

TITECH GmbH, Wedel

**Röntgensortierverfahren mit spektral auflösender
Sensorik für die Aufbereitung von primären
Rohstoffen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 24444 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Thomas Erdmann, TITECH GmbH
Dipl.-Ing. Christopher Kleine, RWTH Aachen

Wedel, November 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	24444	Referat	22	Fördersumme	275.921,00 €
Antragstitel	Röntgensortierverfahren mit spektral auflösender Sensorik für die Aufbereitung von primären Rohstoffen				
Stichworte	Verfahren Ressource				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
36 Monate	06.06.2007	11.06.2010	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	TITECH GmbH Feldstraße 128 22880 Wedel			Tel	04103/1888-0
				Fax	04103/1888-188
				Projektleitung Herr Erdmann	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 52054 Aachen				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ein stetig wachsender Rohstoffbedarf bei gleichzeitig sinkenden Gehalten von abgebauten Lagerstätten erfordert den Einsatz von innovativer Technologie, die nicht nur berg- und aufbereitungstechnische Aufgaben bewältigen sondern auch möglichst sozial und umweltverträglich sein muss. Hierbei stellen trockene Aufbereitungsverfahren einen erfolgsversprechenden Ansatz dar.

Aus diesen Gründen ist das Ziel des Projektes die Entwicklung und Erprobung eines sensorbasierten Sortierverfahrens zur Aufbereitung von primären Rohstoffen für den Einsatz sowohl unter als auch über Tage. Zur Klassifizierung der Materialien soll das Grundprinzip der Röntgentransmissionsbildverarbeitung angewendet werden. Die zu erzielenden Durchsätze sollen maximiert werden, um die spezifischen operativen Kosten und Investitionskosten pro Tonne Produkt zu senken. In Anlehnung an die spezifischen Rahmenbedingungen einer jeden Anwendung soll die Sortierleistung im Bezug auf Produktausbringen und Anreicherung optimiert werden. Das Ziel ist der Einsatz eines Demonstrators im industriellen Maßstab, um die Tauglichkeit der Entwicklung für den Betrieb unter Produktionsbedingungen zu beweisen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Nach der aufbereitungstechnischen Anforderungsanalyse folgen die erste konzeptionelle Planung und Untersuchungen zur Entwicklung eines Sensorsystems auf Basis der Röntgentransmission. Hierbei sollen zwei unterschiedliche Sensortechnologien zur energieaufgelösten Röntgentransmissionsdetektion zum Einsatz kommen, ein neuer Ansatz mit deutlich höherem Umsetzungsrisiko (energiedispersiver Sensor) sowie ein Ansatz auf Basis von bereits bei Titech vorhandener Technologie (zweikanaliger Szintillator basierender Sensor).

Eingehende theoretische Betrachtungen und praktische Versuche an Testaufbauten werden im Bezug auf die beiden Zuführsysteme Rutsche und Band durchgeführt. Hierbei stehen die Vereinzelung zur

separierten Präsentation der Partikel an das Sensorsystem und die Durchsatzoptimierung in einem Interessenskonflikt, welcher durch geeignete bauliche Maßnahmen und der Wahl des besten Vereinzelungsprinzips gelöst werden soll. Basierend auf den Voruntersuchungen wird eine Sortieranlage entwickelt und gefertigt, die einen hohen Durchsatz bei hoher Verfügbarkeit gewährleistet.

Im Anschluss daran folgen die Applikationstests an ausgesuchten mineralischen Rohstoffen sowie die Pilotphase in industriellem Maßstab.

Ergebnisse und Diskussion

Eingehende praktische Untersuchungen zu den konkurrierenden Aufgabesystemen Rutsche und Band zeigen, dass das Rutschenprinzip Vorteile gegenüber dem Bandsystem hat. Daher wurde im Zuge des Forschungsprojektes ein Demonstrator auf Basis des Rutschensystems konstruiert und gebaut. Da der energiedispersive Sensor nicht den Anforderungen entsprach und deshalb nicht verwendet werden konnte, wurde das Prinzip des zweikanaligen Röntgensensors für die Anwendung in einem Rutschensortiersystem optimiert.

Eine Vielzahl von Applikationen sind auf dem Demonstrator getestet worden. Für Steinkohle, Eisenerz, Talk und Phosphat konnten positive Ergebnisse erzielt werden. Dies bedeutet, dass Röntgensortierung unter den gegebenen Rahmenbedingungen für den jeweiligen Einsatzfall technisch und ökonomisch sinnvoll einsetzbar ist. Zwei durchgeführte Pilotanwendungen zeigen, dass Röntgensortierung den technischen Anforderungen entspricht und im industriellen Maßstab einsetzbar ist. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Steinkohlesortierung. Eine positive Resonanz des Marktes und der Absatz von mehreren Maschinen unterstreichen diese Ergebnisse. Aufgrund der guten Ergebnisse aus den Tests bei der Pilotanwendung konnte direkt nach Abschluss des Projektes das erste System verkauft und ausgeliefert werden. Mittlerweile sind zwei weitere Sortierer bestellt.

Durch die im Vergleich zu nass arbeitenden Verfahren kompakte Bauweise, dem geringen Infrastrukturbedarf, dem geringeren Umwelteinfluss und dem geringen legislativen Zulassungsaufwand stellt Röntgensortierung ein flexibles Verfahren dar, welches insbesondere für die Abscheidung von Bergen nahe des Abbaus unter und über Tage eingesetzt werden kann. Durch eine optimierte Positionierung im Prozess kann das volle Potential entfaltet werden. Auch wenn sie bei der Lösung von schwierigen Sortieraufgaben nicht mit nass arbeitenden Verfahren konkurrieren kann, stellt die Röntgensortierung eine berg-, aufbereitungs- und umwelttechnische sowie wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung für die mineralische Rohstoffwirtschaft dar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die gefundene Systemlösung wurde durch einen Fachvortrag sowie auf einem Messestand auf der ACPS Konferenz „Australian Coal Preparation Society Conference“ in Mackay, Australien im September 2010 vorgestellt. Ein komplettes Sortiersystem wurde auf der Elektra Mining Show in Johannesburg, Südafrika im Oktober 2010 auf einem Messestand ausgestellt. Ein weiterer Vortrag wurde auf der Fossil Fuel Foundation 15th Conference, Clean Coal to Clean Energy gehalten. Nachdem die Pilotanwendung zur Steinkohlesortierung in Betrieb genommen und optimiert war, wurden potentielle Kunden aus Südafrika und von Übersee auf die Installation geführt, um diese neue Methode der Reinigung von Kohle vorzustellen. Im November 2010 ist eine Pressemitteilung an alle relevanten Fachverlage herausgegangen.

Fazit

Die Röntgensortierung stellt eine leistungsfähige Aufbereitungstechnik dar, die bereits heute bei ausgewählten Sortieraufgaben technisch und wirtschaftlich mit bestehenden Techniken konkurrieren kann. Die sehr positive Resonanz von Industrie und wissenschaftlichen Einrichtungen zeigt, dass umweltverträgliche Technik auch leistungsfähig und wirtschaftlich sinnvoll sein kann.

Die schnellen Fortschritte im Bereich der Sensortechnologie, der Datenverarbeitung und auch im Bereich des mechanischen Aufbaus von sensorgestützten Sortierern werden dazu führen, dass Röntgensortierung auf immer mehr Sortieraufgaben anwendbar sein wird und damit in Konkurrenz mit bestehenden, nassen Verfahren tritt. Weiterhin besteht das Potential, die für die Sortierung gewonnenen Daten in die Prozesskontrollsysteme von nachfolgenden Aufbereitungsschritten zu integrieren. Hierdurch lassen sich große Mengen an Energie, Wasser und Prozesschemikalien durch optimierte Anpassung an Aufgabenschwankungen einsparen. Röntgensortierung hat großes Potential für die umweltverträgliche Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	4
VERZEICHNIS VON ABBILDUNGEN UND TABELLEN	5
VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN UND ABKÜRZUNGEN	6
1 ZUSAMMENFASSUNG	7
2 EINLEITUNG	8
3 HAUPTTEIL	12
3.1 ANFORDERUNGSSPEZIFIKATION	12
3.2 KONZEPTE UND VORUNTERSUCHUNGEN	13
3.3 VEREINZELUNG – RUTSCHE VERSUS BAND.....	15
3.3.1 <i>Versuche zur Vereinzelung bei Förderbandzuführung</i>	15
3.3.2 <i>Pilotversuche an Rutschenmaschine</i>	19
3.4 SYSTEMENTWICKLUNG	20
3.4.1 <i>Durchführung und Ergebnisse</i>	20
3.4.2 <i>Diskussion der Ergebnisse</i>	23
3.5 APPLIKATIONSTESTS	24
3.5.1 <i>Steinkohle aus den Witbank Kohleabbaugebiet, Südafrika</i>	24
3.5.2 <i>Massives, sulfidisches Golderz</i>	25
3.5.3 <i>Steinkohle aus dem Bonito Flöz, Santa Caterina, Brasilien</i>	25
3.5.4 <i>Eisenerz aus den Lagerstätten Bou Khrada und Ouenza, Algerien</i>	26
3.5.5 <i>Talk der Lagerstätte Lusenac, Frankreich</i>	26
3.5.6 <i>Karbonatisches Phosphatgestein</i>	27
3.6 TESTPHASE IN PILOTANWENDUNGEN.....	27
3.6.1 <i>Pilotanwendung 1 - Steinkohle</i>	27
3.6.2 <i>Pilotanwendung 2 - Massives, sulfidisches Golderz</i>	30
3.7 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE DER PILOTANWENDUNG.....	32
3.7.1 <i>Verringerung der Umwelteinflüsse</i>	32
3.7.2 <i>Wirtschaftlichkeit</i>	32
3.7.3 <i>Konstruktive Verbesserungsansätze und Bewertung</i>	33
3.8 MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE	33
3.8.1 <i>Kooperation mit Isambane Mining zum Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage</i>	34
3.8.2 <i>Vorstellung der Systemlösung auf Messen</i>	35
3.8.3 <i>Veröffentlichungen</i>	35
3.8.4 <i>Vertriebsmaßnahmen</i>	36
4 FAZIT	37
5 LITERATURVERZEICHNIS	39

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Röntgentransmissionssortierers	14
Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Bildauswertung	16
Abbildung 3: Auswertung der Sektoren	18
Abbildung 4: Materialverteilungen bei Zuführung mittels Rutsche.....	20
Abbildung 5: Schnittzeichnung des Sortiersystems	21
Abbildung 6: Volumenmodell der Sortiereinheit und des vollständigen Systems.....	23
Abbildung 7: Röntgensensorabdeckung, Düsenleiste und Auslassschächte	23
Abbildung 8: Sortierer im Technikum Wedel mit Vibrationsrinne.....	24
Abbildung 9: Kalibrationssatz Steinkohle (linke Spalte Produkt, Rest Berge).....	25
Abbildung 10: Pilotanlage mit Röntgensortierer (rot), ARNOT Mine & Power Station, RSA ..	28
Abbildung 11: Ergebnisse für Steinkohle in der Fraktion 50-100 mm bei 120 t/h Durchsatz .	29
Abbildung 12: Ergebnisse der Pilotanlage für Steinkohle in der Fraktion 12-50 mm	30
Abbildung 13: Aufstellung des Röntgensortierers bei TGME, Pilgrims Rest, RSA	31
Abbildung 14: Messestand auf der Elektra Mining Show Johannesburg, Okt. 2010.....	35

Verzeichnis von Begriffen und Abkürzungen

[CO ₂]	Kohlendioxid
[keV]	Kilo-Elektronenvolt]
[h]	Stunde
[km]	Kilometer
[kV]	Kilovolt
[kW]	Kilowatt
[kWh]	Kilowattstunden
[mA]	Milliampere
[MJ]	Megajoule
[mm]	Millimeter
[NO _x]	Stickoxide
[PM ₁₀]	Feinstaub kleiner 10 Mikrometer
[SO _x]	Schwefeloxide
[t]	Metrische Tonne
[XRT]	X-Ray-Transmission/Röntgentransmission
[ZAR]	Südafrikanischer Rand

1 Zusammenfassung

Das Entwicklungsprojekt zu Röntgensortierverfahren mit spektral auflösender Sensorik für die Aufbereitung von primären Rohstoffen ist sehr erfolgreich abgeschlossen worden. Im Zuge der Entwicklungen konnte eine leistungsfähige Röntgensortiermaschine auf Basis des Rutschenprinzips entwickelt und auf verschiedene Anwendungen erfolgreich angewendet werden. Die Marktresonanz bestätigt, dass ein leistungsfähiges Sortiersystem entwickelt wurde, welches nicht nur wirtschaftlich sinnvoll ist, sondern auch eine ressourcenschonende Aufbereitungstechnik darstellt.

Eingehende praktische Untersuchungen zu den konkurrierenden Aufgabesystemen Rutsche und Band zeigen, dass das Rutschenprinzip Vorteile gegenüber dem Bandsystem hat. Daher wurde im Zuge des Forschungsprojektes ein Demonstrator auf Basis des Rutschensystems konstruiert und gebaut. Es wurden unterschiedliche Röntgensensortechnologien auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Das gewählte Verfahren des zweikanaligen Szintillator-basierenden Röntgensensors wurde für die Anwendung in einem Rutschensortiersystem optimiert.

Eine Vielzahl von Applikationen sind auf dem Demonstrator getestet worden. Für Steinkohle, Eisenerz, Talk und Phosphat konnten positive Ergebnisse erzielt werden. Dies bedeutet, dass Röntgensortierung unter den gegebenen Rahmenbedingungen für den jeweiligen Einsatzfall technisch und ökonomisch sinnvoll einsetzbar ist. Zwei durchgeführte Pilotanwendungen zeigen, dass Röntgensortierung den technischen Anforderungen entspricht und im industriellen Maßstab einsetzbar ist. Eine positive Resonanz des Marktes und der Absatz von mehreren Maschinen unterstreichen diese Ergebnisse.

Die Röntgensortierung stellt eine leistungsfähige Aufbereitungstechnik dar, die bereits heute bei ausgewählten Sortieraufgaben technisch und wirtschaftlich mit bestehenden Techniken konkurrieren kann. Durch die im Vergleich zu nass arbeitenden Verfahren kompakten Bauweise, dem geringen Infrastrukturbedarf, dem geringeren Umwelteinfluss und dem geringen legislativen Zulassungsaufwand stellt Röntgensortierung ein flexibles Verfahren dar, welches insbesondere für die Abscheidung von Bergen nahe des Abbaus eingesetzt werden kann. Durch eine optimierte Positionierung im Prozess kann das volle Potential entfaltet werden. Auch wenn sie bei der Lösung von schwierigen Sortieraufgaben noch nicht mit nass arbeitenden Verfahren konkurrieren kann, stellt die Röntgensortierung eine bergtechnische, aufbereitungstechnische, umwelttechnische und wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung für die mineralische Rohstoffwirtschaft dar.

Eine Weiterentwicklung der Sensortechnik und Verbesserungen am mechanischen Aufbau werden die Sortierleistung sowie den Durchsatz weiter steigern und weiteres Potential zur umweltfreundlichen und wirtschaftlich erfolgreichen Sortierung von mineralischen Rohstoffen erschließen. Es wird erwartet, dass im nächsten Jahr die energiedispersiven Sensoren für eine Industrieanwendung verfügbar werden und in den Sortierer integriert werden können. Dadurch können Anwendungen erschlossen werden, für die eine größere Trennschärfe notwendig ist.

Kooperationspartner war die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen. Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichens Az: 24444 gefördert.

