

Industrial Application of Electrodynamic Fragmentation to Bottom Ashes at the KVA Fribourg, Switzerland

Alexander Weh

This study describes the implementation of the electrodynamic fragmentation within the bottom ash processing plant at the KVA Fribourg, Switzerland. The smart combination of the existing dry and new installed wet processing allows the direct treatment of bottom ash after extraction without intermediate storage. The systematic commissioning accepts optimizations and adjustments without disturbing the general operation. This strategy delivered a robust and efficient plant to the client that operates within the economic optimum situation. The reduced space situation was used efficiently by modular design and optimized requirements for processing.

With the use of electrodynamic fragmentation, achievable recoverable values are maximized in an open cycle process. The process liberates values over a wide range of grain sizes without the need of several comminution steps. The high-level release of metallic raw materials maximizes the non-ferrous and ferrous metal yield by the simple, subsequent conventional sorting and results meets official limits. In addition, the process preserves mineral raw material to be recovered and to reduce landfill costs. Tests during operation confirm the superior liberation ability of industrial applied electrodynamic fragmentation. The subsequent sorting success was evaluated during operation by investigations to sorted bottom ash and achieved concentrates. Results confirm that the electrodynamic fragmentation maximizes the recovery of valuable metals by the installed sorting in an industrial regime. In conclusion, with the present operational setup the plant is run at 6 kWh/t at the economic optimum. The operating results 2017 confirmed the tests done during processing. Trends to increasing metal yield and the change of the non-ferrous concentrate composition show the raising influence of the new treatment by the gradual commissioning. The improved liberation successively increased the heavy metal content in the non-ferrous concentrate - this doubled the value of the concentrate within a short period. With electrodynamic fragmentation wet processing is getting competitive at lower throughputs to enable a more sustainable bottom ash treatment.

Industrieller Einsatz der elektrodynamischen Fragmentierung von Rostaschen in der KVA Fribourg, Schweiz

Alexander Weh

1.	Ausgangslage.....	132
2.	Umsetzung und Inbetriebnahme.....	133
3.	Einschränkungen der mechanischen Aufbereitung.....	135
4.	Grundlagen der elektrodynamischen Fragmentierung.....	136
5.	Ergebnisse aus dem industriellen Betrieb.....	137
5.1.	Schlackenzusammensetzung.....	137
5.2.	Wertstoffverteilung in der Rohschlacke.....	138
5.3.	Metalleinschluss in unbehandelter Rohschlacke.....	139
5.4.	Wertstofffreisetzung durch elektrodynamische Fragmentierung.....	141
5.5.	Sortiererfolg.....	143
6.	Anlagenmodifikationen und Betriebsergebnis während gestaffelter Inbetriebnahme.....	146
6.1.	Anlagenmodifikationen während Inbetriebnahme.....	146
6.2.	Betriebsergebnis während Inbetriebnahmephase.....	147
7.	Zusammenfassung.....	149
8.	Literatur.....	150

Rostaschen und -schlacken sind feste Rückstände aus der thermischen Verwertung von Siedlungs- und Industrieabfällen. Verschiedene Publikationen beschreiben deren Aufkommen und weitere Verarbeitung [1, 4, 7]. Die kontrollierte Abfall-Verfeuerung in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) ermöglicht es, die entzündlichen Bestandteile fast vollständig zu verbrennen. Dadurch werden organische Schadstoffe abgebaut und das Abfallvolumen signifikant reduziert. Durch die Verbrennung von Abfällen werden Fernwärme und Energie gewonnen. Entstehenden Abgase werden nach hohen Standards gereinigt. Dem gegenüber steht die Behandlung der festen Verbrennungsrückstände. Die Verwertung und Entsorgung der belasteten Rohschlacke ist national

unterschiedlich geregelt. Der Aufwand erfolgt zwar gesetzkonform, bleibt aber oft bei den Minimalanforderungen [4, 7, 12]. Zunehmend wird eine umfassendere stoffliche Verwertung der mineralischen und metallischen Bestandteile der Schlacke in Betracht gezogen. Die elektrodynamische Fragmentierung zeigt gegenüber der trockenmechanischen Aufbereitung weitreichende Vorteile für eine nachhaltige Behandlung der Rohschlacke. Verwertbare Stoffgruppen werden über das gesamte Kornspektrum aus der Schlackenmatrix sortenrein freigelegt [15]. Dadurch können ohne mehrstufige Zerkleinerung und/oder parallel laufende Sortierungsanlagen bei einem vereinfachten Fließschema hohe Metall-Ausbeuten erreicht werden. Verschiedene Autoren [6, 10] beschreiben das gesteigerte Verwertungspotential der Schlacke durch die elektrodynamische Fragmentierung. Weh [15] und Weh und Käppeler [16] beschreiben die grundlegende Prozessentwicklung und Industrialisierung des Verfahrens zur Schlackenaufbereitung. Diese Studie beschreibt den Implementationsprozess des innovativen Prozesses innerhalb der KVA Fribourg, Schweiz. Ausführlich werden die ersten Ergebnisse der elektrodynamischen Fragmentierung im industriellen Betrieb diskutiert und in Relation zu den Ergebnissen im ersten Betriebsjahr der modifizierten Schlackenaufbereitungsanlage gesetzt.

1. Ausgangslage

Die KVA Fribourg ist als Rostverbrennungsanlage mit Nassaustrag seit 2001 im Betrieb (Bild 1). Die Anlage verwertet für über 200 Gemeinden etwa 88.000 t/a Abfall zu 17.000 t/a Rohschlacke. Metallgehalte der Rohschlacke liegen mit 9 % Fe- und 3,5–4 % NE-Metalle im schweizerischen Durchschnitt [5, 8, 15]. Zusätzliches Rohstoffpotential



Bild 1: KVA-Anlage in Kanton Fribourg, Posieux

besteht durch etwa 30 % mineralischen Anteil. Etwa ein Drittel daraus bestehen aus sogenannten Durchläufermaterialien wie Glas oder Keramik. Vor dem Umbau hatte die KVA eine reduzierte Aufbereitungsanlage mit einer Gesamtmetall-Ausbeute von 60–65 % installiert. Mit geringem Aufwand wurden 80 % des Fe aber nur 25–30 % des NE-Metallanteils zurückgewonnen. Durch Änderung der Gesetzlage 2016 zur VVEA (Verordnung über Vermeidung und Entsorgung von Abfällen) muss in einer Übergangsfrist die Aufbereitung von Schlacken verbessert werden. Grundlegend ist die Reduktion

des NE-Anteils auf $< 1\%$ in der Restschlacke. Zusätzlich ist der KVA-Betreiber daran interessiert, durch Rückgewinnung mineralischer Wertstoffe Deponiekosten zu verringern. CO_2 -Gutschriften durch eine verbesserte Metall-Ausbeute können helfen, den KVA-Betrieb in Richtung CO_2 -neutrale Produktion zu verbessern. Dies alles soll unter ökonomischen Gesichtspunkten das Betriebsergebnis der KVA verbessern.

Bild 2 zeigt das erarbeitete Fließschema. Die Implementierung der bestehenden Anlagenteile umfasst die bestehende trockenmechanische Bearbeitung der Grobfraktion > 40 mm. Diese kann weiterhin unabhängig von der nachfolgenden Nass-Aufbereitung betrieben werden. Dadurch kann der vorher bestehende Status auch in Störungsfällen beibehalten werden. Der neue Kreislauf bezieht sich auf die Fraktion < 40 mm – etwa 85 % des gesamten Massestromes. Dieser beginnt mit einer 2 mm-Nasssieveung als Schlackenwäsche. Die gewaschene Fraktion 2–40 mm wird mittels elektrodynamischer Fragmentierung aufgeschlossenen und nachfolgend mit Magnet- und Wirbelstromscheidung von Metallen entfrachtet. Mineralische Wertstoffe, wie Glas oder Keramik, werden sensortechnisch aus der Restschlacke abgeschieden.

Weh und Käppeler [16] beschreiben die intensive Testphase der elektrodynamischen Fragmentierung im Pilotmaßstab, sowie deren Umsetzung und Implementierung in den Aufbereitungskreis. Bild 3 zeigt die kompakte Installation der Anlage auf engstem Raum mit der Integration der bestehenden Anlagenkomponenten.



Bild 3:

Aufbereitungsanlage der KVA Fribourg

Die Anpassung der elektrodynamischen Fragmentierung auf die Bearbeitung der Rohschlacke wurde von der Selfrag AG erfolgreich mit der Entwicklung der Hochspannungsanlage (*Scoria*) erreicht (Bild 4). Die Anlage kann bei angepasster Energieabgabe den fast vollständigen selektiven Aufschluss (> 90 %) des metallischen Inhaltes in einem offenen Kreislauf erreichen.

