
Masterarbeit

**Systematische aufbereitungstechnische
Bewertung ausgesuchter Einsatzstoffe der
Montanwerke Brixlegg AG**

Vorgelegt von:

Martin Hartwig WRIENZ, BSc

0935258

Betreuer:

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Böhm

Leoben, 28.09.2017



Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung
Montanuniversität Leoben

8700 Leoben, Franz-Josef-Straße 18
Telefon: +43 3842 402 – 1801
Fax: +43 3842 402 – 1802
E-Mail: aufbereitung@mu-leoben.at

Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.“

Datum, Unterschrift

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Kurzfassung

In Brixlegg in Tirol, steht die Schmelzhütte der Montanwerke Brixlegg AG, welche hochreine (> 99,99 % Cu) Kupferanoden aus rein sekundären Rohstoffen gewinnt. Der pyrometallurgische Prozess ist dreistufig und jede dieser Stufen verlangt einen unterschiedlichen Gehalt an Kupfer im Aufgabegut. Diese Arbeit legt das Hauptaugenmerk darauf Möglichkeiten zu finden, drei ausgewählte Einsatzstoffe für den ersten Schmelzprozess im Schachtofen verbessert aufzubereiten. Diesem Schachtofen werden Einsatzstoffe mit einem Kupfergehalt von bis zu 50 % aufgegeben. Ziel dieser Arbeit ist es, mit physikalischen Aufbereitungsmethoden Produkte in ihrem Anlieferungszustand von etwaigen Störstoffen zu entfrachten. Diese Störstoffe sind Chrom-, Aluminium und Eisenträger, sowie Kunststoffe. Durch Anwendung der Methode der aufbereitungstechnischen Rohgutanalyse auf die kupferhaltigen Einsatzmaterialien, wird das bestmögliche Aufbereitungsergebnis auf Basis analysenscharfer Trennung nach physikalischen Eigenschaften gezeigt. Die Schadstoffentfrachtung gelingt, jedoch mit nicht unerheblichen Cu-Verlusten. Vor- und Nachteile der weiteren Aufbereitung werden diskutiert.

Abstract

The Montanwerke Brixlegg AG is a secondary copper smelter in Brixlegg in Austria. It is producing very pure (> 99,99 % Cu) copper anodes out of secondary material only. The smelter comprises three consecutive kiln processes and each of them requires a different grade of copper in the input material. Main focus of this master thesis is the input material for the first of these three kilns, the shaft kiln. It gets input material with a maximum grade of 50 % copper. Aim is to show methods for physical separation of disruptive materials, which contain elements like chromium, aluminium, iron and plastic material. The method of systematic physical raw materials analysis is adapted to the copper containing secondary materials. Three samples are investigated. It is shown that the reduction of the phases containing the deleterious elements is possible at the expense of high copper losses. The benefit of subsequent processing are discussed

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangssituation	7
1.2 Rohgutbedingte Probleme in der Pyrometallurgie	8
1.3 Erläuterung der momentanen Einkaufsstrategie und auftretender Probleme	12
2 Aufgabenstellung	14
3 Zusammenfassung	15
4 Proben	19
5 Überblick über mögliche Aufbereitungsmethoden von Kupferschrott	21
5.1 Zerkleinerung	21
5.1.1 Guillotinescheren	24
5.1.2 Shredder (Hammerbrecher)	26
5.1.3 Rotor- und Schraubenreißer	30
5.1.4 Rotorscheren bzw. Schneidmühlen	32
5.1.5 Querstromzerspaner	36
5.2 Klassierung	37
5.2.1 Vibro-Stangensizer	38
5.2.2 Wurfsiebe	39
5.2.3 Spannwellensieb	40
5.2.4 Taumelsieb	42
5.3 Sortierung	43
5.3.1 Sortierung nach der Endfallgeschwindigkeit	43
5.3.2 Magnetscheidung	53
5.3.3 Elektrosortierung	63
5.3.4 Sensorgestützte Sortierung nach optischen Eigenschaften	68
6 Prozessschaubild einer Aufbereitungsanlage für Sekundärrohstoffe	73
7 Systematische aufbereitungstechnische Rohgutanalyse von Hütteneinsatzstoffen	76
7.1 Merkmalsklassen- und Elementanalyse	81
7.2 Phasenanalyse und Elementverteilung auf Phasen	83

7.3	Versuch der Entwicklung einer Nachreinigungsstufe für die vorliegenden Fraktionen	88
8	Ergebnisse der Rohgutanalyse der untersuchten Hütteneinsatzstoffe	95
8.1	Übersichtsergebnisse aus der Merkmalsklassenanalyse	96
8.2	MMT	99
8.3	LOACKER	104
8.4	WURZER	109
9	Diskussion der Ergebnisse	114
10	Ausblick	119
11	Anhang A – Abbildungen	120
11.1	MMT	120
11.2	LOACKER	132
11.3	WURZER	140
12	Anhang B – Tabellen	148
12.1	MMT	148
12.2	LOACKER	152
12.3	WURZER	156
13	Anhang C – Phasenanalysen	160
13.1	0,5/0 mm MP 0,12 T	160
13.2	1,0/0,5 mm MP 1,2 T	178
13.3	1,0/0,5 mm SG	186
13.4	2,0/1,6 mm LG	199
14	Abbildungsverzeichnis	203
15	Tabellenverzeichnis	210
16	Literaturverzeichnis	212

1 Einleitung

Die Montanwerke Brixlegg AG betreibt auf dem Standort Brixlegg die Gewinnung von Kupfer in einem gekoppelten pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Prozess. Sie ist in Österreich der größte Kupfererzeuger mit einer Jahresproduktion von ca. 100.000 t Kathodenkupfer. Ab den 30iger Jahren des vorigen Jahrhunderts kam der Bergsegen der umliegenden Erzbergbaue zum Erliegen, wobei bis zum Jahr 1977 noch aus einem salzburgischen Bergbau Erzkonzentrat verhüttet wurde. Dies und die zunehmende Industrialisierung mit dem Auftreten von großen Mengen an Metallschrott und Recyclingmaterial führten zur Umstellung der Verarbeitung von Primärerzen auf einen Schmelzbetrieb der rein sekundäre Rohstoffe nützt. [1]

1.1 Ausgangssituation

In den Montanwerken Brixlegg AG fallen, abhängig von der Menge an Störstoffen im Aufgabegut des pyrometallurgischen Prozesses, große Mengen an Schlacke an. Dies nimmt seinen Ursprung in der eingebrachten Menge an Störstoffen, wie Aluminium (Al), Chrom (Cr), Bismut (Bi), Wolfram (W), Vanadium (V), Molybdän (Mo) sowie Kunststoffen und organischen Bestandteilen durch die sekundären Rohstoffe. Diese Störstoffe können im Laufe der Aufbereitung aus verschiedensten Gründen nicht vollständig abgetrennt werden. Sie besitzen aber einen großen Einfluss auf die Schlackenphasen in den einzelnen Öfen. Die Montanwerke Brixlegg AG hat das Bestreben, den Eintrag an genannten Störstoffen in die pyrometallurgischen Prozesse, vorwiegend Chrom, Aluminium, Kunststoffe und organische Bestandteile durch Zusammenarbeit mit den Produzenten der sekundären Rohstoffe zu minimieren, um etwaige Probleme weitestgehend zu reduzieren. Positiv zu beurteilen sind die Gehalte an Edelmetallen, wie Gold (Au), Silber (Ag), Platin (Pt) oder Palladium (Pd) und der Metalle Blei (Pb), Zink (Zn), Zinn (Sn) und Nickel (Ni). Blei, Zink und Zinn werden über die Gasphase der Öfen ausgetragen und können separat verkauft werden. Nickel wird durch die der Verhüttung nachfolgende Elektrolyse im

Anodenschlamm angereichert und separat durch stufenweise Fällungsreaktionen rückgewonnen.

1.2 Rohgutbedingte Probleme in der Pyrometallurgie

Die Schmelzhütte in Brixlegg besteht aus drei Öfen, dem Schachtofen, dem Konverter und dem Anoden- bzw. Flammofen, sowie einer nachfolgenden Elektrolyseanlage. Die Öfen bedürfen unterschiedlicher Zusammensetzungen in den Aufgabematerialien um die geforderte Reinheit von > 99 % in den, nach dem Flammofen, gegossenen Anoden zu erreichen. Abbildung 1 veranschaulicht das Fließbild sowie die Stoffströme in den Montanwerken Brixlegg.

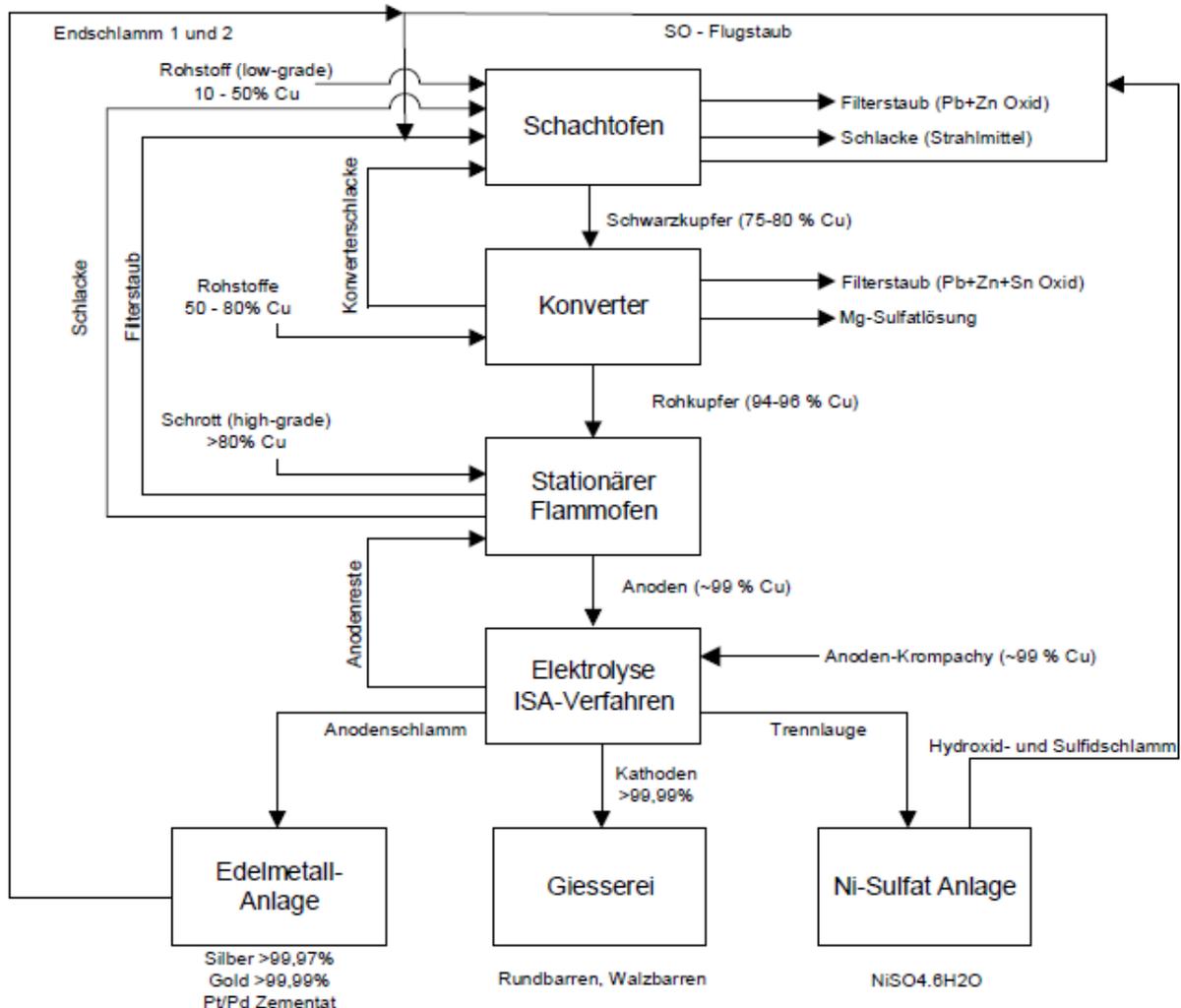


Abbildung 1: Prozessschaubild der Montanwerke Brixlegg AG [1]

Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die verschiedenen Öfen unterschiedliche Gehalte an Kupfer in den Aufgabematerialien verarbeiten und die Abreicherung von etwa Blei, Zink, Zinn oder Nickel unterschiedlich beeinflussen. Der Schachtofen und der Konverterofen sind im umgedrehten *Knudsen-Altmetallkonverterverfahrensschema* geschaltet. [2]

Um eine gleichmäßige Aufgabe in den Schachtofen zu gewährleisten, muss das Material passend zusammengestellt und vergleichmäßiggt werden. Die dafür verwendete Methode der Vergleichmäßigungshalde ist in Abbildung 2 ersichtlich.



Abbildung 2: Vergleichmäßigungshalde vor dem Schachtofen, Größenabschätzung durch das weiße DIN A4 Papiers in der linken Hälfte des Bildes

Probleme im Schachtofen treten bei einem zu hohen Anteil an feinkörnigem Material und Kunststoff auf. Diese beginnen im Ofenkopf zu sintern und verursachen ein Zuwachsen des Kopfes. Das Wartungsintervall des Ofens umfasst drei bis vier Wochen mit einem viertägigen Stillstand zur Wartung. Ebenso beeinflussen die Elemente Vanadium, Aluminium und Chrom die Schmelztemperatur der Schlacke hin zu einem höheren Schmelzpunkt. Chrom bedingt zudem eine starke Erhöhung der Viskosität der Schlacke. Nach dem Abstich des Schachtofens, der ungefähr alle 20 Minuten erfolgt, gelangt die Schmelze (Schwarzkupfer) samt Schlacke in einen Warmhalteofen. In den Warmhalteofen werden drei bis vier Abstiche des Schachtofens eingebracht. Die Schmelze, welche aus dem Schachtofen kommt, muss beim zweiten, dritten und vierten Abstich immer durch die bereits aufschwimmende Schlacke treten. Wenn über längere Zeit (ungefähr drei Stunden) der Gehalt an Chrom, Aluminium, Wolfram, Vanadium oder Molybdän den Wert von 5 % übersteigt, bildet sich hoch viskose Schlacke, welche das durchtretende Kupfer in Kugelform in ihre Struktur einbettet und somit den Wertmetallaustrag mindert. Ebenfalls wird die Separation durch Gravitation zwischen Schlacke und Kupferschmelze gehemmt. Die Schlacke wird vor der Weiterverarbeitung im Konverter bestmöglich abgezogen und mit ihr das enthaltene Kupfer. Aus der Schlacke wird das Produkt *Granos* erzeugt.[3]

Für ein besseres Verständnis des Reduktionsvorganges von Kupfer im Schachtofen sei auf das nachfolgende Ellingham-Diagramm in Abbildung 3 verwiesen. Aus dem Ellingham-Diagramm ist abzulesen, dass abhängig von der *Gibbs'schen Energie* Metalle, je nach absolutem Wert dieser Energie zueinander, reduziert oder oxidiert werden. Für den speziellen Fall des Kupfer-Aluminium-Eisen Systems, kann abgeleitet werden, dass Kupfer mit der positiveren *Gibbs'schen Energie* in seine metallische Form, Aluminium und Eisen hingegen in ihre oxidische Form überführt werden. Dies ist, wie aus dem Diagramm ersichtlich, unabhängig von Temperatur und Sauerstoffpartialdruck. Als tiefer führende Literatur sei an dieser Stelle auf [2] verwiesen.

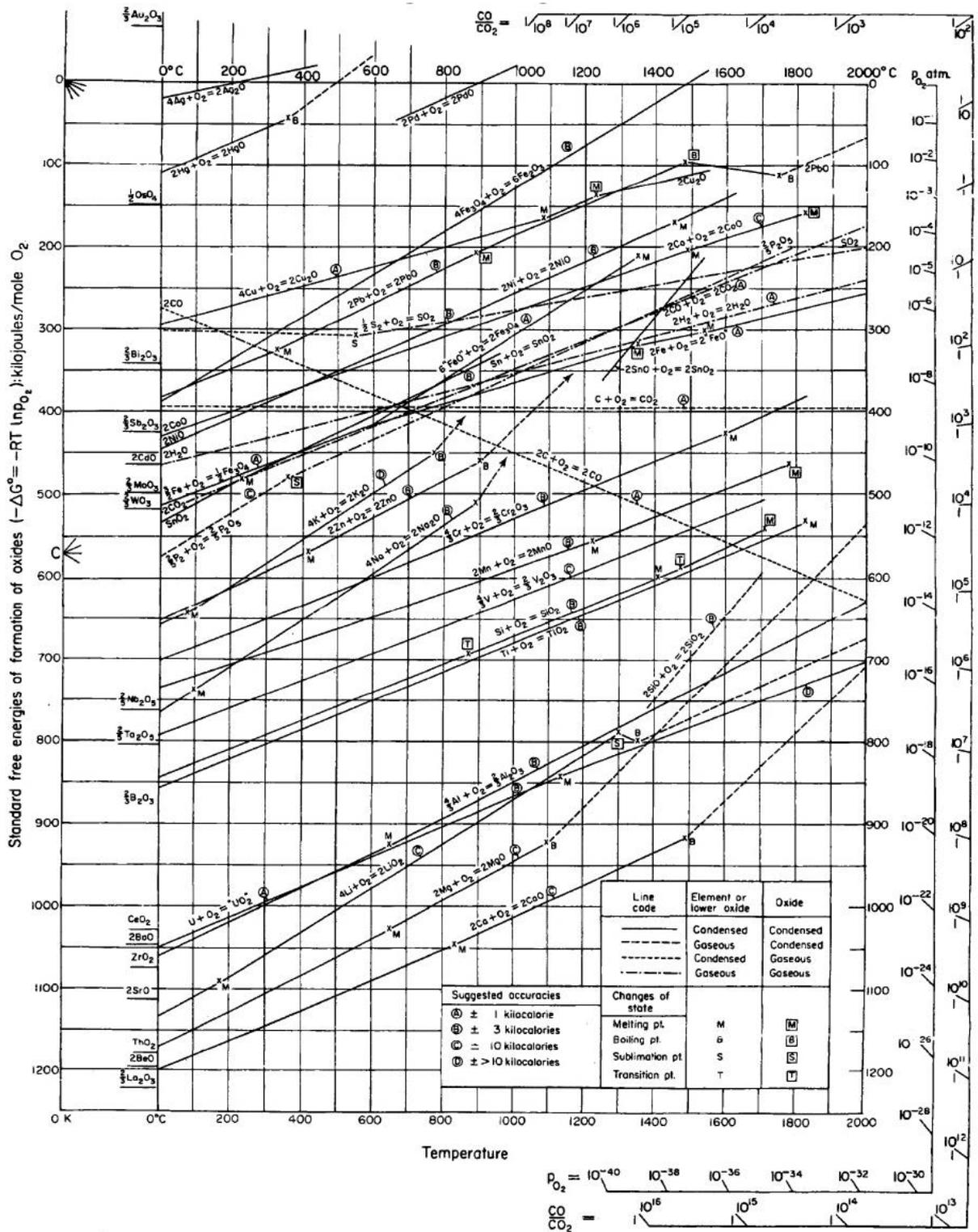


Abbildung 3: Ellingham Diagramm für Metalloxide [2]

1.3 Erläuterung der momentanen Einkaufsstrategie und auftretender Probleme

Folgende Jahresmengen an Schrotten werden den einzelnen Öfen im Einkauf zugeordnet und in jenen pyrometallurgisch verarbeitet [1]:

- 16.400 t mit einem Kupfergehalt von 10 – 50 % für den Schachtofen,
- 1.550 t von 50 – 80 % Kupfergehalt für den Konverterofen und
- 55.000 t mit > 80 % Kupfergehalt für den Anodenofen.

Der in Brixlegg eingeschmolzene Kupferschrott wird weltweit gehandelt. Es gibt den Direktbezug von einem Produzenten, sowie auch die Möglichkeit Einsatzstoffe für die Hütte bei Zwischenhändlern, sogenannten Streckenhändlern, zu beziehen. Der Einsatzstoff, welcher von einem Streckenhändler bezogen wird, wird nach internationalen Standards gehandelt. Für den deutschsprachigen Raum ist dieser Standard laut VDM (Verband deutsche Metallhändler e.V). festgelegt. Mit dem angloamerikanischen Raum wird nach ISRI (Institute of Scrap Recycling Industrie) gehandelt, wobei diese Klassifikationen nur Gehalte an Kupfer festlegen, aber keine Festlegung an Grenzwerten für andere enthaltene Störstoffe aufweisen. Somit erfolgt nur eine grobe Einteilung der Schrottsorten.

