

BMU-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

„Röntgentrennung für Aluminiumrecycling“

Aktenzeichen: NKa3-002020

Fördernehmer/-in:

WMR Recycling GmbH

Edisonstraße 5

41542 Dormagen

Umweltbereich:

Abfallwirtschaft, Recycling, Energie

Laufzeit des Vorhabens:

22.01.2013 bis 30.06.2014

Autoren:

Gregor Kurth und Boris Kurth

**Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit**

Datum der Erstellung:

12. November 2014

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen: NKa3-002020	Vorhaben-Nr.:
Titel des Vorhabens: „Röntgentrennung für Aluminiumrecycling“	
Autor(en); Name(n), Vorname(n) Kurth, Gregor Kurth, Boris	Vorhabensbeginn: 22.01.2013 Vorhabensende (Abschlussdatum): 30.06.2014
Fördernehmer/-in (Name, Anschrift) WMR Recycling GmbH Edisonstraße 5 41542 Dormagen	Veröffentlichungsdatum: Seitenzahl: 21
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesumweltministeriums	
Kurzfassung/Summary: Innerhalb des Projektes wurde auf Basis eines patentierten Verfahrens eine neuartige Trenntechnik zur Aufbereitung von Aluminium-Schrott errichtet. Das Verfahren umfasst die spezielle Vorbereitung des zerkleinerten Schrottes (Schredder) durch zusätzliche Sortier- und Trennvorrichtungen, so dass eine möglichst einheitliche Geometrie des Schredders erreicht wird. Im Anschluss wird das separierte Material mittels Röntgentransmission analysiert und pneumatisch sortiert. Mit dem entwickelten Verfahren ist es erstmals möglich, Aluminium-Schredder mit einer einheitlichen DIN- bzw. EN-Legierung zu erzeugen. Im Versuchsbetrieb wurde ein legierungsreiner Schredder aus Altschrotten hergestellt, welcher ohne Zusatz von primärem Aluminium bei der Herstellung von Aluminium Pressbolzen eingesetzt werden konnte. Als Resultat des Projektes wird die Verwendung von Sekundäraluminium (Aluminium Schrott) zur Herstellung von primären Produkten (z. B. Aluminium-Pressbolzen) ausgebaut und der Verbrauch von Primär-/Reinaluminium reduziert. Die Folge des Serienbetriebs des Verfahrens sind eine Erhöhung der Recyclingquote durch Rückgewinnung von Alt-Schrotten aus Aluminium sowie erhebliche Energieeinsparungen bei der anschließenden Herstellung von Produkten und damit verbunden eine ebenso große Reduzierung von CO₂-Emissionen.	
Schlagwörter: Aluminium-Schredder, Recycling, Trennung, Separation, Röntgentransmission, CO ₂ -Emissionen, Sekundäraluminium, Reinaluminium	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 5 Elektronischer Datenträger: 1	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet geplant auf der Homepage: www.kurth-aluminium.com

Kurzfassung

Im Projekt wurde eine neuartige Aufbereitungstechnik von Aluminium-Alt-Schrotten realisiert. Auf der Grundlage eines zum Patent angemeldeten Verfahrens erfolgt in der aufgebauten Anlage eine spezielle Vorbereitung des Schrottes durch zusätzliche Sortier- und Trennvorrichtungen. Das Schreddermaterial wird zunächst abgesiebt, getrennt und aussortiert und anschließend mittels Röntgentransmission analysiert und pneumatisch sortiert.

Mit der neuen Anlagen- und Verfahrenstechnik werden aus Alt-Schrotten Aluminiumfraktionen in einheitlicher DIN- bzw. EN-Legierung gewonnen. In Versuchsreihen bis zum Produktionsmaßstab wurde nachgewiesen, dass die auf der Versuchsanlage gewonnenen Legierungen für ein produktspezifisches Recycling geeignet sind.

Der Umweltvorteil der neuen Technologie besteht darin, den Einsatz von Reinaluminium für die Herstellung von Aluminiumerzeugnissen erheblich zu reduzieren. Da die Herstellung von Reinaluminium einen hohen Energieeinsatz erfordert, können durch eine verstärkte Verwendung von Alt-Schrotten zur Herstellung von primären Aluminiumerzeugnissen erhebliche Energieeinsparungen und eine Reduzierung von CO₂-Emissionen erreicht werden.

Innerhalb der Versuchsphase wurde ebenfalls die Aufbereitung der sonstigen Schredderabfälle durchgeführt, sodass ein metallfreies Gemisch verbleibt, welches als Ersatzbrennstoff energetisch in der Zementindustrie genutzt werden konnte.

Der Energiebedarf der Anlage beträgt ca. 520.000 kWh pro Jahr (bei Volllast in Abhängigkeit des zu sortierenden Materials). In der 10-monatigen Versuchsphase vom 01.10.2013 – 31.07.2014 wurden bei einer Produktionsmenge von 23.017 Tonnen 2.136.585,63 kWh verbraucht. Somit beträgt der Stromverbrauch je eingesetzter Tonne durchschnittlich 92,83 kWh. Unter Berücksichtigung der Projektkosten wurde eine Amortisation (Return on Investment) von max. 3 Jahren errechnet.

Die Aufbereitung der Schrotte erfolgt bei der WMR Recycling GmbH als Lohnarbeit für Kunden, d.h. die Aluminiumindustrie lässt Alt-Schrotte innerhalb eines Dienstleistungsvertrages bei WMR aufbereiten. Es konnte bereits Europas größter Aluminiumproduzent als Kooperationspartner zur Aufbereitung von Sekundärschrotten gewonnen werden. Eine Übertragung der Anlagentechnik auf höhere Produktionsmengen und weitere Standorte ist angestrebt.

Summary

With the project a novel processing technique for aluminium scrap metals has been implemented. The scrap is prepared for further processing by being sorted and separated in a purpose-built construction, based on a patent-pending procedure. All shredded material is sorted, sieved and separated, followed by X-ray transmission analysis and pneumatical sortation.

Standardised DIN- respectively EN-aluminium alloys are extracted from scrap metals, by adopting the given plant and process engineering. Concluding a series of trials up to production scale it has been positively proven, that the obtained alloys are suitable for product-specific recycling.

Reducing the usage of raw aluminium in aluminium-based product manufacturing is the main environmental advantage of this new technology. Since the fabrication of raw aluminium requires a high energy input, substantial savings in energy expenses and reduction of CO₂ emissions can be achieved.

Throughout the experimental phase miscellaneous shredded materials have been processed into free of metal composite, eligible as substitute fuel in the cement industry.