Die Anlage besteht aus zwei Generatoren-Einheiten in Serie. Das Material wird über normale Förderstrecken dosiert in die erste Prozesszone verbracht. Nach erster Bearbeitung folgt die Übergabe in die zweite Zone zur weiteren Bearbeitung. Jede Prozesszone umfasst $0,8 \text{ m}^3$ Wasser. Im laufenden Betrieb muss die Wasserqualität stabilisiert werden, um gleichbleibende Bedingungen zu erreichen. Dabei hat sich ein maximaler Wasserverbrauch für die Gesamtanlage von $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ Frischwasser eingependelt. Das Abwasser kann innerhalb des Verbrennungsprozesses wieder verwertet werden. Damit entsteht kein direktes Abwasser aus der Aufbereitung.

Durch die Verarbeitung in 2 Stufen wird das Material zunehmend verbessert und die Freisetzung der Wertstoffe maximiert. Das redundante System kann Ausfälle kompensieren und stellt eine robuste industrielle Lösung dar. Jede Generatorenstufe hat eine Leistung von 10 kW. So werden bei 6 kWh/t spezifischen Energiebedarf Durchsätze von bis zu 3 t/h ermöglicht. Die Größe der Anlage reicht aus, um die anfallende Rohschlacke der KVA Fribourg direkt zu verarbeiten.

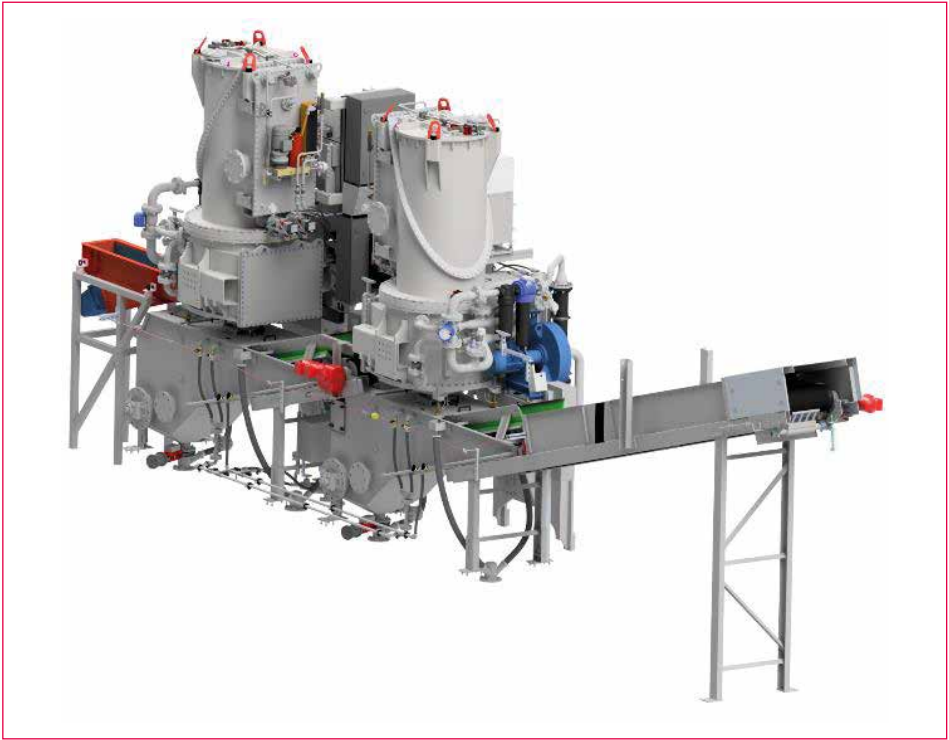


Bild 4: Hochspannungsanlage zur elektrodynamischen Fragmentierung von Rohschlacken 2–40 mm

Um Erfahrungen mit der nassen Aufbereitung zu sammeln und nötige Anpassungen durchführen zu können, wurde ein gradueller Übergang bis zur vollen Produktionsübernahme eingeführt. Die modulare Bauweise erlaubte dies ohne Beeinträchtigung des allgemeinen Betriebes. Mit der schrittweisen Zuschaltung und Inbetriebnahme der nassen Aufbereitung konnte die Anlage rasch angepasst und optimiert werden. Durchgeführte Anpassungen werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

3. Einschränkungen der mechanischen Aufbereitung

Die Wirtschaftlichkeit einer Schlackenaufbereitung richtet sich nach zurückgewonnenen partikulären Metallgehalt > 2 mm. Bunge [4] erkennt die Vorteile einer nassen gegenüber der trockenmechanischen Aufbereitung für ein verbessertes Recycling-Potential der Rohschlacke. Jedoch limitiert er es auf die Reduzierung der Deponiekosten durch eine Verwertung mineralischer Bestandteile. Durch die höheren Investitionskosten einer nassen Aufbereitung und der geringeren Wertschöpfung mineralischer Wertstoffe ist demnach eine Wirtschaftlichkeit erst bei Durchsätzen von > 100.000 t/a erreicht. Der Autor sieht technische und wirtschaftliche Einschränkungen, um Metall-Ausbeuten mit der traditionellen Aufbereitungskette sinnvoll zu erhöhen. Diese besteht aus der Kombinationen aus Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung (Bild 5).

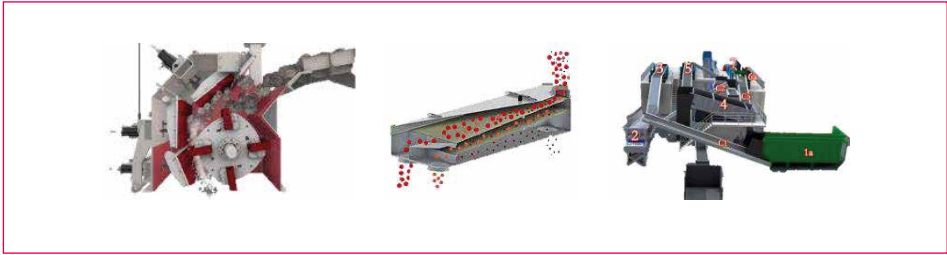


Bild 5: Traditionelle Aufbereitungskette bestehend aus mechanischer Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung

Klassierung und Sortierung, wie moderne Wirbelstramanlagen, arbeiten bei hoher Effizienz von bis zu 95 %. Dem hinkt die mechanische Zerkleinerung hinterher. Konventionelle Anlagen wie Prall- oder Impaktbrecher benutzen Unterschiede im E-Modul von Metall und Schlacke zum Aufschluss der Wertstoffe. Ergebnisse sind jedoch unzureichend über ein weites Kornspektrum. Dadurch wird die Effizienz der nachfolgenden Schritte nicht ausgenutzt und die Metall-Ausbeuten bleiben zurück.

Bunge [4] beschreibt Metall-Ausbeuten von 45–60 % für NE-Metalle als wirtschaftliches Optimum. Gesteigerte Metall-Ausbeuten können nur durch mehrstufige Zerkleinerung erreicht werden. Diese Fließschemata benötigen vielfältige und parallel verlaufenden Klassier- und Sortierungsanlagen. Solche komplexen Anlagen steigern die Aufbereitungskosten und erscheinen nicht wirtschaftlich. Die Kombination von trockenmechanischer Aufbereitung und der des innovativen Zerkleinerungsprozesses der elektrodynamischen Fragmentierung kann diese bestehenden Grenzen durchbrechen und ein nachhaltigeres Recycling von Rostaschen gewährleisten.

4. Grundlagen der elektrodynamischen Fragmentierung

Das Prinzip und die Anwendung der elektrodynamischen Fragmentierung ist in verschiedenen Publikationen detailliert beschrieben [9, 11, 14, 17, 18, 19]. Das Verfahren ist eine alternative Zerkleinerungsmethode, um eingeschlossene Komponenten selektiv freizusetzen. Der nasse Prozess übermittelt hochenergetische elektrische Entladungen in das Aufgabegut zwischen zwei Elektroden. Dabei dient das umgebende Prozesswasser als Isolator. Bei der Eingabe von gepulsten Entladungen mit kurzer Anstiegszeit der Durchbruchspannung wirkt Wasser isolierend [3] (Bild 6). Entstehende Plasmakanäle werden in das Aufgabegut gezwungen und wandern dort entlang Materialgrenzen. Durch Feldverzerrungen entwickeln sich die entstehenden Plasmakanäle zu den Metall-Einschlüssen hin (Bild 7). Der folgende elektrische Überschlag deponiert seine Aufbereitungsenergie in die unmittelbare Nähe der Wertstoffe. Durch den Überschlag bei bis zu 200.000 V ergeben sich starke Druckwellen vergleichbar zu chemischen Detonationen. Die Selektivität des Prozesses entsteht dadurch, inwieweit die abgegebene Elektrizität und Druckwelle mit den elektrischen und akustischen Eigenschaften des Aufgabegutes interagieren. Durch das Verfahren können metallische Einschlüsse über das gesamte Kornspektrum von der Aufbereitungsenergie erfasst werden, ohne die

umgebende mineralische Matrix zu übermahlen. Der direkte Aufschluss der Metalle kommt ohne eine mehrstufige Zerkleinerung aus. Dadurch können auch bei einfachen Anlagenkonfigurationen gesteigerte Metallausbeute wettbewerbsfähig gestaltet werden. Bisherige konventionelle Verwertungsmaßnahmen ergeben begrenzte Ausbeuten und bedeuten eine endgültige Ausschleusung der nicht erreichten Materialien aus dem Wirtschaftskreislauf.