Die Bemusterung und Auswertung der Wertstoffinhalte geschieht in Brixlegg. Gibt es einen erhöhten Störstoffgehalt, wird dieser erst durch auftretende Probleme in der Hütte erkenntlich. Gekauft wird die Ware, nachdem festgestellt wurde ob der geforderte Kupfergehalt eingehalten wird. Ist dies nicht der Fall, wird das Material auf Kosten des Streckenhändlers bzw. Direktproduzenten wieder abtransportiert. Die Bezahlung erfolgt nach Kupferinhaltseinheiten. Diese Vorgehensweise wird vorab vertraglich fixiert. Der Preis für eine Kupferinhaltseinheit liegt nicht fest, sondern unterliegt den Regeln des Marktes. Ein transparenter Markt dafür ist nicht vorhanden. [4]

Die übermäßige Beschränkung von Störstoffen seitens der Montanwerke Brixlegg AG kann sich negativ auf die Verkaufsbereitschaft auswirken. Wobei das Interesse der Produzenten, zumindest im deutschsprachigen Raum, darin besteht, möglichst sortenreine Kupferprodukte zu erstellen, da andere Metalle separat verkauft

werden können. Probleme diesbezüglich treten vermehrt nur bei Streckenhändlern auf, die international handeln. Die höheren Störstoffgehalte sind auch dadurch bedingt, dass gezielt minderwertige Schrotte für den Einsatz im Schachtofen gekauft werden. [4]

Eine weitere Möglichkeit Schrott zu beziehen, ist eine Endfallstelle bei Kabel- oder Blechproduktionsanlagen sowie Gießereibetrieben, in denen Kupferschrott in sehr reiner Form anfällt. [4]

Der Handel von Kupferschrott EU intern geschieht Mehrwertsteuerfrei um Steuerbetrug zu verhindern. Aus dem amerikanischen Raum nach ANNEX-Deklarierungen (nach EU-Abfallverbringungsverordnung). Nur bei Lieferungen aus Drittstaaten erfolgt eine Verzollung. Der Handel mit asiatischen Lieferanten wird in Bandbreiten des Kupfergehaltes vollzogen. So wird das Material mit z.B. 94 – 96 % Kupfergehalt geliefert und der Preis auch für diese Schwankungsbreite festgelegt. [4]

2 Aufgabenstellung

Die Montanwerke Brixlegg AG verarbeitet kupferhaltige Schrotte mit Hilfe unterschiedlicher Schmelzaggregate und Elektrolyse. Im Rohgut enthaltene Störstoffe führen zu erhöhten Kupferverlusten in der Schlacke oder erhöhtem Aufwand in der Vermeidung von Schadstoffemissionen.

Ausgesuchte Proben aus dem Rohgut unterschiedlicher Produzenten sind auf weiterführende Aufbereitbarkeit hinsichtlich der Abreicherung der erkannten Schadstoffe zu prüfen. Auf Basis der Daten ist ein technisch umsetzbarer Verfahrensvorschlag zu erarbeiten.

Dazu ist im Literaturstudium ein Überblick über den Stand der Technik zur Aufbereitung von Kupferschrotten zu geben, eine Methode zur Charakterisierung der Aufbereitbarkeit auszuwählen und zu beschreiben sowie die Untersuchung auf Aufbereitbarkeit inklusive chemischer Elementanalyse und Phasenanalyse darzustellen. Die Ergebnisse sind hinsichtlich eines möglichen Aufbereitungserfolges auszuarbeiten.

Die Möglichkeiten einer aufbereitungstechnischen Umsetzung sind aufzuzeigen und zu diskutieren.

3 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden drei Proben ausgesuchter Hütteneinsatzstoffe für die Montanwerke Brixlegg AG auf ihr Potential für eine Störstoffabscheidung untersucht. Als Störstoffe sind Aluminium, Chrom und Kunststoffe anzusehen. Die maximal erlaubten Störstoffgehalte für Einsatzstoffe im Schachtofen wurden vorab von der Montanwerke Brixlegg AG, wie in Tabelle 1 gezeigt, festgelegt.

Tabelle 1: Angaben zu Grenzwerten über Störstoffe in den Hütteneinsatzstoffen für den Schachtofen laut Montanwerke Brixlegg AG

Störelement	LG-Mat	HG-Mat	Bemerkung Problem
Al, Cr, Refraktäre	je < 3%	je < 3%	verursachen höheren Schlackenschmelzpunkt sowie mehr Menge
Organik (Fett, Kunststoff, Öl, Holz etc.)	je < 2%	je < 2%	Chargierprobleme (Ausflammen, Zuwachsen des Ofenkopfes) sowie erhöhte CO- und Kohlenwasserstoff- Emissionen im Abgas

Probleme im Schachtofen treten bei einem zu hohen Anteil an feinkörnigem Material und Kunststoff auf. Diese beginnen im Ofenkopf zu sintern und verursachen ein Zuwachsen des Kopfes. Die Elemente Aluminium und Chrom erhöhen neben dem Schmelzpunkt der Schlacke ebenso die Schlackenmenge. Chrom bedingt zudem eine starke Erhöhung der Viskosität der Schlacke.

Die Proben wurden von den Montanwerken Brixlegg AG ausgewählt und erstellt und an das Labor für Aufbereitung und Veredlung in Leoben versandt. Die Proben mit den Bezeichnungen MMT, LOACKER und WURZER besitzen eine maximale Partikelgröße von 10 mm und weisen Gehalte an Kupfer zwischen 70,47 % und 45,08 % in der Aufgabe auf. Die Aluminiumgehalte liegen zwischen 3,59 % und 33,92 %, jene an Chrom im Bereich von 0,03 % und 0,69 % bezogen auf die Aufgabe und Kunststoff zwischen 0,32 % und 8,62 % Gehalt. Die Rohgutbeschreibung befindet sich in Kapitel 4.

Einer Identifizierung von Möglichkeiten zur Abtrennung von Störstoffen liegt immer eine Rohgutanalyse zugrunde. Diese Rohgutanalyse in analysenscharfer Weise führt zu Aussagen über die Verteilung von Elementen und Phasen in den Merkmalsklassen. Die Methodik der aufbereitungstechnischen Rohgutanalyse nach [5] wird in Kapitel 7 erklärt.

Für diese Arbeit werden die Merkmale Korngröße, Stoffdichte und Magnetisierbarkeit gewählt. Die Korngröße wird über analysenscharfe Handsiebung charakterisiert, die Magnetisierbarkeit durch Prüfung mit dem Handmagneten bei 0 mm Polabstand (0,12 T) bzw. mit einem Induktionswalzenscheider (bei 1,2 T gemessen als Minimalwert auf der Walze bei einer Spaltweite von 23 mm zwischen Eisenkern und Walze, Drehzahl der Walze im Trennschritt 20 – 25 U/min und einer Stromstärke von 6,5 A).

Die nasschemische Analyse der Produkte wird durch Nassaufschluss in Königswasser laut interner Arbeitsanweisung der Abteilung für Qualitätssicherung der Montanwerke Brixlegg AG durchgeführt. Die Lösungen werden in den jeweils passenden Konzentrationsbereich für das zu detektierende Element verdünnt und in einem ICP-OES Gerät Typ *Optima 5X00* von *PerkinElmer* analysiert.

Die Phasenanalyse erfolgt am Rasterelektronenmikroskop Typ *JSM-IT300* von *JEOL* am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie an Anschliffen ausgesuchter Merkmalsklassen für die Probe MMT.

Aus der Rohgutanalyse werden Ergebnisse bezüglich der Merkmalsklassenverteilung, der Verwachsungsverhältnisse, der chemischen Zusammensetzung der Merkmalsklassen und der Phasenzusammensetzung der Merkmalsklassen generiert. Die Ergebnisse sind als bestmögliches Trennergebnis im Labormaßstab zu sehen. Eine Übersicht dieser Resultate ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2: Übersicht der Resultate der Rohgutanalyse

Aufgabe	Masseausbringen Aufgabe [%]	Gehalte [%]					Inhaltseinheiten [% ²]				
		AL	Cr	Cu	Fe	KS	Al	Cr	Cu	Fe	KS
MMT	100	3,76	0,69	70,47	4,43	0,40	375,58	69,36	7047,32	443,11	40,18
LOACKER	100	3,59	0,08	68,20	0,53	6,20	359,43	7,52	6820,43	53,50	619,74
WURZER	100	33,92	0,03	45,08	0,48	8,62	3391,92	2,70	4508,24	48,09	862,43
SG ¹	Masseausbringen SG [%]	Gehalte [%]					Inhaltseinheiten [% ²]				
		AL	Cr	Cu	Fe	KS	Al	Cr	Cu	Fe	KS
MMT	74,64	0,20	0,02	82,62	0,06	0,00	15,18	1,43	6167,24	4,47	0,00
LOACKER	74,35	0,08	0,00	88,97	0,00	0,00	5,67	0,00	6614,37	0,00	0,00
WURZER	37,50	1,18	0,00	94,83	0,00	0,00	44,21	0,00	3556,47	0,00	0,00
MP ² + LG ³	Masseausbringen MP und LG [%]	Gehalte [%]					Inhaltseinheiten [% ²]				
		AL	Cr	Cu	Fe	KS	Al	Cr	Cu	Fe	KS
MMT	25,36	16,50	2,68	33,82	17,30	1,58	418,46	67,93	857,52	438,64	40,18
LOACKER	25,65	13,79	0,29	8,03	2,09	24,16	353,76	7,52	206,06	53,50	619,74
WURZER	62,50	53,57	0,04	15,23	0,77	13,80	3347,72	2,70	951,77	48,09	862,43

¹ SG: Schwergut aus der Dichtesortierung

² MP: Summe aus Stark- und schwachmagnetischem Produkt

³ LG: Leichtgut aus der Dichtesortierung

Aus diesen Ergebnissen ist ableitbar, dass bei allen drei untersuchten Materialien eine Magnetscheidung und eine Dichtesortierung zum Unterschreiten der geforderten Grenzwerte führt, sowie zu Kupfergehalten in den Konzentraten von > 85%. Das Konzentrat ist als Schwergut mit einer Dichte > 3,0 g/cm³ erzeugt aus dem unmagnetischen Fraktion definiert. Diese Abreicherung der Schadstoffe zbd die Anreicherung von Kupfer sind aber mit zum Teil erheblichen Kupferverlusten von bis zu 21 % des Kupferinhaltes verbunden. Die Details dazu bis hin zu den korngößenbezogenen Ausbringenswerten werden in Kapitel 8 beschrieben bzw. sind den Bilanztafeln in Anhang B zu entnehmen.

Die Ausarbeitung in Form von Henry-Reinhardt-Schaubildern ist in Kapitel 8 zu finden. Mit deren Hilfe kann das bestmögliche Trennergebnis für einen gewünschten Chrom- bzw. Eisengehalt abgelesen werden und eine Vorauswahl für die notwendige magnetische Flussdichte und damit den zielführenden Magnetscheider gefunden werden.

Die Ergebnisse stellen den Grenzwert der bestmöglichen Trennung dar, wie sie nur im Labor zu erzielen sind. Die aufgezeigten Trennschnittlagen mögen als Ausgangspunkt für Pilotversuche in einem Verfahrensablauf dienen, wie er in Kapitel 9 beschrieben wird. Er stellt eine Abfolge von Siebung auf Wurfsieben, Dichtentrennung auf Lufttrennherden und Magnetscheidung in unterschiedlichen Flussdichtebereichen dar. Investitionskosten für eine handelsübliche apparative Ausführung werden abgeschätzt. Sie stellen eine erste Einschätzung des Aufwands dar, mit dem am Ort der Hütte oder am Ort des Herstellers zu rechnen ist. Jedenfalls ist dies mit einer Erhöhung der Kosten für das Rohgut verbunden. Einige Diskussionspunkte sind in Kapitel 9 angeführt. Eine endgültige Beurteilung der Wirtschaftlichkeit kann nur vom Hüttenbetrieb selbst getroffen werden.

4 Proben

Die Proben, für die in dieser Arbeit untersuchten Fraktionen, wurden von den Montanwerke Brixlegg AG ausgewählt und zur Verfügung gestellt. Die Probenmasse wurde von den Montanwerken Brixlegg AG festgelegt, die Probennahme wurde von Mitarbeitern der Montanwerke auf nicht näher erläuterte Art durchgeführt.

Die drei Einsatzstoffe, welche einer aufbereitungstechnischen Untersuchung unterzogen werden, sind das Rohgut LOACKER, das Rohgut WURZER und das Rohgut MMT. Der Zustand der Proben, wie sie nach Lieferung ins Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung vorlagen, sind Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 zu entnehmen.



Abbildung 4: Rohgut MMT bei Anlieferung

Probe: MMT

Eingangsdatum 22.06.2017

Eingangsmasse: ca. 4,0 kg

E-Nr.: 45 040



Abbildung 5: Rohgut LOACKER bei Anlieferung

Probe: LOACKER

Eingangsdatum 22.06.2017

Eingangsmasse: ca. 2,5 kg

E-Nr.: 45 277



Abbildung 6: Rohgut WURZER bei Anlieferung

Probe: WURZER

Eingangsdatum 22.06.2017

Eingangsmasse: ca. 3,0 kg

E-Nr.: 44 881

5 Überblick über mögliche Aufbereitungsmethoden von Kupferschrott

Die Auswahl der Apparate erfolgte angepasst an die speziellen Erfordernisse der Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott (WEEE, waste of electrical and electronic equipment) angepasst. Die Grundlage für die Gliederung der Verfahren und die Auswahl lieferten die einschlägigen Vorlesungen am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben (wie z.B. Abfallaufbereitung und Aufbereitung von Sekundärrohstoffen). Diese wurden um weiterführende Literatur ergänzt.

Im vorliegenden Fall der Einsatzstoffe für die Montanwerke Brixlegg AG, werden ausgewählte Aggregate vorgestellt und kurz in ihrem Funktionsschema umrissen. Diese Aggregate sollen die Erstellung einer optimalen Aufgabe für die Öfen gewährleisten. Diese Aufgabe soll eine Partikelgröße im Bereich von 1 – 800 mm haben. Bei einem zu hohen Gehalt an Partikeln mit < 1 mm kommt es zum Ausblasen dieser Fraktionen. Ebenso entstehen Anbackungen am Kopf des Schachtofens die entfernt werden müssen, um ein vollständiges Zuwachsen des Ofenkopfes zu verhindern. Teile > 800 mm können aus konstruktiven Gründen nicht in die Öfen chargiert werden. Auch muss eine Abtrennung von etwaigen Störstoffen erfolgen, da das Ziel, eine möglichst optimale Aufgabe, aus Forderungen der Montanwerke Brixlegg AG heraus, gewährleistet sein muss.

5.1 Zerkleinerung

Zerkleinerung im Allgemeinen beruht auf der Überwindung von Bindungskräften innerhalb eines Werkstoffes durch Ausbildung von Mikrorissen und Spannungsspitzen. Erreicht wird diese Überwindung durch Einbringen äußerer Kräfte und Momente oder durch Zuführung von thermischer Energie. Die Auswahl der Apparate in der Zerkleinerung hängt von den Prozessanforderungen ab. Grundsätzlich werden folgende Aufgaben der Zerkleinerung unterschieden [6]:

- Herstellung von Partikelgrößenverteilungen die auf die Anforderungen des Fertigproduktes oder der nachgestellten Prozesse abgestimmt sind. Zudem

soll diese eine Erhöhung der Schüttdichte ermöglichen bzw. die Fördereigenschaften der Sekundärrohstoffe verbessern

- Erreichen eines ausreichenden Aufschlussgrades der verbundenen Phasen der eine möglichst optimale Sortierung gewährleistet

Für das Erreichen der genannten Anforderungen steht eine Vielzahl von Aggregaten zur Verfügung. Ihre Auswahl wird maßgeblich von der Art und dem Verhalten des zu zerkleinernden Stoffes bei äußerer mechanischer Belastung bestimmt. Die Materialeigenschaften der Sekundärrohstoffe weisen zumeist elastisches (sprödes) bzw. plastisches Bruchverhalten auf. Eine Einteilung hierzu wird in Tabelle 3 getroffen.[7]

Tabelle 3: Bruchverhalten von Sekundärrohstoffen und Abfällen [8]

Bruchverhalten von Sekundärrohstoffen und Abfällen	
Elastisch	plastisch
<ul style="list-style-type: none"> • Bauschutt • Glasbruch • Gußeisen und NE-Metall-Gußlegierungsschrotte • Schlacken, Krätzen u. a. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stahl und NE-Metall-Knetlegierungsschrotte • Kunststoffabfälle • Pappen- und Papierabfälle • Holzabfälle • Textilabfälle • Pflanzenabfälle

Der Unterschied zwischen sprödem bzw. zähem Bruchverhalten ist aus dem nachfolgenden Spannungs-Dehnungsdiagramm in Abbildung 7 ablesbar.

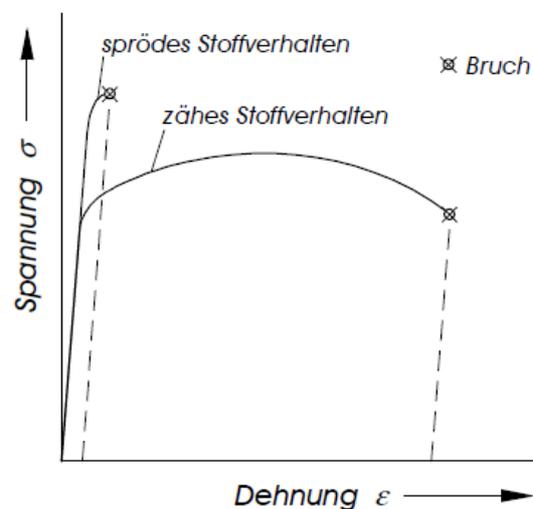


Abbildung 7: Spannungs-Dehnungsdiagramm [9]

Sekundärrohstoffe, hier im speziellen WEEE, erfahren bei Belastung große Verformungen und verbrauchen, bevor sie zerteilt werden, aufgrund ihres plastischen Bruchverhaltens sehr viel Formänderungsenergie je Volumeneinheit. Somit kann über ihre Festigkeit und Verformungsart abgeschätzt werden, wieviel Energie aufgewandt werden muss um eine Zerstörung des Materialverbundes oder eine Zerkleinerung zu erreichen. [7]

Der Zerkleinerungsvorgang lässt sich in drei Teilvorgänge gliedern [8]:

- *die elastische und plastische Verformung*
- *die Schneidphase (Bildung von Rissen)*
- *die Bruchphase von der Anrissbildung bis zur Trennung des Werkstoffes*

WEEE können daher nur zerkleinert und geteilt werden, wenn sie bis zu ihrer Bruchdehnung belastet und deformiert werden und das belastete Volumen möglichst klein gehalten wird. Einen Überblick über die verschiedenen Belastungsarten und die dazugehörigen Zerkleinerungsaggregate bietet Tabelle 4. [7]

Tabelle 4: Einteilung der Zerkleinerungsaggregate nach ihrer Beanspruchungsart [8]

Einteilung von Apparaten nach ihrer Beanspruchungsart		
Aufgabenstellung	Geeignete Beanspruchung	Zerkleinerungsaggregat
Herstellung von Partikelgrößenverteilungen und -klassen	Scher- und Schneidbeanspruchung	Translationsscheren, Rotorscheren, Rotorschneider, Schneidmühlen
	Zugbeanspruchung in Verbindung mit Biegung und Torsion (→Reißbeanspruchung)	Rotorreißer (langsam laufend), Hammerreißer (schnell laufend)
	Biegebeanspruchung	Schienenbrecher
Aufschlusszerkleinerung (Auflösen von Verbindungen verschiedener Materialien)	Reißbeanspruchung	Hammerreißer (Schraubenreißer, langsam laufend)

Als Besonderheit in der Recyclingindustrie gibt es die Möglichkeit einer kryogenen Vorbehandlung des Verbundes aus Kunststoff und Metall mit flüssigem Stickstoff. Dies bedingt einen Versprödungseffekt bei Thermoplasten und Elastomeren. Bei

nachfolgender Prallbeanspruchung dieser Kunststoffe wird ein sehr effektiver Aufschluss von Kabelschrotten durch abplatzen des Isolierungsmaterials erreicht. Als Aggregat sei beispielhaft ein Wirbelschneckenkühler der Bauart *Messer Group GmbH* in Abbildung 8 angeführt. [10]

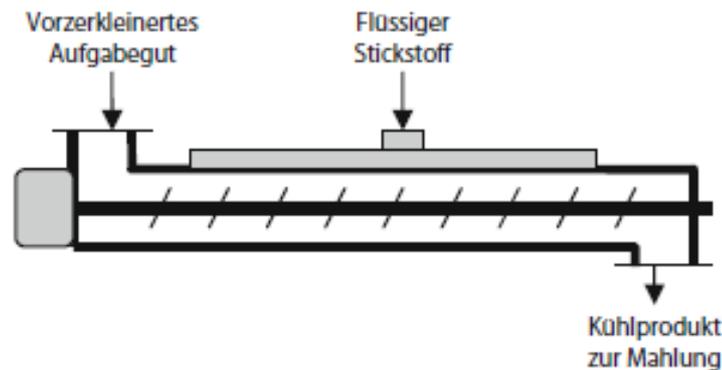


Abbildung 8: Wirbelschneckenkühler der Messer Griesheim GmbH für eine kryogene Vorbehandlung [10]

Diese Methode gestattet auch die Verarbeitung von metallbeschichteten Kunststoffteilen, wie sie in der Autoindustrie eingesetzt werden. Ebenso gelingt es gummierte Metallteile in den Recyclingprozess zurück zu führen. Als weitere Apparate sind Wirbelrohrkühler und Kühltunnel anzuführen. [10]

5.1.1 Guillotinescheren

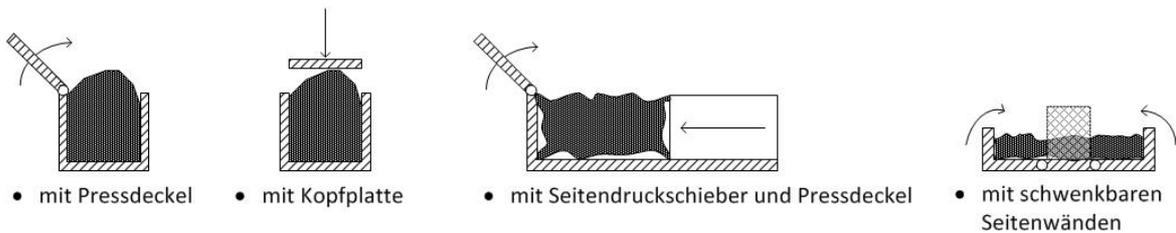
Guillotinescheren werden bei großstückigen Gütern eingesetzt, um eine definierte Partikelgröße zu erreichen die in den nachfolgenden Aggregaten verarbeitbar ist. Die Partikelgröße des zu zerkleinernden Schrottes, der in die Zuführmulde aufgegeben wird, wird über den Vorschub des Zuführschiebers eingestellt. Der Zuführschieber bringt das Gut unter den Niederhalter, wo es nachfolgend durch das Wirken des Ober- und Untermessers durch scherende linienhafte Belastung geteilt wird. In Abbildung 9 ist eine Guillotineschere gezeigt. [7]

Um auch voluminöse und sperrige Schrotte unter den Niederhalter schieben zu können, werden verschiedene Vorverdichtungseinrichtungen verwendet, welche sich hinsichtlich ihres Wirkprinzips (ein- oder zweidimensionale Vorverdichtung) und der Anordnung des Vorverdichtungsraumes (im Bereich der Zuführmulde oder außerhalb der Zuführmulde) unterscheiden. [7]



Abbildung 9: Guillotineschere der Firma COPEX von vorne; Roter Kreis: Ober- und Untermesser sowie die dahinterliegende Zuführmulde Bild entstanden bei einer Anlagenbesichtigung

Vorverdichter im Bereich der Zuführmulde



Vorverdichter außerhalb der Zuführmulde

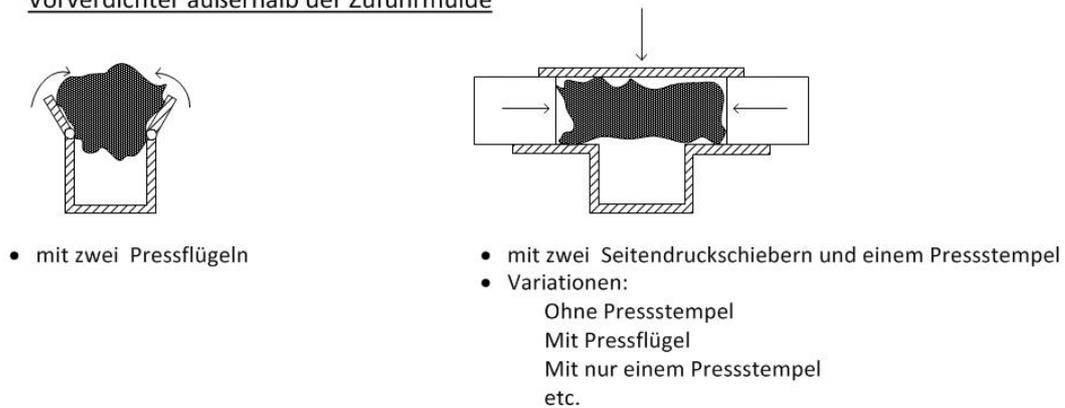


Abbildung 10: Verschiedene Vorverdichtereinrichtungen nach [7]

Abbildung 10 zeigt verschiedene Varianten der Ausführungsart von Zuführmulden und Vorverdichtereinrichtungen. Eine weitere Möglichkeit der Vorverdichtung der verschiedensten Einsatzstoffe für Guillotinescheren sind Flügelbette deren Funktion in Abbildung 11 verdeutlicht werden soll.