The energy required amounts up to circa 520.000 kWh per year (at full capacity in connection to sorted material). During a ten-month trial phase from 10/01/2013 to 07/31/2014, 2.136.585,63 kWh were exhausted for a production value of 23.017 tons. Therefore the average power consumption accounts for 92,83 kWh per ton. In consideration of the costs of the project an amortisation (ROI) within 3 years maximum has been calculated.

Processing of the scrap will be carried out as hire-work at WMR Recycling GmbH, meaning that the aluminium industry will have WMR process the material on the basis of a corresponding service contract. The largest aluminium producer europe-wide was gained as a cooperation partner for the processing of secondary scrap already. It is aspired to make a transition to higher production values and to establish other sites.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens.....	1
1.2. Ausgangssituation.....	1
2. Vorhabensumsetzung.....	3
2.1. Ziel des Vorhabens	3
2.2. Darstellung der technischen Lösung	4
2.3. Darstellung der Umsetzung des Vorhabens	8
2.4. Behördliche Anforderungen.....	9
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	9
3. Ergebnisse.....	10
3.1. Bewertung der Vorhabensdurchführung	10
3.2. Stoff- und Energiebilanz	11
3.3. Umweltbilanz.....	13
3.4. Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms	15
3.5. Wirtschaftlichkeitsanalyse	16
3.6. Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren	16
4. Empfehlungen	18
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	18
4.2. Modellcharakter.....	18
4.3. Zusammenfassung.....	18
5. Literatur	20
6. Abkürzungen	21

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens

Die WMR Recycling GmbH (WMR) ist ein mittelständisches Unternehmen mit aktuell 29 Mitarbeitern. WMR betreibt am Standort Dormagen einen Aluminium-Schredder zur Aufbereitung von Aluminiumblech- und Profilschrott (siehe Abbildung 1). In der Anlage werden angelieferte Aluminiumschrotte verarbeitet und dabei gleichzeitig Störstoffe wie Kunststoffe oder Eisenanhaftungen aus dem Schrott entfernt. Das Produkt, ein vorgereinigter Aluminium-Schredder, wird von anderen Unternehmen für die Erzeugung von Stahl als Desoxidationsmittel oder bei der Herstellung von Sekundäraluminium in Schmelzwerken verwendet.



Abbildung 1: Aluminium-Schredder am WMR-Standort Dormagen

1.2. Ausgangssituation

Ein Aluminium-Schredder war bei WMR bereits vor Beginn des Vorhabens vorhanden. Die genehmigte Anlage umfasst die Lagerung von Schrotten, die Vorzerkleinerung der Schrotte über eine Schrottschere, die Separierung und Trennung von Fremdanhaftungen mittels geeigneter Trenntechnik. Die Gesamtkapazität beträgt bei einer Durchsatzleistung von 3.000 t pro Monat ca. 36.000 t Aluminium-Einsatzmaterial (Input) pro Jahr. Mit der Anlage werden Aluminium-Alt-Schrotte verarbeitet, welche neben Aluminium noch Verunreinigungen in Form von anderen Nichteisenmetallen (NE-Metallen) wie Kupfer, Messing, Blei und Zink und Edelstahl enthalten. Darüber hinaus enthält das Material häufig auch noch Anhaftungen in Form

von Eisen und sonstigen Materialien wie Gummi, Kunststoff oder anderen organischen Stoffen.

Die NE-Metalle (Kupfer, Edelstahl, Messing, Blei und Zink) verblieben beim Stand der Technik vor Antragstellung im sonstigen Abfall des Shredder Prozesses und konnten nicht separiert werden (Der Mengenanteil der NE-Metalle lag bei ca. 1 bis 3 % vom Input, d. h. 20 bis 60 t/Monat). Um diese zu gewinnen, musste der sonstige Abfall vor Antragsstellung durch ein Fremdunternehmen mittels Schwimm-Sink Verfahren aufbereitet werden, was mit großem Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden war.

Der allgemeine Stand der Technik beim Recyceln von Aluminium umfasst die 100%tige Wiederverwertung von Alt-Aluminium zu sekundären Aluminiumlegierungen. Die recycelten Produkte konnten in Aluminiumlegierungen eingesetzt werden, die innerhalb ihrer Materialspezifikation höhere Toleranzen für analytische Verunreinigungen in der Legierung aufweisen. Ein produktspezifisches Recycling (d.h. aus einem alten Profil wieder ein neues Profil herzustellen) war nicht möglich. Einzige Ausnahme waren die sogenannten Werksentfallschrotte, welche direkt während der Produktion als Ausschuss wieder in den Schmelzprozess gelangten. Diese Schrotte entsprechen einer einheitlichen Analyse und konnten somit wiederverwertet werden. Für den Einsatz von aufbereiteten Altschrotten mussten große Mengen primäres Aluminium (Reinaluminium) im Schmelzprozess zugesetzt werden, um die gewünschte Aluminiumanalyse zu erzielen. Das Verhältnis der Zugabe liegt bei ca. 40-45% Reinaluminium (siehe Schreiben Alumat vom 29. Oktober 2012).

Aus Umweltgesichtspunkten wird ein hoher Verbrauch von Reinaluminium vor allem deshalb kritisiert, da zur dessen Herstellung ein sehr hoher Energieaufwand erforderlich ist, während bei der Herstellung von Sekundäraluminium aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes (660°C) nur ca. 5 % der Energie, die für die Herstellung von Primäraluminium notwendig ist, benötigt wird. Wird hingegen, wie im Fall WMR, der Aluminium Schrott mechanisch recycelt, so fallen hier sogar nur 1% der Energie im Vergleich zur primären Herstellung von Aluminium an.

2. Vorhabensumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Aufgabenstellung des vorliegenden Projektes war es, den Aluminium-Schredder so aufzubereiten, dass Legierungszusammensetzungen erkannt und separiert werden können. Hierdurch bestand das Ziel, einen Aluminium-Wertstoff zu gewinnen, mit dem anschließend Neuprodukte ohne (bzw. mit deutlich geringerer) Zugabe von Primäraluminium hergestellt werden können, d. h. eine Verarbeitung von bis zu 100 % Sekundäraluminium möglich ist. Dies hätte erhebliche Umweltvorteile zur Folge (siehe unten).

Innerhalb des Projektes sollte hierzu die bestehende Schredder-Anlage erheblich erweitert und ein vom Antragsteller neu entwickeltes und zum Patent angemeldetes Trennverfahren erstmals im Praxismaßstab etabliert werden.