2 Einleitung

Ökonomische und ökologische Gründe zwingen zunehmend zu einem sinnvollen Umgang mit den vorhandenen Rohstoffen. Die primären, natürlichen Vorkommen werden immer rarer und gleichzeitig hat in den letzten Jahren der Bedarf an Rohstoffen, insbesondere bedingt durch das Wirtschaftswachstum in Asien, zugenommen. Dadurch entsteht ein steigender Bedarf an wirtschaftlichen Lösungen, um die Rohstoffgewinnung zu optimieren. Auch Vorkommen geringerer Qualität werden zunehmend ausgebeutet. Zudem wurden in den vergangenen Jahrhunderten mangels geeigneter Aufbereitungstechnik nur die sehr reichen Zonen abgebaut und hierbei Abraumhalden hinterlassen, die noch große Mengen an Nutzmaterial enthalten. Durch die Aufbereitung werden Rohstoffvorkommen geschont und die Umweltbelastung durch den Rohstoffabbau reduziert. Beim Abbau von Rohstoffen entstehen Umweltbelastungen durch z.B. Bohrungen, Sprengungen und Transport, insbesondere durch Nitrate von Sprengungen und Emissionen der dieselbetriebenen Aggregate. Der Aufwand von Abbau und Transport wurde für das Material der Althalden bereits geleistet.

Heute übliche Aufbereitungsprozesse im Bergbau bestehen häufig aus einer energieaufwendigen Zerkleinerung und Siebung und nasstechnischen Verfahren, wie Schwimm-/Sink-Verfahren (z.B. Schwertrübescheidung) und Flotation. Jede Tonne Taubgestein, das vor dem eigentlichen Aufbereitungsprozess abgetrennt werden kann, ermöglicht die Einsparung von bis zu 40 kWh elektrischer Energie, die für Transport, Zerkleinerung und Siebung verbraucht werden.

Zielsetzung dieses Projektes ist die Entwicklung und Erprobung eines sensorbasierten Sortierverfahrens zur Aufbereitung von primären Rohstoffen zum Einsatz sowohl unter als auch über Tage. Mit einer geeigneten Trenntechnologie soll das wertstoffhaltige Material (Erze, Nutzminerale oder Energieträger) von dem wertlosen Taubgestein (Berge) getrennt werden.

Dadurch sollen

- Rohstoffvorkommen besser genutzt,
- Transportkosten und damit zusammenhängende Emissionen verringert werden (Sortierung vor Ort),
- Kosten für Abraumhalden reduziert werden (weniger Deponiematerial) und
- bestehende Abraumhalden nachsortiert und eventuell sogar beseitigt werden.

Die effizientere Ausbeutung durch den Einsatz sensorgestützter Sortiermaschinen schont auch die Umwelt durch Verringerung von Emissionen, Energieverbrauch und Chemikalieneinsatz.

Zur Klassifizierung der Materialien soll das Grundprinzip der Röntgentransmissionsbildverarbeitung angewendet werden. Dieses Erkennungsverfahren, welches auf sensorgestützten Sortieraggregaten zum Einsatz kommen kann, eignet sich insbesondere für die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe, da es trocken arbeitet und im Vergleich zu konkurrierenden nassen und trockenen Dichtesortierverfahren eine planare Projektion der atomaren Dichte der Partikel für die Trennung verwendet. Im Gegensatz hierzu wirkt bei der Dichtesortierung das durchschnittliche Partikelgewicht auf den Sortiervorgang. Eine Detektion der räumlichen Verteilung von Bestandteilen mit unterschiedlicher atomarer Dichte erlaubt die Bewertung und Sortierung von Rohstoffen aufgrund eines zusätzlichen Sortierkriteriums. Weiterhin hat die Röntgentransmission im Vergleich zu anderen sensorgestützten Sortiersystemen (z.B. optische Sortierung) den Vorteil, dass eine Vorbereitung der Oberfläche für die Detektion, wie z.B. durch Attrition oder Bedüsung mit Wasser nicht notwendig ist, da die Strahlung die Partikel und damit auch nicht repräsentative Anhaftungen an der Oberfläche durchdringt.

Durch den Einsatz eines mehrkanaligen Röntgensensors kann sowohl die atomare Dichte als auch das materialspezifische Absorptionsverhalten der Elemente genutzt, um eine bestmögliche Selektivität zu erzielen. Hierzu muss der Sensor den Photonenstrom in mehreren Energiebändern des Röntgenspektrums gleichzeitig quantitativ erfassen und in elektrische und schließlich numerische Größen wandeln können. Es sollen zwei unterschiedliche Sensortechnologien zum Einsatz kommen, ein neuer und innovativer Ansatz mit deutlich höherem Umsetzungsrisiko sowie ein Ansatz auf Basis von bereits bei Titech vorhandener Technologie. Durch dieses Vorgehen kann der Erfolg des Projektes sicher gestellt werden.

Folgenden Informationen stehen zur Auswertung in Echtzeit zur Verfügung:

- Röntgentransmission mit spektraler Auflösung,
- Geometrie der Objekte und
- Textur der inneren Objektstruktur

Durch eine geeignete Signalverarbeitung wird daraus das Klassifikationsergebnis berechnet und dieses mit Methoden der Bildverarbeitung weiterverarbeitet. Anschließend wird der Materialstrom im freien Fall per Druckluft in zwei Ausgangsströme (Produkt und Berge) getrennt.

Ferner ist eine geeignete Verfahrenstechnik zu entwickeln und zu optimieren, die zu einem optimierten Gesamtprozess führt. Zu diesem Zweck soll im Rahmen dieses Vorhabens eine Sortieranlage bei einem Pilotanwender aufgebaut und erprobt werden. Beide Sensortypen sollen alternativ in ein Sortiergerät integrierbar sein, das für den rauen Einsatz der Erzaufbereitung geeignet ist und im Rahmen von Pilotanwendungen erprobt werden kann.

Als Ergebnis der Erprobungsphase sollen Wirtschaftlichkeit und Umweltrelevanz des Aufbereitungsverfahrens nachgewiesen werden. Für die anvisierten Marktsegmente muss die Maschine möglichst robust und auf maximalen Durchsatz optimiert sein. Um die geforderten Materialstärken mit dem Röntgensystem durchdringen zu können, muss mit höheren Röntgenenergien gearbeitet werden als bei den Recyclinganwendungen. Dies bedingt eine gute Abschirmung der Maschine gegen austretende Röntgenstrahlung

Technische Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist, ein Röntgensortiergerät mit folgenden technischen Parametern zu entwickeln:

- modulare Arbeitsbreite der Sortiermaschine von 1200 mm bis 3000 mm
- horizontale und vertikale Röntgenbildauflösung < 1 mm
- Sortierung von Teilchen im Kornband +20 mm / -150 mm
- Höchstmöglicher Durchsatz:
je nach Teilchengröße und spezifischem Gewicht 50 – 200 Tonnen / Stunde
- hohe Sicherheit für den Bediener, d.h. Strahlenschutz der Hochklasse (wie Gepäckkontrolle)

Qualitative Zielsetzung

Um letztlich die Wirtschaftlichkeit der Sortierung zu gewährleisten, müssen folgende qualitative Ziele für den Sortierprozess erreicht werden:

- mindestens 90 % Produktausbringen
- eine Produktreinheit von > 80 %
- eine hohe Verfügbarkeit von mindestens 20 Stunden an 350 Tagen = 7000 Stunden / Jahr

- geringer Wartungsaufwand von ca. 1 – 2 Stunden pro Tag
- nur ca. 3 – 4 Serviceeinsätze pro Jahr

Wirtschaftliche Zielsetzung

Die geplante Sortiertechnik lässt sich nur dann in der Breite umsetzen, wenn sie ökonomisch interessant für die Betreiber wird. Die Wertschöpfung im Anwendungsbereich der primären Rohstoffe wird erzielt durch das frühzeitige Aussortieren von wertlosem Gestein (Berge) vom werthaltigen Gestein. Dadurch werden erhebliche Kosten im nachfolgenden Aufbereitungsprozess eingespart. Die ökonomischen Zielsetzungen sind

- ein von der Arbeitsbreite abhängiger Maschinenpreis zwischen 400 T€ und 600 T€
- niedrige Betriebskosten von unter 0,30 € pro Tonne bei 300 t/h
- eine Amortisierungszeit für die Investition von unter 2 Jahren

Im Folgenden werden die notwendigen Schritten zur Realisierung der Aufgabe beschrieben. Zunächst werden in der Anforderungsspezifikation alle wichtigen Parameter für typische Anwendungen zusammengetragen. Die dann folgenden Voruntersuchungen dienen der Ermittlung wichtiger Systemparameter, um eine Auslegung der Komponenten und des Gesamtsystems durchführen zu können:

- Berechnung der Energieabstufung für ausgewählte Anwendungsbeispiele
- Laboruntersuchungen an Sortiermaterialien
- Auslegung von Röntgenquellen
- Test der Sensoranordnung
- Auslegung der Röntgen-Filter
- Berechnungen zur Abschirmung
- Lebensdauerbetrachtungen zu den Röntgenkomponenten

Ein wichtiger Arbeitspunkt zur Konzeption befasst sich mit dem Prinzip der Förderung in der Scan- Zone. Eine Gegenüberstellung der Förderung mit Rutsche oder Band soll einen hohen Durchsatz bei bestmöglicher Vereinzelung gewährleisten.

Die Realisierungsspezifikation beschreibt das Lösungskonzept des Gesamtsystems und dient als Leitfaden und für die Umsetzung.

Bei der Systementwicklung wird zunächst für das Sortiergerät ein mechanisches Volumenmodell entwickelt, das bereits die genaue Geometrie der Förderaggregate und der Sensoranordnung enthält. Auf dieser Basis erfolgt die Detailkonstruktion der Module, Baugruppen und Bauteile. Es werden die Module Zuförderung, Scaneinheit und Trennkammer unterschieden, die definierte Schnittstellen haben. Parallel dazu erfolgt die Elektroplanung der Steuerungs- und Sicherheitstechnik.

Der Aufbau der Sensorik und die Hardwarekonfiguration der elektronischen Signalverarbeitung wird festgelegt. Die Sonderfunktionen der Signalverarbeitung werden in Logik und Software programmiert und Schnittstellen zur Sensorik in Hardware entwickelt und in Software implementiert.

Für Labortests und Applikationstests können vorhandene abgeschirmte Versuchsgeräte verwendet werden, die mit der Sensorik und entsprechender Signalverarbeitung ausgestattet sind.

Die Fertigung der mechanischen Bauelemente erfolgt bei Partnerfirmen. Parallel dazu wird die Sensorik produziert. In der eigenen Produktion erfolgt die Montage sowie die elektrische Ausrüstung und die Ausstattung mit System zur Zu- und Abförderung der Massenströme. Für den Pilotbetrieb werden alle Module in einen Container integriert, um den Betrieb vor Ort zu ermöglichen.

Sobald die Geräte elektrisch geprüft sind und die Betriebsspannung eingeschaltet werden kann, erfolgt die Strahlenschutzmessung durch den TÜV Nord. Die Leistungsdaten werden mit den Anforderungen verglichen und optimiert. Der Arbeitspunkt endet mit dem Meilenstein I, der Freigabe für den Pilotbetrieb.

Zum Nachweis der Selektivität wird die Anlage im Technikum mit ausgewählten Applikationen betrieben. Diese Applikationen sollten den Testbetrieb bei den Pilotanwendern vorbereiten. Die Maschine kann auf diese Weise bereits auf die Trennaufgabe eingerichtet werden.

Im Rahmen des Feldeinsatzes wird das Sortiersystem in Pilotanwendungen erprobt, erst in der Felderprobung kann die volle Leistungsfähigkeit des Sortiersystems nachgewiesen werden, denn erst hier können die Materialmengen herbeigeschafft werden und kann die Stabilität über viele Schichten nachgewiesen werden. Erst die großen Mengen zeigen, wo unerwünschte Materialablagerung, Verschleiß und Verschmutzung auftritt.

Die Felderprobung wird durch Applikationsingenieure von Titech sowie wissenschaftliche Mitarbeiter der RWTH Aachen unterstützt. Etwaige Mängel werden von der Konstruktionsabteilung aufgenommen und nachgebessert, damit die Langzeitstabilität nachgewiesen werden kann.

3 Hauptteil

3.1 Anforderungsspezifikation

Als Vorstufe für die Anforderungsanalyse müssen zunächst die in Frage kommenden Anwendungen analysiert werden. Die möglichen Anwendungen zur Sortierung von primären Rohstoffen müssen auf ihre Relevanz hinsichtlich der folgenden Kriterien untersucht werden:

- Technische Sortierbarkeit
Ein Material kann mit dem Röntgentransmissionsverfahren sortiert werden, wenn:
 - Das Kornband der Sortieraufgabe in dem Bereich liegt, den der Sortierer verarbeiten kann.
 - Das Produkt in dem jeweiligen Kornband aufgeschlossen, d.h. nicht gleichmäßig in allen Partikeln verteilt ist.
 - Die enthaltenen Minerale müssen mit Röntgentransmissionsbildverarbeitung erkennbar sein.
- Wirtschaftliche Sortierbarkeit
Das Sortieren muss dem Prozess einen ausreichenden Mehrwert hinzufügen. Dies kann nach folgenden Aspekten erfolgen:
 - Abtrennung von minderwertigen Bestandteilen (Bergen)
 - Anreicherung von hochwertigen Bestandteilen (Produkt)
 - Aussortierung von speziellen Verunreinigungen, die in dem nachfolgenden Prozess stören.
- Marktvolumen

Um die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten zu beurteilen, ist das Verständnis des Gesamtprozesses bei der Erz- und Mineralaufbereitung erforderlich. In der Studie werden verschiedene Erze (Eisen, Kupfer, Zink, Gold und weitere), Steinkohle, Braunkohle, Speichergestein, metallurgische Schlacke, industrielle Minerale und Edelsteine ausführlich nach den oben aufgeführten Kriterien betrachtet.

Zusammenfassend kommen als Einsatzorte Anwendungen in Minen oder Steinbrüchen, rund um die Aufbereitung und in Abraumhalden in Frage. Bezogen auf die Rohstofftypen sollten Erze und Kohle im Fokus stehen.

Basierend auf der oben beschriebenen Studie wurde an der TU Delft die Anforderungsanalyse durchgeführt. Dabei wurden die Anforderungen betrachtet, die durch die folgenden Punkte entstehen:

- Umweltbedingungen
- Eigenschaften des Materialstroms
- Qualität des Sortierprozesses

Hinzu kommen noch die wirtschaftlichen Anforderungen.

Anforderungen durch Umweltbedingungen

Die Anlage muss in dem weiten Bereich von klimatischen Verhältnissen arbeiten können, in dem Bergbau betrieben wird. Das betrifft den Temperaturbereich, Temperaturschwankungen innerhalb von 24h (Tag/Nachtunterschied), Luftfeuchtigkeit (von fast trocken bis nahezu 100 % Feuchtigkeit) und Luftdruck (Untertage oder im Gebirge).

Die Bedingungen vor Ort, wie Vibrationen durch andere Maschinen, Staubbelastungen, usw. müssen berücksichtigt werden. Für einen Untertageeinsatz ist ein Transport der Maschine in kompakten Einheiten erforderlich.

Anforderungen durch die Eigenschaften des Materialstromes

Die wesentlichen Eigenschaften sind dabei die Größe der Objekte (minimale Größe und maximale Dicke) und das auftretende Kornband, das verarbeitet werden muss. Ist das System bis zu einer bestimmten Dicke der Objekte optimiert, können deutlich dünnere Objekte nicht mehr erkannt werden, da sie die Röntgenstrahlung nicht genug absorbieren.

Feuchtigkeit im Materialstrom darf nur zu minimalen Wartungszeiten der Maschine führen. Insbesondere in der Kohleaufbereitung ist ein feuchter Materialstrom notwendig, um starke Staubentwicklung zu vermeiden.

Qualitative Anforderungen

Zur Erreichung von einem hohen Produktausbringen und Reinheit ist eine hohe Sensorauflösung, eine hohe Empfindlichkeit und gute Kanalseparation der spektralen Bänder erforderlich. Außerdem wird eine an die Anwendung angepasste Bildverarbeitung (z.B. Filterung, Texturerkennung) benötigt.

Die Beschickung und das Ausbringen der Objekte haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sortierung. Um die im Bergbau benötigten hohen Durchsätze zu erreichen, muss sowohl die Beschickung als auch das Ausbringen auf hohen Durchsatz optimiert werden. Weitere Punkte sind die Anforderungen an Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des Sortierers.