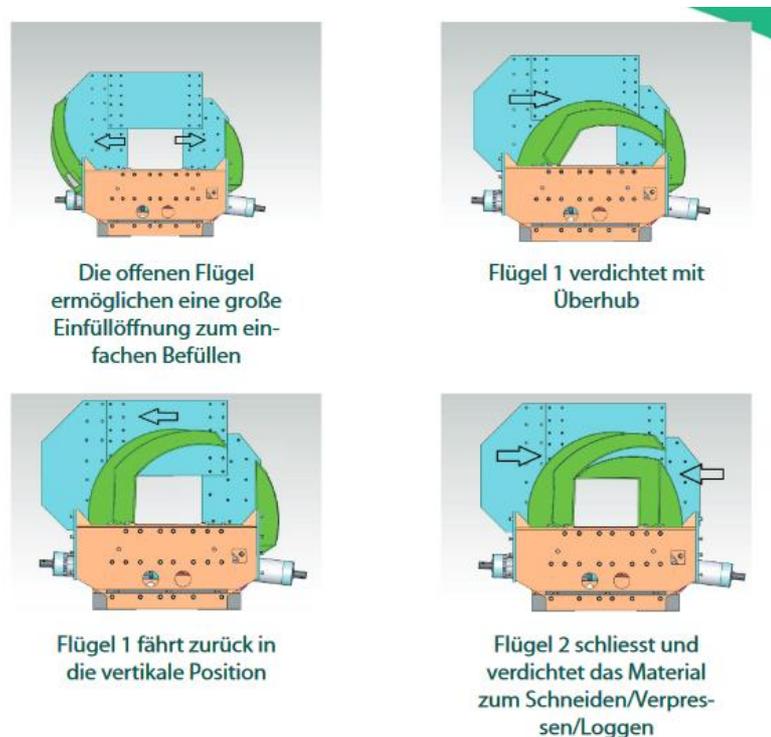


Abbildung 11: Metso Flügelbettschere schematisch [11]

Eine Ausführungsvariation eines Zerkleinerungsaggregates mit linienhafter Belastung stellen die Alligatorscheren dar, die aber nur in Spezialfällen zum Einsatz kommen.

5.1.2 Shredder (Hammerbrecher)

Eine sehr weite Verbreitung in der Zerkleinerung von Sekundärrohstoffen haben die Shredder (schnell umlaufende Hammerbrecher mit bis zu 65 m/s Umfangsgeschwindigkeit) gefunden. Die dabei angestrebten Ziele sind ein möglichst weitgehender Aufschluss der verbundenen Komponenten (Aufschlusszerkleinerung) und die Herstellung bestimmter Stückgrößenverteilungen. Ein möglichst vollständiger Aufschluss wird in der Aufbereitung von Stahl- (PKW- und Mischschrotte), Aluminium-, Müllverbrennungs-, Bleiakкумуляtorenschrott und WEEE angestrebt. Die bisher

eingeführten Shredder lassen sich nach konstruktiven Merkmalen in solche mit horizontal oder vertikal angeordnetem Rotor gliedern. Vorrangigen Einsatz finden Shredder mit horizontal angeordnetem Rotor. In Abbildung 12 ist der schematische Aufbau von Schreddern mit horizontal und vertikal angeordnetem Rotor abgebildet. [12]

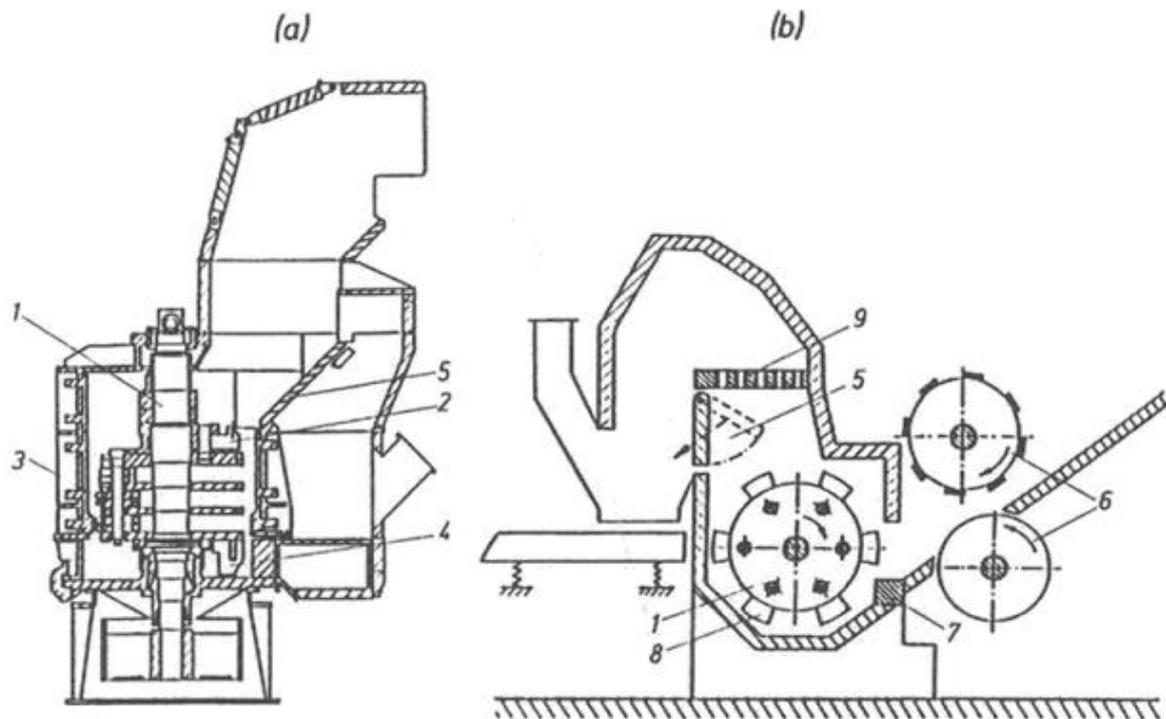


Abbildung 12: Shredderbauarten, schematisch: (a) mit vertikal angeordnetem Rotor; (b) mit horizontal angeordnetem Rotor; (1) Rotor, (2) prismaförmiges Schlagelement, (3) ringförmiges Schlagelement, (4) Austragsvorrichtung, (5) Auswurfklappe, (6) Schrottzufuhr, (7) Amboss, (8) Schlagelemente (Hämmer); [12]

Die Aufgabe wird mittels Druckwalze dem Shredder zu dosiert. Die Zerkleinerung erfolgt im Zusammenspiel der Hämmer mit dem Amboss, wobei von sehr komplexen Beanspruchungen auszugehen ist. Der über dem Rotor befindliche Austragsrost und dessen Öffnungsgröße beeinflusst maßgeblich die Verweilzeit des Materials im Zerkleinerungsraum und damit neben der Zerkleinerung auch die durch Biegebeanspruchung stattfindende Kompaktierung der Einzelstücke. Der Austrag von schwer bis nicht zerkleinerbaren Stücken geschieht über eine schwenkbare Austragsklappe. [12]

Einige weitere ausgewählte Shredderbauarten zeigt Abbildung 13.

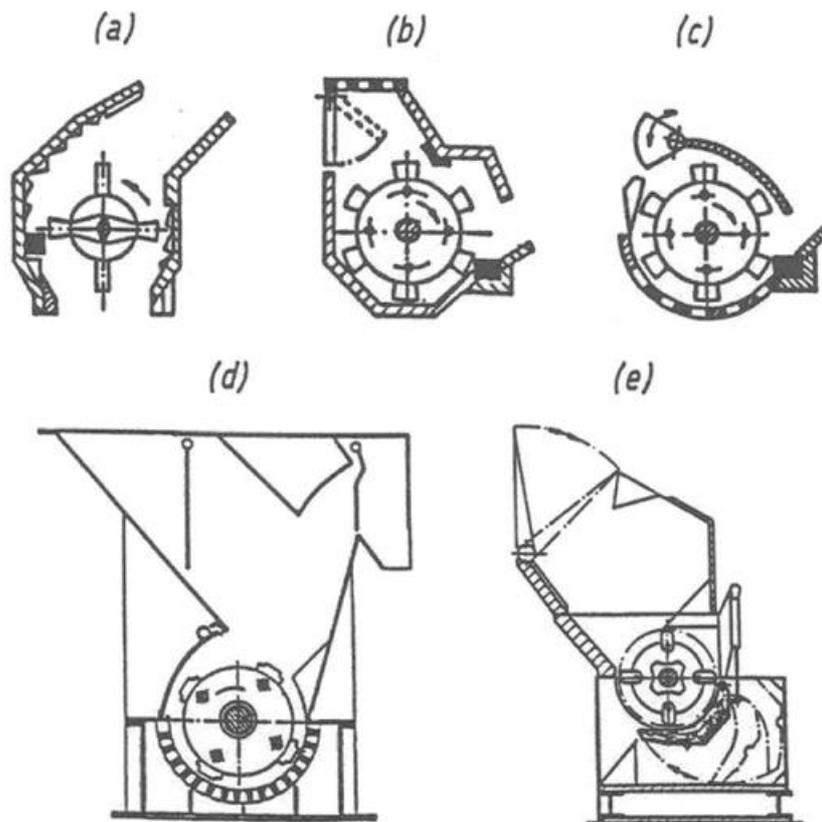


Abbildung 13: Shredderbauarten mit horizontal angeordnetem Rotor: (a) Shredder ohne Rost, (b) Shredder mit Austragsrost über dem Rotor, (c) Shredder mit Austragsrost unter dem Rotor, (d) Späneshredder, (e) Papiershredder [7]

Die Rotoren beanspruchen das Aufgabegut auf Biegung, Scherung, Druck und Zug im Zusammenwirken mit dem Austragsrost bzw. den Prallplatten und der Abrisskante am Amboss. Auch massive Stahlschrotte können in einer neueren Variante des Shredders, dem so genannten Kondirator, zerkleinert werden. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen Shredder mit Austragsrosten über oder unter dem Rotor. Abbildung 16 zeigt den Kondirator, einen Shredder nach Bauart *Lindemann/Metso*.

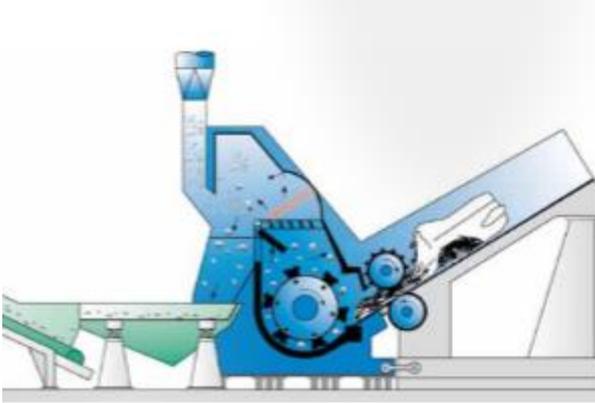


Abbildung 14: Shredder mit Austragsrost über dem Rotor [13]

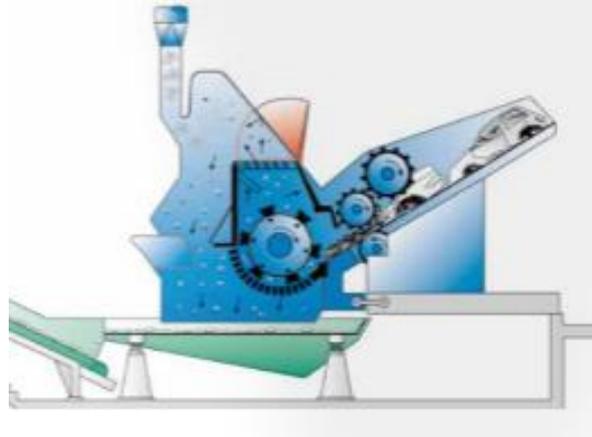


Abbildung 15: Shredder mit Austragsrost über und unter dem Rotor [13]

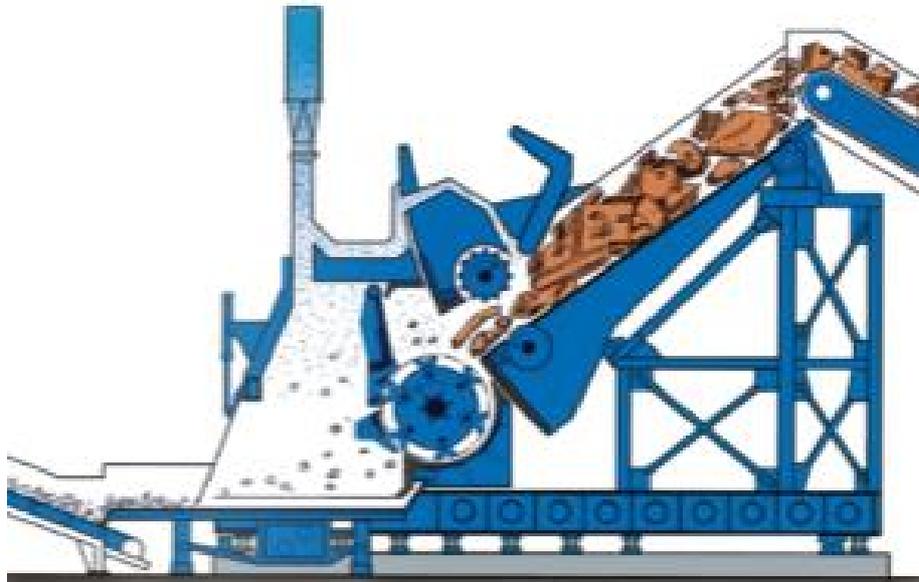


Abbildung 16: Shredderbauart Kondirator [13]

Der Kondirator besitzt einen seitlich liegenden Austragsrost. Die leichten und kleinen Partikel werden über ein Saugsystem aus dem Zerkleinerungsraum ausgebracht. Entwickelt wurde der Kondirator für die Verarbeitung von Schrott der für einen gewöhnlichen Shredder zu hohen Zerkleinerungswiderstand aufweist, wie zum Beispiel Elektromotoren oder Werkzeugstähle. Der Durchsatz der verschiedenen Shredder wird durch Rotorabmessung, Antriebsnennleistung, Schrottausbildung und die Beschickung beeinflusst. Ein Richtwert für die Zerkleinerung von PKW-Schrott liegt hier bei 40 t/h. Der massebezogene Energiebedarf für die Zerkleinerung von Schrotten liegt zwischen 15 und 30 kWh/t.

Eine Abschätzung der Durchsätze an Stahlechtschrott bis zum Erreichen der Betriebsgrenze der Bauteile bietet Tabelle 5. [12, 13]

Tabelle 5: Durchsätze an Stahlechtschrott bis zum Erreichen der Betriebsgrenze der Bauteile eines Shredders, nach [14]

Bauteil	Verarbeitete Schrottmasse [t]
Shredder mit horizontal angeordnetem Rotor	
Hämmer	4.000-6.000
Roste	80.000-120.000
Amboss	35.000-60.000
Prallplatte	40.000-100.000
Rotorkappen	40.000-50.000
Shredder mit vertikal angeordnetem Rotor	
Schlagringe	3.000-5.000
Arbeitsraumauskleidung	14.000-16.000
Rotorscheiben	15.000-17.000

Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass für die Instandhaltungsarbeiten an Shreddern die verwendeten Hämmer und deren Verschleißbeständigkeit maßgebend sind. [14][7]

5.1.3 Rotor- und Schraubenreißer

Bei Rotor- und Schraubenreißern erfolgt die Zerkleinerung unter Zusammenwirken von Zugkräften mit Biegung und Torsion. Dabei liegen die Abstände zwischen den Zerkleinerungswerkzeugen bei deutlich > 1 mm. Ein grundsätzlicher Aufbau der Rotor- und Schraubenreißer ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 ersichtlich. [15]

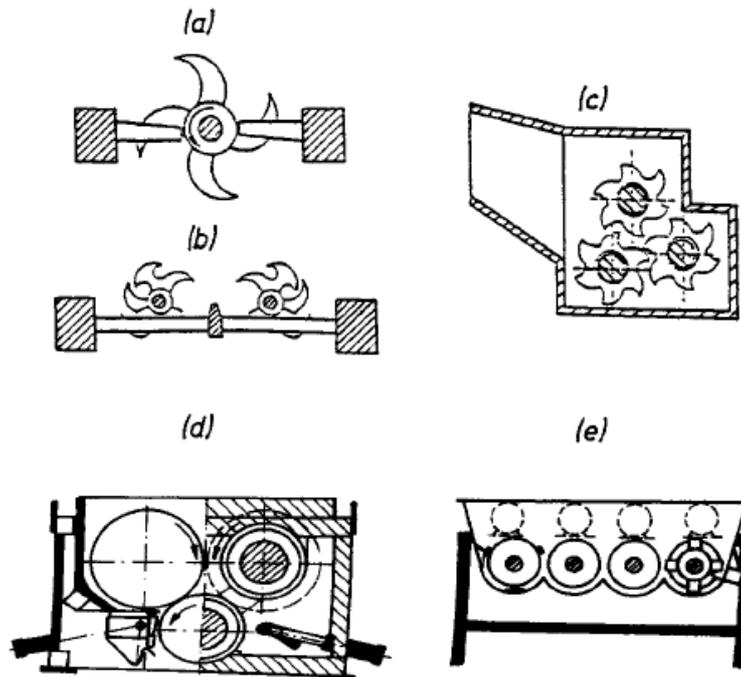


Abbildung 17: Schematischer Aufbau verschiedener Schraubenreißer; (a, b) Rotorreißer für Sperrmüll und Gewerbeabfälle, (c) Rotorreißer für Aluminium- und PKW-Schrotte, (d) Schraubenreißer Bauart Bühler, Schweiz, (e) Schraubenreißer Bauart Herbold, Deutschland [7]