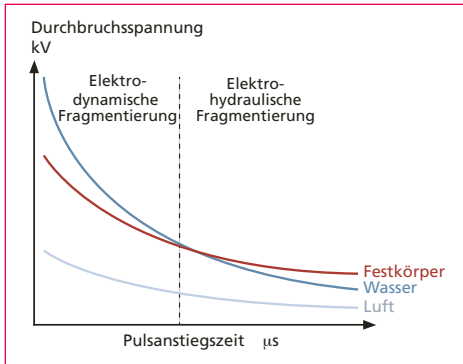


Bild 6: Einfluss der Pulsanstiegszeit auf die Durchbruchsspannung verschiedener Medien bei der elektrodynamischen Fragmentierung

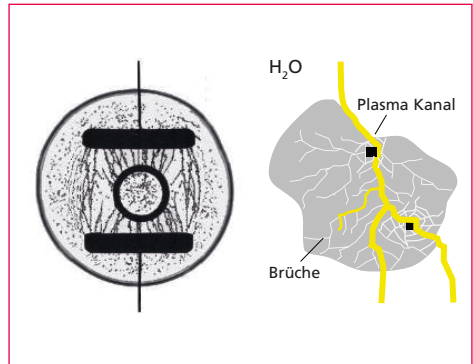


Bild 7: Verfahrensprinzip der elektrodynamischen Fragmentierung; Feldverzerrungen durch metallische, leitfähige Einschlüsse lenken entstehende Plasma-Entladungen zu den Wertstoffen

5. Ergebnisse aus dem industriellen Betrieb

Während der graduellen Inbetriebnahme der Anlage wurde im laufenden Betrieb, die Effizienz der elektrodynamischen Fragmentierung in einem industriellen Umfeld untersucht. Neben der Zerkleinerung wurde die Wertstoff-Freisetzung bei ansteigender spezifischer Energieabgabe ermittelt mit dem Hauptfokus auf die Entwicklung der NE-Metalle.

5.1. Schlackenzusammensetzung

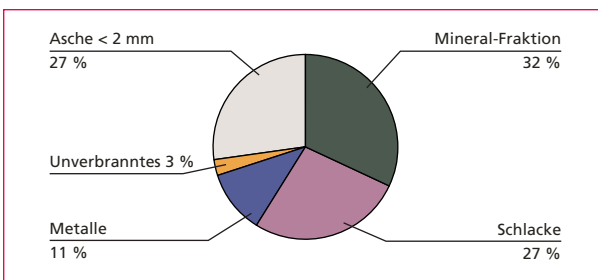


Bild 8:

Verteilung von Stoffgruppen in der Rohschlacke

Quelle: Bunge, R.: Recovery of metals from waste incineration bottom ash, online publication UMTEC, HSR Rapperswil, 2016

Als anthropogene Lagerstätte stellt Rostschlacke ein heterogenes Stoffgemisch dar. Dieses besteht aus fünf allgemeinen Stoffgruppen, die zum Recycling zur Verfügung stehen (Bild 8). Aus diesen Stoffgruppen lassen sich folgende Wertstoffe herausarbeiten [4]:

- (i) Partikuläre Eisen- (Fe) und Nicht-Eisenmetalle (NE),
- (ii) Oxidisch gebundene Metalle in der Schlacke und
- (iii) Mineralische Wertstoffe aus Durchläufer und/oder aus abgereicherter Schlacke.

Die Verwachsung der Wertstoffen hängt von den Bedingungen während der Verbrennung und der nachfolgenden Lagerung ab. Die Effizienz der Gesamtanlage hängt vom Zerkleinerungserfolg ab. Dieser muss eine Wertstoffgruppe aufschließen ohne andere Wertstoffgruppen zu vernichten.

5.2. Wertstoffverteilung in der Rohschlacke

Der partikuläre Metallgehalt > 2 mm umfasst den größten Wertstoffcharakter von Rohschlacke mit einem Massenanteil von 11–12 %. Dabei wird in eine Fe- und NE-Metallfraktion (NE) unterschieden. Während Fe-Metalle etwa 75 Ma.-% der Metallfraktionen ausmachen, dominieren NE-Metalle mit 85 % des potentiellen Wertes. NE-Metalle können in leichte und schwere Fraktionen getrennt werden. Schwere NE-Metalle stellen nur 10 Ma.-% der Gesamtmetalle, steuern aber 60 % des potentiellen Wertes bei [4].

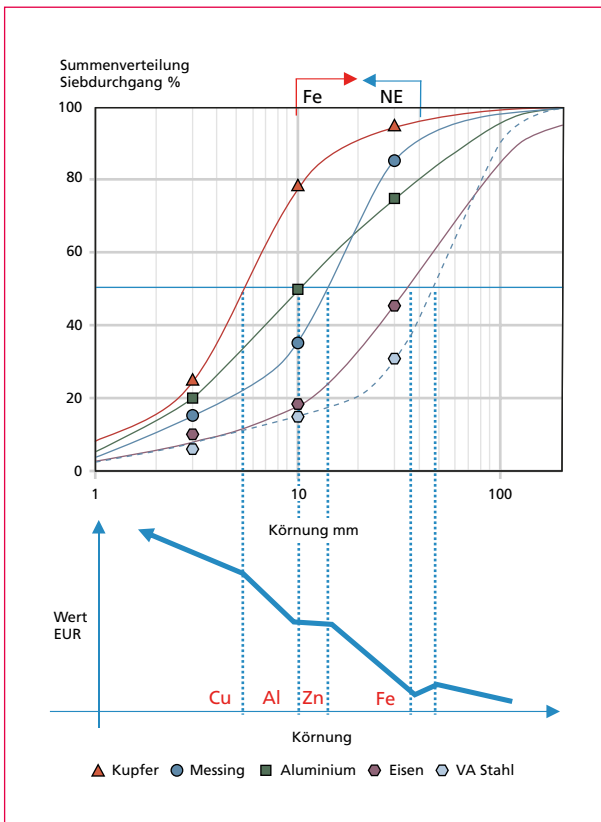


Bild 9:

Kumulative Verteilung metallischen Wertstoffen in Rohschlacke und deren Wert/Kornverteilung bei D_{50}

modifiziert nach: Bunge, R.: Recovery of metals from waste incineration bottom ash, online publication UMTEC, HSR Rapperswil, 2016

Bild 9 beschreibt die metallische Wertstoffverteilung in Rohschlacke nach Bunge [4]. Fe-Metalle treten zu 80 % > 10 mm auf, während NE-Metalle zu 80 % < 40 mm sind. Mit abnehmender Körnung steigt der Wert der auftretenden Metalle. Besonders die Bestandteile einer NE-Fraktion zeigen unterschiedliche Anreicherung, die mit ihrem Wert korrelieren. Der Median von Leichtmetallen wie Al liegt bei etwa 10 mm, das wertvollere Cu kumuliert bei 5 mm.

Mineralische Ausbeuten hängen von nationalen Vorgaben ab, beinhalten jedoch einen geringeren Wertstoffcharakter. Insgesamt treten 32 Ma.-% mineralische Fraktionen in unterschiedlichen Qualitäten auf. Durchläufer wie Keramik und Glas machen etwa 10 Ma.-% aus. Oxidisch gebundene Metalle können mit den installierten physikalisch-mechanischen Methoden nicht verwertet werden. Jedoch liefert die elektrodynamische Fragmentierung Grundlagen für die weitere Verwertung dieser Stoffgruppe in der Zukunft.