Wirtschaftliche Anforderungen

Der Mehrwert, der durch die Sortierung erzeugt wird, muss in einem angemessenen Verhältnis zu den Betriebskosten und dem Systempreis stehen. Um wirtschaftlich arbeiten zu können, sind je nach Anwendung und Produktwert hohe Durchsätze von bis zu 200 t/h pro Röntgensortierer notwendig.

3.2 Konzepte und Voruntersuchungen

Zur Klassifizierung der Materialien wird das Grundprinzip der Röntgentransmissionsbildverarbeitung angewendet. Bei Röntgentransmissionssortierern, wie sie im Recyclingbereich eingesetzt werden, ist oberhalb des Förderbandes eine breitbandige Röntgenquelle angeordnet. Die auf dem Förderband transportierten Objekte werden von der emittierten Röntgenstrahlung durchdrungen und die Intensität der Strahlung mit einem unterhalb des Bandes platzierten Röntgensensor erfasst (Abbildung 1). Die Abschwächung der Strahlung eines bestimmten Energiebereiches hängt sowohl von der Dichte und der Zusammensetzung des Materials als auch von der Dicke des Objektes ab. Ein dünnes Eisenblech würde also die Strahlung eines bestimmten Energiebereiches genauso absorbieren wie ein entsprechend dem Dichteunterschied dickeres Stück Aluminium. Wird ein Sensor verwendet, der in mindestens zwei Energiebereichen die Strahlungsintensität detektiert, kann durch geeignete Algorithmen ein dickenunabhängiges Klassifikationsergebnis erreicht werden. Dadurch ist eine Sortierung der Materialien möglich, die nur noch von der jeweiligen atomaren Dichte abhängig ist.

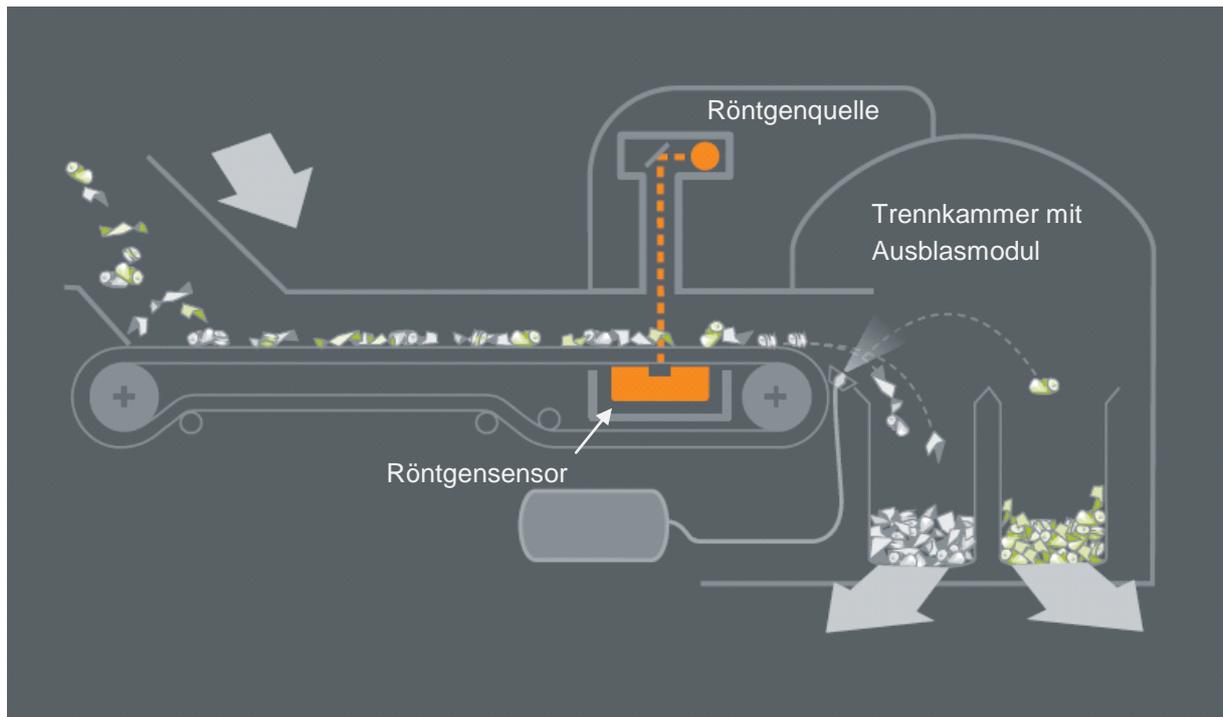


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Röntgentransmissionsortierers

Im Projektantrag sind zwei Sensortechnologien für energieauflösende Röntgensensoren (Zweikanaliger Szintillator-basierender Sensor, energiedispersiver Sensor) angeführt, die alternativ in das Sortiergerät integrierbar sein sollen. Diese Sensoren wurden in Hinblick auf die folgenden Aspekte untersucht:

- Berechnung der Energieabstufung für ausgewählte Anwendungsbeispiele
- Laboruntersuchungen an Sortiermaterialien
- Auslegung und Anordnung von Röntgenquellen
- Test der Sensoranordnung
- Auslegung der Röntgenfilter
- Berechnungen zur Abschirmung
- Lebensdauerbetrachtungen zu den Röntgenkomponenten

Beim zweikanaligen Szintillator-basierenden Sensor wurde die Empfindlichkeit und die Kanalseparation der spektralen Bänder optimiert. Die Kanalseparation wird durch die Kombination von Vorfiltern und der Auslegung der Szintillatoren (Material, Stärke) bestimmt. Da es dabei eine große Anzahl von möglichen Kombinationen gibt, wurde ein Simulationsmodell entwickelt. Das Modell berücksichtigt verschiedene Röntgenquellen, Vorfilter (Materialien und Stärken) und Szintillatoren.

Um die geforderten Materialstärken mit dem Röntgensystem durchdringen zu können, muss mit höheren Röntgenenergien (größer als 125 keV) gearbeitet werden als bei den Recyclinganwendungen. Durch die harte Strahlung kommt es zu einer schnelleren Zerstörung der Röntgensensorik. Verschiedene Szintillatoren wurden daher Lebensdauerests unterzogen, um einen Szintillator zu finden, der sowohl robust gegen die harte Strahlung ist, als auch eine hohe Empfindlichkeit aufweist.

Bei den energiedispersiven Sensoren wurden CdTe- und Si-Detektoren untersucht, die von einem externen Lieferanten und in einem parallelen Entwicklungsprojekt unter Beteiligung von Titech entwickelt werden. Bei beiden Detektoren traten technische Probleme auf (zu lange Auslesezeiten beim CdTe-Detektor, geringe Empfindlichkeit bei Energien über 80 keV beim Si-Detektor), so dass ein industrietauglicher Sensor im Projektzeitraum nicht zur Verfüg-

gung stand. Die Umsetzung des Verfahrens in einen industrietauglichen Sensor wird noch circa ein Jahr benötigen.

Bei dem in Abbildung 1 gezeigtem System wird das Material mittels Bandgerät in den Sensorbereich gefördert. Nachteilig sind die Anfälligkeit der bewegten Teile und der Platzbedarf. Alternativ kann das Material auch per Rutschensystem zugeführt werden, welches sich durch eine höhere Robustheit und eine kompaktere Bauweise auszeichnet.

An der RWTH Aachen wurde eine Studie bearbeitet, um die Vor- und Nachteile beider Lösungen im Hinblick auf einen möglichst großen Durchsatz theoretisch zu betrachten. Im ersten Schritt ist ein Simulationsmodell erstellt worden, welches mit praktischen Versuchen überprüft werden musste.

Auf der Rutsche kommt es durch die unterschiedlichen Reibkoeffizienten der Partikel zu Geschwindigkeitsunterschieden im Bereich des Sensors, so dass eine Lösung mit Bandgerät hier im Vorteil ist. Da das gefundene Modell aber von idealisierten Voraussetzungen ausgeht, musste im nächsten Schritt durch Experimente die optimale Anordnung gefunden werden.

3.3 Vereinzlung – Rutsche versus Band

Im Rahmen der theoretischen Betrachtung hinsichtlich der Zuführung des zu sortierenden Gutes in die Scan-Zone wurde diskutiert, welche Zuführungssysteme prinzipiell für die gewählte Aufgabenstellung des Röntgen-Sortierverfahrens in Frage kommen. Für die technische und wirtschaftliche Optimierung ist das Ziel nicht nur eine Steigerung des Durchsatzes zur Verringerung der spezifischen operativen und Investitionskosten. Für einen Erfolg sind weiterhin die Präsentation an den jeweiligen Sensor, die Detektion und die damit verbundene Sortierleistung von besonderer Bedeutung.

Neben den theoretischen Betrachtungen und einem Simulationsmodell sollten die beiden physikalischen Zuführungssysteme Rutsche und Band in praxisorientierten Vereinzlungsversuchen analysiert und optimiert werden.

Die im Rahmen dieser Versuche gewonnenen Erkenntnisse dienen als Entscheidungshilfe bei der Wahl des Zuführungssystems für den zu konstruierenden Demonstrator.

Im Folgenden werden die verschiedenen Versuchsabschnitte vorgestellt und die wichtigsten bei der Durchführung der Vereinzlungsversuche erzielten Ergebnisse zusammengefasst.

3.3.1 Versuche zur Vereinzlung bei Förderbandzuführung

Das Ziel bei der Durchführung der verschiedenen Testreihen war es, zu untersuchen, ob sich mit dem jeweilig zu testenden Versuchsaufbau eine für ein Röntgen-Sortierverfahren günstige Materialverteilung auf dem Förderband realisieren lässt. Dabei sind vor allem zwei Aspekte von besonderer Bedeutung: Um der Anforderung eines hohen Durchsatzes gerecht zu werden, muss sowohl die Transportgeschwindigkeit des Förderbandes als auch die Belegungsdichte des zu fördernden Gutes auf dem Förderband möglichst hoch sein. Zusätzlich bietet eine hohe Belegungsdichte auf dem Förderband den Vorteil, dass durch die im Vergleich zu unbelegten Stellen auf dem Band stärkere Absorption der Röntgenstrahlung Alterungseffekte bei den Detektorkomponenten vermindert werden und somit längere Lebensdauern der beteiligten Komponenten zu erwarten sind.

Ein hoher Massendurchsatz von sensorgestützten Sortiersystemen ist aus weiteren Gründen von Bedeutung. Zum einen sind die spezifischen Investitionskosten pro Tonne sowie auch die spezifischen operativen Kosten bei höherem Durchsatz geringer, zum anderen führt ein höherer Durchsatz zu geringerem Platzbedarf bei der Aufstellung (Maschinenkörper selber; zu- und abführende Infrastruktur) und damit zu einer erhöhten Flexibilität. Neben der Forde-

nung nach einem hohen Durchsatz, muss eine weitere Eigenschaft des Vereinzelungssystems erfüllt sein. Das Aufgabematerial muss für eine zuverlässige Detektion, Bewertung und Ausschleusung ausreichend vereinzelt auf dem Förderband vorliegen. Dies bedeutet, dass Überlappungen der Einzelstücke zu vermeiden sind. Zudem sind Clusterbildungen aus eng aneinander liegenden Ansammlungen von Einzelkörnern bei gleichzeitiger Bildung von größeren Lücken im Förderstrom unerwünscht.

Dieser Interessenkonflikt zwischen möglichst hoher Bandbelegung und ausreichender Vereinzelung des Fördergutes führt zu einem Optimierungsbedarf.

Im Rahmen der ersten beiden Versuchsabschnitte wurde versucht, mittels verschiedener Versuchsaufbauten eine möglichst hohe und gleichmäßige Materialverteilung auf einem schnell laufenden Förderband zu erreichen. Diese Versuchsabschnitte werden im Folgenden vorgestellt.

Versuchsabschnitt 1

Für den ersten Versuchsabschnitt wurde im Technikum des AMR ein Teststand, bestehend aus Aufgabebunker, unwuchtgetriebener Vibrationsrinne, Übergangsrutsche und in der Laufgeschwindigkeit regelbaren Förderband konstruiert und errichtet. Für die optische Dokumentation und Auswertung wurde eine Beleuchtungseinheit entwickelt und installiert sowie eine senkrecht auf das Förderband ausgerichtete Digitalkamera, die Bilder mit einer Frequenz von 4 Hz aufnehmen kann.

Für den ersten Versuchsabschnitt wurde als Fördergut ein hämatitisches Eisenerz verwendet, dessen Korngrößenverteilung zuvor mittels Zerkleinerung und Klassierung auf einen Bereich von 20–50 mm begrenzt wurde. Dieses Fördergut weist eine geeignete Stabilität und spezifische Dichte auf und wurde für die jeweiligen Vereinzelungsversuche in den über der Vibrationsförderrinne angebrachten Aufgabebunker gegeben. Als veränderliche Parameter der Versuche wurden jeweils unterschiedliche Einstellungen bezüglich der Förderbandgeschwindigkeit und der Stärke des Vibrationsrinnenantriebs gewählt.

Die Auswertung der verschiedenen Bildinformationen erfolgte automatisiert, um die Bandbelegung zu ermitteln. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Auswertung an einem Bild, bei dem die Randbereiche abgeschnitten, die und die Partikel eingefärbt wurden, um eine quantitative Analyse der vorkommenden Farbklassen zu bestimmen. Weiterhin wurden die Übergabepunkte zwischen Rinne und Rutsche, sowie Rutsche und Band dokumentiert und das Bewegungsverhalten der Partikel beschrieben.

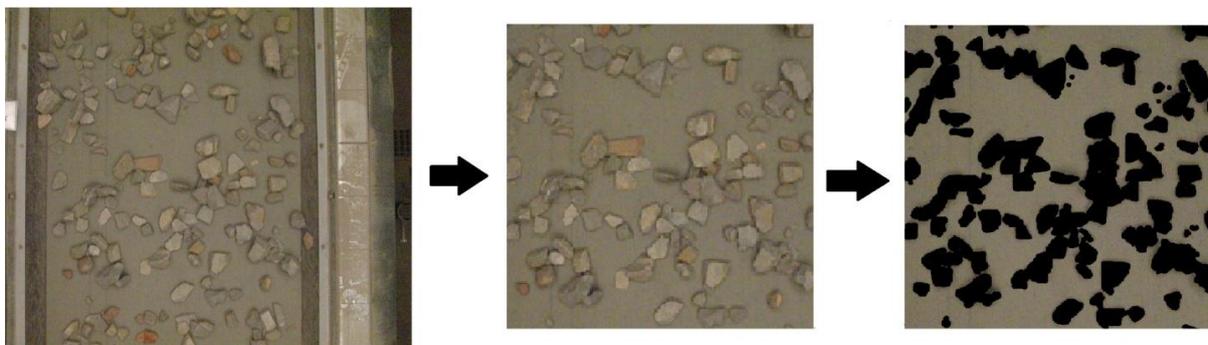


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Bildauswertung

Insgesamt wurden 12 verschiedene Einstellungen der Parameter getestet. Dabei wurden Bandbelegungen in einem Bereich von ca. 13 % bis zu einem Maximalwert von ca. 63 % erreicht. Die Durchsätze betragen dabei zwischen 35 t/h und 92 t/h.

Prinzipiell wurde während der Auswertung der Digitalaufnahmen der erwartete Trend beobachtet, nach dem mit steigendem Durchsatz zwar auch die Bandbelegung ansteigt, die Tendenz zur Bildung von Clustern auf dem Förderband aber ebenfalls zunimmt.

Als bester Kompromiss, welcher einen hohen Durchsatz bei gleichzeitiger akzeptabler Vereinzelung und Verringerung der Clusterbildung abbildet, konnte ein Durchsatz von 60 t/h bei einer Bandbelegung von 35 % erreicht werden. Es ist jedoch zu erkennen, dass auch bei diesen Einstellungen noch Cluster entstehen und die Belegung auf dem Förderband weder absolut gleichmäßig ist, noch wurden größere Lücken der Belegung auf dem Förderband gänzlich verhindert.