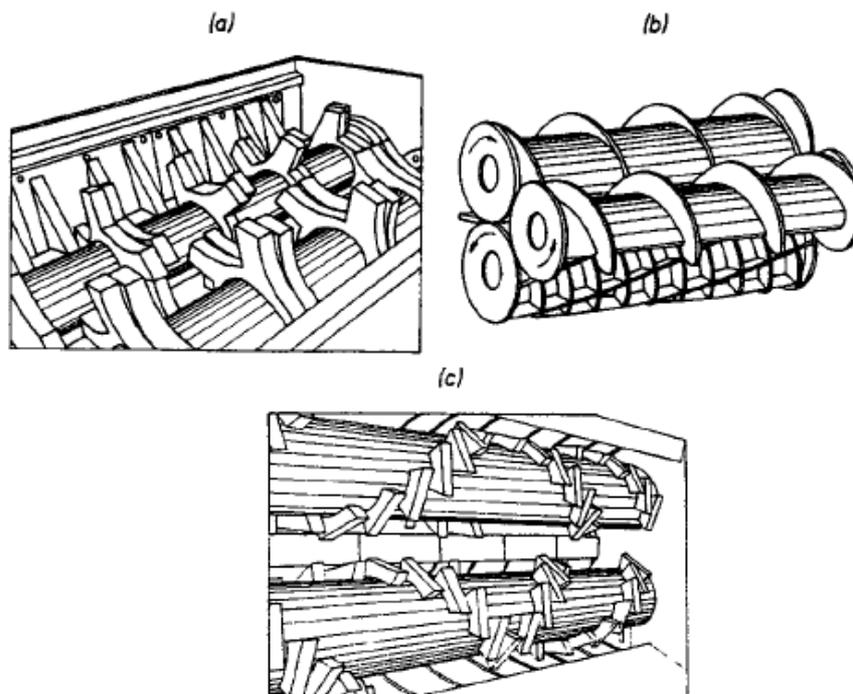


Abbildung 18: Verschieden ausgeführte Zerkleinerungselemente auf den Rotoren der Schraubenreißer von verschiedenen Herstellern; (a) Bauart Hölter, Gladbeck; (b) Bauart Bühler; (c) Bauart Zeno, Norken [15]

Die erforderlichen Zugbeanspruchungen bei Reißern werden durch die gegenläufige Förderrichtung speziell ausgebildeter, schraubenförmiger Rotoren erzeugt. Die Zerkleinerungswirkung der Rotorreißer ist auf eine senkrecht zur Rotorachse wirkende Zugbeanspruchung zurück zu führen. Im Unterschied dazu erfolgt bei Schraubenreißern die Zugbeanspruchung und damit die Rissbildung parallel zur Rotorachse. Zur Vermeidung von Überlastung durch Verstopfungs- bzw. Verdichtungserscheinungen wurden Ausführungen von Rotorreißern entwickelt, welche die Vorteile beider maschinentechnischer Lösungen vereinen. Durch eine schraubenförmige Anordnung der Reißzähne ist es nun möglich, die Komponenten der Zugbeanspruchung senkrecht und parallel zu den Rotorachsen wirken zu lassen. Dies ist in Abbildung 18 (c) ersichtlich. [15]

5.1.4 Rotorscheren bzw. Schneidmühlen

Die Zerkleinerung der in vielen Industriebereichen eingesetzten Rotorscheren beruht auf dem Zusammenwirken umlaufender Rotoren oder einem Rotor- und einem feststehenden Statormesser (Radialspaltscheren). Durch die Rotation des Schneidrotors bildet sich eine dichte Gutwolke vor den Rotor- und Statormessern. Unmittelbar vor dem Schnitt vereinigt diese sich und die Rotormesser schneiden in die Gutwolke hinein. Der Großteil der Teilchen weicht den Messern aus und nur jene welche sich unmittelbar zwischen den Schneiden befinden, werden unter scherender Belastung zerkleinert. Die Rotorscheren mit ihren geringen Spaltbreiten von < 1 mm und hohen Drehzahlen sind besonders für die Zerkleinerung zur Erhöhung des Aufschlussgrades von leicht verformbaren Teilen wie Drähten, Kabeln, Litzen, Späne und Folien im Einsatz. Eine Einteilung der Rotorscheren trifft *Woldt* in [8] wie in Abbildung 19 gezeigt. Das Unterscheidungsmerkmal in Axialspalt- bzw. Radialspalt-Rotorscheren ist die Lage der Hauptbeanspruchungszone.

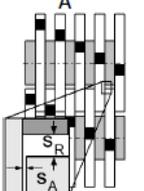
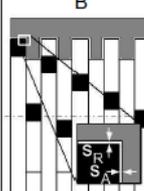
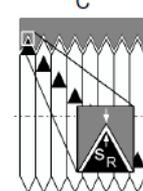
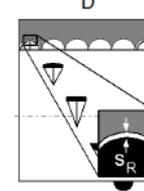
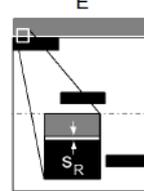
Rotoranzahl	Axialspalt-Rotorscheren		Radialspalt-Rotorscheren		
	zwei-/drei-/vierrotorig	einrotorig	einrotorig/zweirotorig (selten)		einrotorig
Rotorumfangsgeschwindigkeit	< 0,5 m/s		0,5 ... 5 m/s		5 ... > 20 m/s
Schematische Darstellung (Draufsicht)					
Hauptbeanspruchungszone	axialer Spalt s_A		radialer Spalt s_R		
Werkzeugkeilwinkel	90° (Seitenkante)	90° (Seitenkante)	80 ... 90° (Vorderkante)	80 ... 90° (Vorderkante)	90° (Vorderkante)
Antriebsleistung	< 10 ... 800 kW	20 ... 300 kW	< 10 ... 320 kW	< 10 ... 300 kW	< 400 kW
Rotorbreite	160 ... 2700 mm	800 ... 2200 mm	100 ... 3000 mm	100 ... 3500 mm	300 ... 2500 mm
Rotordurchmesser	125 ... 850 mm	450 ... 1000 mm	100 ... 750 mm	100 ... 800 mm	200 ... 1000 mm
Rotorbauart	Scheibenrotor mit Distanzscheiben	Scheibenrotor; Flachrotor	Profilrotor; Scheibenrotor	Flachrotor	Flachrotor; Scheibenrotor
Werkzeuggeometrie	ineinandergreifende Rotorscheiben mit zahnförmigen Werkzeugen (Spitze/Schneide) oder T-Messern	Rotorscheiben oder Flachrotor mit U-förmigen Messern	Wendemesser viereckiger Gestalt (Wendeplattenschere); Messerleisten (Zahnleistenschere); Rotorscheiben (Zahnschere)	Wendemesser vier-, dreieckiger oder runder Gestalt (Wendeplattenschere); Messerleisten (Zahnleistenschere)	quaderförmige Messerblöcke
Amboßgeometrie	kein Amboß	U-förmiger Amboß	V-förmiger Amboß	V-, O-förmiger, gerader Amboß	gerader Amboß
Räumorgan/ Abstreifer	Räumscheiben (4-/3-rotorig); Kamm (3-/2-rotorig)	-	-	-	-
Siebrost	meist (4-/3-rotorig); selten (2-rotorig)	-/ja	ja	ja	ja
Einzugsvorrichtung	Schieber; Schwenkarm; Einzugswalzen; Einzugsband	Schieber; Einzugswalzen	Schieber; Schwenkarm	Schieber; Schwenkarm	- Schieber; Schwenkarm

Abbildung 19: Einteilung der Rotorscheren nach [8]

Den Aufbau von Rotorscheren mit ein, zwei oder vier Rotoren, die sich mit Umfangsgeschwindigkeiten < 0.5 m/s drehen, zeigt Abbildung 20.

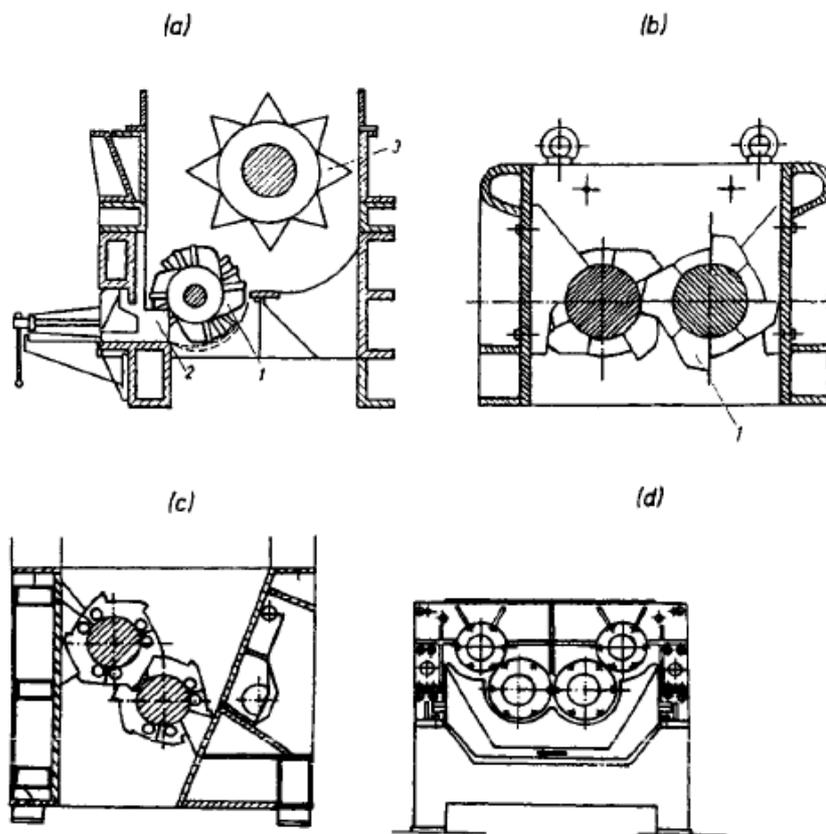


Abbildung 20: Bauarten von Rotorscheren [15]: (a) Rotorschere mit einem horizontal angeordneten Rotor, Bauart Alpine Augsburg, Deutschland; (b) Rotorschere mit zwei Rotoren, Bauart Hoger Maschinenbau; (c) Rotorschere mit zwei Rotoren, Bauart SID, Frankreich; (d) Rotorschere mit vier Rotoren und Siebrost, Bauart Untha, Deutschland [7]

Die Rotoren bestehen aus abwechselnd angeordneten Schneid- und Distanzscheiben, die bei mehrrotorigen Rotorscheren jeweils ineinander oder aber in spezielle Abstreifer greifen. Durch eine kaskadenartige Anordnung der Rotoren (Abbildung 20 (c)) soll ein besseres Einzugsverhalten insbesondere bei großvolumigen Sekundärrohstoffen erreicht werden. Gleichzeitig ermöglicht diese Bauart ein leichteres Ausschleusen unzerkleinerbarer Partikel. Zur Anpassung der Rotorscheren an die Vielfalt der zu zerkleinernden Materialien stellt jeder Maschinenhersteller spezielle, mehr oder weniger aufwendig ausgeführte Zerkleinerungswerkzeuge bereit. Einige ausgewählte Beispiele für häufig eingesetzte Formen von Schneidscheiben, die sich hinsichtlich der Schneidscheibenbreite und der Anzahl sowie Anordnung der Zähne über den Umfang unterscheiden, zeigen Abbildung 21 und Abbildung 22. Die Materialzufuhr erfolgt ausschließlich über Formzwang. [15]

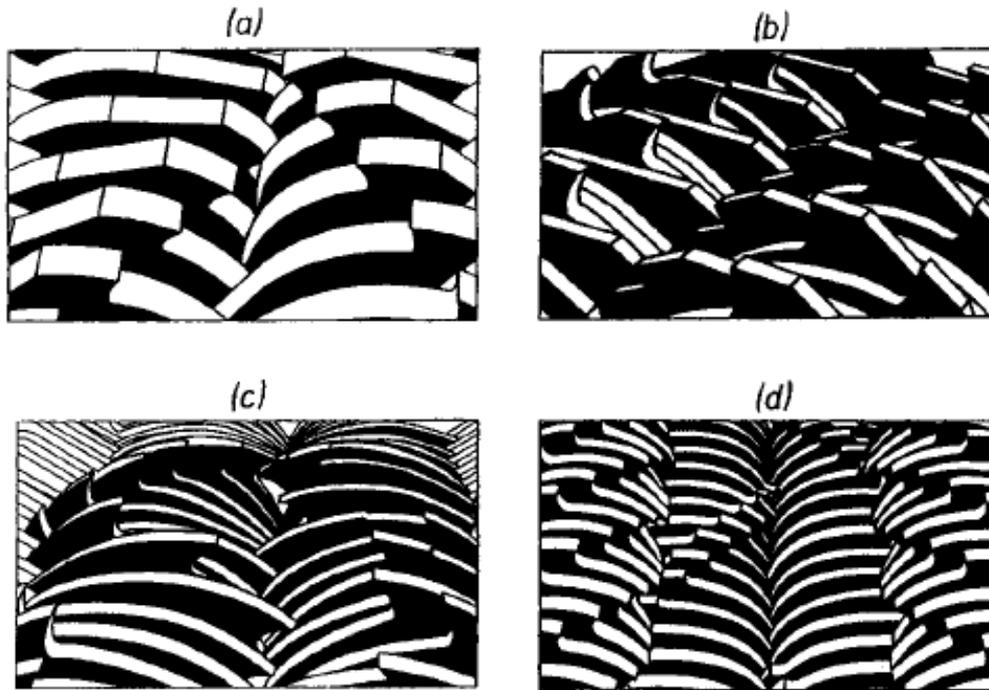


Abbildung 21: Gestaltungsvarianten der Schneidscheiben bei Rotorscheren; (a) Bauart Hoger Maschinenbau GmbH, (b) Bauart MEWA, (c) Bauart Mercodor, (d) Bauart Untha [15]

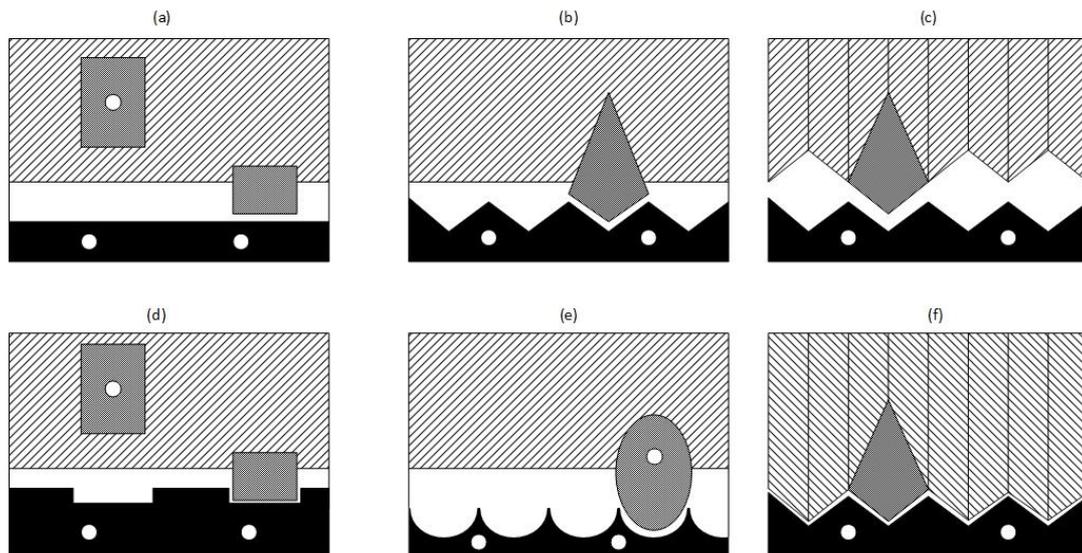


Abbildung 22: Beispiele (schematisch) für Rotor-, Stator- und Messergestaltung bei langsamlaufenden einrotorigen Radialspaltscheren; (a, b, d, e) Flachrotoren; (c, f) Profilrotor; schraffiert: Rotor, schwarz: Statormesser; dunkelgrau: Schneidwerkzeug [15]

5.1.5 Querstromzerspaner

Mit dem Querstromzerspaner steht ein Zerkleinerungsaggregat ohne Schneidelemente zur Verfügung. Einzugliedern ist sie als Sonderbauform der reißenden beanspruchenden Aggregate. Eine solche Maschine wird in Abbildung 23 dargestellt. Das Aggregat besteht aus einem Kessel, an dessen Boden eine rotierende Kette angebracht ist, die eingebrachte Elektroaltgeräte auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt und dadurch einen Teil der Zerkleinerungsenergie in autogener Form bedingt. Die dabei entstehende Wärme wird zum Auflösen von Verbunden genutzt. Die Verweilzeit, und damit der Aufschlussgrad, kann individuell angepasst werden, da der Querstromzerspaner im Batch- oder Durchlaufbetrieb betrieben werden kann. So können wesentliche Bauteile wie Elektromotoren, Trafos, Elektronikbauteile, Kabel etc. in kompakter Form gewonnen werden und gefährliche Bauteile, wie Batterien oder Kondensatoren bleiben unzerstört. Eine sehr positive Wirkung auf den Aufschlussgrad von WEEE ist festzuhalten. [16]

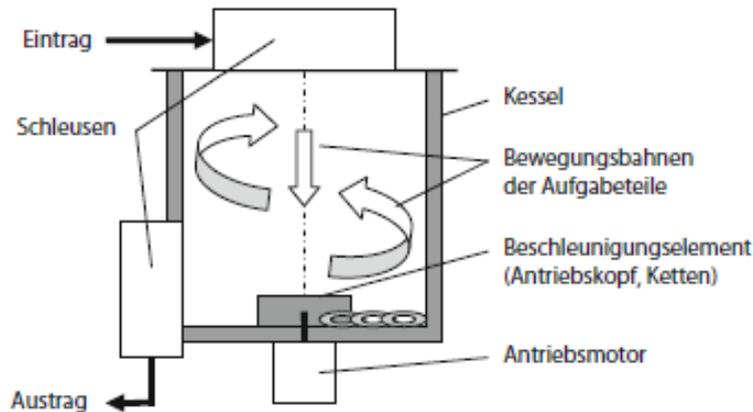


Abbildung 23: Querstromzerspaner [10]

5.2 Klassierung

Klassierprozesse dienen zur Trennung von Körnerkollektiven in Produkte unterschiedlicher Korngröße. Die Klassierung mittels Siebung ist das Hauptverfahren für Korngrößen $> 1 \text{ mm}$. Die Trennung erfolgt durch eine Relativbewegung zwischen dem zu siebenden Gut und dem perforierten Siebbelag. Die Korngröße der Siebung wird durch die geometrische Abmessung der Maschenweite des Siebbelags definiert. Ein Korn hat die Korngröße $k < a$ wenn es durch eine Quadratmasche der Kantenlänge a verformungsfrei hindurch geht. Durch die Gutbewegung auf dem Siebboden ist es möglich, Siebe in mehrere Gruppen einzuteilen wie es in Abbildung 24 zu sehen ist.

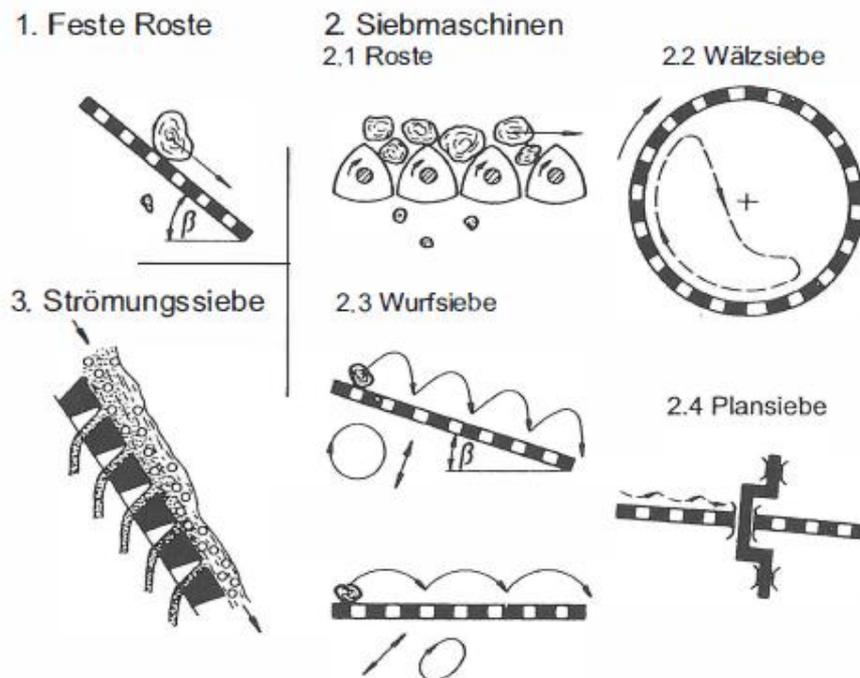


Abbildung 24: Einteilung der Siebe nach der Siebgutbewegung [6]

Jene Ausführungen von Sieben, die häufig in der Sekundärrohstoffaufbereitung zu finden sind, werden hier kurz in ihrer Funktionsweise definiert. Zu diesen Siebmaschinen zählen Schwingroste, Wurfsiebe und Taumelsiebe. Der Siebbelag von Rosten besteht aus unbeweglichen Stangen. Bei Wurfsieben erfolgt der Guttransport durch Abheben des Siebgutes vom Siebbelag zufolge der Beschleunigung des Siebkastens, mit einer Bewegungskomponente senkrecht zum Siebdeck. Taumelsiebe sind das Resultat der Vereinigung von Plansieb und Wurfsieb in einem Aggregat. [17, 18]

Als Zielsetzung für Klassierprozesse in der Sekundärrohstoffaufbereitung sind folgende Punkte zu nennen [17, 18] [7]:

- Herstellung eines verkaufsfähigen Produktes mit einer bestimmten Partikelgrößenverteilung
- Ausnutzung der Anreicherung einzelner Komponenten in bestimmten Partikelgrößen- oder Partikelformklassen
- Vorbereitung für nachgeschaltete Sortierprozesse durch Eingrenzen der Korngrößenverteilung
- Rückführen von zu groben Partikeln zum Zwecke einer neuerlichen Zerkleinerung, bis die vorgegebene Partikelgröße erreicht wird
- Entwässerung