5.3. Metalleinschluss in unbehandelter Rohschlacke

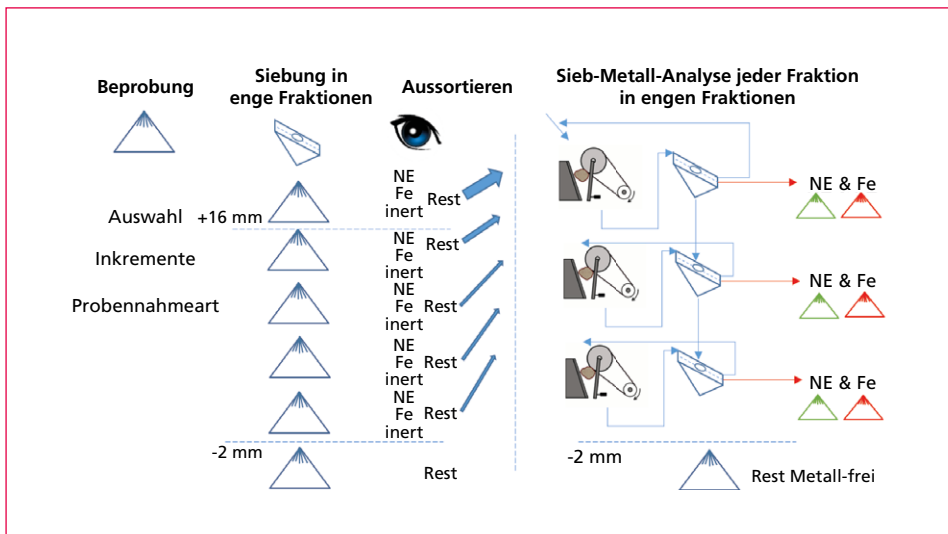


Bild 10: Freisetzung-Analyse basierend auf der UMTEC-Methode

Zur Bewertung von partikulären Metall-Gehalten werden vom schweizerischen Bundesamt für Umwelt [2] spezifische Methoden vorgeschlagen. Die Methode basiert auf dem unterschiedlichen E-Modul von Metallen und Schlacke. Dadurch wird beim Einsatz mit Backen- oder Walzenbrecher Schlacke zu < 2 mm zerrieben, während Metalle nur platt gedrückt werden. Eine genauere Beschreibung der Beprobung, Probenmenge und der Probenbearbeitung ist unter Bunge [4] zu finden.

Der vorgeschlagene Analysevorgang wurde für eine Freilegungsstudie modifiziert. Bild 10 zeigt das generelle Vorgehen. Grundlage ist die Siebung in enge Fraktionen. Angefangen mit der Grobfraction werden zuerst sichtbar liberierte Metalle aussortiert.

exakt gesagt werden wieviel in dieser Fraktion eingeschlossen bleibt. Dennoch ist zu erkennen, dass in den Fraktionen < 16 mm ein signifikanter NE-Anteil eingeschlossen auftritt. Als Konsequenz nimmt mit der Steigerung des Wertinhaltes zu feineren Körnungen der Einschluss des Wertstoffes zu.

Der eingeschlossene Fe-Gehalt variiert in der Fraktion < 40 mm zwar zwischen 20 % und 40 %. Jedoch tritt der Hauptanteil des Fe-Metalls wesentlich gröber auf. In dieser Untersuchung traten nur 30 % des gesamten Fe-Metalls in der Fraktion < 40 mm auf. Mineralische Wertstoffe wie Durchläufer machen etwa 10–13 Ma.-% der gesamten Probe aus.

5.4. Wertstofffreisetzung durch elektrodynamische Fragmentierung

Während des laufenden Betriebes wurde der Effekt ansteigender Energieabgabe der elektrodynamischen Fragmentierung auf die Freisetzung metallischer und mineralischer Wertstoffgehalte überprüft. Dabei wurden Tests mit 4, 6 und 9 kWh/t im Betrieb untersucht.

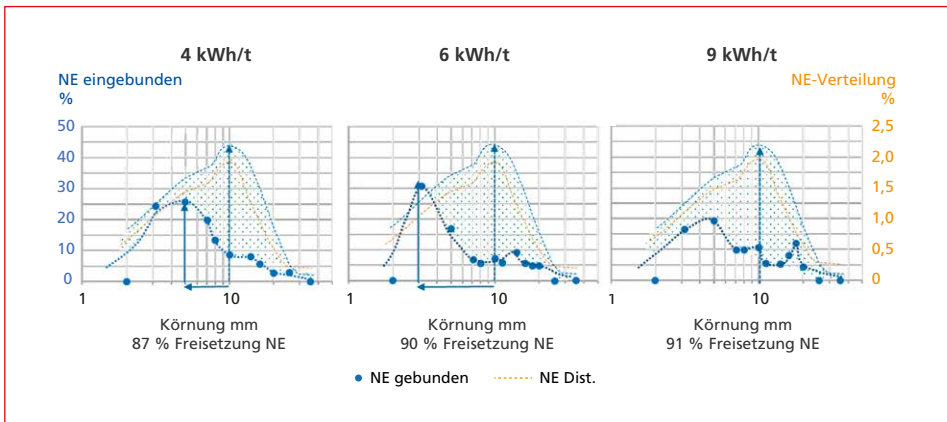


Bild 12: NE-Metall-Freisetzung bei ansteigender Energieabgabe der elektrodynamischen Fragmentierung

Bild 12 beschreibt die zunehmende NE-Freisetzung mit steigender Aufbereitungsenergie. Dabei ist die Ausgangssituation ohne Behandlung in jeder Grafik mit einbezogen, um die Veränderungen deutlich zu machen. Zu erkennen ist, dass die Freisetzung sich von grober hin zu feineren Körnung bei steigender Energieabgabe entwickelt.

Schon bei geringer Energieabgabe von 4 kWh/t ist eine starke Veränderung der Situation erkennbar. Das Maximum der eingeschlossenen NE-Metalle verschiebt sich von 10 mm zu 5 mm und die Freisetzung erhöht sich auf 87 %. Bei 6 kWh/t ist eine weitere Verschiebung der noch eingeschlossenen NE-Metalle zu 3 mm zu erkennen. Der Anteil der aufgeschlossenen NE-Metalle steigt auf 90 % in den Wert-relevanten Fraktionen. Bei 9 kWh/t verbleibt die Verteilung im feinen Bereich, jedoch nimmt die Amplitude ab. Der Anteil der freigesetzten Metalle steigt nur noch geringfügig.

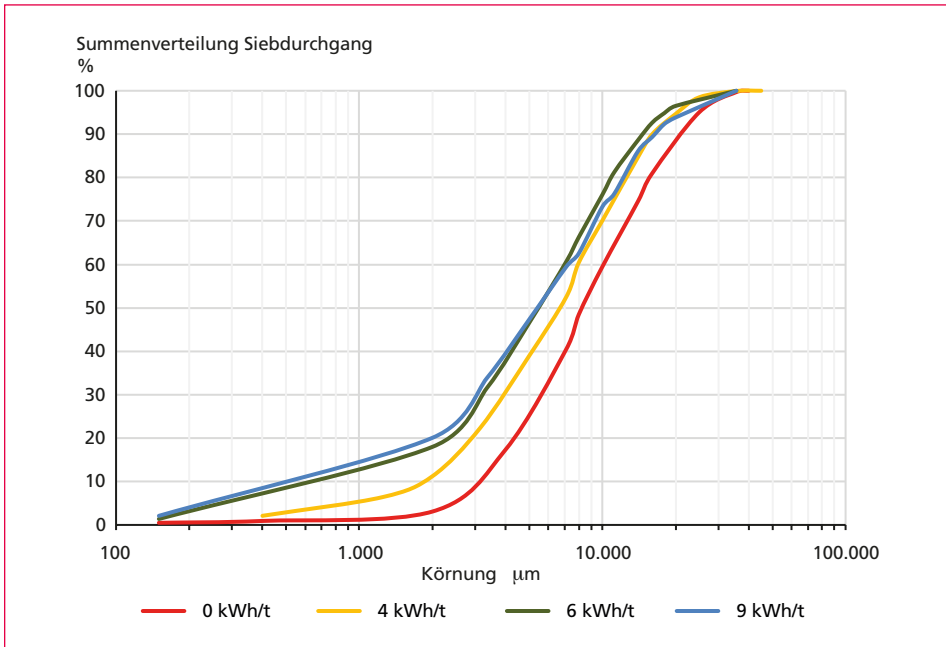


Bild 13: Kornverteilungskurven bei ansteigender Energieabgabe der elektrodynamischen Fragmentierung

Die Fe-Metall-Freisetzung steigert sich auf 80 %. Zu bedenken ist hier der jedoch schon reduzierte Fe-Anteil in den Fraktionen < 40 μm . Der gesamte Fe-Metall-Aufschluss liegt daher wesentlich höher bei > 90 %.

Der zunehmende Aufschluss der Wertstoffe resultiert in einer moderaten Zerkleinerung der Restschlacke. Bild 13 zeigt den geringen Anstieg des Unterkorn < 2 mm auf nur 20–25 %. Der Grobanteil > 10 mm wird stärker beeinflusst und sinkt von 40 % auf 25 %.