Eine Begründung dieser Ergebnisse konnte mit Hilfe der Analyse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gefunden werden. Bei der Übergabestelle zwischen kurzer Übergangsrutsche und Förderband erfahren die Einzelkörner des Aufgabegutes eine hohe Geschwindigkeitsänderung. Von der relativ langsamen Rutschgeschwindigkeit werden die Partikel innerhalb kürzester Zeit auf die mit ca. 3 m/s viel höhere Geschwindigkeit des Förderbandes beschleunigt. Dadurch erhalten sie einen der Förderrichtung des Bandes entgegen gesetzten Drall. Durch diesen Drall verbleiben die Einzelstücke nicht in relativer Ruhe zum Förderband, sondern taumeln teilweise so lange auf dem Förderband, bis sie mit weiteren Einzelstücken zusammenstoßen und dann erst zur Ruhe kommen. Dadurch entstehen die beobachteten Cluster. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass diejenigen Einzelstücke, die kurz nach der Übergabe auf das Band gegen die seitlichen Führungsgummis des Förderbandes stießen, eine negative Beschleunigung gegen die Bandlaufrichtung, Beschleunigung senkrecht zur Bandlaufrichtung und Rotation erfuhren und dadurch bereits in Ruhe auf dem Band liegende Einzelstücke wieder in Bewegung versetzten, so dass sich die Clusterbildung verstärkte.

Die beobachteten negativen Effekte, die eine gleichmäßige Verteilung des Aufgabegutes auf dem Förderband verhinderten, waren somit vor allem in der abrupten Beschleunigung beim Übergang des Fördergutes von der kurzen Übergangsrutsche auf das Förderband begründet. Um diese negativen Effekte zu minimieren, wurde beschlossen, in einem zweiten Versuchsabschnitt eine deutlich längere Übergangsrutsche zu verwenden. Die dabei erzielten Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Versuchsabschnitt 2

Für den zweiten Versuchsabschnitt wurde im Technikum des AMR ein neuer Versuchsstand auf Basis der in Versuchsabschnitt 1 gewonnenen Erkenntnisse aufgebaut. Wie in Versuchsabschnitt 1 wurde das Aufgabegut wiederum in einen Aufgabebunker gefüllt, aus dem es mittels elektromagnetisch angeregter Vibrationsförderrinne abgezogen wurde. Diese förderte das Aufgabegut auf eine zweite Vibrationsförderrinne, die mit Unwuchtmotoren angetrieben wurde. Durch die Kombination von Förderrinnen mit unterschiedlichen Bewegungsmustern sollten möglichst gleichmäßige Durchsätze und Partikelbewegungen erreicht werden.

Von dieser zweiten Förderrinne, gelangte das Fördergut über ein gebogenes Übergangsstück auf eine ca. 3 m lange Rutsche. Diese Rutsche war in ihrer Neigung in einem Bereich von ca. 48°–60° einstellbar. Somit wurde mittels der Rutsche eine Höhendifferenz in einem Bereich von rund 2,50 m überwunden. Von der Rutsche erfolgte die Aufgabe des Fördergu-

tes auf das in der Bandgeschwindigkeit verstellbare Förderband mittels eines weiteren gebogenen Übergangsstückes.

Zusätzlich wurde versucht, die Geschwindigkeit des Förderbandes auf die Geschwindigkeit des Fördergutes beim Übergang anzupassen. Dadurch sollte eine zusätzliche Beschleunigung mit dem dabei entstehenden Drall der Einzelkörner beim Auftreffen auf das Förderband verhindert bzw. minimiert werden. Durch die hohe Rutschgeschwindigkeit des Aufgabegutes konnte die Förderbandgeschwindigkeit jeweils ebenfalls auf einen hohen Wert in einem Bereich von 3–3,7 m/s eingestellt werden.

Zusätzlich zur Variation der Parameter Förderleistung der Vibrationsförderrinnen, der Neigung der Rutsche und der Laufgeschwindigkeit des Förderbandes wurden verschiedene Optionen bei der Gestaltung der Übergänge zwischen den einzelnen Komponenten des Versuchsstandes getestet.

Die Auswirkungen der getesteten Modifikationen und eingestellten Parameter wurden auf ähnliche Weise wie im Versuchsabschnitt 1 mittels Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert. Als Aufgabegut diente heller Quarzit im Korngrößenbereich 20-50 mm, der für die automatisierte Auswertung der Bildinformationen vorteilhafter war. Zusätzlich zu der Ermittlung der prozentualen Bandbelegung und der Dokumentation des Bewegungsablaufes von Partikeln an den Übergabepunkten wurden die Aufnahmen jeweils in 30 Sektoren unterteilt und im Anschluss daran deren Belegungseigenschaften bestimmt. Je nachdem, ob der jeweilige Sektor leer war (0), von einem (1) oder mehreren (2) Einzelstücken, die sich nicht berührten, von Clustern aus zwei Einzelstücken (9) oder von Clustern aus mehreren Einzelstücken (99) belegt war, wurde ihm die entsprechende Kennzahl zugewiesen. Dabei wurden Einzelstücke, die über Sektorengrenzen hinausreichten, immer nur einem Sektor zugerechnet. Exemplarisch ist das Vorgehen in der folgenden Abbildung zu erkennen.

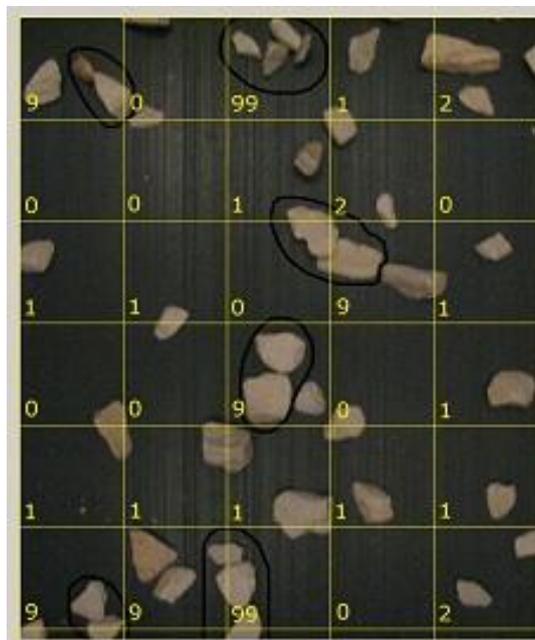


Abbildung 3: Auswertung der Sektoren

Die Auswertung dieser Sektorenkennzahlen für die einzelnen Versuche erlaubte eine quantitative Bewertung der Gleichmäßigkeit der Bandbelegung. Im Laufe der Versuchsreihe zeigte sich, dass sich vor allem zwei Faktoren negativ auf die Clusterbildung auswirkten. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Übergangsstücke, die das Aufgabegut auf die Rutsche und von ihr herunter auf das Förderband leiten. Der erste kritische Punkt befindet sich am oberen Übergang, an dem das Aufgabegut aus der von der Förderrinne angetriebenen Be-

wegung in eine eigenständige Rutschbewegung übergehen soll. Bereits geringste Höhendifferenzen in der Konstruktion sowie die durch die Förderrinne eingebrachte Bewegungskomponente in vertikaler Richtung können beim Übergang kleinste Taumelbewegungen der Einzelstücke hervorrufen. Diese anfänglich sehr leichte Taumelbewegung kann sich über die Länge der Rutsche soweit verstärken, dass eine ruhige Übergabe von der Rutsche auf das Förderband erschwert wird. Konstruktive Veränderungen sowie der Einsatz eines langsam laufenden Förderbandes ergaben keine Verbesserung.

Zudem erfahren die Partikel je nach Oberflächenbeschaffenheit und Gewicht unterschiedliche Reibung auf der Rutsche und es kommt zu einer leichten Abbremsung, die zu einer unruhigeren Rutschbewegung führt. Teilweise werden die Partikel dadurch in Rotation versetzt. Durch diese Geschwindigkeitsdifferenzen sowie durch die teilweise auftretenden Taumelbewegungen werden Beschleunigungs- und Abbremsseffekte hervorgerufen, die – wie bereits in Versuchsabschnitt 1 beobachtet – zur Bildung von Clustern beitragen. Weiterhin hat der Verschleiß der Rutsche einen Einfluss auf die Beschleunigung der Partikel, der sich allerdings durch den Einsatz von Keramikbeschichtungen verringern lässt.

Da diese Aufschaukelwirkung am oberen Teil der Rutsche noch kaum zu beobachten ist, liegt der Schluss nahe, dass der Einsatz einer Scan-Einheit mit direkt anschließender Ausschleusung gerade an dieser Stelle besonders vorteilhaft ist. Diesen Vorteil bietet die bauliche Konstruktion einer Rutschenmaschine. Da sich die Vereinzelung mittels Bandmaschine trotz großer Anstrengung und einer Vielzahl an Versuchen wider Erwarten nicht zufrieden stellend realisieren ließ, wurde letztlich beschlossen, diesen Lösungsweg aufzugeben und sich bei der Vereinzelung auf ein System der Zuführung mittels Rutsche zu konzentrieren.

Die bereits bei den Untersuchungen zur Vereinzelung mittels Förderband geleisteten Anstrengungen waren dennoch nicht vergeblich, da im Rahmen dieser Versuchsabschnitte eine Reihe von Erkenntnissen gewonnen werden konnte, die für die weitere Konstruktion von Sortiermaschinen hilfreich sein werden.

Um den Einfluss der Vereinzelung mittels Rutsche zu untersuchen, wurden Tests auf einer Pilotanlage in Johannesburg (Südafrika) durchgeführt. Diese Tests werden im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.2 Pilotversuche an Rutschenmaschine

Die Versuche zur Zuführung mittels Rutsche wurden auf einer CommodasUltrasort-Pilotanlage auf dem Gelände des renommierten südafrikanischen Bergbau-Forschungsinstituts Mintek durchgeführt.

Diese Pilotanlage bot im Vergleich zum für die Versuchsabschnitte zur Zuführung mittels Förderband verwendeten Aufbau im Technikum des AMR mehrere Vorteile. Durch den geschlossenen Materialkreislauf war es möglich, verglichen mit den Versuchen im Technikum des AMR, innerhalb kürzerer Zeit eine höhere Anzahl an Testdurchläufen durchzuführen und eine Gesamtdurchsatz von mehr als 500 t zu erreichen. Im Rahmen der Versuche wurden zwei verschiedene Korngrößen eines Erzes in den Bereichen 50-80 mm und 30-50 mm bei den Durchsätzen 25, 35 und 50 t/h verwendet.

Für die Beurteilung der Verteilung des Aufgabegutes auf der Rutsche wurden die Aufnahmen der in der Sensoreinheit eingebauten Zeilenkamera verwendet. Diese Aufnahmen sind für die Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Materialverteilung über die gesamte Breite der Rutsche sowie die Dokumentation eventuell auftretender Cluster deshalb besonders gut geeignet, weil sie die Materialverhältnisse unmittelbar in der Flugphase kurz vor dem Moment dokumentieren, in dem die Partikel mittels der installierten Druckluftdüsenleiste ausgeschleust werden können.

Die folgenden Aufnahmen zeigen exemplarisch jeweils eine Materialverteilung der gröberen und der feineren Fraktion des Fördergutes bei Zuführung mittels Rutsche.

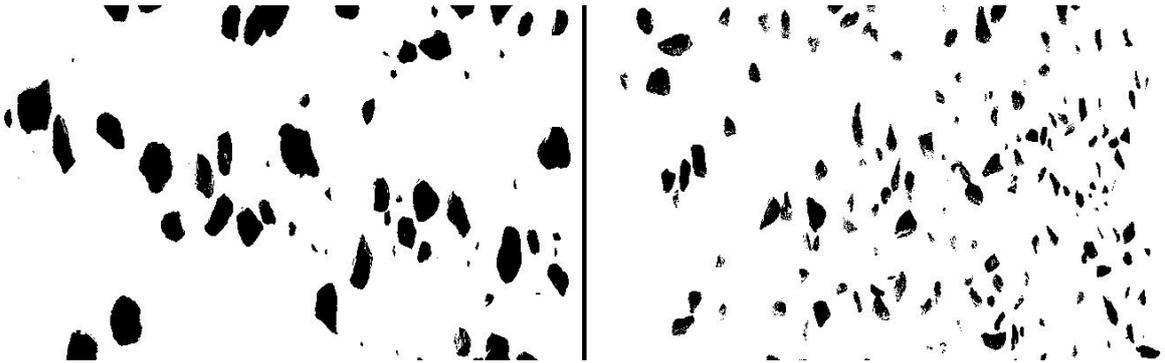


Abbildung 4: Materialverteilungen bei Zuführung mittels Rutsche

Zusätzlich zu den Aufnahmen der Zeilenkamera wurden sowohl mit einer Digitalkamera als auch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Aufnahmen von der Übergabestelle von der Förderrinne zur Rutsche gemacht, um eventuelle Problemstellen in der Zuführung analysieren zu können.

Die Auswertung dieser Bilder zeigte sehr deutlich, dass die Verteilung des Fördergutes auf der Rutsche sehr viel gleichmäßiger erfolgte als bei den Versuchen zur Zuführung mittels Förderband auf dem Versuchsstand im Technikum des AMR. Cluster wurden so gut wie nie beobachtet, auch Überlappungen zweier Einzelstücke traten kaum auf. Während bei den Versuchen auf dem zweiten, verbesserten Versuchsstand mit Förderband Cluster in jedem siebten Sektor auftraten, waren es bei der Rutschenmaschine durchschnittlich 50 % weniger bei gleichem Durchsatz pro Meter Sortierbreite. Es traten somit nur Cluster in jedem 14ten Sektor auf. Nahezu alle Einzelkörner des Fördergutes lagen soweit vereinzelt auf der Rutsche bzw. in der sich anschließenden Flugbahn vor, dass zu erwarten ist, dass eine derartige Vereinzelnung eine problemlose Ausschleusung gewählter Partikel mittels Druckluftimpuls ermöglicht. Diese Aussage gilt für alle getesteten Durchsätze und beide Korngrößenfraktionen. Aufgrund der beobachteten Vereinzelnungsverhältnisse ist sogar davon auszugehen, dass eine weitere Durchsatzsteigerung möglich wäre, ohne die sehr guten Vereinzelnungseigenschaften des getesteten Systems zu verlieren.

Aufgrund der im Rahmen der Untersuchungen erzielten Ergebnisse wird letztlich eine Zuführung in die Scan-Zone des Röntgensortierers mittels Rutschenkonstruktion klar favorisiert. Sowohl die Gleichmäßigkeit der Vereinzelnung als auch die einfacher zu realisierende Ausführung dieser Konstruktion ohne zusätzliche bewegte, mechanische Teile, wie sie bei der Zuführung mittels Förderband erforderlich sind, unterstützen die Auswahl der Konstruktion des Demonstrator als Rutschenmaschine.