5.2.1 Vibro-Stangensizer

Die Schwingroste, zu denen der Vibro-Stangensizer zählt, bestehen aus mehreren Stangendecks, die kaskadenförmig in einem angetriebenen Schwingrahmen angeordnet sind. Die Stangeneinheiten in den einzelnen Decks sind in variabler Neigung (10 – 20°) eingebaut und mit einseitig eingespannten, seitlich verschiebbaren Klassierstangen in der Regel divergierend oder plan, angeordnet. Das zu klassierende Gut wird über die Stangendecks bewegt und währenddessen mehrfach umgewälzt. Durch das Fehlen von Stangen quer zur Förderrichtung am Ende des Siebdecks, kommt es zu keinen Verhakungen und selbst eingeklemmte Stücke lösen sich, da die einzelnen Stangen frei beweglich sind. Dies führt zu einem freien Materialfluss und auch die Abtrennung von Drahtknäulen aus zerkleinertem Schrott ist möglich. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind die Klassierung von Haus- oder Gewerbemüll, Bauschutt, Friedhofskompost und vieles mehr. Die Funktion des Vibro-Stangensizers sei in Abbildung 25 kurz dargestellt. [19]

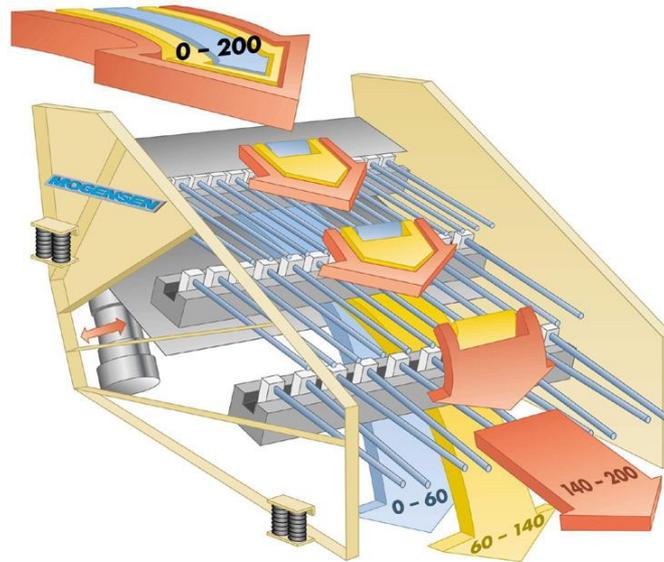


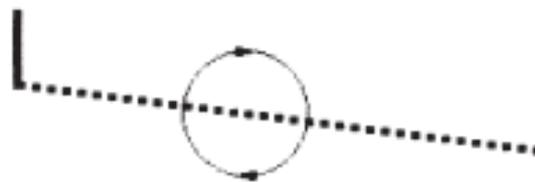
Abbildung 25: Vibrostangensizer mit ungefähren Angaben von Partikelgrößen über die verschiedenen Stangendecks[19]

5.2.2 Wurfsiebe

Die Einteilung von Wurfsieben erfolgt in drei Unterkategorien, abhängig von der Bewegungsart des Siebdecks, in Linearschwinger, Kreisschwinger und Ellipsenschwinger. Für ein besseres Verständnis sei hier auf Abbildung 26 verwiesen.



a) Linearschwinger



b) Kreisschwinger



c) Ellipsenschwinger

Abbildung 26: Einteilung von Wurfsieben nach der Art ihrer Schwingung [17]

Der in Abbildung 26 a) gezeigte Linearschwinger transportiert das zu klassierende Gut auch bei horizontaler Ausrichtung des Siebdecks entsprechend dem Bewegungsanteil in Förderrichtung. Zum Erreichen einer guten Trennschärfe sollten nur geringe Schichthöhen des zu klassierenden Materials am Siebdeck verarbeitet werden. Der Linearschwinger ist anfälliger für Klemmkörnern als ein Kreisschwinger wie in Abbildung 27 veranschaulicht. Dies ergibt sich aus der in alle Richtungen wirkenden Kraft des Kreisschwingers auf Klemmkorn und der damit verbundenen Selbstreinigung. [17, 18]

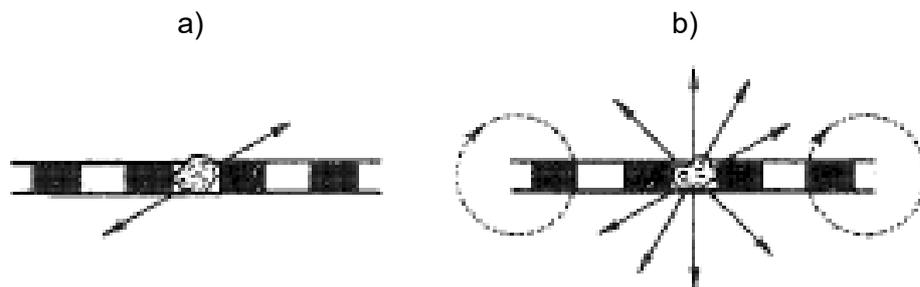


Abbildung 27: Auf Klemmkorn wirkende Kräfte, a) bei einem Linearschwinger, b) bei einem Kreisschwinger [18]

Kreisschwinger besitzen keine ausgezeichnete Transportrichtung, sodass ein ausreichender Transporteffekt durch eine Neigung des Siebes in Transportrichtung ($> 10^\circ$) kompensiert werden muss. Die Auflockerung des Siebgutes und die wirkenden Kräfte auf Klemmkörner sind besser als bei Linearschwingern. Die hinsichtlich Transport, Durchsatz und Trennschärfe am anpassungsfähigste Siebart ist der Ellipsenschwinger. Die Entscheidung für einen Klassierapparat wird nun dadurch beeinflusst, welches Sieb die beste Wirkung auf das zu klassierende Gut besitzt. Gekennzeichnet wird die Trennschärfe des Siebes durch die sogenannte Teilungskurve und die daraus ableitbaren Kennwerte. [17, 18]

5.2.3 Spannwellensieb

Das Spannwellensieb gehört zu den Siebmaschinen, welche mit verformbaren Siebbelag arbeiten und ist eine Sonderbauform. Der Transport des zu klassierenden Materials geschieht durch einen Schrägstellung des Siebes in Förderrichtung. Der Siebbelag ist ein flexibler, gegen mechanische Abrasion beständiger Kunststoff, der die zu klassierenden Partikel mit 30- bis 50-facher

Erdbeschleunigung beschleunigt. Diese Beschleunigung bewirkt eine Auflockerung der Partikel. Die Funktionsweise ist ein zyklisches spannen und entspannen des Siebbelages wird in Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt. [20]

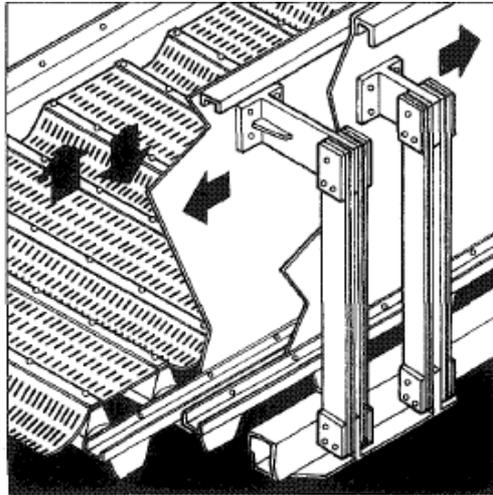


Abbildung 28: Schematisches Bewegungsprinzip eines Spannwellensiebes[18]

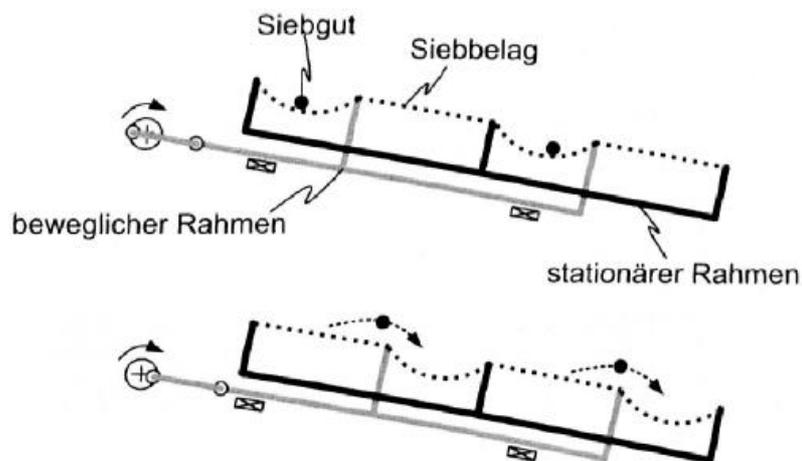


Abbildung 29: Schematische Siebgutbewegung auf einem Spannwellensieb [20]

Während der Entspannungsperiode hängt der Siebbelag durch und wird dann gestrafft. Die Amplitude beträgt 30 – 50 mm und die Erregerfrequenz liegt im Bereich von 10 Hz. [20]

Die Aussparungen im Sieb sind, in der Regel, Schlitz entlang zur Förderrichtung oder quadratische Öffnungen. Durch das Spannen und Entspannen und die daraus resultierenden Verzerrungen des Siebbelags wird es von Klemmkorn befreit. Das Spannwellensieb findet häufig Einsatz bei schwierigen Siebaufgaben.

So zum Beispiel nach Zerkleinerungsaggregaten um drahtiges Material von Kunststoff und Flusen zu befreien. [20]

5.2.4 Taumelsieb

Wird eine Schwingung in der Siebebene, wie es bei Plansieben der Fall ist, mit einer dazu senkrechten Hubkomponente eines Wurfsiebes kombiniert, ergibt sich eine Taumelbewegung bzw. das Taumelsieb. Abbildung 30 illustriert die Bewegungen eines Taumelsiebes. [17]

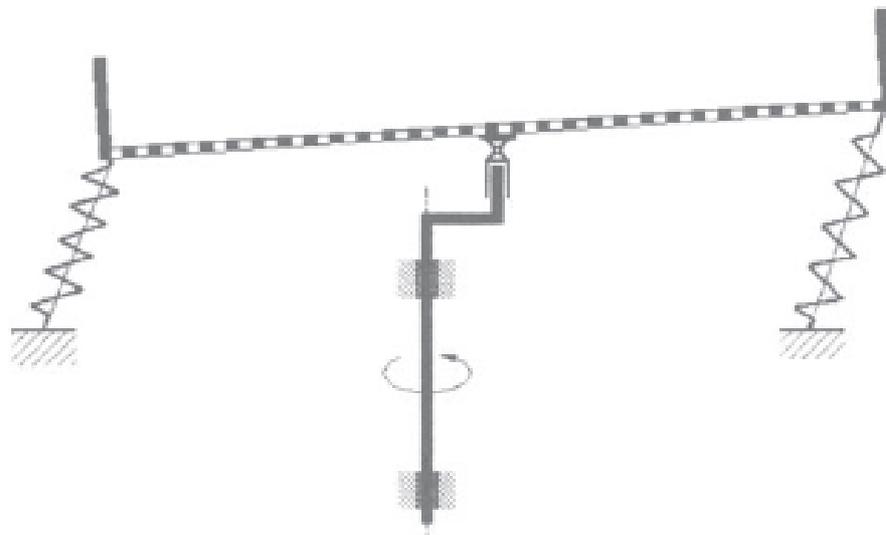


Abbildung 30: Bewegungsschema eines Taumelsiebes [17]

Verwendung findet es bei relativ einfach zu siebendem Gut, wie Kabelschrott der durch die Verarbeitung in einer Mühle eine kugelige Form erhält.

5.3 Sortierung

Unter Sortierung wird das Trennen von Feststoffphasen nach physikalischen Eigenschaften verstanden.

In der Kupferschrottaufbereitung werden derzeit folgende Eigenschaften ausgenutzt [21]:

- Fallbewegung im Fluid als Funktion der Dichte, Form und Größe des Partikels (Endfallgeschwindigkeit) in trockener und nasser Verfahrensweise
- Elektrische Leitfähigkeit nur in trockener Verfahrensweise
- Magnetisierbarkeit (Suszeptibilität) nur in trockener Verfahrensweise
- Verhalten von Feststoffen in elektromagnetischer Strahlung (sensorgestützte Sortierung, Transmission, Reflexion, Absorption)

Gegenüber mineralischen Rohstoffen bestehen Abfälle und Schrotte aus Partikeln unterschiedlichster Formen (Nadeln, dünne Blättchen, Knäule, poröse Stücke etc.). Diese geometrischen Formen beeinflussen wesentlich den Sortierprozess und die Bewegungsvorgänge in einem Teilchenkollektiv. Als besonders schwierig zu trennen gelten Drähte, da diese zum Verhaken neigen und somit als scheinbar größeres Korn beim Siebvorgang agieren. Folglich kommt der Beschreibung der Teilchenform, ihrer Veränderung durch Zerkleinerung und Kompaktierung und ihrer Nutzung im Sortierprozess besondere Bedeutung zu.

5.3.1 Sortierung nach der Endfallgeschwindigkeit

Die Endfallgeschwindigkeit ergibt sich als eine Funktion aus Form, Größe und Dichte der Partikel. Sie stellt jene Geschwindigkeit dar, die ein Partikel in einem wirkenden Kraftfeld in einem Fluid, nach Durchlaufen der Phase der Anfangsfallbeschleunigung, maximal erreichen kann. Als Kraftfelder können das Schwerkraftfeld und das Fliehkraftfeld in Betracht gezogen werden. In der Produktion von Sekundärrohstoffen finden nur Sortierapparate die nach dem Merkmal der Endfallgeschwindigkeit im Schwerkraftfeld sortieren Anwendung mit einer minimalen Korngröße von 1 mm. Da das Fliehkraftfeld zur Sortierung von Feingut (< 1 mm) angewendet wird, wird es in der Folge nicht mehr berücksichtigt.

Als Fluid kann Luft, Wasser oder eine Trübe (Schwerstoff und Wasser) dienen. Es sei nun kurz die Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit eines Partikels in einem Fluid bei einem wirkenden Kraftfeld in Abbildung 31 dargestellt. [22]

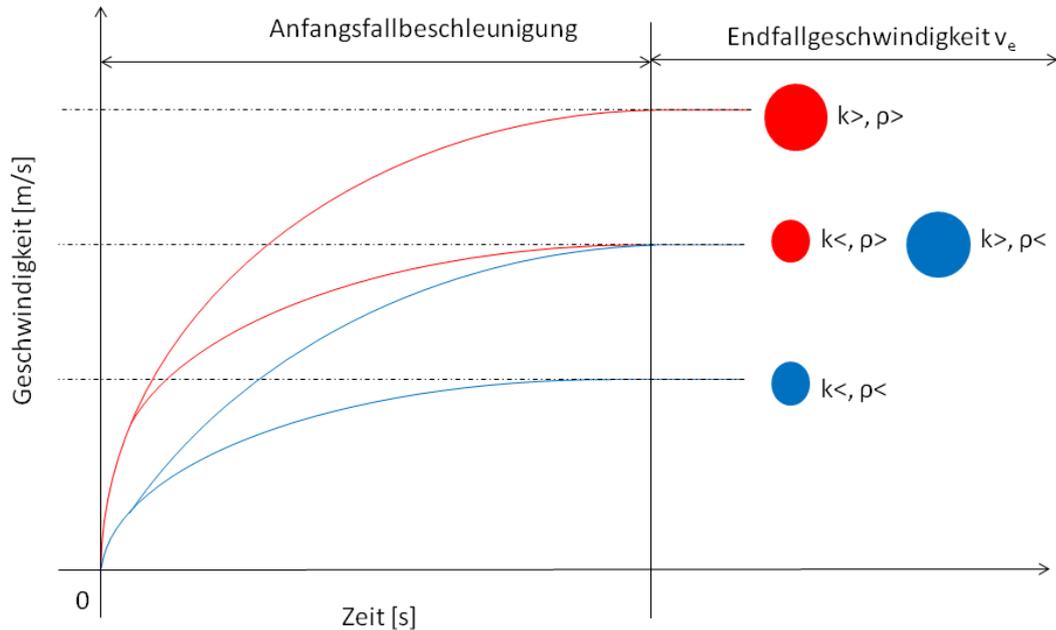


Abbildung 31: Bereich der Anfangsfallbeschleunigung und Endfallgeschwindigkeit aufgetragen über den Geschwindigkeitsgradienten und die Zeit [22]

Dargestellt ist die Anhängigkeit der erreichten Endfallgeschwindigkeit für Partikel mit unterschiedlicher Dichte und Partikelgröße aber gleicher Kornform. Wird ein Partikel einem Fluidstrom parallel zum wirkenden Schwerefeld ausgesetzt, so wird es von dem Fluidstrom mitgerissen, wenn seine Endfallgeschwindigkeit kleiner als die Strömungsgeschwindigkeit des Fluides ist. Diese ausgetragene Fraktion wird auch Überlauf oder Leicht- oder Feingut genannt. Ein Partikel kann sich aber auch entgegengesetzt der Strömungsrichtung bewegen, wenn seine Endfallgeschwindigkeit größer als die Strömungsgeschwindigkeit des Fluides ist. Somit wird es im Unterlauf oder Schwer- oder Grobgut ausgetragen. Erreichen zwei Partikel mit unterschiedlicher Partikelgröße und Dichte nach der Zeit t dieselbe Endfallgeschwindigkeit, so werden sie in derselben Fraktion ausgetragen. Dies ist veranschaulicht im mittleren der drei dargestellten Fälle in Abbildung 31. Eine Möglichkeit der Trennung dieser Partikel besteht im Bereich der Beschleunigung, der vom Bewegungsbeginn der Partikel in einem Kräftefeld bis zum Erreichen der Endfallgeschwindigkeit liegt. Insbesondere die Anfangsfallbeschleunigung wird bei Setzmaschinen ausgenützt. Um den Einfluss

der Korngröße möglichst gering zu halten, oder komplett auszuschalten, und eine Sortierung nach der Endfallgeschwindigkeit die nur mehr von der Partikelform und Dichte abhängt, für das bestmögliche Trennergebnis zu gewährleisten, ist eine sehr trennscharfe Einteilung in Siebklassen vorab erforderlich. In der Produktion von Sekundärrohstoffen finden nur Sortierapparate Anwendung, die nach dem Merkmal der Endfallgeschwindigkeit im Schwerkraftfeld sortieren, und für Korngrößen > 1 mm geeignet sind [22]

Nach dieser kurzen Beschreibung der Wirkenden Kräfte und des Sortiermerkmals werden nun ausgewählte Aggregate kurz beschrieben. Die folgenden Sichter arbeiten in trockener Verfahrensweise, die Setzmaschine und die Schwertrübetrommel in nasser Verfahrensweise. Diese Varianten finden häufigen Einsatz in der Sekundärrohstoffaufbereitung.

5.3.1.1 Windsichter

Die Windsichtung nutzt als Fluid Umgebungsluft und trennt die in Siebklassen eingeteilten Partikel nach ihrer Dichte und Kornform in trockener Verfahrensweise. Der Partikelgrößenbereich kann mit > 1 mm bis 200 mm in der Kunststoffsortierung angegeben werden. Ziel der Windsichtung ist das Trennen von Produktströmen in zwei, selten drei, Endfallgeschwindigkeitsklassen. Produkte mit einheitlicher Dichte werden nach der Partikelgröße klassiert, wo hingegen Materialgemische mit einheitlicher Partikelgröße aber unterschiedlicher Dichte und Form nach eben diesen beiden Merkmalen sortiert werden. Für ein optimales Sortierergebnis muss eine sehr enge Partikelgrößenverteilung vorab durch Klassieren erstellt werden. Tabelle 6 gibt einen ausgewählten Überblick über die Einteilung der Windsichter nach Anströmrichtung und wirkendem Kraftfeld.