Das neue Verfahren sah vor, zunächst mittels verschiedener vorgelagerter Aufbereitungsstufen (Zerkleinerung, Sieben) eine möglichst einheitliche Geometrie des Aluminium Schredders zu erzielen und anschließend eine Analyse mittels Röntgentransmission durchzuführen. Hierbei durchleuchten Röntgenstrahlen das Sortiergut. Aus der Analyse der Strahlungsabsorption kann aus der Datenauswertung die atomare Zusammensetzung des Materials bestimmt werden. Hierdurch wird es erstmals möglich sein, verschiedene Aluminiumlegierungen zu erkennen (z.B. Aluminium-Zink- und Aluminium-Kupferlegierungen) sowie unerwünschte Fremdmetalle wie Zink, Kupfer, Blei und Edelstahl sicher zu trennen. Durch das Abscheiden von schwermetalllegierten Aluminium-Fraktionen und freien Schwermetallen verbleibt die primäre Aluminium-Legierung und kann somit wieder produktspezifisch im Schmelzprozess eingesetzt werden.

Die analytische Reinheit des Aluminiums hat vor allem für die erneute Verarbeitung in der Aluminiumindustrie eine hohe Bedeutung, sodass als Ergebnis des Projektes vor allem folgende Umweltvorteile angestrebt waren:

- Energieeinsparung, da aufgrund der mechanischen Aufbereitung von Aluminium weniger als 1 % der Energie im Vergleich zur Herstellung von Primäraluminium aufgewendet werden muss.
- Reduzierung von CO₂-Emissionen gegenüber dem thermischen Verfahren und Schonung von Ressourcen, da kein primäres Aluminium zum Legieren benötigt wird. Im Vergleich zu Primäraluminium werden zur Herstellung von 1 t Aluminium anstelle von 9.420 kg CO₂ nur 75 kg CO₂, d. h. nur 0,8 % benötigt. Somit ergeben sich jährliche CO₂-Einsparungen von ca. 224.000 t CO₂ zur Herstellung von Aluminium im Primärwerk durch das Vorhaben.

- Durch die Aufbereitung sollten NE-Metalle aus den Schredderabfällen getrennt werden, sodass ein metallfreies Gemisch verbleibt, welches als Ersatzbrennstoff energetisch zum Beispiel in der Zementindustrie genutzt werden kann. Dies ist heute nicht möglich, da das Material noch Metalle enthält. Daher muss ein großer Teil heute kostenintensiv aufbereitet oder deponiert werden.
- Durch den Transport von Schredderabfällen zu Fremdunternehmen per Lkw sollten durch die Eigenaufbereitung ca. 35.000 Transportkilometer im Jahr und die damit verbundenen Emissionen entfallen.

2.2. Darstellung der technischen Lösung

Das im Projekt entwickelte innovative Verfahren basierte zunächst im Wesentlichen darauf, dass der Aluminium Alt-Schrott so aufbereitet wird, dass eine möglichst einheitliche Partikelgröße und -verteilung vorliegt. Hierzu sollten der bestehenden Schredderanlage neue Sortier- und Trennvorrichtungen nachgeschaltet werden, mit denen die bisher aufbereiteten Materialien zur Qualitätsverbesserung weiter abgesiebt, getrennt und aussortiert werden.

Die neue Separationstechnik basiert somit auf einer Kombination aus Röntgen-, Sieb- und NE-Abscheidertechnik.

Zunächst wird der Materialstrom über Förderbändern den Trenneinrichtungen zugeführt (Abbildung 2).



Abbildung 2: Fördersektion der Schredderanlage

In einer Siebanlage (Abbildung 3) erfolgt eine Trennung in zwei Materialkörnungen: in Fraktionen $\min. < 0,3 \text{ mm}$ und $> 0,3 \text{ mm}$. Das abgesiebte Unterkorn ($\min. < 0,3 \text{ mm}$) wird abschließend in Big-Bags abgefüllt. Der Anteil des Unterkornanteils beträgt $< 0,5 \%$ des Gesamtfördervolumens. Durch das Abscheiden des Unterkornanteils werden die Umschlag- bzw. Trennprozesse zusätzlich entstaubt und die Reststaubanteile auf ein Minimum reduziert. Nur das Überkornmaterial ($\min. > 0,3 \text{ mm}$) wird weiter verwertet.



Abbildung 3: Blick auf die Siebanlage

Anschließend gelangt das verteilte Überkorn zur Röntgensortieranlage, die in Abbildung 4 dargestellt ist. Mit dem Röntgensortiersystem besteht die Möglichkeit, Wertstoffgemische in Abhängigkeit der unterschiedlichen Materialdichten bzw. der (Anzahl der Atome) zu sortieren. Über die Röntgensortieranlage werden im Wesentlichen Schwermetalle wie Zink (Zn), Kupfer (Cu), Messing (Ms), Blei (Pb) und Edelstahl (VA) sowie Aluminium Legierungen mit höherer Dichte wie zum Beispiel Aluminium-Zink-Legierungen (Al-Zn), Aluminium-Kupfer-Legierungen (Al-Cu) und Aluminiumguss-Legierungen aussortiert.

Das Röntgen-Sortiersystem beruht auf dem Prinzip der Röntgentransmission:

Dabei durchleuchten Röntgenstrahlen das Sortiergut und ein für Röntgenstrahlen sensibler Sensor ermittelt die Intensität der Strahlung, die durch das Material hindurch tritt. Ein Rechner ermittelt den Unterschied der eintretenden und der austretenden Strahlung. Aus der Differenz der Intensität (über Absorption) werden direkte Rückschlüsse auf die atomare Zusammensetzung des durchleuchteten Materials gezogen.

Innerhalb der Röntgensortieranlage wird das Material auf einem Förderband beschleunigt und währenddessen mittels Röntgentransmission analysiert. Im Materialabwurf befinden sich

zwei Schurren, die durch ein Blech (Trennscheitel) quer zur Förderrichtung voneinander getrennt sind.



Abbildung 4: Röntgensortieranlage

Wird ein Materialteilchen aufgrund der höheren Dichte durch die Röntgentransmission erkannt, wird es durch einen Pressluftimpuls der Düsenleiste unterhalb des Förderbandes ausgeschossen und hinter den Trennscheitel sortiert. Somit landen die aussortierten Materialien in der dahinterliegenden Schurre, wo sie mittels Förderband in einen Stahl-Behälter gefördert werden. Die gesamte Röntgensortieranlage ist komplett gekapselt und gegen den Austritt von Röntgenstrahlung hermetisch abgeschirmt (Vollschutzanlage gemäß Röntgenverordnung, entsprechende Anlagenzertifikate bestätigen die Abnahmen gemäß den gültigen Strahlenschutzbestimmungen). Abbildung 5 zeigt die Schutzmaßnahmen.