3.4 Systementwicklung

3.4.1 Durchführung und Ergebnisse

In der Realisierungsspezifikation wurde basierend auf den Voruntersuchungen das Lösungskonzept des Gesamtsystems beschrieben. Die wesentlichen Punkte sind:

- Aufbau als Rutschenkonstruktion mit 1200 mm Sensorbreite,
- Design für Objekte im Kornband von größer 20 mm bis kleiner 150 mm,
- Integration eines zweikanaligen Szintillator-basierenden Röntgensensors in der Rutsche,
- Anordnung einer Röntgenquelle für die gesamte Sortierbreite.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Sortiersystem entwickelt, bei dem die Materialförderung über eine Rutsche erfolgt und das Sensorsystem aus einem zweikanaligen Szintillator-basierenden Röntgensensor besteht. Im Folgenden wird der Aufbau des Systems kurz erläutert:

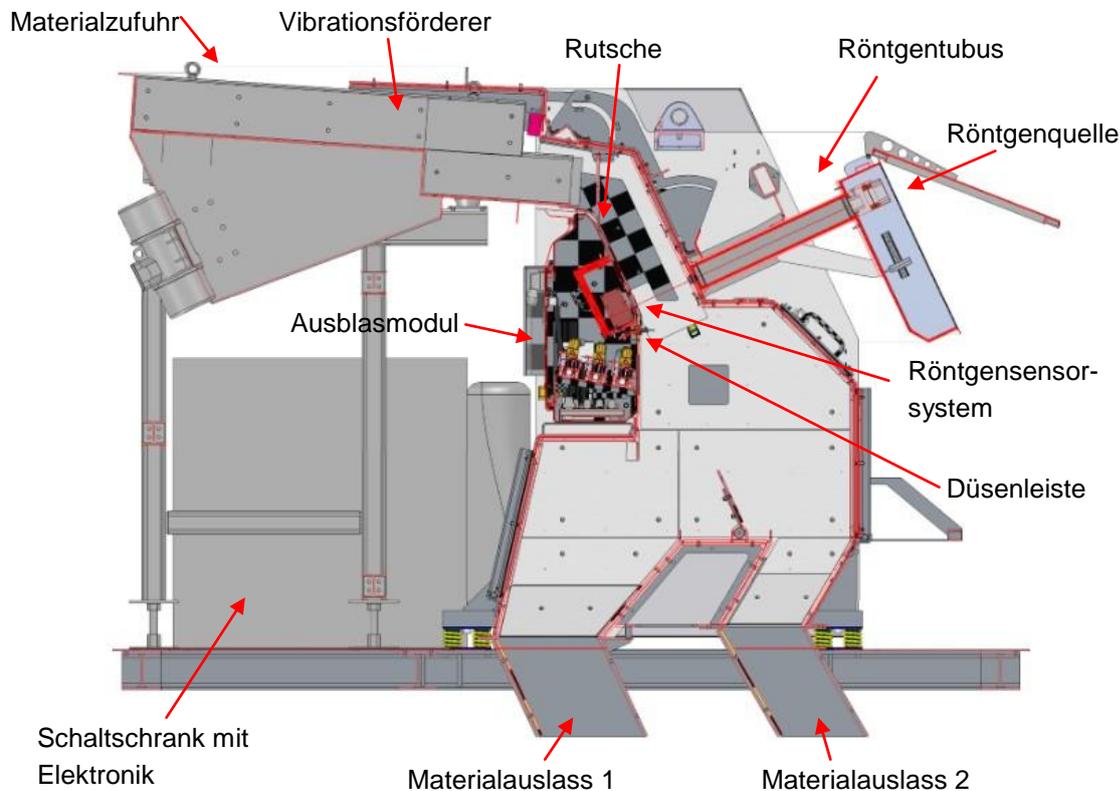


Abbildung 5: Schnittzeichnung des Sortiersystems

Abbildung 5 zeigt eine Schnittzeichnung des Sortiersystems, anhand derer sich der Materialfluss und die wichtigsten Komponenten erläutern lassen. Die Hauptkomponenten sind ein Vibrationsförderer zur Materialzufuhr und Vereinzelung, die als Rutschensystem ausgeführte Sortiereinheit und der Schaltschrank mit Steuereinheit und Sortierelektronik. Das Material wird im linken Teil des Vibrationsförderers von oben aufgegeben und der Rutsche zugeführt. Am Ende der Rutsche befindet sich das Röntgensensorsystem. Gegenüber von dem Sensor ist eine breitbandige Röntgenquelle so angeordnet, dass die Partikel, die den Sensor passieren, im Röntgentransmissionsverfahren detektiert werden können. Das Röntgensensorsystem besteht aus einem zweikanaligen Szintillator-basierendem Sensor, mit dem zwei spektrale Bänder detektiert werden können.

Die Sensordaten werden von der Sortierelektronik verarbeitet. Hier erfolgt Vorverarbeitung, Klassifikation und Nachverarbeitung der Daten mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Das Klassifikationsergebnis wird zur zielgenauen Ausschleusung der Partikel verwendet. Hierzu werden die Ansteuersignale an ein Ausblasmodul übertragen, in dem die Ventilansteuerelektronik Druckluftventile kontrolliert. Über eine unterhalb des Röntgensensors angeordnete Düsenleiste können die Partikel mit einem gezielten Druckluftimpuls ausgetragen werden. Die ausgeschleusten Partikel verlassen das Sortiersystem durch Materialauslass 2, die übrigen Partikel durch den Materialauslassschacht 1.

Basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurde ein neuer zweikanaliger Szintillator-basierender Röntgensensor definiert. Der in den Bandsystemen von Titech eingesetzte Sensor war für die Anwendung in einem Rutschensystem ungeeignet. Bei diesem Sensor sind die beiden Detektorzeilen mit einem Abstand von 16 mm hintereinander angeordnet. Bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Objekte, wie sie auf einem Rutschensystem auftreten, ist es nicht möglich diesen Versatz in der Signalverarbeitung zu korrigieren. Bei dem ausgewählten Sensor der Firma Sens-Tech sind die Detektorzeilen übereinander angeordnet und erfassen somit zeitgleich beide Energiebereiche. Ein weiterer Vorteil des Sensors liegt in der großen Anzahl verfügbarer Szintillator-Materialien. Der Sensor wurde über ein neuentwickeltes Interfaceboard in die Sortierelektronik integriert.

Bei Applikationstests zeigten sich zwei Nachteile, die durch die übereinanderliegende Anordnung der Detektoren bedingt sind. Da die Röntgenstrahlung der punktförmigen Röntgenquelle zu den Rändern hin mit einem Winkel von bis zu 30° auf die Detektorzeilen trifft, führt der Höhenunterschied zu einem Versatz von bis zu zwei Pixeln. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass die obere Detektorzeile zugleich auch als Filter für die untere Zeile wirkt und der Filter deshalb nicht mehr frei gewählt werden kann. Aus diesen Grund wurde ein neuer Sensor entwickelt, der die Vorteile der beiden oben beschriebenen Sensoren kombiniert. Die beiden Sensorzeilen (Auflösung 0,8 mm) wurden nach einer Modifikation der Detektorplatten unmittelbar nebeneinander angeordnet. So wurde der Versatz durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten minimiert und zugleich die Nachteile des Sens-Tech-Sensors vermieden.

Die verwendete Signalverarbeitung für das Sortiergerät wurde bereits in anderen Projekten entwickelt. Die notwendigen Änderungen zur Integration der neuen Sensoren und Erweiterungen der Leistungsfähigkeit wurden vorgenommen. In der eingesetzten Bildvorverarbeitung war nur eine einstufige Filteroperation möglich. Diese Filterstufe kann beispielsweise für morphologische Operationen verwendet werden, um die nach der Vordergrund/Hintergrundtrennung häufig nicht verwendbaren Randpixel der Objekte von der Verarbeitung auszuschließen. Eine zweite wichtige Anwendung liegt darin, den Filter als Relationsfilter zu verwenden. Dabei werden Relationen verschiedener Vordergrundklassen zueinander betrachtet. Da beide Anwendungen des Filters für die Erzsartierung bei hohen Durchsätzen wichtig sind, muss ein zweistufiger Filter implementiert werden. Eine erste Implementierung eines zweistufigen Filters ist abgeschlossen und getestet. Die zweite Filterstufe kann dabei als Kontrastfilter eingesetzt werden, wie sie z.B. bei der Erkennung von Wolframerz notwendig ist.

Bei der Konstruktion des Systems wurde den Anforderungen entsprechend ein robustes und modulares Design erarbeitet (Abbildung 6). Um einen möglichst weiten Bereich von Anwendung abdecken zu können, sollte das System bis 200 keV bei 1000 W Röntgenleistung betrieben werden können. In Zusammenarbeit mit dem TÜV Nord wurde ein Abschirmungskonzept erstellt und umgesetzt. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die Materialzufuhröffnung und die Auslassschächte gelegt werden. Die Stufe im Vibrationsförderer und das abgewinkelte Design der Auslassschächte dienen dabei der Abschirmung der Röntgenstrahlung.

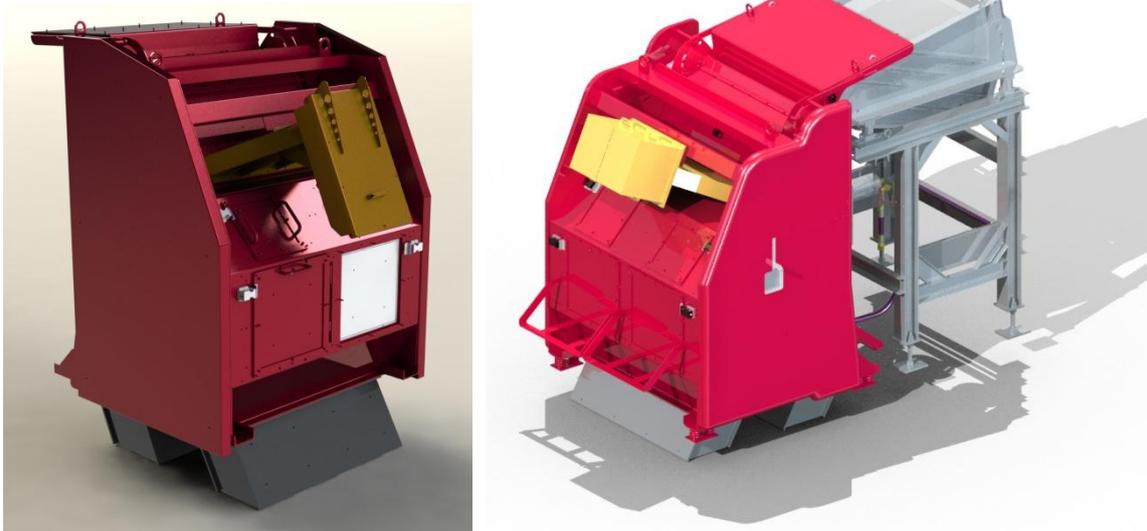


Abbildung 6: Volumenmodell der Sortiereinheit und des vollständigen Systems

Durch den hohen geforderten Durchsatz und die damit verbundene hohe Fördergeschwindigkeit sind auch die Anforderungen an das Ausblasmodul gewachsen. Es wurden schnell schaltende Ventile (5 ms) ausgewählt, um auch bei hoher Belegung eine saubere Trennung vornehmen zu können. Die Ventile sind robust, um den Umweltbedingungen im Bergbau gerecht zu werden und gewährleisten einen hohen Durchfluss von bis zu 1500 l/min, um auch große Objekte noch sicher ausschleusen zu können. Zusätzlich wurde eine beschleunigte Ventilansteuerung konzeptioniert und implementiert, um die Ventile zusätzlich zu beschleunigen. Abbildung 7 zeigt die Düsenleiste des Moduls mit 6 mm Düsendurchmesser.



Abbildung 7: Röntgensensorabdeckung, Düsenleiste und Auslassschächte

3.4.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde ein Sortiergerät mit einer Sensorbreite von 1200 mm entwickelt, das modular aufgebaut ist und den Anforderungen im Bergbau entspricht (Abbildung 8). Durch die kompakte Bauweise des Systems können durch Anordnung von mehreren Systemen beliebige Breiten im 1200-mm-Raster erreicht werden. Das System steht nun für Applikationstests und die Felderprobung zur Verfügung. Die umfassende Abschirmung des Systems gegen das Austreten von Röntgenstrahlung und die entsprechende Sicherheitstechnik gewährleisten einen Strahlenschutz der Hochschutzklasse. Es wurde ein neuer zweikanaliger Röntgensensor entwickelt, der für die Anwendung in einem Rutschensystem optimiert ist.

Die technische Zielsetzung wurde vollständig erreicht. Die Entwicklung des Systems hat sich gegenüber dem Projektantrag um 12 Monate verzögert. Die Gründe lagen zunächst in einem frühzeitig notwendig gewordenen Wechsel des universitären Kooperationspartners und Verzögerungen bei der Entwicklung einer geeigneten Sensorik. Durch eine Umstrukturierung in der Titech Gruppe zum Sommer 2009, die durch die Wirtschaftskrise und den damit verbundenen Umsatzeinbruch notwendig wurde, kam es bei der Fertigung des System zu weiteren Verzögerungen. Auch die Suche nach geeigneten Pilotanwendern wurde durch die Wirtschaftskrise stark erschwert.



Abbildung 8: Sortierer im Technikum Wedel mit Vibrationsrinne

Ein energiedispersiver Sensor mit den benötigten Leistungsmerkmalen war zur Projektlaufzeit nicht verfügbar. Das Risiko bei der Entwicklung des Sensors ist im Projektantrag schon aufgeführt und wurde durch die alternative Einplanung des zweikanaligen Sensors begrenzt. Durch die Spezialisierung des Sensors auf ausgewählte Anwendungsfälle konnte die Leistungsfähigkeit des zweikanaligen Verfahrens deutlich erhöht werden.

3.5 Applikationstests

Die Kalibration des Sortieralgorithmus muss für jede Applikation neu eingerichtet werden, um die Leistung der Sortiermaschine an die gegebenen Verhältnisse anzupassen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die durchgeführten Kalibrationen für verschiedene Anwendungen.

3.5.1 Steinkohle aus den Witbank Kohleabbaugebiet, Südafrika

Das Ziel der Kalibration war die Identifizierung der enthaltenen Bestandteile von Rohkohle aus den Abbaugeländen rund um Witbank, Südafrika. Als Vorbereitung für die Kalibration wurden einzelnen Handstücken händisch vorsortiert und auf der Sortiermaschine eingemessen. Die dabei zusammengestellten Fraktionen repräsentieren reine Steinkohle, schieferige Steinkohle, Schiefer, Sandstein und Kohle mit Ton- und Pyriteinschlüssen. Die folgende Abbildung zeigt das Röntgenbild und die verarbeiteten/klassifizierten Bilddaten des Trainingsatzes für die Steinkohleanwendung. In der linken Spalte befindet sich reine Steinkohle. Die folgenden Spalten sind Schiefer, Sandstein und Kohle mit Ton- und Pyriteinschlüssen.

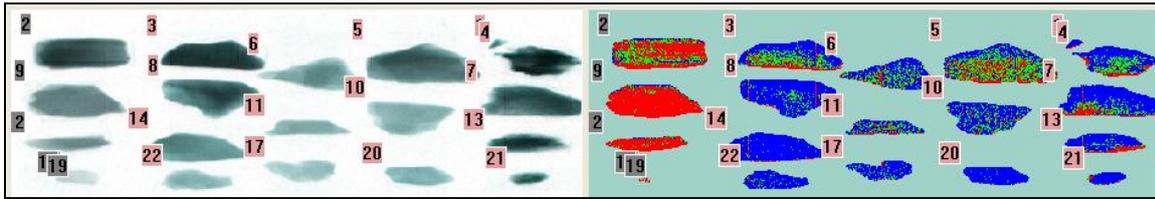


Abbildung 9: Kalibrationssatz Steinkohle (linke Spalte Produkt, Rest Berge)

Die anschließenden Versuchsläufe, die mit Probemengen im Bereich von 50 kg durchgeführt wurden, zeigen, dass bei geringen Durchsätzen unterschiedliche Kohlequalitäten erzeugt werden, sowie bei hohen Durchsätzen eine Abtrennung von Sandstein erfolgreich durchgeführt werden konnten. Mit dem Ziel der Optimierung der verwendeten Beschleunigungsspannung der Röntgenröhre wurden Kohlebriketts mit unterschiedlicher Dicke auf der Sortiermaschine eingemessen und die optimale maximale Partikeldicke auf einen Wert von 110mm festgelegt. Sie erlaubt bei einer Klassierung mittels Stangensieben einen hohen Durchsatz bei gleichzeitig geringem Energieeinsatz und geringen Investitionskosten.

3.5.2 *Massives, sulfidisches Golderz*

Die Applikationstests mit südafrikanischem massiven, sulfidischen Golderz des Bergwerkes TGME in Pilgrims Rest wurden im Jahr 2009 auf einem Röntgensortierer mit 60 kg Roherz und 100 kg Abgängen aus dem Schwertrübezyklon (Leicht-, Bergefraction) durchgeführt. Die Versuchsarbeiten sollten die Leistungsfähigkeit des Röntgensortierers im Vergleich zu konventionell eingesetzten nassen Verfahren beleuchten und als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dienen.