Tabelle 6: Einteilung der Windsichter nach Anströmrichtung und wirkendem Kraftfeld nach [22]

	Schwerkraftfeld
Gegenstrom-	Zickzack-Sichter Kegelsichter
Querstrom-	Querstromsichter

Zickzacksichter

Ein Vertreter der Gegenstromsichtung ist der Zickzacksichter wie in Abbildung 32 dargestellt. Der trennbare Partikelgrößenbereich liegt zwischen 60 und 1 mm. Als Trennmedium wird Umgebungsluft verwendet welche von unten nach oben durch den Zickzacksichter gesaugt wird. Die Aufgabe geschieht entgegen dem Luftstrom im oberen Bereich des Sichters. Das Feingut bewegt sich mit dem Gasstrom nach oben, während das Grobgut weiter nach unten rieselt. Der Zickzacksichter setzt sich aus mehreren geknickten Elementen zusammen. Der Winkel zwischen den Elementen beträgt 140° . Ein jedes Element des Zickzacksichters stellt eine eigenständige Sichtstufe dar. In jedem einzelnen bildet sich eine Wirbelwalze aus trennkornnahen Partikeln aus, wodurch das Gut an der Innenkante des Kanals einer Querstromsichtung unterworfen wird. Die Trennschärfe jeder einzelnen Stufe ist gering, jedoch bewirkt das Hintereinanderschalten vieler solcher Stufen eine scharfe Trennung. Durch Parallelschaltung mehrerer Kanäle lassen sich auch hohe Durchsätze erreichen. Anwendung finden diese Sichter z.B. beim Trennen von Kabelabfällen, genauer bei der Trennung von Kupfer und Isolierung. Nachteilig an diesem Aggregat ist die hohe Neigung zur Verstopfung aufgrund der immer dichter werdenden Wirbelwalzen. [17, 21]

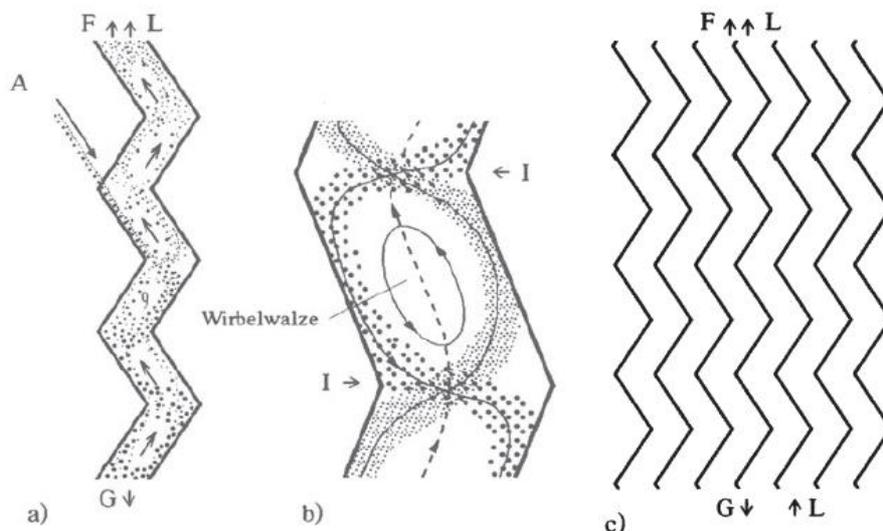


Abbildung 32: Zickzacksichter; (a) Einkanalsichter, (b) Trennprinzip, (c) Mehrkanalsichter, (A) Aufgabepunkt, (G) Grobgutausstrag, (F) Feingutausstrag, (L) Luftströmung [17]

Kegelsichter

Der Kegelsichter ist für Reinigungsaufgaben bei der Sortierung von feinkörnigen Stoffen (Kabelabfälle) konzipiert. Abbildung 33 zeigt schematisch die Arbeitsweise. In der Aufgabezone bewegt sich das zu trennende Material zunächst quer zum Gasstrom, in der eigentlichen Sichtzone aber im Gegenstrom zur Gasströmung. [17]

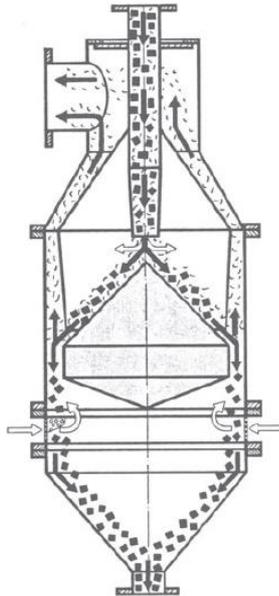


Abbildung 33: Schematisches Funktionsprinzip eines Kegelsichters [17]

Querstromsichter

Die einfachste Variante von Sichern sind die Querstromsichter. Sie werden in der Abfallaufbereitung eingesetzt, um Folien und anderes flächiges Material aus dem Gutstrom abzutrennen. Ebenso ist ihr Einsatz bei großen Dichteunterschieden der zu trennenden Materialien möglich. Das Funktionsprinzip sei in Abbildung 34 skizziert. [17]

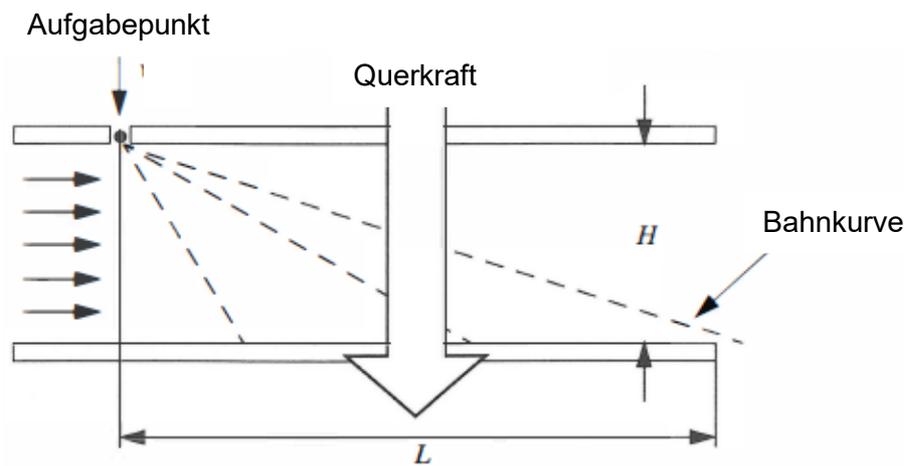


Abbildung 34: Prinzip eines Querstromsichtprozesses [10]

Das zu sortierende Gut kommt über den Aufgabepunkt quer zur Luftströmungsrichtung in den Sichtraum. Die Distanz des Erreichens des Austrages hängt maßgeblich von den wirkenden Querkräften ab. Sie ist die Resultierende aus horizontaler Geschwindigkeit (Gasstrom) und vertikaler Geschwindigkeit (Endfallgeschwindigkeit). Als Querkräfte können die Schwerkraft, die Fliehkraft, elektrische Kräfte oder Diffusion je nach Bauart genutzt werden. Eine Ausführungsvariante ist in Abbildung 35 dargestellt. [17]

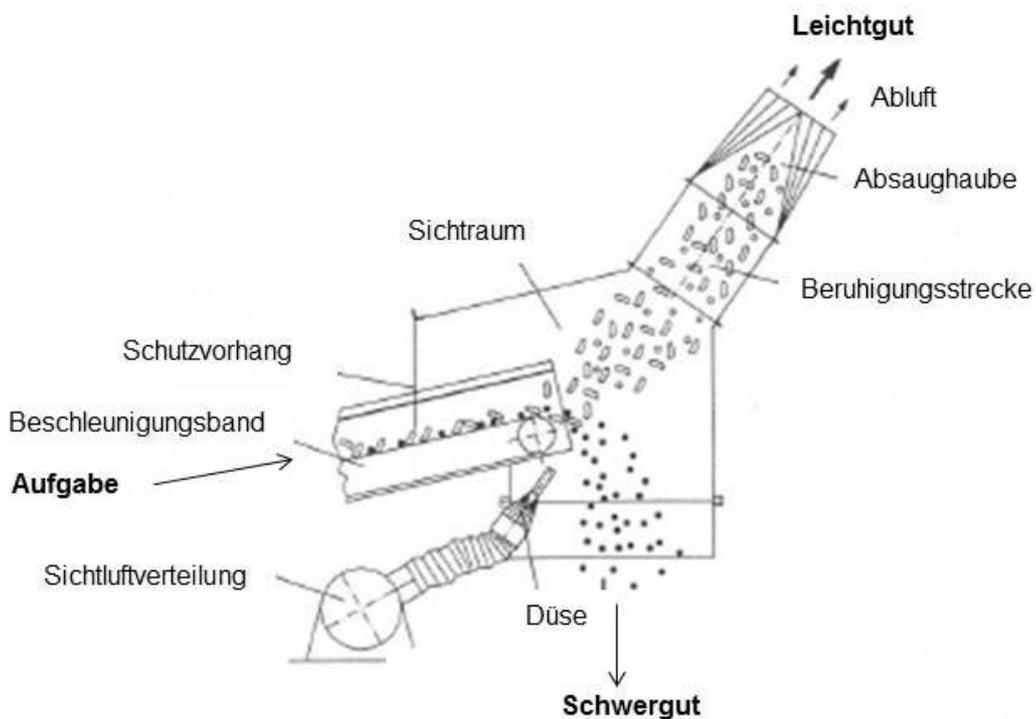


Abbildung 35: Funktion eines Querstromsichters nach [21]

5.3.1.2 Lufttrennherd

Dem Lufttrennherd (LTH) liegt das physikalische Trennprinzip der Endfallgeschwindigkeit zugrunde, dessen Fluid die Luft ist. Die Aufgabe wird mittig auf ein geneigtes Sieb aufgegeben. Das Sieb wird in Schwingung versetzt und von unten mit einem regelbaren Luftstrom beaufschlagt. Die Bewegungen des Siebdecks entsprechen jenen eines Linearschwingsiebes. Die Schwingamplitude am Sieb, bzw. die Wurfweite und –parabel, kann mittels Veränderung der Neigung des Siebes beeinflusst werden. Eine steil stehende Parabel bewirkt eine große Wurfhöhe und somit eine bessere Entmischung des Materials, wobei dadurch auch der Austrag durch die Absaugung gesteigert wird und somit, bei feinen Fraktionen, viel Wertstoff verloren gehen kann. Eine flache Parabel mindert den Verlust durch die Absaugung, hat aber eine schlechtere Entmischung des Materials zur Folge. Die Schwingfrequenz der Sieboberfläche ist ebenfalls stufenlos regelbar. Um die Verweildauer der Aufgabe am Sieb zu kontrollieren, ist eine Überlaufwehre, in Richtung Leichtgutaustrag, am Ende des Siebes montiert.

[20]

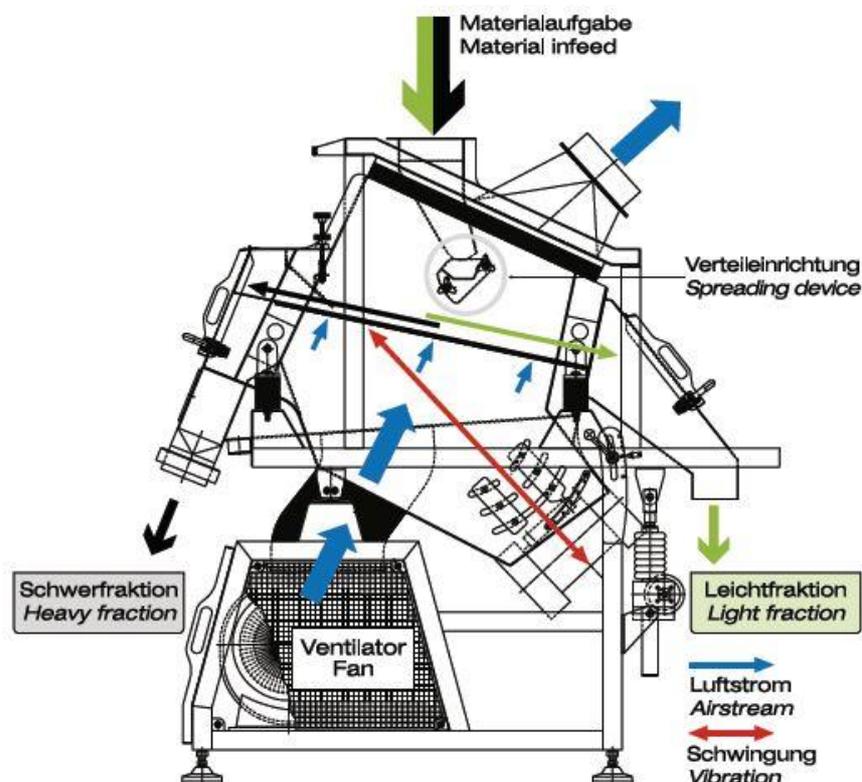


Abbildung 36: Funktionsprinzip des LTH [23]

In Abbildung 36 wird die Funktion des LTH veranschaulicht. Nach dem Stabilisieren des Fluidbettes auf dem Sieb wird die Aufgabe durch den Luftstrom in drei Fraktionen getrennt. Das Leichtgut, welches keinen Kontakt mit der Sieboberfläche hat, schwimmt auf dem Luftstrom, aufgrund der Gravitation, in Richtung Leichtgutaustrag, wohingegen das Schwergut, welches immer wieder in Kontakt mit dem Sieb steht, durch die Beschleunigung aufgrund des Siebbodens in Richtung Schwergutaustrag gefördert wird. Die Metallpartikel, welche einen zu geringen Auftrieb durch die Luftströmung erhalten und durch das Sieb passen, werden in einem extra Trenntischunterlauf ausgebracht. Verarbeitbare Partikelgrößen liegen im Bereich von 50 – 0,5 mm. Die optimalen Einstellungsparameter für Luftstrom, Neigung, Schwingfrequenz und Amplitudenhöhe des Siebes sowie Aufgaberate werden experimentell ermittelt. [24]

Positiv beeinflusst werden kann die Trennung durch einen möglichst großen Dichteunterschied der zu trennenden Materialien bei einer sehr engen Partikelgrößenverteilung. Ein großes Problem tritt auf, wenn Partikel unterschiedlicher Phasen die gleiche Endfallgeschwindigkeit erreichen. Dies hat zur Folge, dass beide in der gleichen Fraktion ausgetragen werden, wodurch die geforderte Güte im Produkt der Sortierung herabgesetzt wird. Ebenso ist eine zu kurze Verweilzeit auf dem Siebdeck von Nachteil, da die schwereren Partikel nicht genügend Zeit bekommen, sich einen Weg durch die Restfraktion zu bahnen um mit dem Sieb in Kontakt zu treten. Es besteht auch die Möglichkeit Trennherde nass zu betreiben. Dies findet Einsatz in der Feinstkornaufbereitung von unter 0,5 mm. [22, 24]

5.3.1.3 Setzmaschinen

Setzmaschinen arbeiten nach dem Trennmerkmal der unterschiedlichen Anfangsfallbeschleunigung von Stoffen. Diese Anfangsfallbeschleunigung ist eine Funktion der Dichte, Korngröße und Form. Wenn ein Partikel sich in einem Fluid unbeeinflusst durch Stöße anderer Partikel bewegen kann, erreicht es nach der Zeit t seine Endfallgeschwindigkeit oder Sinkgeschwindigkeit v_e . Bis zum Erreichen dieser Geschwindigkeit durchläuft es einen Beschleunigungsvorgang, der Anfangsfallbeschleunigung genannt wird. Die Setzmaschinen nutzen

Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit aus, nachdem das zu setzende Gut durch einen Wasser- oder Luftpuls vom Setzgutträger abgehoben wurde. Je nach Einstellung der Parameter Hubhöhe und Hubfrequenz stellt sich die Fallstrecke ein. Damit wird die Anfangsfallbeschleunigung oder die Endfallgeschwindigkeit als zur Entmischung führende Bewegungsform gewählt. Im Zustand der Anfangsfallbeschleunigung lassen sich auch Körner gleicher Endfallgeschwindigkeit trennen (siehe Abbildung 31). In Abbildung 37 sei das Funktionsschema einer Remer Setzmaschine die im Fluid Wasser arbeitet dargestellt. [6]

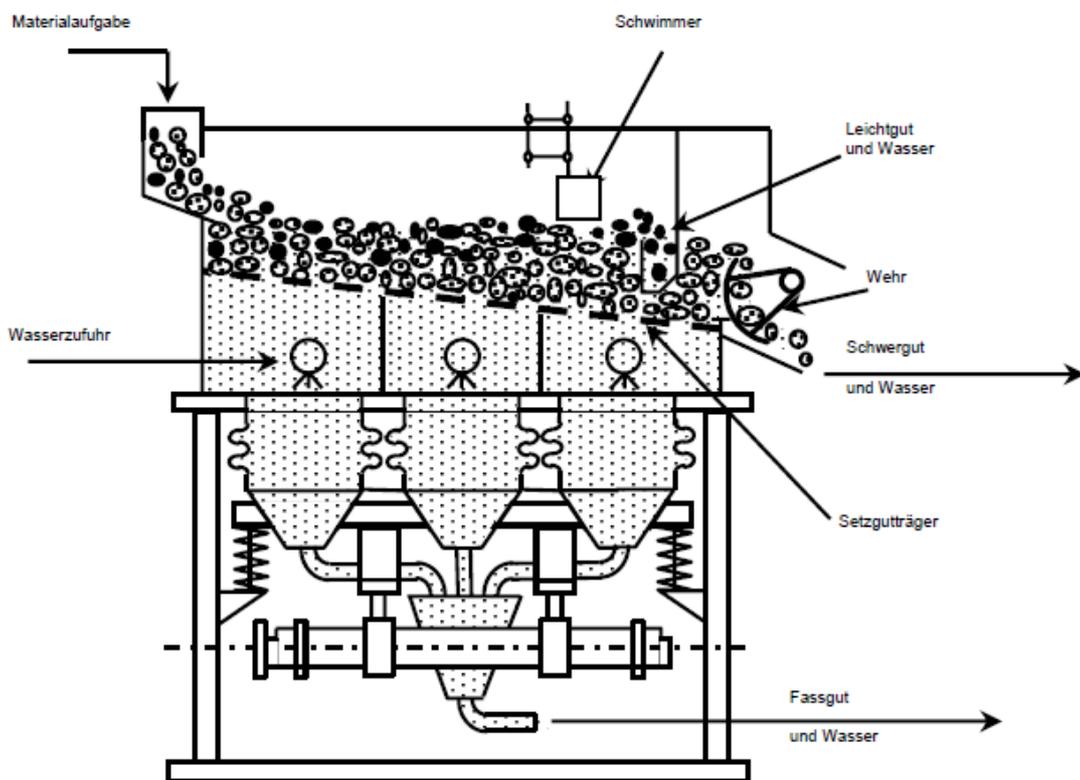


Abbildung 37: Prinzip einer Pulssetzmaschine (Remer Setzmaschine) [25]

Da das Trennprinzip bei allen Pulssetzmaschinen gleich ist und die Remersetzmaschine nur eine mögliche Bauart darstellt, sei hier auf die Hersteller wie z.B. *MBE Coal & Minerals Technologie GmbH*, *AGS Anlagen und Verfahren GmbH* und *Siebtechnik GmbH* verwiesen.

Als den Trennerfolg beeinflussende Parameter in einer Setzmaschine sind zu nennen [24]:

- Korngröße
- Kornform
- Korndichte
- Physikalische Eigenschaften des Fluides (Viskosität etc.)
- Hubhöhe in mm
- Hubzahl pro Minute
- Unterwasserstrom
- Aufgaberate

Das Partikelgrößenspektrum für den Einsatz einer Setzmaschine kann nach *Schubert* mit 0,1 bis 100 mm angegeben werden. In neuerer Zeit wurden Setzmaschinen für die Trennung von gröberen (> 400 µm) Partikeln entwickelt. [24, 25]

5.3.1.4 Schwertrübescheidung im Grobkornbereich - Schwertrübetrommelscheider

Ebenfalls nach der Endfallgeschwindigkeit, allerdings in einer Schwertrübe, erfolgt die Trennung im Schwertrübetrommelscheider. Als Schwertrübe wird eine Schwerstoff-Wasser-Suspension mit 20 – 35 Vol.-% Feststoff (Schwerstoff) bezeichnet. Als Schwerstoff können z.B. Magnetit oder Ferrosilizium eingesetzt werden, da sie durch ihre ferromagnetischen Eigenschaften rückgewinnbar sind. Die Korngröße dieser Schwerstoffe liegt bei < 100 µm. Mit verdüstem Ferrosilizium (Körner haben eine rundliche Form) lassen sich Trübedichten von bis zu 3800 kg/m³ und mit Magnetit bis zu 2400 kg/m³ erreichen. Wesentlichen Einfluss auf die Trübestabilität nehmen die Korngröße und –form des Schwerstoffes, sowie die Schwerstoffdichte und die Feststoffvolumenkonzentration.[22, 24]:

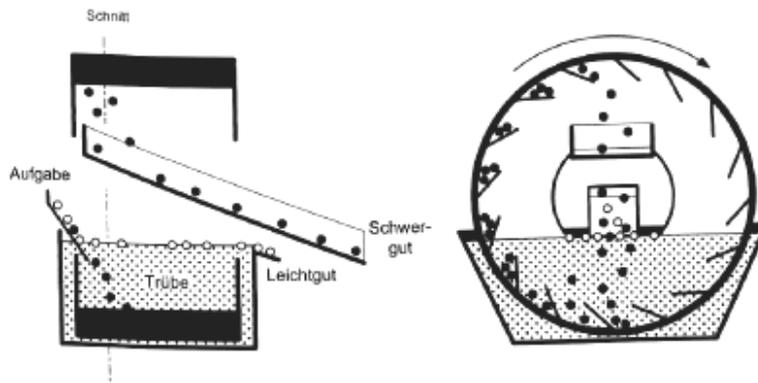


Abbildung 38: Schwertrübetrommelscheider mit Hubaustrag [20]

Wesentliche Vorteile des in Abbildung 38 dargestellten Trommelscheiders sind die einfache Bauart, die relativ geringer Wartungsaufwand und das, nach Absetzen des Schwerstoffes bei einer Betriebsstörung, einfache Anfahren. Als Nachteil sind die unruhigen Strömungsverhältnisse zu nennen, die das Aggregat auf die Grobpartikelsortierung > 3 mm beschränken. Im Inneren der Trommel wird das zu trennende Gut über eine Fördereinrichtung in die Trübe, mit eingestellter Dichte, aufgegeben. Jener Teil des Gutes der spezifisch schwerer ist als die Trübe (Schwergut), sinkt ab und wird über Förderschaufeln, die an der Zylinderwand angebracht sind, in eine Rinne oberhalb der Trübe ausgetragen. Jenes Gut das spezifisch leichter ist (Leichtgut) schwimmt über die Länge der Trommel hin zum Leichtgutaustrag. Die Baugrößen von Schwertrübetrommelscheider können bis 6 m im Durchmesser erreichen (VA Erzberg). Nach der Trommel müssen die Produkte von den Schwerstoffpartikeln gereinigt werden. Dies geschieht durch eine Bebrausung und anschließender Regeneration der Trübe (Einstellen der Trübedichte durch Schwerstoff-/Flüssigkeitszugabe). [24]

5.3.2 Magnetscheidung

Eine erfolgreiche Trennung mit einem Magnetscheider bedingt einen ausreichenden Unterschied in der magnetischen Suszeptibilität der zu trennenden Partikel. Nur dann wirken im inhomogenen Magnetfeld auf die zu sortierenden Partikel verschieden große magnetische Kräfte, dies hat unterschiedliche Bewegungsbahnen eben dieser im Prozessraum zur Folge. Die verschiedenen Wirkprinzipien seien schematisch in Abbildung 39 veranschaulicht. [24]

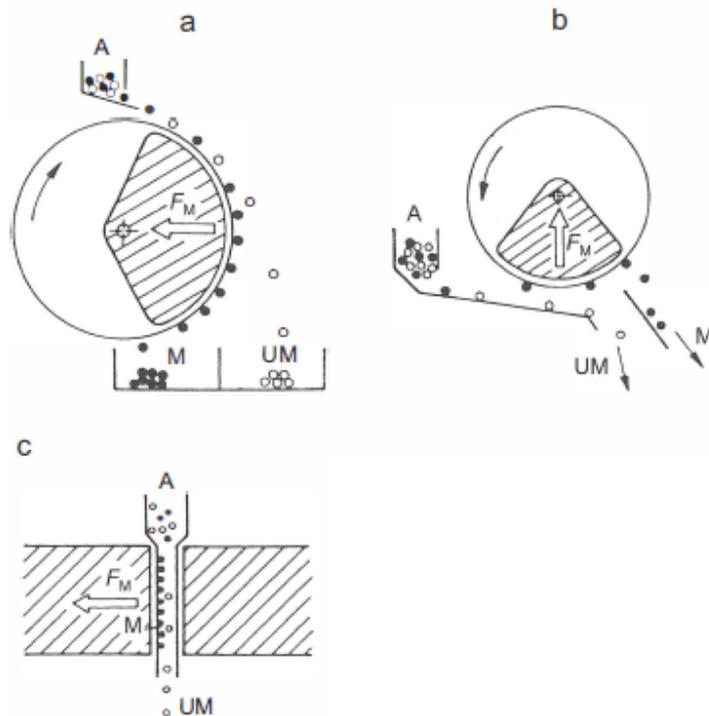


Abbildung 39: Wirkprinzip für die Trennung auf Magnetscheidern: (a) Ablensortierung (Trommelmagnetscheider mit oberer Aufgabe), (b) Aushebesortierung (Trommelmagnetscheider mit unterer Aufgabe), (c) Rückhaltesortierung (Matrix- bzw. Hochgradientenmagnetscheider), (A) Aufgabegut, (M) Magnetprodukt; (UM) unmagnetisches Produkt [6]

Magnetscheidung kann nur in einem inhomogenen statischen Magnetfeld erfolgreich eingesetzt werden, weil nicht nur Kraftwirkung, sondern auch Translationsbewegungen stattfinden müssen. Die Magnetscheider werden nach der Flussdichte des erzeugten Magnetfeldes in Starkfeld- ($> 0,15 \text{ T}$) und Schwachfeldmagnetscheider ($< 0,15 \text{ T}$) unterteilt. Die Unterteilung der Stoffe erfolgt nach ihrer Magnetisierbarkeit bzw. durch die Kenngröße der magnetischen Suszeptibilität. Für die Trennung im Magnetfeld ist die Körpersuszeptibilität, in die auch Korngröße und Kornform Eingang finden, entscheidend für einen Trennerfolg. Die von der Körpersuszeptibilität zu unterscheidende Stoffsuszeptibilität dient hingegen nur als Richtgröße, deshalb ist für aufbereitungstechnische Zwecke eine Einteilung der Stoffe nach ihrer Kraftwirkung im Magnetfeld ausreichend. Für starkmagnetische Stoffe ist ein schwaches äußeres magnetisches Feld ausreichend für eine Trennung. Für schwachmagnetische Stoffe wird ein starkes äußeres Feld benötigt.