Abbildung 5: Blick auf die Abschirmung der Röntgensortieranlage



Abbildung 6: Nicht-Eisen-Metallabscheider

Die Materialien, die vor dem Trennscheitel durch die Abwurfparabel in der vorderen Schurre landen, werden auf ein Förderband verbracht und von dort zum NE – Metallabscheider (siehe Abbildung 6) gefördert. Dessen Aufgabe besteht darin, Aluminium-Fractionen von verbliebenen Reststoffen zu trennen.

Die Materialien werden getrennt nach Aluminium- und Reststofffraktionen in Materialboxen gefördert.

Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 7 abgebildet:

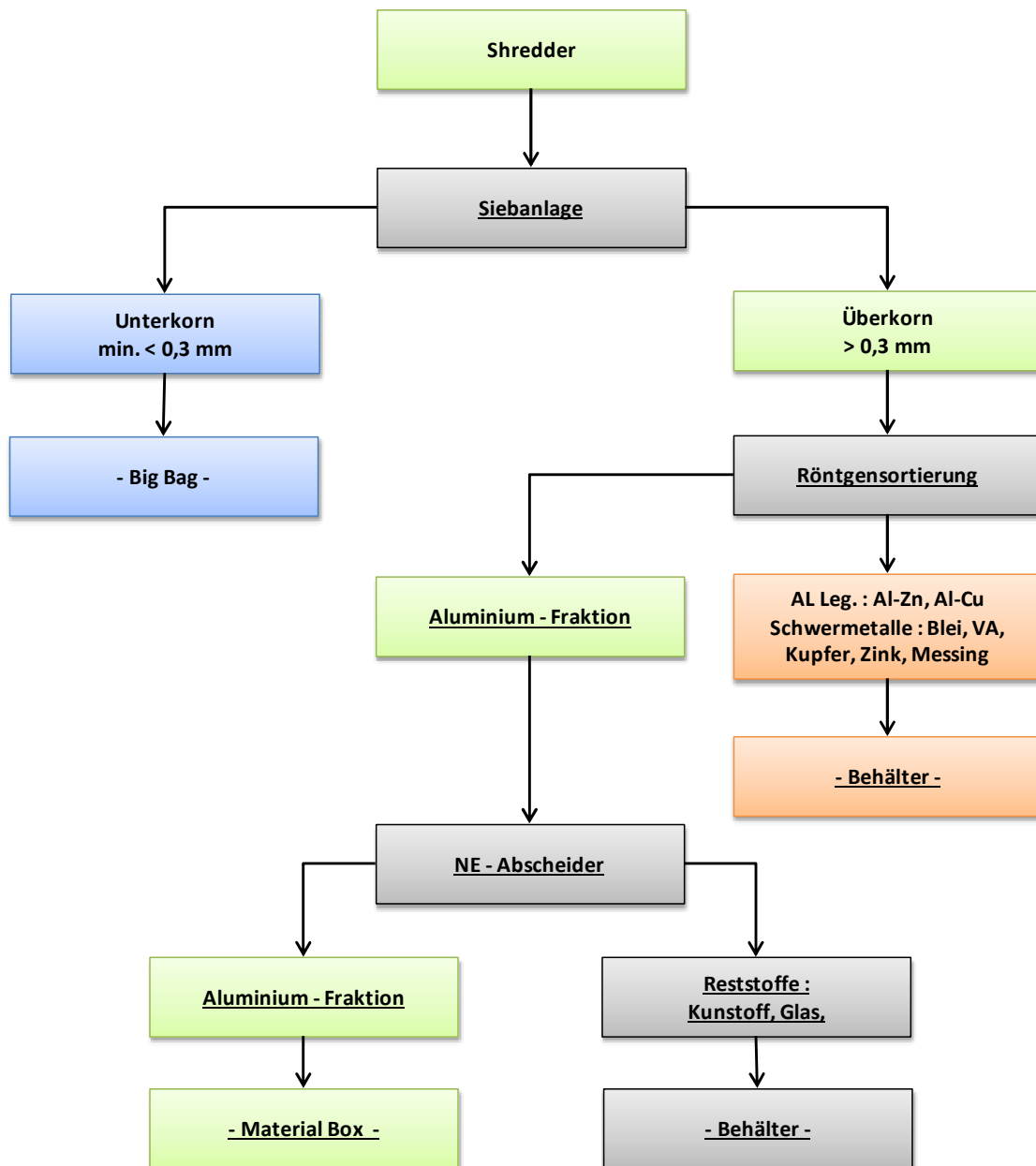


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Aluminumsortieranlage

2.3. Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

Die Durchführung des Vorhabens folgte in Arbeitsschritten bzw. Arbeitspaketen (AP):

- AP 1: Anlagenplanung und Konstruktion
- AP 2: Anlagenbau
- AP 3: Inbetriebnahme
- AP 4: Versuchsphase
- AP 5: Optimierungsphase

2.4. Behördliche Anforderungen

Für den Bau der Anlage wurde ein Antrag gemäß § 16 Bundesimmissionsschutzgesetz gestellt. Der Genehmigungsbescheid der Bezirksregierung Düsseldorf wurde am 29.07.2013 erteilt. (Nummer des Genehmigungsbescheides/Az.: 52.03-0428248-0000-1010)

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Die Erfassung der Betriebsdaten der Anlage erfolgte während des Betriebs mittels installierter Sensorik sowie der Analyse aufbereiteter Stoffproben im eigenen Labor mittels Probenschmelze. Ebenso wurden die hergestellten Chargen zur Gegenkontrolle auch im Empfängerwerk auf Eignung und Gutbefund kontrolliert.

Die Aufbereitung der Betriebsdaten und Auswertung erfolgte mittels umfangreicher Protokollierung, systematischer Dokumentation und deren Auswertung.

3. Ergebnisse

3.1. Bewertung der Vorhabensdurchführung

Die Durchführung des Vorhabens folgte dem in Abschnitt 2.3 dargestellten Arbeitsablauf. Hierbei ergaben sich zeitliche Verzögerungen aufgrund des Genehmigungsverfahrens. Beispielsweise mussten aufgrund entsprechender Gutachten zusätzliche Schalldämpfer und eine Wasserbenebelung im Abwurfbereich der Boxen und im Eingangslager vorgesehen werden.

Die Anlagenplanung und Konstruktion wurde plangemäß gestartet und bis März 2013 weitgehend abgeschlossen. Mit dem Anlagenbau wurde im März 2013 begonnen, die wesentlichen Komponenten jedoch erst nach Erhalt der Bewilligung der Förderung sowie der Genehmigung der Anlage bestellt. Hierdurch konnte der Anlagenbau erst im September 2013 abgeschlossen werden. Die Inbetriebnahme erfolgte in den Monaten September und Oktober 2013.