Dies zeigt, dass hohe Metall-Ausbeuten zu den feineren und vermehrt eingeschlossenen NE-Metallen ohne starke Übermahlung der Matrix zu erreichen ist. Dadurch können vermehrt Fraktionen mit höherem Wertstoffpotential, wie schwere NE-Metalle erreicht werden. Zudem bleiben mineralische Rohstoffe erhalten. In Einzelpartikeltest konnten Weh und Mosadeghi [17] zeigen, dass Schlacke-Komponenten mit Metall-Einschlüssen intensiver zerkleinert werden. Durchläufer wie Glas oder Keramik unterliegen einem anderen Zerkleinerungsregime und bleiben tendenziell gröber erhalten. Durch die gesteigerte Bearbeitung durch bis zu 9 kWh/t sinkt der erreichbare Anteil der mineralischen Durchläufer > 10 mm nur leicht von 10 % auf etwa 8 % ab.

Der Effekt der verbesserten Freisetzung zu eingeschlossenen und feinen NE-Metall konnte in Zusammenarbeit mit UMTEC [13] bewiesen werden. In einer vergleichenden Studie mit konventioneller Aufbereitung mittels Gutbettwalzenmühlen an abgelagerter Schlacken in Fraktion < 11,2 mm, zeigt die elektrodynamische Fragmentierung bei nur geringfügiger Zerkleinerung eine gesteigerte NE-Metall-Ausbeute.

Während Gutbettmühlen nahezu das gesamte Material auf < 2 mm zerkleinern, konnte die NE-Ausbringung bei 70 % Qualität des Konzentrates von 26 % auf nur 40 % gesteigert werden. Demgegenüber steht eine Steigerung auf 62 % durch die elektrodynamische Fragmentierung. Zu berücksichtigen ist dabei die unklare Effizienz der benutzten Wirbelstromstromanlage, sowie Anteile der NE-Fraktion, die nicht durch die Wirbelstromanlage zu erreichen sind wie z.B. VA-Stahl. Eigene Untersuchungen zeigen in der Fraktion $< 11,2$ mm einen relevanten Anteil von bis zu 10 % VA-Stahl in der NE-Fraktion. Bei einer angenommenen elektrodynamischen Freisetzung um 80–90 % und einer Sortiereffizienz von etwa 80–90 % wird eine maximale Ausbringung um die 60–65 % realistisch. Im Umkehrschluss zeigt die intensive Zerkleinerung konventioneller Bearbeitung einen signifikanten Verlust – höchstwahrscheinlich durch Übermahlung – von über 20 % gegenüber der elektrodynamischen Fragmentierung.

Die Steigerung der NE-Metall-Ausbeute bei geringfügiger Zerkleinerung bestätigt, dass die elektrodynamische Fragmentierung das weitere Wertstoffpotential der Restschlacke erhält und NE-Metall-Ausbeute aus relevanten Fraktionen maximiert ohne massive Überzerkleinerung oder mehrstufige Zerkleinerung zu benötigen – ein klarer Vorteil des innovativen Verfahrens.

5.5. Sortiererfolg

Auf die Fragmentierung folgend wird die Schlacke in drei Materialströme klassiert: (i) < 2 mm Unterkorn; (ii) 2–10 mm und (iii) > 10 mm. Die Fraktionen > 2 mm werden jeweils durch aushebende Magnetscheidung von Fe-Metallen entfrachtet. Darauf folgt jeweilig die NE-Rückgewinnung durch Wirbelstromscheidung. In der Fraktion > 10 mm werden nach der Metallabscheidung Durchläufer mittels optischer Sortierung zurückgewonnen.

Während des Betriebstestes, bei ansteigender spezifischer Energie, wurde der Sortiererfolg anhand des Restmetallgehaltes der Restschlacke und der Qualität des erreichten Konzentrates bewertet und mit den Freisetzungsdaten (Bild 12) nach der Fragmentierung verglichen.

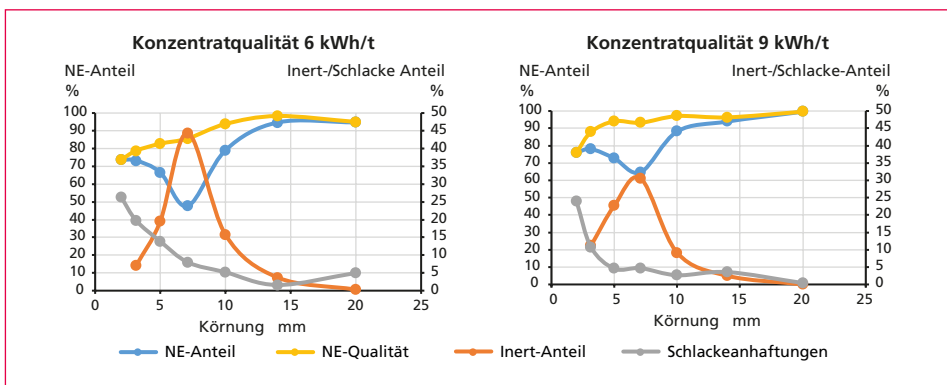


Bild 14: Darstellung der Qualität des Konzentrates bei 6 und 9 kWh/t Energieeinsatzes; blaue und orangefarbene Linien zeigen NE-Metalle und Störstoff-Anteile; gelbe und graue Linien zeigen von Störstoffen korrigierte NE-Anteile und Schlackenanhaftungen

Die ansteigende Freisetzung macht sich zwischen 4 und 6 kWh/t bemerkbar. Während die Freisetzung von 87 % auf 90 % ansteigt, ändert sich die erreichte Ausbeute von etwa 78 % auf 83,7 %. Die Freisetzung zu 9 kWh/t steigt nur marginal auf 91 %, die Ausbeute verbleibt bei 83,7 %. Auffällig ist, dass die Ausbeute hinter der Freisetzung zurückbleibt. Freisetzungsstudien zur Bestimmung des Restmetallgehaltes an sortierten Restschlacke zeigen, dass zwar 60 % bei 6 kWh/t und 80 % bei 9 kWh/t der verbliebenen NE-Metalle frei vorliegen aber nicht abgeschieden wurden. Gründe dafür sind zum Einen die Effizienz und Einstellung der Wirbelstrom-Anlagen. Zusätzlich wurde ein Anteil VA-Stahl entdeckt, der durch die vorhandene Technik nicht abgeschieden werden kann. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde auf eine passende VA-Sortiertechnik für die Fraktion < 40 mm verzichtet. Grobfractionen werden händisch vom VA-Stahl befreit.

Der Anteil VA-Stahl in den Fraktionen 2–40 mm machen etwa 10 % des vorhandenen NE-Gehaltes aus. Wie in den Bildern 9 und 11 angedeutet sinkt der VA-Anteil zu 2 mm. Dadurch sind die installierten Sortieranlagen auf maximal 90 % NE-Metall-Ausbeuten limitiert, auch wenn die Freisetzung höher ausfällt. Bei einer 95%-igen Effizienz der Wirbelstromanlagen sind Ausbeute von 85–86 % NE realistisch zu erreichen.

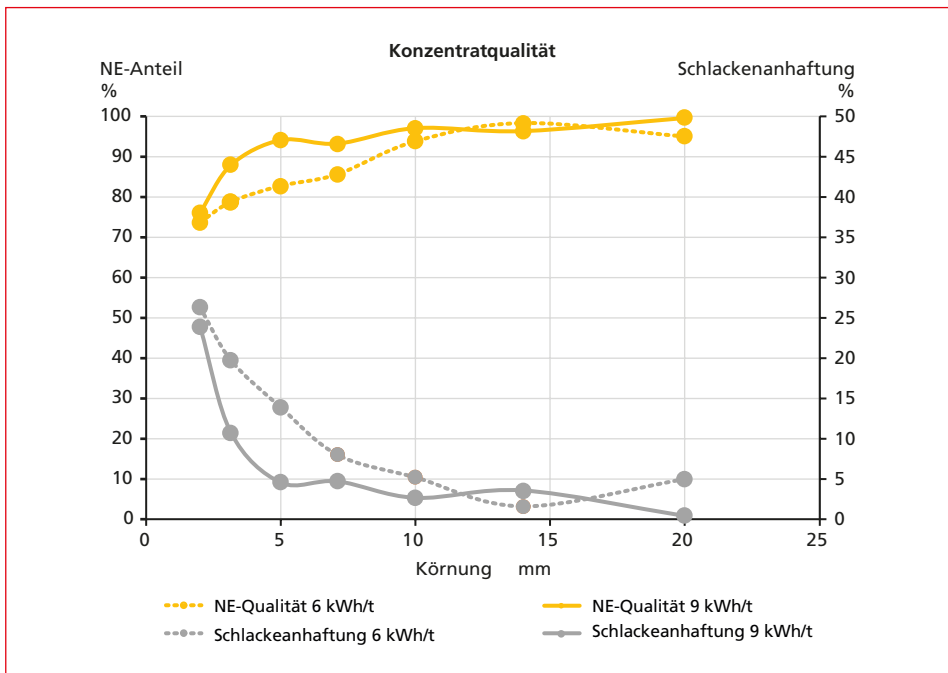


Bild 15: Korrigierte Konzentratqualität ohne Störstoffe

Ein weiterer Faktor des Sortiererfolges ist die Qualität des NE-Metall-Konzentrates (Bild 14). Nach entsprechender Probennahme wurden die Konzentrate klassiert und begutachtet. In einem ersten Schritt wurden offensichtliche Störstoffe, wie deplatzierte Durchläufer separiert. Das restliche Konzentrat wurde mechanisch gebrochen, um Schlackeanhaftungen zu entfernen. Dabei konnten bei 6 und 9 kWh/t Energieaufgabe