Tabelle 7: Einteilung von Stoffen nach der zur Trennung benötigten Flussdichte [12]

Stoffeigen schaft	massebezogene Suszeptibilität X [m³/kg]	Zur Trennung benötigte Flussdichte B [T]	Zuzuordnende Metalle und Legierungen
Starkmagn etisch	$> 35 \cdot 10^{-6}$	0,15	<ul style="list-style-type: none"> • un-, niedrig- und mittellegierte Stähle • Ni-Cu-Legierungen mit $> 65\%$ Ni-Cr • hochlegierte Stähle • Schnell- und Kaltarbeitsstähle
Mittel- magnetisch	$35 - 7,5 \cdot 10^{-6}$	0,3 - 0,6	
Schwach- magnetisch	$7,5 - 0,1 \cdot 10^{-6}$	0,6 - 2,5	<ul style="list-style-type: none"> • Cu-Mehrstoff-Gusslegierungen • Sondermessing (Fe-haltig)
Nichtmagne tisch	$< 0,1 \cdot 10^{-6}$	nicht möglich	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminium, Kupfer, Magnesium • Zink und Zinn sowie die meisten ihrer Legierungen • hochlegierte Stähle • Al-/Mn-Mehrstoffbronzen • Fe-armes Messing • Sn- und Pb-Bronzen • Cr-/Mn-/Ni-legierter Stahlschrott

Magnetscheidung kann in trockener oder nasser Betriebsweise erfolgen. Für die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen sind aber nur die trockenen Magnetscheider von Bedeutung, da die nasse Betriebsweise vornehmlich bei feinen Partikelgrößen zum Einsatz kommt (z.B. bei der Rückgewinnung von Schwerstoffen aus einer Trübe).

5.3.2.1 Trockenschwachfeldscheider

Zu den Trockenschwachfeldscheidern zählt der langsam laufende Trommelscheider mit oberer Aufgabe. Er wird für grobe bis mittlere Partikelgrößen (100 – 1 mm) eingesetzt. Diese Scheider verfügen über feststehende, in axialer Richtung parallel angeordnete Permanentmagneten mit Wechselfolge über der Trommel, sodass nebeneinander mehrere Trennzonen vorhanden sind. Abbildung 40 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Trommelscheiders. [6]

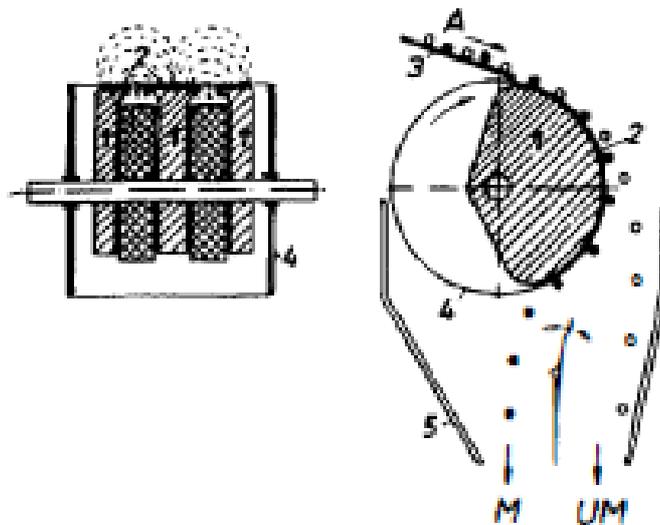


Abbildung 40: Langsam laufender Trockentrommelscheider mit oberer Aufgabe; (1) feststehendes Magnetsystem, (2) Pole, (3) Aufgabevorrichtung, (4) rotierende Trommel, (5) Gehäuse mit verstellbarem Produkteller, (A) Aufgabepunkt, (M) Magnetprodukt; (UM) unmagnetisches Produkt [6]

Die äußere Trommel rotiert um das feststehende Magnetsystem und besteht aus nicht magnetisierbarem Werkstoff. Die Breite kann bis zu 2500 mm betragen und die Durchmesser liegen zwischen 300 und 1000 mm. Die Trommeldrehzahl liegt zwischen 20 und 70 Umdrehungen/min, die Durchsätze liegen zwischen 5 und 50 t/(h m Trommelbreite). Eingebachte feinere Partikelgrößen führen zu einer hohen Staubbildung. Für ein gutes Trennergebnis muss darauf geachtet werden, dass das Gut rieselfähig und der Polabstand größer als das fünffache der oberen Korngröße ist. Ebenfalls können die Trennbedingungen durch die Drehzahleinstellung (Feldfrequenz, Zentrifugalkräfte) angepasst werden. Schnell laufende Trockentrommelscheider werden für Partikelgrößen < 5 bis etwa < 0,04 mm eingesetzt, darunter wird eine nasse Betriebsweise benötigt. [6]

5.3.2.2 Überbandmagnetscheider

Ein weiterer Vertreter der Schwachfeldscheider, der häufig Einsatz in der Sekundärrohstoffaufbereitung findet, ist der Überbandmagnetscheider. Er zählt zu den Aushebescheidern und wird nach primären Zerkleinerungsstufen zur Abtrennung von Eisen aus dem Gutstrom verwendet.

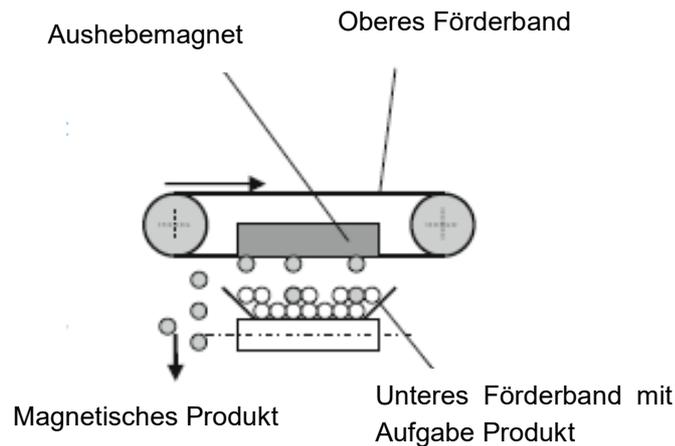


Abbildung 41: Aushebemagnetscheider über dem Produktförderband [10]

Das in Abbildung 41 gezeigte um den Permanent- oder Elektromagneten laufende Band, bewegt die angezogenen magnetischen Körner aus dem Magnetfeld heraus, sodass sie seitlich ausgebracht werden können. In Abbildung 42 sind die Möglichkeiten der Anordnung von Magnetsystemen bezogen auf das Förderband abgebildet.

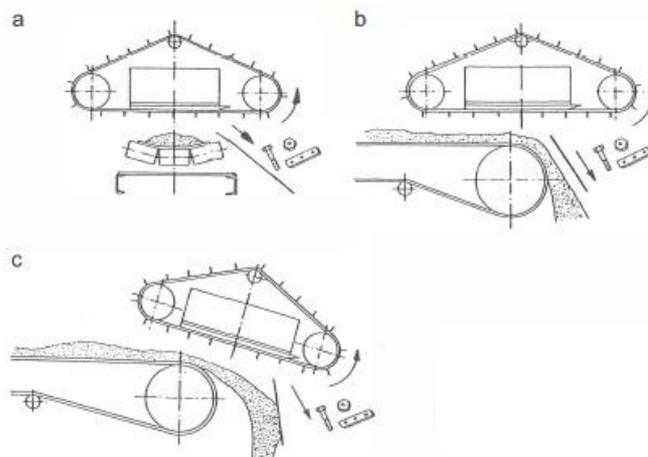


Abbildung 42: Anordnung von Überbandmagnetscheidern, (a) Querbandanordnung, (b) Überkopfanordnung, (c) Vorkopfanordnung [6]

5.3.2.3 Wirbelstromscheider

Eine Entwicklung aus der Sekundärrohstoffindustrie sind die Wirbelstromscheider. Die Wirkung eines Wirbelstromscheiders beruht auf dem Phänomen, dass ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld in einem Leiter einen Wirbelstrom induziert. Werden elektrisch leitende Partikel einem zeitlich veränderlichen magnetischen Feld ausgesetzt bzw. bewegen sich diese durch ein stationäres magnetisches Feld, so werden in ihnen Wirbelströme normal auf den magnetischen Wechselfluss erzeugt. Diese bilden sekundäre Magnetfelder aus, die den induzierten Feldern entgegen gerichtet sind, was eine abstoßende Kraftwirkung und eine Trennung der nichtmagnetischen Partikel nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit zur Folge hat. Das Trennverhalten der Partikel hängt aber nicht nur von der elektrischen Leitfähigkeit sondern auch entscheidend von der Form und der Orientierung der Teilstücke im Magnetfeld ab. Abbildung 43 zeigt schematisch das Arbeitsprinzip eines Wirbelstromscheiders und Abbildung 44 die wirkenden Kräfte. [6]

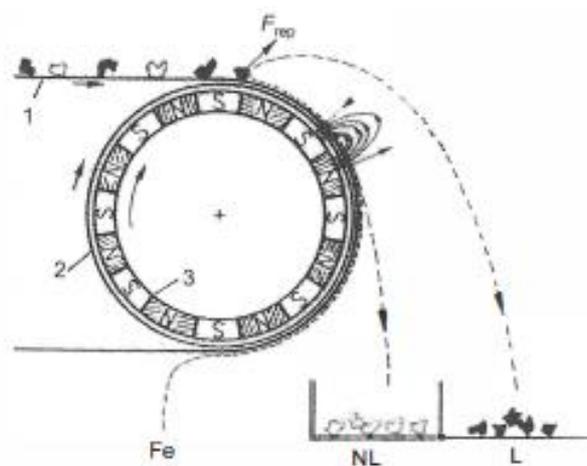


Abbildung 43: Arbeitsweise eines Wirbelstromscheiders mit konzentrischem Polrad; (1) Förderband, (2) rotierende Bandtrommel, (3) rotierendes Polrad, (L) leitendes Produkt, (NL) nichtleitendes Produkt, (Fe) ferromagnetisches Produkt [6]

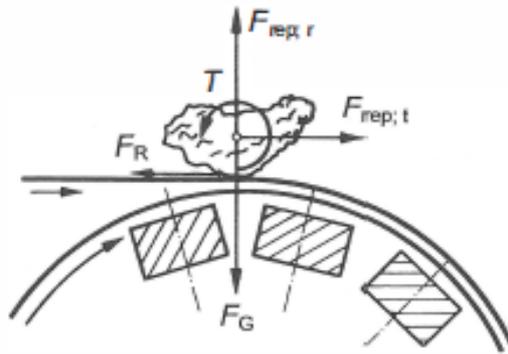


Abbildung 44: Wirkende Kräfte auf ein leitendes Partikel im Einwirkungsbereich des Polrades eines Wirbelstromscheiders; (F_G) Schwerkraft, ($F_{rep,r}$ bzw. $F_{rep,t}$) radiale bzw. tangentielle Komponente der Abstoßungskraft, (T) Drehmoment; (F_R) Reibungskraft [6]

Eine erfolgreiche Anwendung der Wirbelstromsortierung gelingt nur dann, wenn elektrisch leitende Partikel von nicht-/halbleitenden Partikeln zu trennen sind. Gibt es zwischen leitenden Partikeln kleine Leitfähigkeitsunterschiede, so sind akzeptable Trennergebnisse nur in Ausnahmefällen erreichbar, die eine sehr günstige Voraussetzung hinsichtlich der Partikelgröße und -form sowie der Orientierung im Magnetfeld erfordern. Der Parameter γ/ρ (Leitfähigkeit γ zu Stoffdichte ρ) lässt eine Abschätzung der Trennbarkeit von Materialien auf einem Wirbelstromscheider zu. So ist zum Beispiel Aluminium leichter zu trennen als Kupfer. In Tabelle 8 sind diese Stoffparameter für verschiedene Materialien angeführt. [6]

Ein weiterer wesentlicher Parameter für die wirkenden Abstoßungskräfte hängt vom Abstand der Poloberfläche zu den Partikeln ab. Dieser Abstand kann über die Dicke des Fördermittels sowie dem Sicherstellen einer Monokornschicht beeinflusst werden. Ebenfalls hat die Frequenz des Wechselfeldes einen starken Einfluss auf die wirkenden Kräfte. Es besteht ein Zusammenhang der Eindringtiefe des induzierten Feldes in die Partikel mit der elektrischen Leitfähigkeit, der Größe der Partikel sowie dem Polabstand. Daraus folgt, dass mit abnehmender Partikelgröße die Frequenz des Feldes stark zu erhöhen ist. Ein weiterer wichtiger Punkt der für eine erfolgreiche Trennung zu beachten ist, ist das eine möglichst enge Kornklasse aufgegeben werden muss. Tabelle 9 gibt einen generellen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten der Wirbelstromsortierung im Sekundärrohstoffbereich.

Tabelle 8: Angaben zu Stoffparametern für die Trennung auf einem Wirbelstromscheider, (γ) spezifische elektrische Leitfähigkeit, (ρ) Dichte, (γ/ρ) Stoffparameter von nichtmagnetischen Metallen und NE-Legierungen [16]

Stoff	γ [$10^6/(\Omega \text{ m})$]	ρ [kg/m^3]	γ/ρ [$10^3/(\Omega \text{ m kg})$]
Metalle			
Aluminium	35	2700	13
Magnesium	22	1800	12,2
Kupfer	56	8900	6,3
Silber	63	10500	6
Zink	16	7100	2,3
Messing	11 - 14	~8500	1,3 - 1,6
Zinn	9	7300	1,2
Blei	5	11300	0,4
legierte Stähle	~0,7	~7700	0,1
Aluminiumlegierungen			
Al Cu Mg	20	2800	7,1
Al Mg Si	29	2700	10,7
Al Mg 5	17	2600	6,5
G-Al Si 12	21	2650	7,9
Magnesiumlegierungen			
Mg Mn 2	17	1800	9,4
Mg Al 6 Zn	7	1800	3,9
Kupferlegierungen			
Cu-Zn-Legierungen	14	8300	1,7
Cu-Sn-Legierungen	9	8800	1,6
Cu-Al-Legierungen	9	7730	1,2

Tabelle 9: Anwendungsmöglichkeiten für Wirbelstromscheider [12, 26]

Art der Trennung	Aufgabegut	Stückgröße	Trennprodukte	
		[mm]	elektrisch besser leitende Bestandteile	elektrisch schlechter leitende Bestandteile
Metall-Nicht-Metall-Trennung	NE-metallhaltige Zwischenprodukte der Schrottaufbereitung	5 - 100		
	Mg-Gummi		Mg	Gummi
	Al-Glas-Stein		Al	Glas, Stein
	unmagnetische Zwischenprodukte gesiebt oder gesichtet		Al, Mg, Cu, Zn, Al-Zn-Legierungen	Pb, legierte Stähle, Nichtmetalle
	schwermetallhaltige Zwischenprodukte		Cu, Zn, Cu-Zn-Legierungen	Pb, legierte Stähle
	Vorangereicherte Zwischenprodukte der Siedlungsabfallaufbereitung	< 150		legierte Stähle, Nichtmetalle
	Verpackungsabfälle		Al, Al-haltige Verbunde	Nichtmetalle
	Zwischenprodukte der Hausmüllaufbereitung		Al, Al-haltige Verbunde	Nichtmetalle
	Glasbruch		Al	Glas
	Al-haltige Salzsclacken		Al	Schlacke
Metall-Metall-Trennung	NE-Metall-Gemisch mit günstiger Partikelgröße und Form	< 100	Al	Cu, Cu-Zn-Legierungen
	Pb-Cu-Gemisch der Kabelschrottaufbereitung		Cu	Pb

Eine Unterteilung der Wirbelstromsortierer erfolgt nach der Art der Felderzeugung und Anordnung des Magnetsystems. Es gibt Magnetfelder, die mit Permanent- oder Elektromagneten erzeugt werden, wobei die Elektromagneten, aufgrund ihres Stromverbrauches, in ihrer Anwendung rückläufig sind. Ferner gibt es Scheider mit konzentrischer und exzentrischer Polradanordnung. Einen Überblick dieser Einteilung und die jeweilige Arbeitsweise zeigen Abbildung 45 und Abbildung 46. [6]

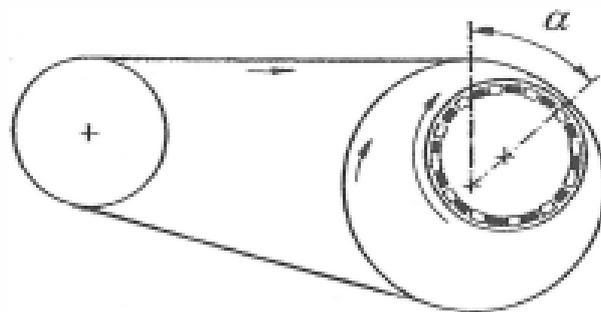


Abbildung 45: Wirbelstromscheider mit exzentrischem Polrad, (α) Wirkungsbereich des Wechselfeldes [6]

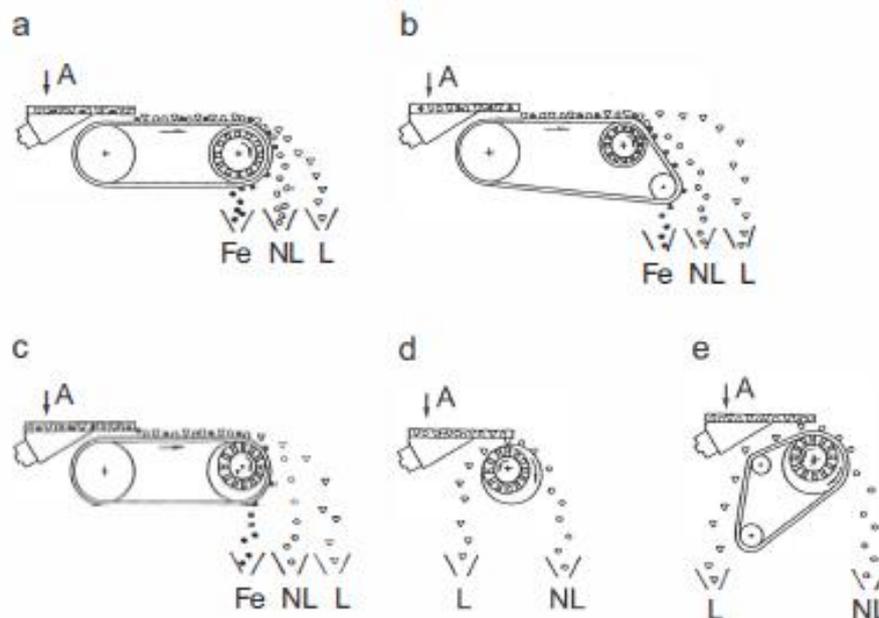


Abbildung 46: Bauarten von Wirbelstromscheidern verschiedener Hersteller, schematisch; (a) Eriez, Wagner, Goudsmit; (b) Gantry; (c) Steinert; (d) Älmhults-EI-Merk; (e) Exner-Werth/Steinert; (A) Aufgabepunkt, (L) leitendes Produkt, (NL) nicht leitendes Produkt, (Fe) ferromagnetisches Produkt [6]