Bei der Konstruktion und dem Bau der Anlage erhöhten sich die Kosten für Konstruktion und Stahlbau im Vergleich zur Planung deutlich. Gründe hierfür waren insbesondere mehrfach notwendige Überarbeitungen und Änderungen der technischen Lösungen im Bereich der Sortiertechnik (Modifikation von Materialführungen/Schurren). Dadurch sollten der Produktfluss verbessert und eine Entkopplung der Stahlbaugruppen von nicht gewünschten Schwingungen zur Erzielung der angestrebten Erkennungsgenauigkeit erreicht werden.

Nach Errichtung der Anlage startete eine umfangreiche Versuchsphase im Zeitraum 10/2013 – 01/2014 zur Ermittlung optimaler Betriebsparameter bei Aufgabe unterschiedlicher Qualitäten und Zusammensetzung von Ausgangsmaterialien. Hierzu wurden auf der Anlage innerhalb des mehrmonatigen Versuchsbetriebes unterschiedliche Ausgangsmaterialien unter Variation der Anlagenparameter gefahren. Die aufbereiteten Fraktionen wurden anschließend hinsichtlich Zusammensetzung und Sortierqualität im Labor analysiert und daraus Erfahrungen zur Optimierung der Anlagenparameter und des Sortierverfahrens abgeleitet. So entstanden diverse "Programme" zur Einstellung der Sortiерergebnisse sowie ein Reporting-Tool, welches parallel zur Aufbereitung die einzelnen Sortiерergebnisse dokumentiert.

Die Optimierungsphase wurde im Januar 2014 gestartet, wobei auch Optimierungen am Röntgensortierer mechanisch und programmseitig vorgenommen wurden.

Aufgrund der Vielfalt der aufzubereiten Stoffströme sowie der Komplexität und Neuheit des Verfahrens wurde der Versuchsbetrieb anschließend bis 30.06.2014 verlängert. In dieser Versuchsphase wurden diverse Optimierungen an der Anlagentechnik und der Verfahrenseinstellungen zur Vermeidung von Übersortierungen (möglichst wenig Gutware falsch aussortieren) durchgeführt. Problematisch war auch ein teilweise hoher Verschleiß von Anla-

genkomponenten, die auf den Dauerbetrieb sowie die hohe Belastung der darauf teilweise nicht ausgelegten Komponenten zurückzuführen waren.

Zum Abschluss des Vorhabens gelang es, die Anlage erfolgreich bis zu einem monatlichen Volllastbetrieb von 3.000 t zu betreiben.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

Die Stoffbilanzen der aufbereiteten Stoffströme hängen sehr stark von den jeweiligen Aufgabemengen sowie ihrer Zusammensetzung ab. In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind beispielhaft Sortiererergebnisse aus verschiedenen Proben dargestellt, die eine sortenreine Aufbereitung belegen:

Produktions Auswertung / Analysen der Produktion Chargin

Datum	Chargen Nr.	Material	Accept Menge	Accept %	Eject in kg	Eject in %
23.07.14	831	Iso, EE	44.540 kg	82,27%	0.464 kg	0,86%
23.07.14	839	Iso, HW	139.420 kg	79,18%	8.756 kg	4,97%
28.07.14	838/840	Iso, HW	114.680 kg	77,83%	4.416 kg	3,00%
29.07.14	852	Iso, EE	53.920 kg	88,95%	2.200 kg	3,63%
01.08.14	844	Iso, HW	73.040 kg	75,80%	5.272 kg	5,47%
05.08.14	846	Iso, HW	171.000 kg	77,83%	6.644 kg	3,02%
12.08.14	859/860	Iso, HW	239.380 kg	78,36%	8.592 kg	2,81%
14.08.14	866	Iso, HW	79.300 kg	79,16%	2.130 kg	2,13%
15.08.14	867	Iso, HW	85.180 kg	72,40%	5.827 kg	4,95%
			1.000.460 kg	79,09%	44.301 kg	3,43%

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
0,465	0,241	0,012	0,047	0,215	0,017	0,002
0,521	0,237	0,023	0,044	0,300	0,041	0,004
0,506	0,230	0,015	0,043	0,224	0,018	0,003
0,510	0,291	0,016	0,044	0,248	0,017	0,004
0,508	0,244	0,018	0,056	0,313	0,023	0,004
0,506	0,228	0,020	0,049	0,301	0,029	0,003
0,536	0,254	0,031	0,056	0,359	0,028	0,005
0,506	0,253	0,016	0,045	0,257	0,019	0,004
0,602	0,270	0,029	0,060	0,348	0,035	0,003
Mittelwert der WMR Chargin :						
0,518	0,250	0,020	0,049	0,285	0,025	0,004

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
0,30-0,60	0,10 - 0,30	0,10	0,10	0,60	0,15	0,05

Chemische Zusammensetzung nach :
EN 573-3, Legierung : EN AW 6060

Die Tabelle enthält die Zusammensetzung der einzelnen Legierung nach EN 573-3. Die angegebenen Werte sind die Maximalen Gehalte der Massenanteile in % der Legierungselemente. Wertebereiche geben den maximalen Gehalt an. Der Aluminiumgehalt ergibt sich aus der Differenz der Summe der einzelnen Bestandteile zu 100 %