Die Kalibration der Sortiermaschine erfolgte anhand eines handsortierten Trainings-Sets, welches mittels Röntgentransmission aufgenommen und dann mit der Bedienungssoftware analysiert wurde. Die Festlegung des Trennkriteriums erfolgt auf dem Prinzip der Objekterkennung, um eine detaillierte Auswertung jedes einzelnen Partikels zu gewährleisten. Als Aufgabe diente die Fraktion 9,5–30 mm. Das Unterkorn zeigt bereits eine Anreicherung des Goldgehaltes und kann daher direkt als Konzentrat betrachtet werden.

Die Ergebnisse für die Roherzfraktion zeigen eine Anreicherung des Goldgehaltes von 0,49 auf 1,16 g/t in 32 % der Masse bei einem Ausbringen von 76 %. Wird das Konzentrat des Röntgensortierers mit dem Unterkorn zusammengeführt, beträgt die Steigerung des Goldgehaltes 1,04 g/t. Aus einer Gesamtaufgabe von 2,15 g/t kann ein Konzentrat mit 3,19 g/t bei einem gesamten Wertstoffausbringen von 97 % erreicht werden. Das Massenausbringen beträgt in diesem Fall 65 %.

Auf der Basis der Versuchsergebnisse konnte eine Empfehlung für den Einsatz eines Röntgensortierers auf dem Bergwerk TGME in Pilgrims Rest, Südafrika ausgesprochen werden.

3.5.3 *Steinkohle aus dem Bonito Flöz, Santa Caterina, Brasilien*

Die Kohle des Flözes Bonito aus der Provinz Santa Catarina in Brasilien ist alluvial entstanden und hat einen hohen Anteil von fein verwachsenem Ton, der die Erstellung eines reinen Kohleprodukts ausschließt. Die Probe wurde mit dem Ziel untersucht, ein Produkt mit einem Ascheanteil von kleiner 43 % aus einem Aufgabeeaschegehalt von 62 % zu erstellen. Eine Aufbereitung mit nassen Verfahren wird dadurch erschwert, dass die Kohle eine Porosität aufweist, die die spezifische Dichte von einzelnen Partikeln im Fluid verfälscht. Aus diesem Grunde erscheint die Aufbereitung mittels trockenen Sortierverfahren sinnvoll, auch wenn der hohe Verwachsungsgrad eine Sortierung im groben Korngrößenbereich, der für Röntgensortierung technisch und wirtschaftlich möglich ist, erschwert. Bei dieser Anwendung er-

folgte die Kalibration anhand von Einzelkörnern, die mittels Schwimm-Sink-Analyse in die Dichteklassen $<1,8 \text{ g/cm}^3$, $1,8\text{--}2 \text{ g/cm}^3$ und $<2 \text{ g/cm}^3$ eingeteilt, mit dem Röntgensortierer gescannt und mittels der Software der Sortiermaschine analysiert wurden. Die Korngröße der Fraktion war 16–50 mm. Die Probemenge betrug 150 kg. Die Analyse der Sortierergebnisse hat ergeben, dass in zwei Sortierschritten ein Produkt mit einem Aschegehalt von 48 % bei einem Massenausbringen von 20 % erreicht werden kann. Der Aschegehalt der Bergfraktion betrug 67 %. Es lässt sich zusammenfassen, dass die erforderlichen Produktqualitäten zurzeit nicht mit Röntgensortierung erreicht werden können. Der hohe Verwachsungsgrad und die damit verbundenen, sehr geringen Dichteunterschiede lassen eine erfolgreiche Detektion und damit Sortierung nicht zu. Allerdings zeigen auch andere Aufbereitungsverfahren keinen Erfolg für diese bestimmte Kohle. Es besteht die Chance, dass Röntgensortierung für eine Bergevorabscheidung im Grobkornbereich sinnvoll ist.

3.5.4 Eisenerz aus den Lagerstätten Bou Khrada und Ouenza, Algerien

Die Lagerstätten Ouenza und Bhou Khrada sind im Atlasgebirge im Nordwesten von Algerien, etwa 190 km südlich der Hafenstadt Annaba gelegen. Das Nebengestein der Lagerstätte ist Kalkstein. Die eisenhaltigen Minerale sind Eisenkarbonate, die zum Teil zu Hämatit oxidiert sind. Der Inhalt der Lagerstätte ist 120 bis 150 Millionen Tonnen mit Eisengehalten von 53-60 %. Während des bergmännischen Abbaus gelangt Nebengestein mit Eisengehalten unter 10 % in die Roherzförderung. Aus akutem Wassermangel besteht der Bedarf an effizienten, trockenen Aufbereitungstechniken, die das nicht ökonomische Nebengestein aus der Roherzförderung abtrennen. Trockene Dichtesortierung ist nicht geeignet. Auch optische Sortierung kann aufgrund einer fehlenden Korrelation des Eisengehalts mit Farbmerkmalen nicht verwendet werden. Mit Röntgensortierung kann abbaunah ohne aufwendige Oberflächenkonditionierung (wie z.B. durch Waschen) Nebengestein abgetrennt werden. Zudem hat das Röntgentransmissionsverfahren eine höhere Repräsentativität der Messdaten zu dem Inhalt als oberflächlich messende Sortiersysteme. Für die Kalibration des Sortiersystemes wurden Handstücke unterschiedlicher Farbe, Dicke und Eisengehalt zu einem Kalibrationsatz zusammengestellt. Hierbei diente das tragbare Röntgenfluoreszenzspektrometer der Bestimmung des Eisengehalts. Der Trainingssatz wurde auf dem Röntgensortierer eingemessen und die gewonnenen Bilddaten mittels Steuerung des Sortierers ausgewertet. Die Auswertung zeigt, dass karbonatisches Nebengestein effektiv und eindeutig von dem Eisenerz unterschieden und damit sortiert werden kann. Durch abbaunah Sortierung können Transportkosten und Emissionen vermieden werden. Zudem kann Röntgensortierung den Einsatz von Wasser vermeiden.

Da Prozesswasser in der Region nicht ausreichend zur Verfügung steht, besteht sehr hohes Kundeninteresse an trockener Sortierung und insbesondere Röntgensortierung.

3.5.5 Talk der Lagerstätte Lusenac, Frankreich

Aus der Lagerstätte Lusenac in Frankreich wird Talk im Tagebau gewonnen. Die Zonen der Lagerstätte, die reinen Talk beinhalten sind erschöpft. Im Zuge des Abbaufortschritts werden zunehmend gestörte und verwachsene Lagerstättenteile angefahren. Diese zeichnen sich durch höhere Kalzit- und Eisenanteile aus, welche durch konventionelle Verfahren nicht abgetrennt werden können und damit Probleme in der Verarbeitung hervorrufen. Auch neue sensorgestützte Sortierung auf Basis von spektroskopische Messmethoden, wie Nahinfrarotspektroskopie, lieferte keine ausreichenden Ergebnisse. Während des Applikationstests sollte untersucht werden, ob diese Bestandteile mit dem Röntgentransmissionsverfahren abgetrennt werden können. Auch für diese Anwendung wurden Partikel im Korngrößenbereich 20-60 mm, mit unterschiedlicher Dicke und Erscheinungsbild händisch vorsortiert und mittels tragbaren Röntgenfluoreszenzspektrometers vermessen. Auf Basis der Analysen konnte ein

Trainingsatz ausgewählt, mit dem Röntgensortierer vermessen und ausgewertet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Kalzit und Eisen effektiv erkannt und abgeschieden werden können, wenn der Kalziumanteil mehr als 4 % oder der Eisenanteil mehr als 4 % beträgt. Aus der zur Verfügung stehenden Probe konnten 16 % der Masse aussortiert werden. Durch den Einsatz von Röntgensortierung verlängert sich die Lebenszeit des Bergwerks, da gestörte und verwachsene Lagerstättenteile angereichert und damit wirtschaftlich abgebaut werden können. Zudem können Abraumhalden aufkonzentriert und dem Produktstrom zugeführt werden. Da kein Wasser und wenig Energie für die Sortierung aufgewendet werden muss kann die Lagerstätte nachhaltig ausgebeutet werden.

3.5.6 Karbonatisches Phosphatgestein

Die Sortieraufgabe besteht darin Flintstein aus karbonatischem Phosphatgestein abzutrennen. Der Flintstein verursacht einen besonders hohen Energieverbrauch und hohen Verschleiß bei der Mahlung; bis zu 50 % der gesamten Zerkleinerungskosten werden durch die Anteile von Flintstein in der Aufgabe verursacht. Der Flintstein liegt weitestgehend abgeschlossen vor. Jedoch kann er mit optischen Sortiermethoden nicht erkannt werden, da er zu großen Teilen in einer dünnen Schicht von Erz umschlossen ist. Dichtesortierung kann für die Lösung dieser Sortieraufgabe nicht verwendet werden, da der Unterschied in spezifischer Dichte zu gering ist. Zurzeit besteht kein effektives Aufbereitungsverfahren, mit dem Flintstein aus karbonatischem Gestein abgetrennt werden könnte. Die Probe wurde in zwei Kornbänder klassiert und jeweils in einer Vorreinigungsstufe und einer Nachreinigungsstufe auf dem Röntgensortierer sortiert. Die Partikelgrößen der beiden Fraktionen waren 20-40 mm und 40-60 mm. In der Fraktion konnte durch die Kombination der beiden Sortierstufen eine Produktreinheit von 99,5 % bei einem Wertstoffausbringen von 99 % und einem Massenausbringen von 88 % erreicht werden. In der Fraktion 40-60 mm lag die Produktreinheit ebenfalls bei 99,5 %. Das Wertstoffausbringen war 97 % und das Massenausbringen 87 %.

Durch den Einsatz von Röntgensortiertechnik besteht für diese Anwendung das Potential, dass bis zu 50 % der Zerkleinerungskosten durch ein trockenes Sortierverfahren eingespart werden können. Diese sind direkt verknüpft mit dem Energieverbrauch für den Mahlprozess selber, den Energieverbrauch für die Herstellung von Mahlwerkzeugen und den damit verbundenen Emissionen.

3.6 Testphase in Pilotanwendungen

3.6.1 Pilotanwendung 1 - Steinkohle

Eine Pilotanwendung wurde auf der Rohkohlehalde des Kraftwerks Arnot des südafrikanischen Stromproduzenten ESKOM durchgeführt. Die Anlage wurde in Zusammenarbeit mit ISAMBANE PROCESSING (Pty) Ltd geplant, errichtet und betrieben. Als Aufgabe diente Rohkohle aus den Witbank Kohlefeldern (Flöz Witbank Nr.2), die von kleineren Satellitenbergwerken der Umgebung mittels LKW zum Kraftwerk transportiert und dort auf der Rohkohlehalde gebrochen und dem Rohkohleband zum Kraftwerk zugeführt wird. Für den Pilotbetrieb der XRT-Rutschensortiermaschine wurde die Kohle nach dem Brechen durch einen mobilen, Diesel-betriebenen Backenbrecher mittels eines Diesel-betriebenen Linearschwingesiebs auf die zu sortierenden Zielkorngrößen zerkleinert, klassiert, zwischengelagert und dann mit einem Radlader auf die Pilotanlage aufgegeben. Die beiden Siebfraktionen, die für die Sortierversuche verwendet wurden, sind 12–50 mm und 50–100 mm. Die folgende Abbildung 10 zeigt die Aufstellung der Pilotanlage. Der rote Röntgensortierer befindet sich in einem 6m Standard-Schiffscontainer. Der gesamte Aufbau ist innerhalb von weniger als zwei Tagen abbau-, transportier- und aufbaubar, was die Sortierung von kleineren Halden und abbaunahen Stoffströmen zulässt.



Abbildung 10: Pilotanlage mit Röntgensortierer (rot), ARNOT Mine & Power Station, RSA

Die Anlage besteht aus einem Aufgabebunker, aus dem mittels einer frequenzgesteuerten Vibrorinne Rohkohle mit definiertem Durchsatz auf die Sortiermaschine aufgegeben werden kann. Im laufenden Testbetrieb wurden die Aufgabemenge und die Einstellungen des Sortierers variiert und die Massenströme der Produkt- und Bergefraktion kontinuierlich beprobt.

Die Ergebnisse der Testversuche zeigen, dass mit dem Röntgensortierer effizient beim Abbau mit gewonnene Bergeanteile, wie z.B. Sandstein, die von außerhalb der Kohleflöze stammen und beim Abbau mit Großgeräten zwangsläufig in den Rohkohlestrom gelangen, abgetrennt werden können. Für Sortieraufgaben, die die Trennung der Kohle nach verschiedenen Qualitätsklassen als Ziel haben, zeigte sich der Sortierer als weniger gut geeignet, insbesondere, weil hierzu der Durchsatz signifikant verringert werden musste und damit die spezifischen Kosten pro Tonne Produkt steigen. Zudem erscheinen die traditionellen Verfahren wie Trennung mittels Schwertrübezyklon leistungsfähiger bei geringen Dichteunterschieden zwischen Produkt und Bergefraktionen.

Für die grobe Fraktion im Korngrößenbereich 50–100 mm zeigen die abgeschiedenen Bergefraktionen einen Aschegehalt zwischen 65 % und 80 % mit den entsprechenden Brennwerten zwischen 10 MJ/kg und 3 MJ/kg (Abbildung 11). Das Massenausbringen in die Produktfraktion beträgt durchschnittlich 65 %. Die Ergebnisse zeigen einen konstanten Verlauf bis zu einem Durchsatz von 170 t/h. Aus konstruktionstechnischen Gründen bezüglich der Material zuführenden und abführenden Infrastruktur konnten keine Versuche mit höherem Durchsatz gefahren werden. Jedoch kann anhand der Bildauswertung ein möglicher Durchsatz von 250 t/h bei gleichbleibender Leistung als möglich erachtet werden. Eine Steigerung des Durchsatzes wird dringend empfohlen, um die spezifischen Kosten zu senken und um die Grenzen der Betriebsparameter der Sortiermaschine zu analysieren.

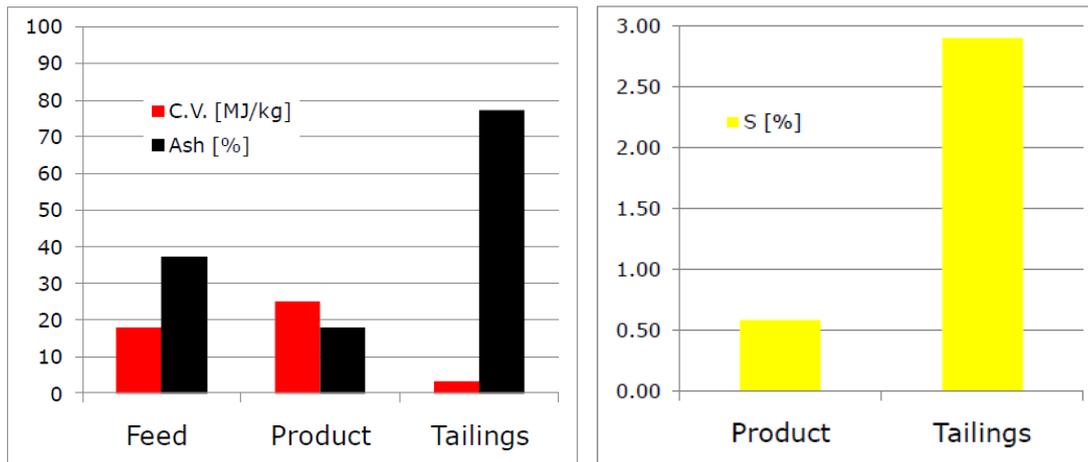


Abbildung 11: Ergebnisse für Steinkohle in der Fraktion 50-100 mm bei 120 t/h Durchsatz

Durch den Effekt der selektiven Zerkleinerung finden sich in der feinen Fraktion 12–50 mm mehr Ascheanteile in Form von fein disseminiertem Ton. Dieses kann durch den generell geringeren Abrasivitätsindex verifiziert werden. Aus diesem Grund ist die Leistung des Sortierprozesses geringer als bei der groben Fraktion. Die Produktfraktion hat einen durchschnittlichen Brennwert von 26 MJ/kg. Der Ascheanteil der selbigen variiert zwischen 25 % und 50 %. Die Sortiererleistung hat ein Maximum bei einem Durchsatz von 60 t/h, stabilisiert sich dann auf einem niedrigeren Level und bleibt konstant bis zu dem maximal getesteten Durchsatz von 170 t/h (Abbildung 12). Für zukünftige Installationen muss jeweils für den entsprechenden Anwendungsfall (erforderliche Produktqualitäten, Beschaffenheit der Rohkohle, Erlös für das Produkt, Verfügbarkeit von Wasser, Energiekosten und Kosten für alternative Techniken) errechnet werden, welcher Durchsatz der ökonomisch sinnvollste ist.