eine unterschiedliche Entwicklung festgestellt werden (Bild 14). Offensichtlich ist eine Häufung mineralischer Störstoffe in der Fraktion < 10 mm bei beiden Proben. Diese entsteht durch die erweiterte Körnungsaufgabe von 2–10 mm auf den Wirbelstromscheider. Die Störstoffe sind weitestgehend freigesetzte mineralische Durchläufer und machen etwa 15–20 % in beiden Konzentraten aus. Auffällig ist die Reduzierung der Störstoffe zu höheren Energien.

Bild 15 zeigt die korrigierten Konzentrate mit abnehmenden Schlackenanhaftungen zu höheren Aufbereitungsenergien. Schlackenanhaftungen reduzieren sich von 11 % bei 6 kWh/t zu 6,5 % bei 9 kWh/t. Bei 6 kWh/t ergeben sich bei > 10 mm schon sehr reine NE-Metalle. Bei 9 kWh/t sind schon ab > 5 mm saubere NE-Metalle zu erhalten. Die zu höheren Aufbereitungsenergien stagnierende Freisetzung erklärt sich daher, dass die zusätzliche Energie von schon fast vollständig freigesetzten Metalle konsumiert wird. Die erhaltene Verbesserung des Konzentrates kann wirtschaftlich entschieden werden, falls bessere Qualitäten oder höherer Durchsatz mit akzeptablen Ausbeuten zu erreichen sind.

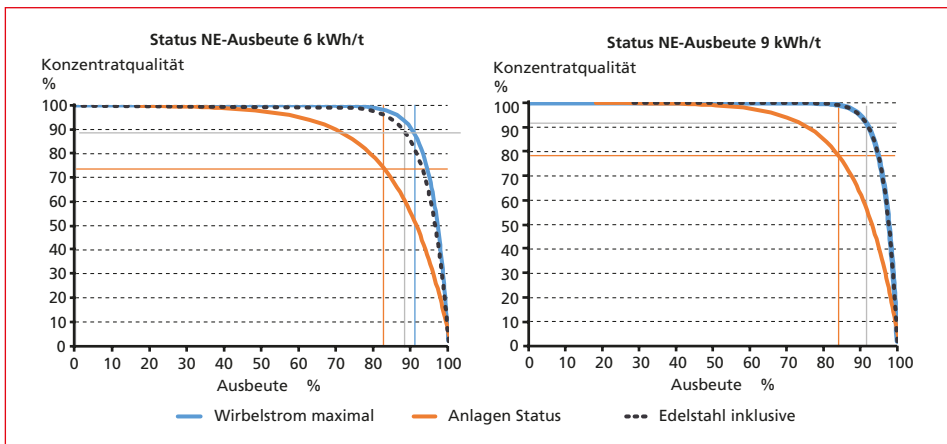


Bild 16: Darstellung des Sortiererfolges bei 6 und 9 kWh/t

Bild 16 fasst den Sortiererfolg bei 6 und 9 kWh/t zusammen. Bei 6 kWh/t ergibt die gegenwärtige Anlagenkonfiguration eine Ausbeute von 83,7 % bei einer Konzentratqualität von 72 %. Durch eine optionale VA-Abscheidung des liberierten Edelstahls kann die Ausbeute auf 89 % gesteigert werden, wenn Störstoffe effizient weggeführt werden. Die maximal erreichbare Ausbeute bei vollständiger Rückgewinnung der liberierten Metalle würde einen hypothetischen Wert von 90,5 % erreichen. Dies entspricht in etwa dem erreichten Freisetzungsgrad. Bei einer Energieabgabe von 9 kWh/t ergeben sich nur leichte Veränderungen, die sich hauptsächlich auf die Qualität des Konzentrates beziehen. In der gegenwärtigen Anlagenkonfiguration verbleibt die Ausbeute bei 83,7 % bei einer gesteigerten Qualität des Konzentrates von 79 %. Durch eine optionale VA-Scheidung des freigesetzten Edelstahls könnte die Ausbeute auf 91 % gesteigert werden. Dies entspricht der fast vollständigen Rückgewinnung aller freigesetzten NE-Metalle.

Im Falle der installierten Anlage ergibt die Behandlung durch die elektrodynamische Fragmentierung eine klare Steigerung der Ausbeute. Die Steigerung von 6 auf 9 kWh/t zeigt Vorteile, die durch die installierte Sortierung jedoch nicht erfasst werden kann. Somit ist eine Bearbeitung der Rohschlacke bei 6 kWh/t ausreichend, um bei der gegebenen Anlagenkonfiguration die Metall-Ausbeute wirtschaftlich zu maximieren ohne eine nachfolgende komplexe Sortierung zu etablieren.

6. Anlagenmodifikationen und Betriebsergebnis während gestaffelter Inbetriebnahme

Während der stufenweise Inbetriebnahme wurden erste Erfahrungen mit der Gesamtanlage erreicht und sukzessive Anpassungen, Optimierungen und Kundenwünsche umgesetzt. In einem ersten Schritt wurde wie oben beschrieben die elektrodynamische Fragmentierung auf 6 kWh/t eingependelt. Diese konnte verlässlich angewandt werden. Im laufenden Betrieb ergaben sich Verbesserungen und Optimierungen verschiedener Anlagenkomponenten. Die drei wichtigsten sind folgend zusammengefasst: Wasseraufbereitung, die Verarbeitung von Unverbrannten und der Arbeitsaufwand.

6.1. Anlagenmodifikationen während Inbetriebnahme

Wasseraufbereitung

Die direkte Verarbeitung der Rohschlacke benötigt eine intelligente Materialführung und ausreichendes Wassermanagement. Die Rohschlacke wird nicht kontinuierlich aus dem Entschlacker abgezogen. Der Stößelaustrag verursacht periodisch sehr unregelmäßige Anlieferung in Bezug auf Volumen, Feuchte und Körnung. Da keine Zwischenlagerung oder Homogenisierung der Rohschlacke durchgeführt werden kann, müssen Materialbehandlungen die Schwankungen kompensieren. Messungen zeigen einen Massestrom im statistischen Mittel von 1,8 t/h. Variationen sind häufig mit kurzzeitige Spitzen von 0 t/h bis zu 6 t/h. Diese massiven, kurzzeitigen Variationen sind eine Herausforderung für eine kontinuierliche Schlackenwäsche und der nachfolgenden Wasseraufbereitung. Bei gleichbleibender Wassermenge kann der unterschiedlich angelieferte Festkörperanteil Verstopfungen verursachen, da sich die hydraulischen Bedingungen stetig ändern. Anfänglich wurde die Wasseranlage mit separater Sand- und nachfolgender Schlammabscheidung über Schrägklärer mit Flockungsmittel betrieben. Diese Konfiguration benötigt einen möglich kontinuierlichen Massestrom, tolerierte aber Schwankungen mit Faktor 3. Da zu Spitzenzeiten höhere Schwankungen auftraten wurde das Risiko von Blockaden und Havarien im laufenden Betrieb zu groß. Besonders die Abfuhr des Schlammes mit ausreichender Dosierung des Flockungsmittels konnte im Dauerbetrieb nicht garantiert werden. Daraus folgend wurde die Wasseraufbereitung sukzessive angepasst und ausgebaut. Dabei wurden die allgemeine Wassermenge verdoppelt und Zwischenpuffer eingesetzt, um homogenere Bedingungen zu schaffen. Zusätzlich wurde die aufgeteilte Sand- und Schlammbehandlung durch Presskammerfiltern ersetzt, wodurch auf eine Flockung des Schlammes verzichtet werden kann.