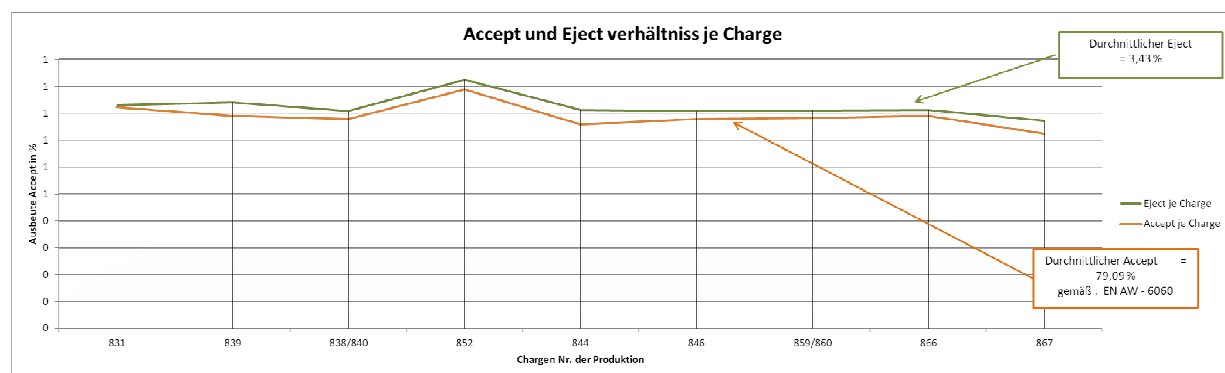


Abbildung 8: Analyseergebnisse sortierter Stoffströme

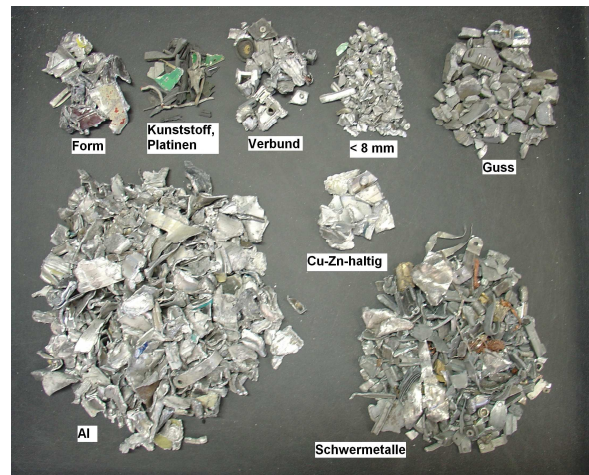


Abbildung 9: Sortiierungsergebnisse aus verschiedenen Proben (Links Accept / Rechts Eject)

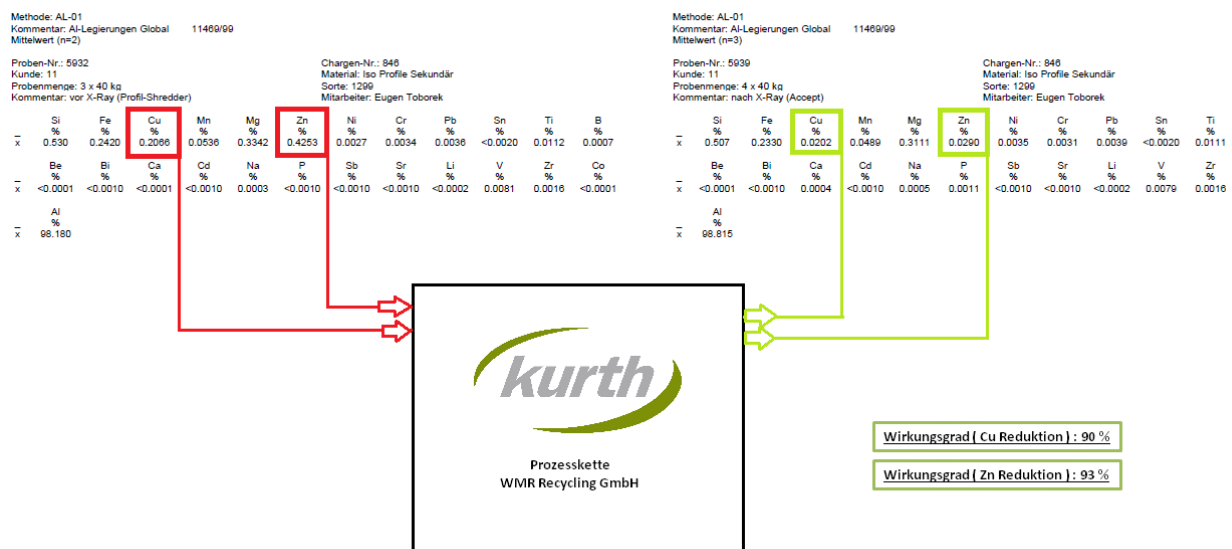


Abbildung 10: Effizienz der Separation am Beispiel Kupfer (Cu) und Zink (Zn)

Bei der Energiebilanz der Anlage ist der zusätzliche Energiebedarf des Schredders durch Installation der zusätzlichen Sortier- und Trenntechnik sowie Röntgentrennung, inklusive der dafür benötigten Peripherie, zu betrachten. Der Mehrbedarf an Energie beträgt ca. 520.000 kWh pro Jahr (bei Volllast in Abhängigkeit des zu sortierenden Materials).

Es wurden im Zeitraum der 10 monatigen Versuchsphase vom 01.10.2013 – 31.07.2014 bei einer Produktionsmenge von 23.017 Tonnen 2.136.585,63 kWh verbraucht (siehe Abbildung 11). Somit beträgt der Stromverbrauch je eingesetzter Tonne durchschnittlich 92,83 kWh. Der prognostizierte Energieverbrauch von 125 kWh wurde daher deutlich unterschritten.

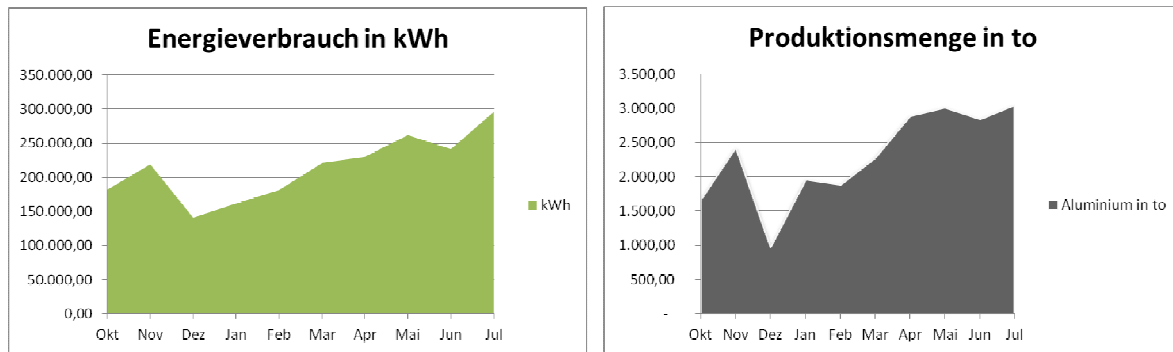


Abbildung 11: Darstellung des Energieverbrauchs in Relation zur Aluminiumproduktion

3.3. Umweltbilanz

Bereits innerhalb der Projektlaufzeit wurden beispielhaft aufbereitete Aluminiumproben bei Kunden von WMR verarbeitet. Hierbei gelang es, die hohe Qualität und damit die Erfüllung des Projektziels, Vermeidung/Reduzierung der Zugabe von Primäraluminium, nachzuweisen. Bei einer Volllastung der Anlage nach Projektabschluss werden durch die Weiterverarbeitung des so gewonnenen Sekundäraluminiums folgende Energieeinsparungen und dadurch Reduzierung der CO₂-Emissionen erwartet:

Energieverbrauch	t/Aluminium in kWh	Monatsproduktion 2.000 t in kWh	Jahresproduktion 24.000 t in kWh	Monatsproduktion 3.000 t in kWh	Jahresproduktion 36.000 t in kWh
1 Aluminiumhütte (Primäre Aluminiumproduktion)	15.700	31.400.000	376.800.000	47.100.000	565.200.000
2 Thermische Aufbereitung - Recycling 5% der Energie zu 1 (Sekundäre Aluminiumproduktion)	785	1.570.000	18.840.000	2.355.000	28.260.000
3 Mechanische Aufbereitung - Recycling WMR	93	185.660	2.227.920	278.490	3.341.880
CO ₂ Emissionen (600g CO ₂ /kWh)	t/Aluminium in t CO ₂	Monatsproduktion 2.000 t in t CO ₂	Jahresproduktion 24.000 t in t CO ₂	Monatsproduktion 3.000 t in t CO ₂	Jahresproduktion 36.000 t in t CO ₂
1 Aluminiumhütte (Primäre Aluminiumproduktion)	9,420	18.840	226.080	28.260	339.120
2 Thermische Aufbereitung - Recycling (Sekundäre Aluminiumproduktion)	0,471	942	11.304	1.413	16.956
3 Mechanische Aufbereitung - Recycling WMR	0,056	111	1.337	167	2.005

Abbildung 12: Umwelteffekte durch Betrieb der neuen Anlagentechnik bei einer Monatsproduktion von 2.000 t(Durchschnitt) bzw. 3.000 t (maximal)

Aus Abbildung 12 ist zu erkennen, dass durch die neue Aufbereitungs- und Sortiertechnik erhebliche Energieeinsparungen und Reduzierungen von CO₂-Emissionen ergeben. Diese Effekte basieren auf dem deutlich geringeren Energiebedarf im Vergleich zum Einsatz von Primäraluminium.

Wenn man den Skalierungseffekt auf die deutsche Wirtschaft berücksichtigt (durch Bau weiterer Anlagen erreichbar), liegt der potenzielle Umweltnutzen durch Aufarbeitung aller anfallenden Aluminiumschrotte in Deutschland noch deutlich höher.

Aufgrund des modularen Aufbaus könnten auch Anlagen in größerem Maßstab errichtet oder parallel betrieben werden. Es ergibt sich grundsätzlich aus technischer Sicht keine Begrenzung der Kapazität.

Aus der Metallstatistik aus den Jahren 2000 – 2010, veröffentlicht 2011 vom World Bureau of Metal Statistics, ergibt sich eine durchschnittliche Aluminium-Schrottverwertungsmenge in Deutschland von 743.270 Tonnen pro Jahr (siehe Abbildung 13).

Aluminium Schrottverwertung

Quelle : WORLD BUREAU OF METAL STATISTICS 2011

Jahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005
in Deutschland	572.300 to	622.900 to	666.100 to	680.400 to	655.200 to	711.700 to

Jahr	2006	2007	2008	2009	2010
in Deutschland	795.700 to	835.600 to	720.900 to	560.800 to	611.100 to

Aluminium Schrottverwertung durchschnittlich :	743.270 to
--	------------

Abbildung 13: Berechnung der durchschnittlichen Aluminium Schrottverwertung

Berechnung des Umwelteffektes bei einer Flächendeckenden Umsetzung in Deutschland

	Jahresproduktion 36.000 t in t Co ²	CO ² Einsparung in t durch Mechanische Aufbereitung	Jahresproduktion 743.270 t in t Co ²	CO ² Einsparung in t durch Mechanische Aufbereitung
1 Aluminiumhütte (Primäre Aluminiumproduktion)	339.120	337.115	7.001.603	6.960.207
2 Thermische Aufbereitung - Recycling (Sekundäre Aluminiumproduktion)	16.956	14.951	350.080	308.684
3 Mechanische Aufbereitung - Recycling "Umsetzung in Deutschland"	2.005	-	41.396	-

Abbildung 14: Umwelteffekt bei einer flächendeckenden Umsetzung in Deutschland

Der berechnete Umwelteffekt bezogen auf den Vergleich zwischen der mechanischen- und thermische Aufbereiten von Aluminium würde bei einer flächendeckenden Umsetzung in Deutschland zu gleichen Bedingungen eine CO₂-Einsparung von 308.684 t CO₂ im Vergleich zur Aufbereitung von Sekundäraluminium und eine CO₂-Ersparnis von 6.960.207 t CO₂ im Vergleich zur Herstellung von Primäraluminium bedeuten.

Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms

Das Messprogramm wurde innerhalb des Vorhabens versuchsbegleitend eigenständig von WMR und im Empfängerwerk durchgeführt. Während des Prozesses wurden alle Produktionschargen durch das Labor begleitet, hierbei wurden während der einzelnen Zerkleinerungsstufen 40 kg Proben entnommen. Anschließend wurden die Proben im Probenofen eingeschmolzen und eine Spektralanalyse erstellt. Bei größeren Chargen wurde mehrere Proben entnommen und ein Mittelwert gebildet, um ein möglichst repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Somit konnte das zu sortierende Material analytisch bestimmt werden (Input Analyse). Die Analyse wurden ebenfalls bei den sortierten Qualitäten (Accept Analyse) und bei den aussortierten Qualitäten (Eject Analyse) durchgeführt. Somit konnte der analytische Wirkungsgrad des Prozesses ermittelt werden. Dieser variiert je nach Element innerhalb der Legierung. Grundsätzlich wurde jedoch immer ein Wirkungsgrad $> 85 \%$ im Element Cu, Zn ermittelt.

Die Effizienz der Sortierung wurde durch Proben aus dem aussortierten Material durch eine sogenannte Auszählung (Handsortierung) überwacht. So konnten Gewichtsprozent der einzelnen Bestandteile des Störstoffes ermittelt werden und auch der Anteil der Übersortierung ermittelt werden. Diese Information ist auch für die Wirtschaftlichkeit der Sortierung von Bedeutung. Das Ergebnis der Auszählung ergibt, das WMR eine sehr geringe Übersortierung von max. 10 % bei einem sehr geringen Eject-Verhältnis und hoher Qualitätsanforderung der Accept Analyse nachweisen kann.

Wie den Analysen unter 3.2 zu entnehmen ist, sind die Grenzwerte der EN 573-3 / EN AW 6060 sicher erreicht worden. WMR konnte innerhalb der Versuchsphase bereits Kundenanfragen mit deutlich höheren analytischen Anforderungen gerecht werden, da die Qualitätsanforderungen meist unterhalb der EN-Normen liegen.