Die Sortierergebnisse hängen dabei auch von der Rohkohlequalität und dem Massenanteil der abgeschiedenen Bergefraktion ab. Dies kann zum Teil auf den hohen Anteil an Unterkorn in der Aufgabe bei den Testversuchen zurückgeführt werden, der durch den Umschlagbetrieb, sprich die vielen Prozessschritte zwischen Klassierung und Sortierung, hervorgerufen wird. Ein Teil des Feinkorns wird durch Turbulenzen beim Austragsvorgang von Bergen mit in die Bergefraktion abgeleitet. Dies wird sich im Produktionsbetrieb durch ortsnahe Klassierung vor der Sortierung vermeiden lassen und damit das Sortierergebnis weiter verbessern. Die Abscheidung von Schwefelbestandteilen folgt keinem Trend, da sowohl organisch gebundener Schwefel als auch schwefelhaltige Disulfidverbindungen (wie z.B. Pyrit) heterogen in der Rohkohle enthalten sind. Es kann jedoch zusammengefasst werden, dass massiver Pyrit sehr effektiv erkannt und ausgeschleust werden kann und damit weniger Schwefel in den Verbrennungsprozess und damit die Abgase gelangen. Der Abrasivitätsindex wird generell vermindert, wodurch Kosten für nachfolgende Mahlprozesse gesenkt und der Verschleiß von Mahlwerkzeugen verringert werden.

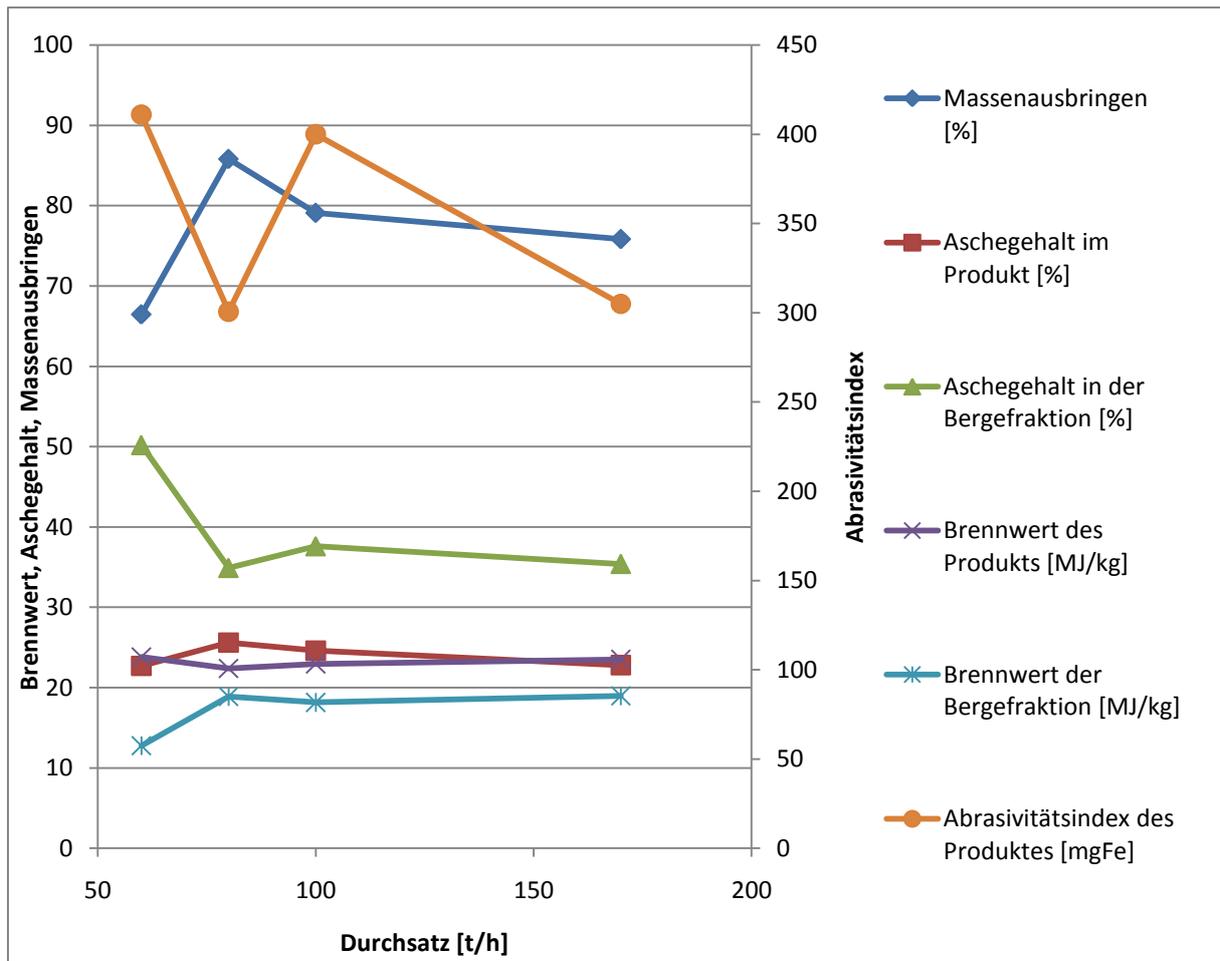


Abbildung 12: Ergebnisse der Pilotanlage für Steinkohle in der Fraktion 12-50 mm

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Sandstein effektiv aus Rohkohle abgetrennt werden kann. Der platzsparende, modulare Aufbau von vollständigen Sortieranlagen mit nur vier Aggregaten (Vorbrecher, Siebmaschine, Sortierer, Kompressoreinheit) ermöglicht den semi-mobilen Einsatz von Sortierung früh in der Prozesskette. Dies wäre idealerweise nahe dem Abbau und damit vor den Transportprozessen wodurch sich zusätzlich Einsparungen und Ressourcenschonung ergeben.

3.6.2 Pilotanwendung 2 - Massives, sulfidisches Golderz

Die zweite Pilotanwendung wurde auf dem Bergwerk TGME in Pilgrims Rest, Südafrika durchgeführt, welches der Bergwerksgesellschaft SIMMER&JACK gehört. Für die Studie zur Leistungsfähigkeit der Röntgensortierung für die Aufbereitung von massiven, sulfidischen Golderz und die Optimierung der Sortiermaschine wurde von SIMMER&JACK der Zugang zu dem Sortierer sowie Kapazität im Labor des Standorts gewährt. Der Röntgensortierer wurde für die Aufbereitung von Bergehalden installiert, die aus den Abgängen des Schwertrübezyklon bestehen. Auf Abbildung 13 ist die Aufstellung des Sortierers abgebildet.



Abbildung 13: Aufstellung des Röntgensortierers bei TGME, Pilgrims Rest, RSA

Der Massenstrom wurde mittels Radlader auf die Anlage aufgegeben und bei 8 mm klassiert. Die Fraktion 8–30 mm wurde auf den Röntgensortierer auf- und das Konzentrat dem Aufgabeband der Kugelmühle zugegeben. Während der Versuchsphase wurden Berge mit sehr geringen Aufgabehalten auf die Sortiermaschine aufgegeben, die weit unter den Spezifikationen und den in den Testversuchen ermittelten Gehalten lagen. Operative Schwierigkeiten führten dazu, dass über lange Zeit taubes Gestein auf den Sortierer gefahren wurde und damit das Erreichen der Produkthanforderung von mindestens 1,5 g/t Gold nicht erreicht werden konnte. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Konzentrat mit 0.6 g/t Gold aus einer Aufgabe von 0,2 g/t Gold erstellt wurde. Das Massenausbringen in das Konzentrat betrug durchschnittlich 20 %. Das Goldausbringen betrug gemittelt 26 %. Es bleibt festzuhalten, dass die Leistung des Sortierers den Umgebungsbedingungen entspricht und immer noch von einer effektiven Trennung gesprochen werden kann, wenn der geringe Aufgabehalt und der Verwachsungsgrad in Betracht gezogen werden. Durchsatzversuche mit Roherz im direkten Vergleich zu dem installierten Schwertrübezyklon konnten in dem Zeitraum der Versuche nicht gefahren werden, so dass ein direkter Vergleich der Leistungsfähigkeit von trockener und nasser Sortierung nicht erfolgen konnte. Am Ende des Versuchszeitraumes wurde der Betrieb des Bergwerks eingestellt. Die operative Stabilität und die hohe Verfügbarkeit trotz hohem Anteil an schlammigem Feinkorn in der Aufgabe belegt die Tauglichkeit von Röntgensortierern in der rauen Umgebung von Aufbereitungsanlagen in der mineralischen Rohstoffwirtschaft. Es lässt sich zusammenfassen, dass eine Trennung von massiven, sulfidischen Golderz mittels Röntgensortierung bei entsprechendem Aufgabehalt und Aufschlussgrad technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist und mit traditionellen, nassen Aufbereitungsverfahren wie Schwertrübescheidung konkurrieren kann. Zudem lässt sich durch den Einsatz von trockener Aufbereitungstechnik die Bildung von sauren Abwässern verringern. Eine kompakte Bauweise von Röntgensortierern und angrenzender Infrastruktur ermöglicht den semi-mobilen Einsatz nahe des Abbaus zur Verringerung von Emissionen durch Transport sowie den damit verbundenen Kosten. Weiterhin lässt sich der Einfluss von bergbauartigen Tätigkeiten auf die Umwelt durch den Einsatz von trockener Aufbereitungstechnik ver-

ringern. Insbesondere beim Abbau von kleinen Satelliten-Lagerstätten bietet Röntgensortierung die entsprechenden Vorteile.

3.7 Bewertung der Ergebnisse der Pilotanwendung

3.7.1 Verringerung der Umwelteinflüsse

Mit den bei den Testarbeiten am Kraftwerk ARNOT gewonnenen Daten konnten folgende Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Verstromung von Kohle errechnet werden. Bei gleicher gelieferter Energiemenge an das Kraftwerk kann die transportierte Masse in der Siebfraction 50–100 mm um 28 % verringert werden. Damit können die durch den Transport verursachten Emissionen ebenfalls um 28 % verringert werden. Bei einer angenommenen Transportdistanz von 30km und Transportkosten von 30 ZAR/t*km können die Transportkosten von 700 ZAR/t auf 684 ZAR/t bei gleicher transportierter Energiemenge verringert werden. Durch trockene Sortierung kann trockene Kohle an das Kraftwerk geliefert werden. Hierdurch lässt sich die Energie von 110 kWh pro Tonne Aufgabe auf das Kraftwerk einsparen. Dies entspricht einer Verringerung der Emissionen von 77 g NO_x, 395 g SO_x, 17 g PM₁₀ und 42 g CO₂ pro Tonne Aufgabe auf das Kraftwerk, wenn eine Energieeffizienz von 40% zu Grunde gelegt wird [BLO06]. Könnte diese zusätzlich freiwerdende Energie auf dem Markt verkauft werden, würde sich ein zusätzlicher Gewinn von 0,055 ZAR pro Tonne Aufgabe auf das Kraftwerk in der Fraktion 50–100 mm ergeben.

Durch Verringerung des Massenstroms, der zerkleinert werden muss, lassen sich insgesamt 3,39 kWh/t pro Tonne Aufgabe in der Fraktion 50–100 mm einsparen. Dies entspricht einem Markterlös von 1,77 ZAR/t. Durch Verringerung der Zerkleinerungsenergie und dem verringerten Mahlkörperverschleiß lassen sich 4,22 kg CO₂ pro Tonne Aufgabe in der Fraktion 50–100 mm einsparen [Blo06, Dum08]. Zudem lässt sich der Massenstrom an Kraftwerksaschen um 24 %, im Bezug auf die Fraktion 50–100 mm verringern.

Zusätzlich zu den verringerten Emissionen kann durch trockene Aufbereitung mittels Röntgensortierung die Ressource Wasser geschützt und die Konkurrenzsituation mit anderen Verbrauchern entschärft werden. In Südafrika ist der größte Verbraucher von Wasser die Landwirtschaft mit einem totalen Anteil von 76 %. Bergbau hat einen Anteil von 5 % [Sta06]. Heute haben über 20 Millionen Südafrikaner keinen Zugang zu frischem Wasser. Durch den Water Services Act 108 aus dem Jahre 1997 soll den Bürger freier Zugang zu Wasser garantiert werden. Dies verschärft die Konkurrenz um die Ressource Wasser und erhöht den Druck auf die Bergbauindustrie, den Wasserverbrauch zu verringern.

3.7.2 Wirtschaftlichkeit

Durch den Einsatz von XRT-Sortierung besteht für das Kraftwerk ARNOT das Potential, 0,055 ZAR/t der Siebfraction 50–100 mm dadurch einzusparen, dass kein Wasser bei der Verbrennung verdunstet werden muss. 1,77 ZAR/t können durch die Verringerung der aufgegebenen Kohlemenge und des verringerten Sandsteingehaltes an Zerkleinerungskosten eingespart werden. Zusätzlich kommen bei der Zerkleinerung Einsparungen aufgrund von geringerer Abrasion hinzu. Diese belaufen sich auf 9,71 ZAR/t. Insgesamt können dadurch 11,54 ZAR/t Rohkohle in der Fraktion 50–100 mm eingespart werden. Weiterhin verringern sich die Transportkosten um 28 %, bezogen auf die sortierte Fraktion.

David Osborne [Osb10] schätzt die Investitionskosten für einen modernen Schwertrübezyklon mit 1.500 mm Durchmesser, zwei Entwässerungssieben und einem Entschlammungssieb auf etwa 18 Millionen US-Dollar. Für den Vergleich der Röntgensortierung und der Schwertrübscheidung wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass nur Kohle mit einer Korngröße von mehr als 10 mm auf den Zyklon aufgegeben wird. Dies entspricht

der Aufgabekorngröße auf einen Röntgensortierer, auch wenn die maximal zulässigen Korngrößen der beiden Aggregate unterschiedlich sind. Wie im Abschnitt zu den Pilotversuchsergebnissen zu der Aufstellung am Kraftwerk ARNOT beschrieben, kann bei konservativer Betrachtung davon ausgegangen werden, dass 150 t/h in der Fraktion 50-100 mm und 80 t/h in der Fraktion 12-50 mm sortiert werden können. Damit ergibt sich die gesamte Anzahl der benötigten Röntgensortierer, um einen Schwertrübezyklon zu ersetzen. Die Anzahl ist zehn Stück. Die Gesamtinstallationskosten für zehn Sortierer inklusive Infrastruktur wird auf 8 Millionen US\$ geschätzt ist damit um die Hälfte billiger als für eine äquivalente Anlage mit Schwertrübezyklon. Die operativen Kosten für Schwertrübescheidung und Röntgensortierung sind vergleichbar und liegen bei etwa 0,3-0,5 US\$ ohne Kapitalkosten, je nach Aufgabekorngröße.

Allerdings erweist sich die Schwertrübescheidung als trennschärfer, wodurch die Wirtschaftlichkeit zugunsten dieser Technik bei schwierigen Sortieraufgaben entschieden wird. Jedoch erscheint der Einsatz von Röntgensortierung für die Abtrennung von Sandstein und Schiefer als Vorreinigungsstufe aufbereitungs- und umwelttechnisch sowie wirtschaftlich sinnvoll.

Die gute Marktresonanz und der Absatz von bereits drei Maschinen sowie sehr zustimmende Reaktionen aus dem akademischen Bereich unterstreichen das Potential dieser Technik.

