetzten Schrotten mit homogener Größenverteilung sehr genau widerspiegelt. Die Abweichung beträgt < 3 %.

Mittels der LIBS-Technik wird von jedem Teil eine vollständige Legierungselementanalyse erstellt, die zum einen für die Sortierung eingesetzt wird (Abgleich mit Sortiergrenzen) und zum anderen in die Durchschnittsanalyse fließt. Diese wird für die sortierte Fraktion (getriggert) sowie für die unsortierte

Fraktion (Drop) getrennt geführt. Bei den eingesetzten Schrotten mit homogener Größenverteilung zeigt sich auch bei der Durchschnittsanalyse, dass die teilebasierte Gewichtung (jedes Teil zählt zu gleichen Anteile in die Durchschnittsanalyse) sehr genaue Ergebnisse liefert. Die Legierungselementanalysen aus Einschmelzversuchen mehrerer Chargen an sortiertem Material (jeweils 6 t pro Charge) zeigten Abweichungen zu den LIBS-basierten Durchschnittswerten von jeweils < 0,05 % Legierungselementanteil für alle Elemente, die nicht zu Abbrand beim Einschmelzen neigen. Somit können alle Massenströme inkl. ihrer Legierungselementzusammensetzungen kontinuierlich mit sehr hoher Genauigkeit erfasst werden.

3. Fazit

Die erfolgreiche Umsetzung des geplanten Projektvorhabens markiert einen bedeutenden Meilenstein im Bereich des Recyclings von metallischen Wertstoffen. Die errichtete Anlage repräsentiert einen Durchbruch, da sie in der Lage ist, Wertstoffe auf Legierungsebene präzise zu sortieren und dabei Durchsätze von bis zu 8 Tonnen pro Stunde zu erreichen.

Die mehrmonatigen intensiven Testphasen verliefen äußerst erfolgreich – alle Ziele des Projekts konnten erreicht werden. Während dieser Phasen konnten wertvolle Erfahrungen im Anlagenbetrieb gesammelt werden, die bereits in konkrete Handlungsanweisungen umgesetzt wurden, um die Effizienz und Zuverlässigkeit der Anlage zu steigern. Das grundlegende Konzept der Anlage hat sich als äußerst erfolgreich und robust erwiesen und bildet eine solide Basis für zukünftige Entwicklungen im Bereich des metallischen Wertstoffrecyclings.

Im Laufe des Projekts wurden konstruktive Anpassungen am Anlagen-Design vorgenommen, die sich positiv auf die Gesamtleistung auswirkten. Diese Anpassungen wurden erfolgreich umgesetzt und tragen zur Optimierung des Systems bei. Parallel zu den Arbeiten im Feld, wurde Mess- und Sortiertechnik im Labor sowie im Technikum der cleansort GmbH weiterentwickelt und ein Großteil der Entwicklungen bereits in die Sortieranlage bei der OSR GmbH & Co. KG eingebracht und unter Produktionsbedingungen getestet.

Die Entwicklungsfelder für die Zukunft sind klar definiert und umfassen insbesondere die weitere Modularisierung und Standardisierung des Systems. Dies ermöglicht eine einfache Integration zusätzlicher Module und die Verbreiterung des Messbands, um den Durchsatz weiter zu erhöhen.

Die erzielten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen in diesem Projekt bilden nicht nur das Fundament für weitere Entwicklungsschritte und zukünftige Anlagenprojekte, sondern kommen schon jetzt der installierten Anlage bei OSR, einer weiteren installierten Anlage im Feld sowie drei weiteren in Planung befindlichen Anlagen zugute.

Ein Jahr nach Projektende wird voraussichtlich ein Netzwerk von insgesamt fünf vergleichbaren Anlagen in Deutschland im Einsatz sein. Diese werden gemeinsam in etwa den Energieverbrauch einer mittelgroßen deutschen Großstadt, die etwa 300.000 Menschen beherbergt, einsparen. Darüber hinaus sind wir überzeugt, dass dies „nur“ der Startschuss für eine weitaus größere Entwicklung ist. Durch die erfolgreiche Umsetzung des Projekts konnte bereits jetzt eine starke Zunahme an Vertrauen in die neue Technologie von vielen relevanten Akteuren von der Recyclingbranche bis zur verarbeitenden Industrie festgestellt werden. Dies steigert gleichzeitig die Nachfrage an hochreinerrecyclten Wertstoffen und somit auch die Nachfrage nach der Anlagentechnik.

Zum einen trägt es maßgeblich zur positiven Entwicklung der beteiligten Projektpartner bei und schafft so wertvolle neue Arbeitsplätze im Bereich grüner Technologien. Zusätzlich ermöglicht es erstmals die direkte Schließung von metallischen Wertstoffketten innerhalb Deutschlands und Europas im großen Maßstab ohne Downcycling. Dies fördert die regionale Kreislaufwirtschaft, reduziert die Abhängigkeit von externen Rohstoffquellen und erhöht gleichzeitig die Nachhaltigkeit in einer der energieintensivsten Branchen drastisch. Dies stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der Branche, indem es Kosten senkt und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck minimiert.

Das Projekt kann daher mit Recht als wegweisend für die Branche angesehen werden.