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für die im Projekt neu errichtete Anlage ergibt sich folgende Ergebnisentwicklung:

P & L	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Menge (Quantity)	21.000 t	27.000 t	36.000 t	36.000 t	36.000 t	36.000 t	36.000 t
Ergebnis (TOTAL P&L)	50.000 €	600.000 €	1.500.000 €	1.650.000 €	1.600.000 €	1.700.000 €	1.800.000 €

Abbildung 15: Ergebnisentwicklung

Die Kosten der Projektdurchführung lagen inklusive der Personalkosten für die Projektdurchführung bei ca. 2,2 Millionen Euro. Gemäß der Abbildung 15 (Ergebnisentwicklung) ergibt sich eine Amortisation (Return on Investment) von max. 3 Jahren.

Die Aufbereitung der Schrotte erfolgt in Form einer Lohnarbeit für den Kunden. Das bedeutet, dass die primäre Aluminiumindustrie Alt-Schrotte innerhalb eines Dienstleistungsvertrages bei WMR aufbereiten lassen können. In diesem Zusammenhang wurde bereits Europas größter Aluminiumproduzent als Kooperationspartner zur Aufbereitung von Sekundärschrotten gewonnen.

Die Aufbereitung ist je nach Preisentwicklung der Sekundärschrotte im Verhältnis zu der Rohstoffbörse für Primäraluminium (LME: London Metall Exchange) wirtschaftlich durchführbar.

Innerhalb der Versuchsphase wurde ebenfalls die Aufbereitung der sonstigen Schredderabfälle durchgeführt, sodass ein metallfreies Gemisch verbleibt, welches als Ersatzbrennstoff energetisch in der Zementindustrie genutzt werden konnte.

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren

Die Innovation im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren besteht darin, dass es nun erstmals möglich ist, Aluminium Alt-Schrotte so aufzubereiten, dass diese ohne oder mit extrem geringer Zugabe von Reinaluminium in der primären Herstellung von Aluminiumlegierungen zu verwenden sind. Vor Projektbeginn war es nur möglich, Alt-Schrotte nach Aufbereitung in der sekundären Herstellung von Aluminium zu verwenden. Einzige Ausnahme waren Werksentfallschrotte, welche aufgrund ihrer einheitlichen Analytik direkt wieder in den Produktionsprozess zurückkehren konnten. Dieser Anteil ist allerdings mengenmäßig sehr gering und wird zunehmend weniger.

Die speziell entwickelte Software bestimmt die Elemente nach Röntgenanalyse anhand der Anzahl der Atome und kann anhand der Dichteunterschiede eine Sortierung von unter-

schiedlichen Legierungen auslösen, welches nach Stand der Technik bisher nicht möglich war.

Mit dem Verfahren werden beispielsweise Aluminium mit geringem Kupferanteil (0,05 - 0,20 %) von Aluminium mit hohem Kupferanteil (3,8 - 4,9 %) getrennt. Auch können Aluminium Gusslegierungen mit hohem Silicium, Kupfer- und Zinkanteil getrennt werden.

4. Empfehlungen

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Erfahrungen aus der Projektdurchführung betreffen insbesondere das umfangreiche Versuchsprogramm zur Bestimmung optimaler Aufbereitungsergebnisse und möglichst minimaler Übersortierung. Entscheidend für die Sortiierungsergebnisse sind sogenannte Teach-In-Programmierungen, in denen die Software auf die Legierungsunterschiede eingelernt wird. Dieser Prozess erfordert jeweils umfangreiche Versuche, da in der Praxis unzählige unterschiedliche Aluminiumlegierungen möglich sind. Nach einem gezielten Teach-In der Anlage ist die Aufbereitung der erforderlichen Qualität möglich.

Die geometrischen Bedingungen des zu sortierenden Materials spielte eine wesentliche Rolle für die Qualität des Fertigproduktes in der Kombination zu einer hohen Genauigkeit des aussortierten Materials (der Übersortierung). Somit die das Verfahren und die Prozesskette ein entscheidender Aspekt bei der Aufbereitung von Aluminium Alt-Schrotten und patentrechtlich geschützt worden.

4.2. Modellcharakter

Das entwickelte Verfahren lässt sich auf weitere Standorte und Anlagen sowie auf weitere Recyclingaufgaben übertragen. Hierzu ist es notwendig, zusätzliche Anlagen zu errichten, die ggf. auch größere Kapazitäten bei entsprechender Anlagenauslegung haben können.

Eine derartige Verbreitung des Vorhabens ist nach Abschluss durch den Antragsteller vorgesehen. Hierzu könnten bei Bedarf sowohl weitere Anlagen errichtet, als auch das patentierte Verfahren durch Dritte lizenziert werden.

4.3. Zusammenfassung

Innerhalb des Projektes wurde auf Basis eines zum Patent angemeldeten Verfahrens eine neuartige Trenntechnik für die Aufbereitung von Aluminium Alt-Schrotten errichtet. Das Verfahren umfasst die spezielle Vorbereitung des Schrottes durch zusätzliche Sortier- und Trennvorrichtungen, mit denen die aufbereiteten Materialien abgesiebt, getrennt und aussortiert werden. Im Anschluss wird das separierte Material mittels Röntgentransmission analysiert und pneumatisch sortiert.

Mit dem entwickelten Verfahren ist es erstmals möglich, aus Alt-Schrotten wieder einheitliche DIN- bzw. EN-Legierungen zu erzeugen.

Es wurde nachgewiesen, dass mit der Anlage ein produktspezifisches Recycling möglich ist und dadurch der Einsatz von Reinaluminium bei der Herstellung von primären Aluminiumerzeugnissen erheblich gesenkt werden kann.

Durch die verstärkte Verwendung von Alt-Schrotten zur Herstellung von primären Aluminiumerzeugnissen werden durch den Serienbetrieb des Verfahrens nach Projektabschluss erhebliche Energieeinsparungen und eine Reduzierung von CO₂-Emissionen erreicht.

5. Literatur

Vorträge Boris Kurth zur neuen Prozesskette in der Aluminiumsortierung:

„Sortenreine Trennung verschiedener Aluminiumlegierungen“

- Recycling- und Rohstoffkonferenz, 25.03.2014, Berlin (erfolgt)
- Metall Recycling Konferenz, 29.10.2014, Bonn (geplant)

Abkürzungen

<	kleiner als
>	größer als
Zn	Zink
Cu	Kupfer
Al	Aluminium
Pb	Blei
Mn	Mangan
Mg	Magnesium
Cr	Chrom
Si	Silizium
Ti	Titan
Fe	Eisen
Ni	Nickel
Leg.	Legierung
t	Tonne
kWh	Kilowatt je Stunde