3.7.3 Konstruktive Verbesserungsansätze und Bewertung

Die während der Pilotversuche gewonnenen Erfahrungen belegen, dass Röntgensortierer bereits den Anforderungen entsprechen, die in der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen gefordert sind. Der Maschinenkörper ist kompakt und robust gebaut und kann containerisiert und damit flexibel eingesetzt werden. Bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und unterschiedlicher Zusammensetzung der Aufgabe (Feuchtigkeitsgehalt, Korngrößenverteilung) war ein stabiler Betrieb weiterhin möglich. Der Wartungsaufwand pro Tag war geringer als eine Stunde.

Bei der Pilotanwendung zur Sortierung von Rohkohle am Kraftwerk ARNOT in Südafrika konnten folgende Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt der Aufgabe von mehr als 10 % bildeten sich Ablagerungen von Feinkorn in der aufgebenden Vibrationsrinne und im Bereich des Detektors. Die Rinne wurde daraufhin mit Polyurethan ausgekleidet wodurch die Anhaftungen weitestgehend vermieden werden konnten. Eine weitere Option ist eine Beheizung des Rinnenkörpers. Vor dem Detektor wurde ein Balg installiert, der in festgelegten Intervallen aufgepumpt wird, so dass Anhaftungen abplatzen. Es bleibt festzuhalten, dass feuchte Kohle im Vergleich zu anderen Stoffströmen in der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen besonders adhäsiv ist und durch die ergriffenen Maßnahmen ein stabiler Betrieb für eine Vielzahl Anwendungsbereiche gewährleistet ist.

Eine weitere durchgeführte Änderung ist die Vergrößerung der Aufgabeöffnung des Maschinenkörpers. Da die Leistung der Pilotmaschine im Bezug auf den Massendurchsatz in der Planungsphase um 50 % unterschätzt wurde konnte diese im Korngrößenbereich 50-100 mm nicht bis an ihre Leistungsgrenze (Detektion, Ausschleusung) gefahren werden. Für alle weiteren Anwendungen ist eine Vibrationsförderrinne mit einem höheren Förderquerschnitt verwendet worden. Weiterhin flossen Erfahrungen zu dem Verhalten der Massenströme in den Austragsschächten in die Dimensionierung von weiteren Anlagen ein.

3.8 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Für die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Technologie wurden Anwendungen in den Bergbau Marktsegmenten Industriemineralien, Metallerze und Kohle entwickelt. In den Seg-

menten Metallerze und Industriemineralien liegen Kundenprojekte vor, die Schritt für Schritt entwickelt werden.

Das Segment Kohle wurde in den Schwerpunkt der Aktivitäten gerückt, da hier die weltweit größten Volumina abgebaut und aufbereitet werden. Gelänge es, diesen Markt für die sensorgestützte Sortierung zu erschließen, so wären Sortiergeräte in hohen Stückzahlen absetzbar, um die erforderlichen Volumina aufzubereiten.

Position	Land	Jährliches Volumen
1	PR China	2971Mt
2	USA	919Mt
3	India	526Mt
4	Australia	335Mt
5	Indonesia	263Mt
6	South Africa	247Mt
7	Russia	229Mt
8	Kazakhstan	96Mt
9	Poland	78Mt
10	Colombia	73Mt
	Andere	253Mt
	Gesamtvolumen	5990Mt

Tabelle 1: Jährliche Kohlefördervolumen nach Ländern

Ferner stellen sich weltweit die gleichen Anforderungen an eine trockene Aufbereitung der Kohle. Auf der anderen Seite ist das Verfahren der sensorgestützten Sortierung in der Kohleaufbereitung bisher nicht bekannt gewesen. Es gab also auch keine Nachfrage nach dieser Technologie. Um diesen Markt zu erschließen, musste zunächst mit einer Pilotanlage die Fachwelt überzeugt werden, dass die sensorgestützte Sortierung eine hervorragende Alternative zur Nassaufbereitung darstellt. Für diesen Schritt hat Titech/CommodasUltraSort den Partner Isambane Mining gewonnen. CommodasUltraSort ist ein Tochterunternehmen der Titech AS und übernimmt den Vertrieb aller bei der Titech entwickelten Systeme im Bereich des Bergbaus.

3.8.1 Kooperation mit Isambane Mining zum Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage

Der Partner Isambane Mining bringt die idealen Voraussetzungen mit, um eine neue, noch nicht verifizierte Technologie vorzustellen. Isambane betreibt bereits ein stabiles Geschäft der Lohnaufbereitung von Kraftwerkskohle in Südafrika. Die mobile Sieb- und Brechstationen sorgen dafür, dass die Kohle in definierter Korngröße zur Verfügung gestellt wird. Durch die Kooperation mit CommodasUltrasort kann Isambane nun zusätzlich die Reinigung der Kohle von Gestein, dessen Anteil bis zu 30 % beträgt, im selben Schritt mit anbieten. Hierdurch wird das Waschen der Kohle überflüssig. Die trocken aufbereitete Kohle mit höherem Brennwert und geringerem Aschegehalt kann direkt in das Kraftwerk gefahren werden. Die erforderliche Anlage ist kompakter und zudem semi-mobil.

Nachdem die Anlage in Betrieb genommen und optimiert war, wurden potentielle Kunden aus Südafrika und von Übersee auf die Installation geführt, um diese neue Methode der Reinigung von Kohle vorzustellen. Ferner wurde die Anlage von unabhängigen Instituten beprobt und die Ergebnisse bewertet. Diese Maßnahmen haben zu einem hohen Interesse

in der gesamten Fachwelt geführt, wodurch nunmehr eine Nachfrage für diese Technologie generiert wurde.

3.8.2 Vorstellung der Systemlösung auf Messen

Australian Coal Preparation Society Conference, Mackay Sept. 2010

Die offizielle Vorstellung der Systemlösung zur Trockenen Aufbereitung von Kohle mittels Sortierung auf Basis von Röntgentransmission war in Mackay (Queensland), Australien auf der ACPS Konferenz durch einen Fachvortrag von GBL Process sowie eine Messestand.

Dieser Kongress wird von Fachpublikum aus dem Kohlebergbau der südlichen Hemisphäre besucht. Zirka 140 Delegierte haben an diese Veranstaltung teilgenommen. Ein erstes Projekt ist als Ergebnis in Bearbeitung mit der Firma Vale, einem weltweit führenden Bergbauunternehmen.

Elektra Mining Show Johannesburg, Südafrika, Okt. 2010

Die Elektra Mining Show in Johannesburg ist die größte Bergbaumesse der südlichen Hemisphäre. Das Team von CommodasUltrasort hat auf dieser Messe die trocken Aufbereitung von Kohle zum Schwerpunktthema gemacht. Der für diese Anwendung speziell angepasste Maschinentyp wurde im Produktionsmaßstab auf dem Stand ausgestellt (Abbildung 14). Der Vertriebspartner Isambane Mining wurde eingeladen, die Messe zu begleiten und die Kunden zu beraten.



Abbildung 14: Messestand auf der Elektra Mining Show Johannesburg, Okt. 2010

3.8.3 Veröffentlichungen

Das System wurde auf der ACPS Konferenz in Mackay in einem Vortrag präsentiert:

Dr. Bernd Länger, *Dry Coal Preparation in Australia – Vision or Necessity*, ACPS Conference, Sept. 2010

Im November 2010 ist eine Pressemitteilung an alle relevanten Fachverlage herausgegangen:

Dual energy X-ray transmission technology ramps up efficiencies in dry coal beneficiation, Media release from CommodasUltrasort (Pty) Ltd, Nov. 2010

Einen weiteren Vortrag gab es auf der Fossil Fuel Foundation 15th Conference in Johannesburg:

Lütke von Ketelhodt, *XRT Dry Coal Sorting*, Fossil Fuel Foundation 15th Conference, Clean Coal to Clean Energy, Nov. 2010

3.8.4 Vertriebsmaßnahmen

Für die Region des südlichen Afrika wurde ein Agentur-Vertrag mit Isambane Mining geschlossen, um die Marktexpertise dieser Firma auch zur Vermarktung zu nutzen. So wurden bereits Vertriebsgespräche mit Anglo American, einem international tätigen Bergbauunternehmen, geführt. Anglo American betreibt Kohlebergbau in Südafrika und Australien.

Für den australischen Markt, der auf Platz vier der Weltrangliste der Kohlefördervolumen rangiert, wurde ein Agenturvertrag mit dem Partner GBL Process geschlossen. GBL Process ist gut vernetzt in der australischen Kohleindustrie und bekannt durch wissenschaftliche Studien in der Kohleaufbereitung. Ferner hat CommodasUltrasort beschlossen, eine Pilotanlage mit einem Industriepartner in Australien zu errichten, um ähnlich wie in Südafrika die Leistungsfähigkeit dieser Technik vor Ort im Feld zu demonstrieren.

Erste Vertriebsfolge

Aufgrund der guten Ergebnisse der Tests mit der Pilotanlage hat Isambane Mining im Juni das erste Sortiergerät bestellt und im Oktober ausgeliefert. Zwei weitere Geräte wurden von Isambane im September bestellt. Diese Geräte werden in der Lohnaufbereitung von Kraftwerkskohle zum Einsatz kommen. Das Gesamtbestellvolumen beträgt ca. 1,6 Mio. Euro.

Weiteres Vorgehen zur Markteinführung

CommodasUltrasort wird die neue Technologie zunächst in den Vertriebsregionen einführen, in denen man bereits mit einer eigenen Niederlassung etabliert ist. Dies sind Südafrika, Australien und Kanada/USA. In diesen Märkten werden wir mit Firmen zusammenarbeiten, die bereits über ein gutes Netzwerk in der entsprechenden Industrie verfügen.

In einer zweiten Vermarktungsstufe werden wir neue Regionen wie China, Latein Amerika sowie Russland bearbeiten. Hier werden wir sowohl eine Niederlassung gründen als auch zusätzlich mit Branchenspezialisten zusammenarbeiten.

4 Fazit

Das Entwicklungsprojekt zu Röntgensortierverfahren mit spektral auflösender Sensorik für die Aufbereitung von primären Rohstoffen ist sehr erfolgreich abgeschlossen worden. Im Zuge der Entwicklungen konnte eine leistungsfähige Röntgensortiermaschine auf Basis des Rutschenprinzips entwickelt und bei verschiedenen Aufgabenstellungen erfolgreich angewendet werden. Die Marktresonanz bestätigt, dass ein leistungsfähiges Sortiersystem entwickelt wurde, welches nicht nur wirtschaftlich sinnvoll ist, sondern auch eine ressourcenschonende Aufbereitungstechnik darstellt. Aufgrund der guten Ergebnisse aus den Tests bei der Pilotanwendung konnte direkt nach Abschluss des Projektes das erste System verkauft und ausgeliefert werden. Mittlerweile sind zwei weitere Sortierer bestellt.

Eingehende praktische Untersuchungen zu den konkurrierenden Aufgabesystemen Rutsche und Band zeigen, dass das Rutschenprinzip Vorteile gegenüber dem Bandsystem hat. Die gleichmäßige Beschleunigung durch die Erdanziehungskraft separiert die Partikel voneinander. Der kurze Abstand zwischen dem Übergang zwischen Vibrationsförderrinne und Rutsche und dem Detektionsbereich verhindert die Verstärkung von unregelmäßigen Bewegungsmustern. Weiterhin entfällt ein Übergang zwischen zwei Bewegungsformen (zwischen Rutsche und Band). Hierdurch verringert sich das Risiko, dass plötzlich Beschleunigungen auf Partikel einwirken. Insgesamt lassen sich Cluster in 50 % weniger Sektoren feststellen. Die Bauart der Rutschenmaschine ist zudem wartungsärmer, da sie eine geringere Anzahl bewegter Bauteile besitzt.

Die Röntgensortierung stellt eine leistungsfähige Aufbereitungstechnik dar, die bereits heute bei ausgewählten Sortieraufgaben technisch und wirtschaftlich mit bestehenden Techniken konkurrieren kann. Durch die im Vergleich zu nass arbeitenden Verfahren kompakten Bauweise, dem geringen Infrastrukturbedarf, dem geringeren Umwelteinfluss und dem geringen legislativen Zulassungsaufwand stellt Röntgensortierung ein flexibles Verfahren dar, welches insbesondere für die Abscheidung von Bergen nahe des Abbaus eingesetzt werden kann. Durch eine optimierte Positionierung im Prozess kann das volle Potential entfaltet werden. Auch wenn sie bei der Lösung von schwierigen Sortieraufgaben noch nicht mit nass arbeitenden Verfahren konkurrieren kann, stellt die Röntgensortierung eine bergtechnische, aufbereitungstechnische, umwelttechnische und wirtschaftlich sinnvolle Ergänzung für die mineralische Rohstoffwirtschaft dar.

Da mit der Röntgensortierung ein neues Trennkriterium zur Verfügung steht, können Anwendungen neu erschlossen werden, die zuvor nicht oder nicht wirtschaftlich aufzubereiten waren. Dies kann die Aufbereitung von alten Bergehalden betreffen, kann aber auch bedeuten, dass in nachfolgenden Prozessen störende Anteile abgeschieden werden können. Insbesondere bei der Laugung und Flotation stellen bestimmte Nebengesteine, wie z.B. Kalkstein einen Kostentreiber dar, der zudem für einen überproportional großen Verbrauch an Reagenzien verantwortlich ist. Durch die Abtrennung von Kalkstein vor einem Laugeprozess lassen sich bis zu 40 % der operativen Kosten und des Säureeinsatzes einsparen.

Durch den geringen Umwelteinfluss stellt sie weiterhin eine Lösung für die Aufbereitung in ariden Gebieten sowie Gegenden mit sensibler Umwelt dar. Insbesondere die semi-mobile Sortierung unter Tage kann den Einfluss von bergbaulichen Tätigkeiten auf die Tagesoberfläche verringern. Eine Weiterentwicklung der Sensortechnik und Verbesserungen am mechanischen Aufbau werden die Sortierleistung sowie den Durchsatz weiter steigern und weiteres Potential zur umweltfreundlichen und wirtschaftlich erfolgreichen Sortierung von mineralischen Rohstoffen erschließen. Es wird erwartet, dass im nächsten Jahr die energie-dispersiven Sensoren für die Industrieanwendung verfügbar werden und in den Sortierer

integriert werden können. Dadurch können weitere Anwendungen erschlossen werden, für die eine größere Trennschärfe notwendig ist.

Die schnellen Entwicklungsfortschritte im Bereich der Sensortechnologie, der Datenverarbeitung und auch im Bereich des mechanischen Aufbaus von sensorgestützten Sortierern werden dazu führen, dass Röntgensortierung auf immer mehr Sortieraufgaben anwendbar sein wird und damit in Konkurrenz mit bestehenden, nassen Verfahren tritt. Weiterhin besteht das Potential, die für die Sortierung gewonnenen Daten in die Prozesskontrollsysteme von nachfolgenden Aufbereitungsschritten zu integrieren. Hierdurch lassen sich große Mengen an Energie, Wasser und Prozesschemikalien durch optimierte Anpassung an Aufgabeschwankungen einsparen. Röntgensortierung hat großes Potential für die mineralische Rohstoffaufbereitung.

5 Literaturverzeichnis

- [Blo06] BLOTTNITZ, H. A. *Comparison of air emissions of thermal power plants in South Africa and 15 European countries*, *Journal of Energy in Southern Africa*. - Cape Town, South Africa, Vol. 17, 2006
- [Dum08] DUMÉ, Belle environmental research web [Online] // *Steel by-product could sequester carbon dioxide*. - *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 5 December 2008. - 6 July 2010. - <http://environmentalresearchweb.org/cws/article/news/36966>.
- [Os010] OSBORNE, Dave *Value of R&D in Coal Preparation Development* [Conference] // *Proceedings of the International Coal Preparation Congress 2010*. - Lexington, Kentucky, USA : Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2010.
- [Sta06] STATSA, *National Resource Accounts - Updated Water Accounts for South Africa* [Report]. - Pretoria, South Africa : Statistics South Africa, 2006.