Unverbranntes

Schwimmendes Material wie Unverbranntes und Schwimmschlacke beeinträchtigten die elektrodynamische Fragmentierung, die Klassierung und die nachfolgende Sortierung. Der bestehende, innerhalb des trockenmechanischen Anlagenbereiches, installierte Windsichter konnte nur die grobe Organik abführen und hatte durch den wechselnden Feuchtegehalt der Schlacke eine geringe Effizienz von 20–30 %. Schwimmschlacke konnte gar nicht abgeführt werden, die somit im Dauerbetrieb die Prozessbecken der elektrodynamischen Fragmentierung verstopften. Siebeläge verstopften und Fraktionen gelangten nicht zu der vorgesehenen Sortierung. Dadurch erhöhte sich der Arbeitsaufwand signifikant, um die relevanten Anlagenteile offen zu halten. Darauf folgend wurde ein Schwimm/Sink-Verfahren entwickelt, um verlässlich Leichtgut aus der Rohschlacke nach der Schlackenwäsche zu entfernen. Mit der Adaption des Verfahrens konnte der Anteil des Leichtgutes signifikant minimiert werden. Erste Messungen zeigen eine Effizienz um 80 % zur Ausschleusung des Leichtgutes. Dadurch ist ein kontinuierlicher Betrieb bei reduziertem Arbeitsaufwand durchzuführen.

Genereller Arbeitsaufwand

Um die Rohschlacke kontinuierlich ohne Zwischenlagerung zu bearbeiten ist ein 24/7-Betrieb der Aufbereitungsanlage nötig. Feuchte Rohschlacke ist sehr schwierig in der Materialbehandlung. Durch die Feuchte ergeben sich rasch Anbackungen, die durch die hydraulischen Eigenschaften des Materials schnell verfestigen können. Der Arbeitsaufwand zur Reinigung ist in Schlackenanlagen generell hoch. Die Erweiterung des Aufbereitungskreislaufes bei gleichbleibendem Personalaufwand hat sich als organisatorisch schwierig gezeigt. Um die Belastung sinnvoll zu reduzieren wurde der Betrieb der Anlage aufgeteilt. Die bestehende trockenmechanische Aufbereitung und anschließende Schlackenwäsche wird weiterhin im 24/7-Betrieb belassen. Durch die Installation eines Zwischensilos kann das Produkt der Schlackenwäsche gebunkert werden. Da die Feinfraktion weggeführt ist, kann das Material unbedenklich zwischengelagert werden. Die nachfolgende elektrodynamische Fragmentierung und Separation wird bei erhöhten Durchsatz in einem 16/7-Betrieb gefahren. Durch den geteilten Betrieb können zum einen Störfälle besser kompensiert werden und die allgemeinen Arbeitsbelastung für das bestehende Personal optimiert werden. So kann die erweiterte Anlage bei ähnlichen Personalkosten betrieben werden.

6.2. Betriebsergebnis während Inbetriebnahmephase

Nach Installation und anfänglich Komponententests wurde die Anlage 2017 zunehmend in Betrieb genommen und erste Erfahrungen gesammelt. Die oben beschriebenen Optimierungen wurden erkannt und schrittweise umgesetzt. Die bestehende trockenmechanische Aufbereitung wurde dabei ständig in Betrieb gehalten, während die nasse Aufbereitung graduell zugeschaltet wurde. Dabei ist die zeitliche Verschiebung hauptsächlich auf die Änderung der Wasseraufbereitung zurückzuführen. Bild 17 zeigt die gestaffelte Inbetriebnahme 2017. Dabei wurde im 4. Quartal eine Verfügbarkeit von

75 % erreicht. Diese wurde begrenzt durch die jährliche Ofenrevision mit 2 Wochen Stillstand und weiteren Baumaßnahmen vor Ort am Ende des Jahres. Ziel der Anlage ist ein Betrieb bei einer Verfügbarkeit von > 85 %. Dies sollte 2018 erreicht werden.

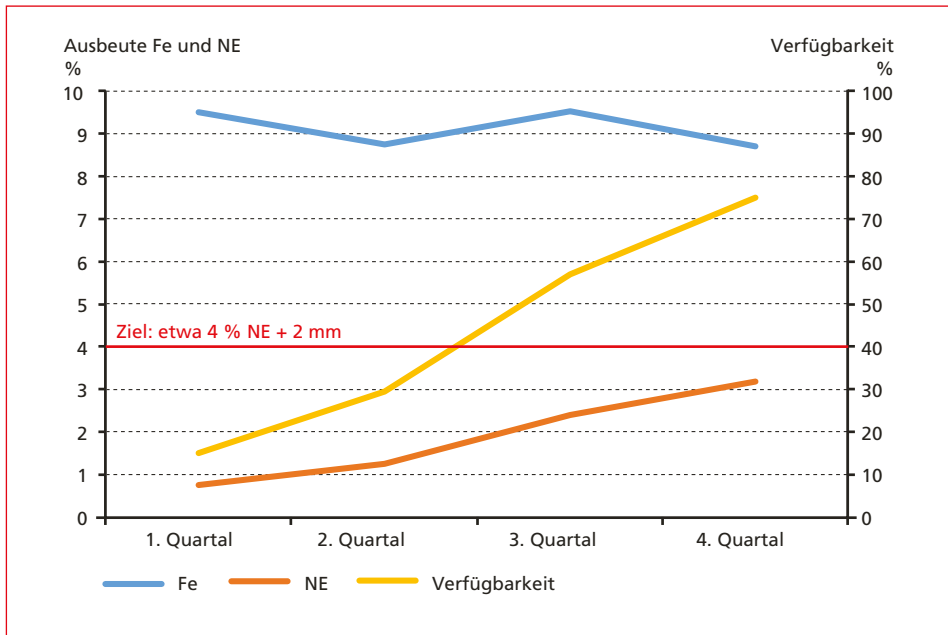


Bild 17: Anlagentwicklung im Jahr 2017 mit der stufenweise Inbetriebnahme des nassen Aufbereitungskreislaufs in Hinsicht Verfügbarkeit und Fe- und NE-Metall-Ausbeuten

Bild 17 zeigt die Auswirkungen der graduellen Inbetriebnahme des nassen Aufbereitungskreislaufes auf die Metallausbeuten. Zu erkennen ist die stabile Verteilung von zurückgewonnen Fe-Metalle. Diese schwankt um 9 % und wird von der trockenmechanischen Aufbereitung dominiert. Der zum 3. Quartal leicht ansteigende Trend wird durch die geplanten Betriebsunterbrechung im 4. Quartal leicht gedrückt. Dem gegenüber steht die Steigerung des NE-Anteils über das gesamte Jahr von 0,8 % auf 3,2 %. Bei einer anvisierten Qualität des Konzentrates von 70–75 % entspricht dies einer Ausbeute zwischen 70 % und 80 % im Rahmen des reduzierten Betriebes. Ziel ist es bei einer Verfügbarkeit von > 85 % die NE-Ausbeute (Konzentrat-Wert) auf > 4 % zu steigern.

Der Erfolg der Aufbereitung zeigt sich im Wert der bis dahin erreichten NE-Konzentrate (Bild 18). Offensichtlich ist neben der Steigerung des NE-Anteils auch eine Veränderung des Konzentrates mit einer massiven Wertsteigerung. Die innerhalb der Grobfraktion rückgewonnenen NE-Fraktionen zeigen durch einen geringen Schwermetall-Anteil einen reduzierten Wert. Durch die Zuschaltung der elektrodynamischen Fragmentierung steigt der Schwermetallgehalt im Konzentrat von 7 % auf über 20 % bei einer Konzentratqualität von 70 % an. Dadurch verdoppelt sich der Wert des Konzentrates mit direkten wirtschaftlichen Vorteilen für den Kunden.

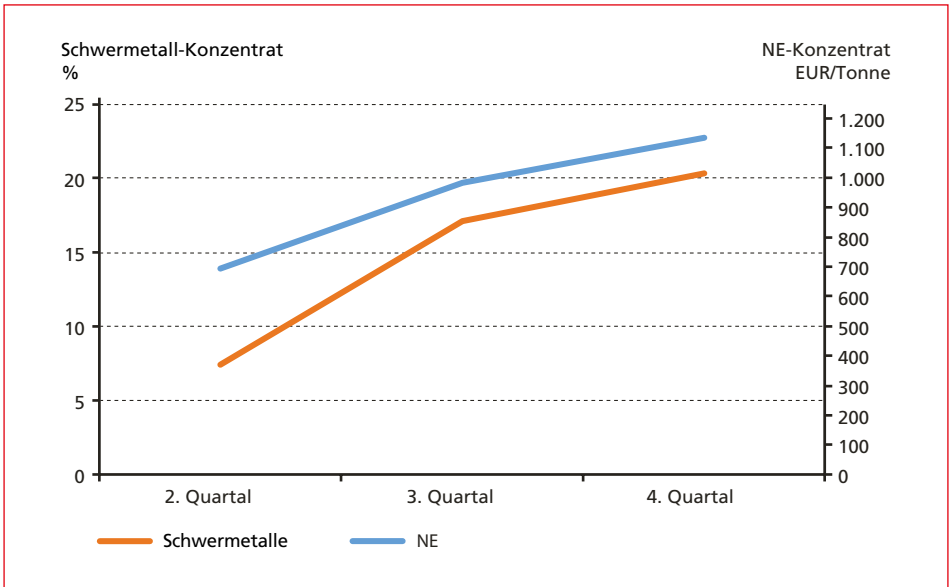


Bild 18: Entwicklung des NE-Konzentrates durch die stufenweise Inbetriebnahme der elektrodynamischen Fragmentierung im Jahr 2017

Die verbesserte Freisetzung, besonders der in der feineren Schlacke eingeschlossenen Schwermetalle hat somit einen direkten Einfluss auf die bestehende Wirtschaftlichkeit der Anlage. Durch den fortlaufenden gesteigerten Betrieb sollte sich die Situation durch die weitere Steigerung der NE-Metall-Ausbeute und der Konzentratqualität auf 75–80 % weiter verbessern.

7. Zusammenfassung

Diese Studie beschreibt den Implementierungsprozess der elektrodynamischen Fragmentierung innerhalb der Schlacke-Aufbereitungsanlage der KVA Fribourg, Schweiz. Durch eine intelligente Kombination aus trockenmechanischer und nasser Aufbereitung kann Rohschlacke direkt ohne Zwischenlagerung weiterverarbeitet werden. Durch die stufenweise durchgeführte Inbetriebnahme wurden benötigte Optimierungen und Anpassungen vorgenommen, ohne den generellen Betrieb zu stören. Diese Strategie ergab eine robuste und effiziente Anlagenlösung für den Kunden die am wirtschaftlichen Optimum arbeitet. Der reduzierte Platzbedarf konnte durch eine modulare Bauweise und optimierten Anforderungen an die Aufbereitung effizient genutzt werden.

Mit dem Einsatz der elektrodynamischen Fragmentierung können im offenen Kreislauf Wertstoffe über ein weites Kornspektrum erreicht werden ohne komplexe Anlagenkonfigurationen zu benötigen. Der hohe Freisetzungsgrad an metallischen Rohstoffen erfüllt offizielle Grenzwerte und maximiert die NE- und Fe-Metall-Ausbeute der nachfolgenden, konventionellen Sortierung. Zudem können mineralische Wertstoffe zurückgewonnen werden und Deponiekosten reduziert werden. Tests im laufenden

Betrieb bestätigen das erhöhte Freisetzungsvermögen der elektrodynamischen Fragmentierung. Weitere Untersuchung der Restschlacke und der Konzentrate im laufenden Betrieb beschreiben den Sortiererfolg. Die elektrodynamische Fragmentierung maximiert dabei die Wertstoffrückgewinnung relevanter Metalle aus der Rohschlacke ohne mehrstufige Zerkleinerung bei einer reduzierten Sortierung. Gegenwärtig wird die Anlage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bei 6 kWh/t betrieben. Das dabei erreichte Betriebsergebnis bestätigt die Vorteile des Verfahrens durch eine Steigerung der Metallausbeute und der Veränderung der NE-Konzentrat-Zusammensetzung. Die verbesserte Freisetzung erhöhte sukzessive den Schwermetallanteil im Konzentrat und konnte somit den Wert des Konzentrates verdoppeln.

Die detaillierten Untersuchungen zur elektrodynamischen Fragmentierung im industriellen Betrieb und deren direkte Relation zu den Ergebnisse im ersten Betriebsjahr der modifizierten Schlackenaufbereitungsanlage zeigen eindrucksvoll die Vorteile des innovativen Prozesses. Des Weiteren stellte sich die entwickelte Anlagentechnik als sehr robust heraus. Benötigte Optimierungen und Anpassungen waren hauptsächlich innerhalb der Wasseraufbereitung nötig. Durchgeführte Anpassung und Optimierungen wurden erfolgreich abgeschlossen. Dadurch konnte dem Kunden eine verlässliche und robuste Anlagen-Lösung übergeben werden. Die deutlich gesteigerten Metall-Ausbeuten in Kombination mit dem Potential weitere mineralische Rohstoffe zurück zugewinnen machen so eine nasse Aufbereitung auch bei sehr viel geringeren Durchsätzen wirtschaftlich sehr interessant.

8. Literatur

- [1] Alwast, H.; Riemann, A: Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacke aus Abfallverbrennungsanlagen, Studie des Umweltbundesamtes, 2010
- [2] Bundesamt für Umwelt – BAFU (Hrsg.): Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich. Bern: Umwelt-Vollzug Nr. 1715: 82 S., Stand 2017
- [3] Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppe, P.; Schultheis, C.; Strassner, R.: Application of pulsed HVdischarges to material fragmentation and recycling, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, Nr. 5, 2000, S. 625-635
- [4] Bunge, R.: Recovery of metals from waste incineration bottom ash, online publication UMTEC, HSR Rapperswil, 2016
- [5] Bunge, R.: Wertstoffgewinnung aus KVA-Rostasche. In: Schenk, K. (Hrsg.): KVA-Rückstände in der Schweiz. Der Rohstoff mit Mehrwert. Bundesamt für Umwelt, Bern, 2010, S. 170-182
- [6] Dittrich, S.; Thome, V.; Seifert, S.; Mayer, M.: Effektive Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken mittels Hochspannungsimpulsen. Chem. Ing. Tech., 88, No.4, 2016, S. 461-468
- [7] Euler, T.: Ressourcenschutz in der Abfallwirtschaft – MVA-Aschen als Sekundärrohstoffquelle für Metalle. Bachelor-Arbeit, Hochschule Rhein-Main, Wiesbaden Rüsselsheim, 2017
- [8] Eggenberger, U.; Mäder, U.: Charakterisierung und Alterationsreaktionen von KVA-Schlacken. In: Schenk, K. (Hrsg.): KVA-Rückstände in der Schweiz. Der Rohstoff mit Mehrwert. Bundesamt für Umwelt, Bern, 2010, S. 104-115
- [9] Parvaz, D.; Weh, A.; Mosaddeghi, A.: Pre-concentration Attributes of SELFRAG High Voltage Treatment. Conference proceedings: European Symposium for Comminution and Classification. At: Chalmers University of Technology; Gothenburg, Sweden, 2015

- [10] Seifert, S.; Thome, V.; Karlstetter, C.; Maier, M.: Elektrodynamische Fragmentierung von MVA-Schlacken – Zerlegung der Schlacken und Abscheidung von Chloriden und Sulfaten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen • Schlacken • Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 353-365
- [11] Shi, F.; Zuo, W.; Manlapig, E.: Pre-concentration of copper ores by high voltage pulses. Part 2: opportunities and challenges. *Miner. Eng.* 79, 2015, S. 315-323
- [12] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung von Sekundärabfällen aus der Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen • Schlacken • Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 79-278
- [13] UMTEC: IGENASS. CH-Dokumente-Factsheets. [Online] April 2016. https://www.igenass.ch/fileadmin/user_upload/igenass.ch/Dokumente/Factsheets/160526_Zerkleinerung_GBWM_EDF.pdf, 2016, abgerufen am: 02.06.2016
- [14] van der Wielen, K.P.; Pascoe, R.; Weh, A.; Wall, F.; Rollinson, G.: The influence of equipment settings and rock properties on high voltage breakage. *Miner. Eng.* 46-47, 2013, S. 100-111
- [15] Weh, A.: Effiziente Metallrückgewinnung aus Kehrrechtverbrennungssasche mittels Hochspannungsimpulsverfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 167-191
- [16] Weh, A.; Käppeler, J.: Industrieller Einsatz des Hochspannungsimpuls-Verfahren zur Aufbereitung von Verbrennungsrückständen. Conference proceeding: Recycling DepoTech. At Montan Universität Leoben; Leoben, Austria, 2016
- [17] Weh, A.; Mosaddeghi, A.: Breakage characteristics of incinerator bottom ash in the HV pulse power process. Conference: Sustainable Minerals'16, At: Falmouth, UK, 2016
- [18] Zuo, W.; Shi, F.; Manlapig, E.: Pre-concentration of copper ores by high voltage pulses. Part 1: principle and major findings. *Miner. Eng.* 79, 2015, S. 306-314
- [18] Zuo, W.; Shi, F.; van der Wielen, K. P.; Weh, A.: Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine. *Miner. Eng.* 84, 2015, S. 64-73

Ansprechpartner



Dr. rer. nat. Alexander Weh
SELFRAG AG
Leiter Technikum
Head Seals Application
Biberenzelgli 18
3210 Kerzers (CH)
Telefon: 0041-31-7503201
E-Mail: a.weh@selfrag.com

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.