Scheider mit konzentrischem Polrad sind günstiger in der Produktion, jedoch lässt sich die Auslenkung und damit die Wurfweite der leitenden Partikel nur über die Veränderung der Frequenz mittels der Drehzahl und –richtung beeinflussen. Bei exzentrisch angeordneten Polrädern steht als zusätzlicher Einstellparameter die Winkellage des Polrades zur Trommel zur Verfügung. Zu berücksichtigen ist auch, dass ferromagnetische Bestandteile vorab aus dem Aufgabegut, durch einen Schwachfeldmagnetscheider, zu entfernen sind, da es sonst vorwiegend bei konzentrischer Anordnung des Polrades zu Betriebsstörungen kommen kann. Scheider mit exzentrischer Anordnung reagieren weniger empfindlich auf ferromagnetische Bestandteile, da das Nachlassen der Magnetkräfte aufgrund der Abstandszunahme bei der Abwärtsbewegung das Abwerfen erleichtert. [6, 26]

5.3.3 Elektrosortierung

Ziel der trockenen Elektrosortierung ist es auf Partikeln Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens oder zumindest unterschiedlicher Größe gleichen Vorzeichens zu erzeugen, um diese anschließend mittels des Wirkprinzips der Ablenkung in einem elektrischen Feld zu trennen. Diese Aufladung kann durch Kontaktpolarisation im elektrischen Feld, der Triboaufladung oder der Aufladung in einem Koronafeld erfolgen. Für die Triboaufladung ist ein genügend großer Unterschied in den Dielektrizitätskonstanten der Partikel wesentlich, für die anderen beiden nur ein ausreichender Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit der Partikel. In allen Fällen ist jedoch zu beachten, dass es sich hauptsächlich um Eigenschaften der Oberflächenschichten handelt, welche durch äußere Einwirkung (Adsorption, Temperatur, Oberflächenreaktionen, Strahlung, Luftfeuchtigkeit, mechanische Einwirkung etc.) beeinflusst werden können. Eingesetzt werden kann die Elektrosortierung bei Partikelgrößen < 3 mm da die auf Nichtleiter wirkende Zentrifugal- und Schwerkraft bei größeren Partikeln den Trennerfolg ungünstig beeinflussen würden. Ein befriedigendes Trennergebnis setzt die Aufgabe eines genügend engen Kornbandes auf die Scheider voraus. Ein Vorteil der Elektrosortierung ist der geringe Energiebedarf da nur hohe Spannungen (~ 40 kV) benötigt werden. Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Trennprinzipien der dazu gehörenden Wirbelstrom- und Elektroscheider. [6, 27]

Tabelle 10: Trennprinzipien von Wirbelstrom- und Elektroscheidern nach ihrem Trennmerkmal gegenübergestellt [30]

Trennmerkmal	Sortierprozess	Trennprinzip	Sortieraufgabe	Partikelgrößenbereich
elektrische Leitfähigkeit (Quotient γ/ρ)	Wirbelstromscheidung	Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Stoffen bewirken in Verbindung mit dem induzierten Magnetfeld eine Kraftwirkung (Lorentz-Kräfte)	Leiter-Nichtleiter-Trennung	> 5 mm
elektrische Leitfähigkeit (Oberflächenleitfähigkeit)	Elektroscheidung mittels Koronawalzenscheider	Koronaaufladung und differenzierte Entladung führen zu unterschiedlichen Ladungen auf den Teilchen und damit zu unterschiedlichen Kraftwirkungen	Leiter-Nichtleiter-Trennung	0,02 bis 4 mm
Dielektrizitätskonstante	Elektroscheidung mittels elektrostatischem Freifallscheider	Triboaufladung mit unterschiedlichen Ladungsvorzeichen der Komponenten bewirken unterschiedliche Krafrichtungen	Nichtleitertrennung	< 3mm

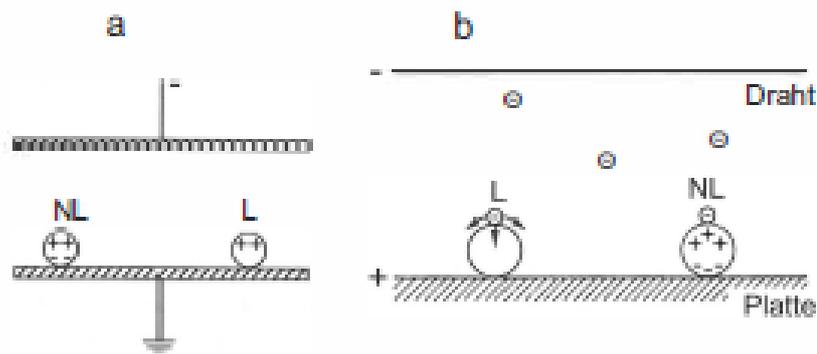


Abbildung 47: Auflademechanismus durch (a) Kontaktpolarisation und (b) im Koronafeld; (L) Leiter, (NL) nicht Leiter [6]

In Abbildung 47 seien kurz die Auflademechanismen für die Kontaktpolarisation und die Aufladung im Koronafeld illustriert. Gleichnamige Ladungen stoßen einander ab, was dazu führt, dass elektrische Leiter, die durch Ladungsübergang gleichnamig zur Kontaktfläche aufgeladen werden, abgestoßen werden. Nichtleiter werden polarisiert, es findet jedoch kein Ladungsübergang statt. Sie bleiben an der Kontaktfläche aufgrund der anziehend wirkenden Coulombkräfte haften. Bei der Triboaufladung kann beobachtet werden, dass, wenn die Oberflächen zweier fester Stoffe in Kontakt gebracht werden und dieser anschließend wieder gelöst wird, sich die Stoffe mit entgegengesetzter Polarität aufladen. Die Coulombkräfte im elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden sind für die translatorische Kraftwirkung verantwortlich. Als tieferführende Informationsquellen sei an dieser Stelle auf [24, 27, 28] verwiesen.

In Abbildung 48 sei der komplette Trennprozess nach einer triboelektrischen Aufladung mit einem nachgeschalteten Walzenscheider veranschaulicht.

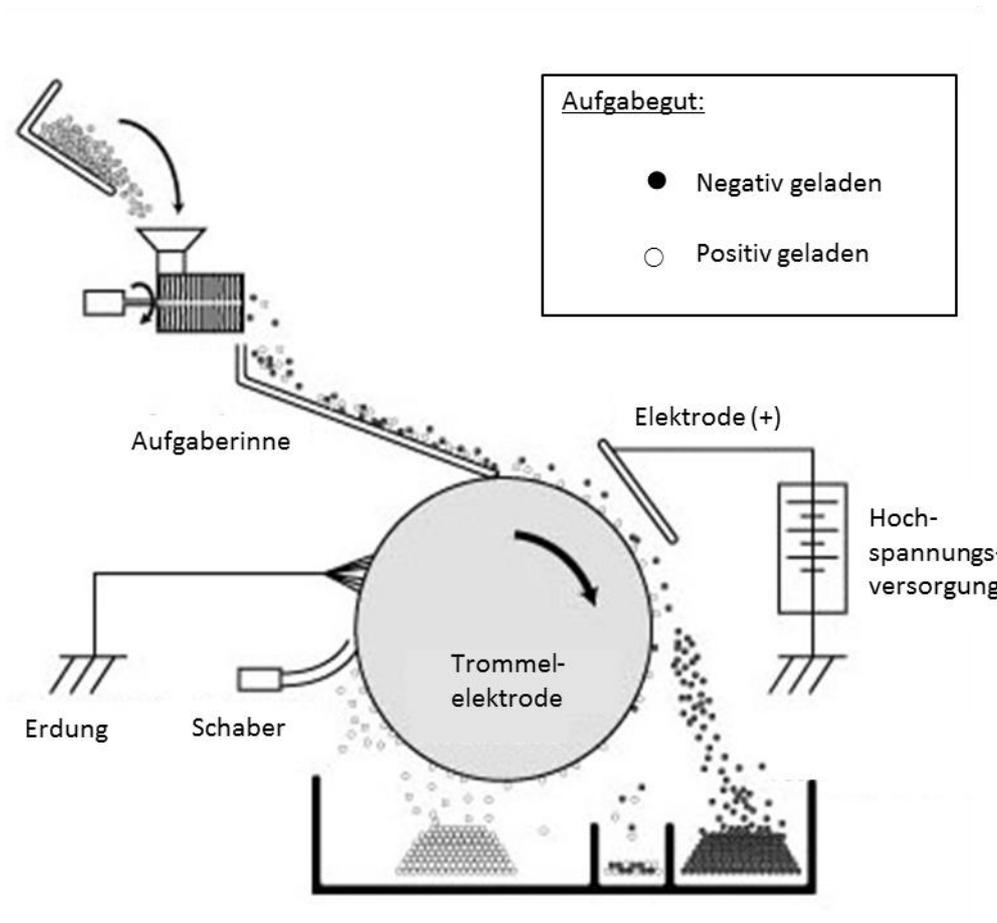


Abbildung 48: Schematisches Funktionsprinzip eines elektrostatischen Walzenscheiders welcher mit Gut, welches durch Triboaufladung vorbehandelt wurde, beschickt wird [29]

In der Abbildung 49 seien die gängigsten Varianten von Elektroscheidern und ihre Bauart angeführt.

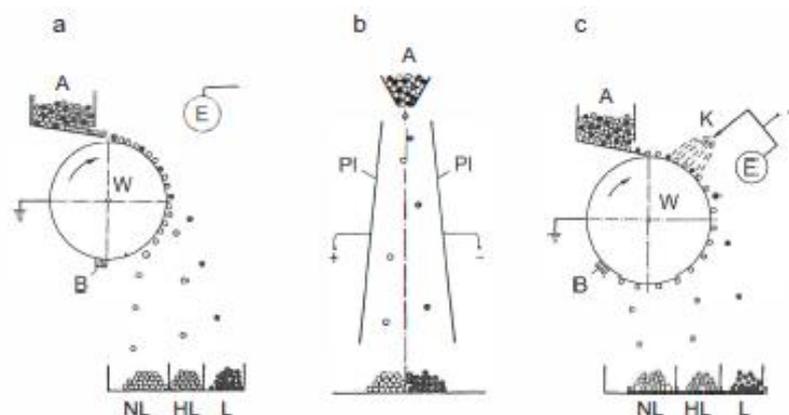


Abbildung 49: Unterschiedliche Trennmodelle für die Sortierung auf Elektroscheidern: (a) Ablensortierung auf einem elektrostatischen Walzenscheider, (b) Ablensortierung in einem elektrostatischen Freifallscheider, (c) Ablensortierung auf einem Koronawalzenscheider; (W) geerdete Walzenelektrode, (E) elektrostatische Gegenelektrode, (Pl) Plattenelektrode, (K) Koronalelektrode, (A) Aufgabegut, (L) leitendes Produkt, (HL) halbleitendes Produkt, (NL) nicht leitendes Produkt [6]

5.3.3.1 Elektrostatischer Walzenscheider

Der in Abbildung 49 gezeigte Walzenscheider sei hier kurz beschrieben: Das leitende Partikel wird sofort entsprechend der Ladung der Trägerelektrode polarisiert. Das nichtleitende Partikel erhält keine Polarisation. Wird ein elektrischer Leiter einem elektrischen Feld ausgesetzt, so wird er durch Wirkung der *Coulombkraft* in Richtung der Gegenelektrode abgelenkt und im Produkt „Leiter“ ausgebracht. Der Nichtleiter wird nicht abgelenkt und kommt in das Produkt „Nichtleiter“. Ein an der Gegenelektrode angebrachter Abstreifer säubert die Walze von etwaig anhaftenden Partikeln. Die Ladung der Gegenelektrode wird durch eine Kammelektrode zusätzlich verstärkt um größere elektrische Feldstärken zu erreichen. Der Einsatz der Walzenscheider ist in letzter Zeit rückläufig, da mit Korona-Walzenscheidern höhere Ladungen der Partikel erreichbar sind.

5.3.3.2 Korona Walzenscheider

In der Sekundärrohstoffaufbereitung findet der Koronawalzenscheider für die Trennung von Leiter/Nichtleiter-Gemischen häufigen Einsatz. Beispielhaft als Aggregat sei hier der *Hamos KWS* von der Firma *Hamos GmbH Recycling- und Separationstechnik* genannt. Laut Herstellerangaben ist der Apparat mit einer maximalen Partikelgröße von 8 mm nach oben und einer minimalen Partikelgröße von 100 µm begrenzt. Das elektrostatische Feld besitzt eine Spannung im Bereich von 35.000 Volt und funktioniert nach dem oben erklärten Koronaauflademechanismus. Für ein sortenreines Trennergebnis muss das Aufgabegut vollständig aufgeschlossen sein. Weiters darf es keine höhere Oberflächenfeuchte als 0,2 % haben und muss staubfrei (Partikel < 100 µm) sein. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 49 ersichtlich. [30]

5.3.4 Sensorgestützte Sortierung nach optischen Eigenschaften

Die sensorgestützte Sortierung von Materialien ist eine automatisierte Weiterentwicklung des Klaubens von Hand. Sensorgestützte Sortierer erkennen, evaluieren und trennen jedes Partikel einzeln und sind deshalb als Einzelkornsortierer anzusehen. Ein trennscharfes Ergebnis auf sensorgestützten Sortierern bedingt zumindest einen vollständigen Aufschluss der Phasen. Das Verhältnis von Größtkorn- zu Kleinstkorndurchmessern kann auf modernen leistungsfähigen Apparaten auf sechs oder mehr ausgedehnt werden. [31]

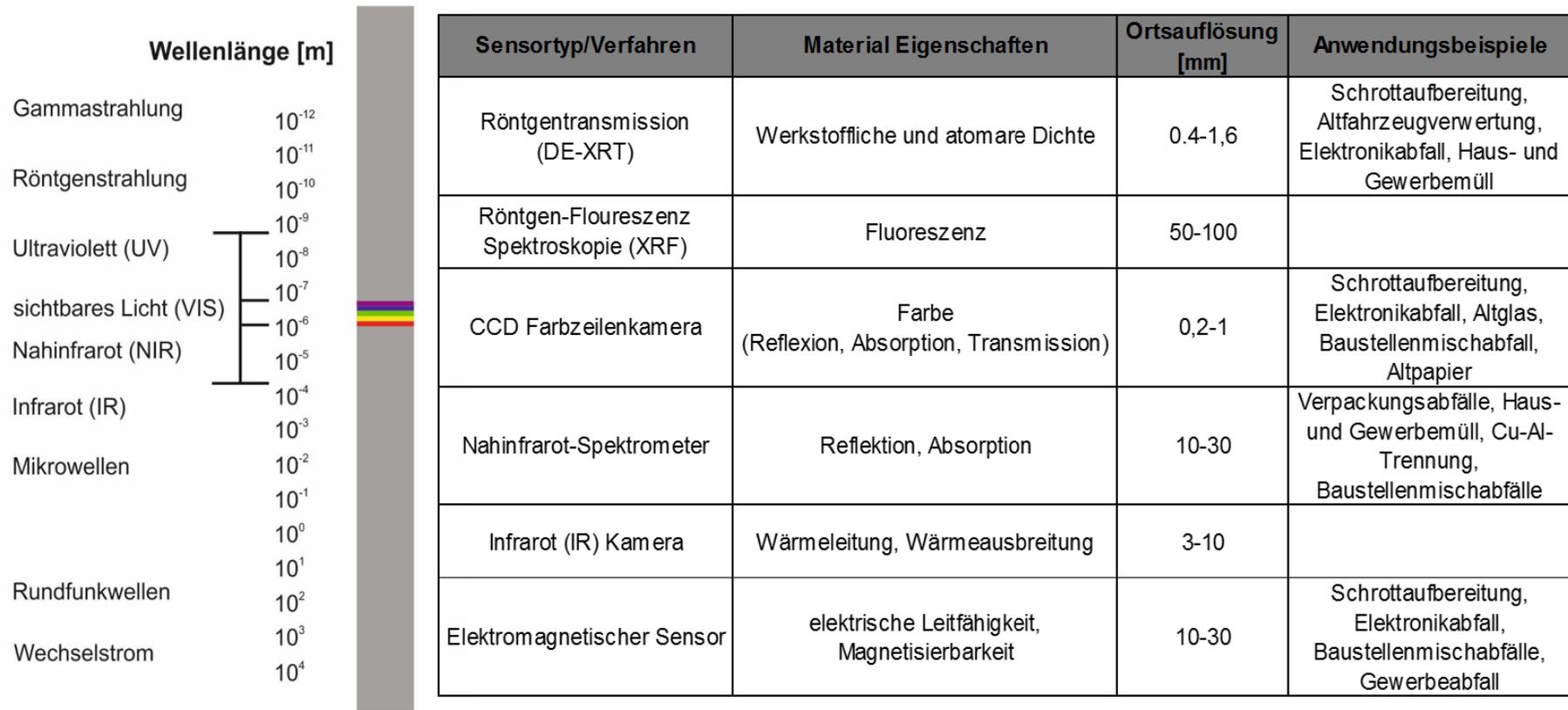
Feststoffe interagieren mit elektromagnetischer Strahlung mit Absorption, Remission und Transmission. Dies hängt von der Art des Feststoffes und der Energie der Strahlung ab. Es wird zwischen oberflächenwirksame (2D, vorwiegend Remission) Wechselwirkung und volumswirksame Wechselwirkung. (3 D, Transmission) unterschieden. Ebenso kann auch lediglich die Farbe, im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes, von zu sortierenden Stoffen ausgenutzt werden. Bei oberflächenwirksamen Sensorsystemen kann vor dem Sortierschritt eine vorgelagerte Waschung, zur Entfernung von Verunreinigungen bzw. zur Erhöhung der Trennschärfe, vonnöten sein. Die Detektionssysteme sind von der zu erfassenden Wellenlänge abhängig. Eine Übersicht über die Sensor Detektorsysteme gibt Tabelle 11. [6]

Tabelle 11: Aufzählung der Trennmerkmale und der zugehörigen Sensorsysteme für eine automatisierte sensorgestützte Sortierung [31]

Detektionssysteme und Anregungsarten für automatisiertes Klauben			
Art der Anregung		Trennmerkmal	Sensor bzw. Sensorsystem
Sichtbares Licht		Echtfarben	photometrische Detektoren, CCD-Schwarz-/Weiß- und Farbkameras
		Reflexion <ul style="list-style-type: none"> • allgemein • spezifisch • polarisiert 	
		Transmission	
		Form	Bildanalysatoren
UV-Strahlung		Fluoreszenz	Photometrische Detektoren
IR-Strahlung		Reflexion	Infrarotspektrometer
Röntgenstrahlung		Transmission	Röntgenstrahldetektoren
		Fluoreszenz	Photometrische Detektoren
		Röntgenfluoreszenz	Wellenlängen- oder energiedispersive Detektoren
Magnetisches Wechselfeld	Wechselstromdurchflossene Spule bei...	...niedriger Spannung	Widerstandsmessung
		...hoher Spannung	Messung der Induktion oder Wirbelstromdetektoren

Einen Überblick über die Wellenlängenbereiche, deren zugehörige Detektionssysteme und beispielhafte Anwendungen gibt Abbildung 50.

Abbildung 50: Wellenlängenbereich mit zugehöriger Sensortechnik und Anwendungsbeispiele für sensorgestützte Sortierer nach [32]



Der anzuwendende Wellenlängenbereich der Strahlung und das dazu gehörende Detektionssystem sind, wie in obiger Tabelle beschrieben, vom zu sortierenden Material abhängig. Um eine erfolgreiche Sortierung durchzuführen ist eine Vereinzelung der Körner notwendig. Dies geschieht entweder über Vereinzelungsrutschen oder -bänder. Diese Vereinzelungsanlagen sollen neben der Separierung des gehäuften Gutstroms in ein Band aus Monopartikel auch eine etwaige Relativbewegung der Partikel unterbinden, während sie das Gut dem Strahlungsquellen-Detektorsystem zuführen. Der Abstand zwischen Strahlungsquellen-Detektorsystem und Ausblasvorrichtung soll so gering wie möglich gehalten werden, um einen Fehlaustrag aufgrund von Bewegungen der Körner vor der Ausblasvorrichtung zu vermeiden. Die Detektorsysteme können in modernen Anlagen bis zu 40.000 Einzelbilder pro Sekunde und Meter Arbeitsbreite erfassen. Diese Daten werden an einen Hochleistungsrechner gesendet, welcher im Millisekundenbereich schaltende Druckluftventile ansteuert und so das mechanische Aussortieren von bis zu 2.000 Einzelstücken pro Sekunde und Meter Arbeitsbreite auslöst. Die Anzahl der Einzelbilder pro Sekunde hängt von der Auflösung des Detektionssystems und der Rechenleistung des Computers ab, die Ausblasleistung von der Reaktionszeit der Ventile. Diese beiden Einschränkungen der sensorgestützten Sortierung unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung in der Elektronik und Mechanik und werden in der Zukunft weit höhere Grenzen erreichen. Als untere Partikelgrößengrenze mit einem akzeptablen Trennergebnis gibt *Wortruba* [31] mit 1 mm an, als obere Grenze sind aus der Mineralrohstoffaufbereitung 300 mm bekannt. Der Massedurchsatz ist vom Einzelkorngewicht abhängig. Als Richtwerte können 1 bis 250 t/h genannt werden. In Abbildung 51 und Abbildung 52 sind der schematische Aufbau von Systemen mit Rutschen und Bändern sowie die Positionierung von Strahlungsquelle-Detektorsystemen veranschaulicht. [31]

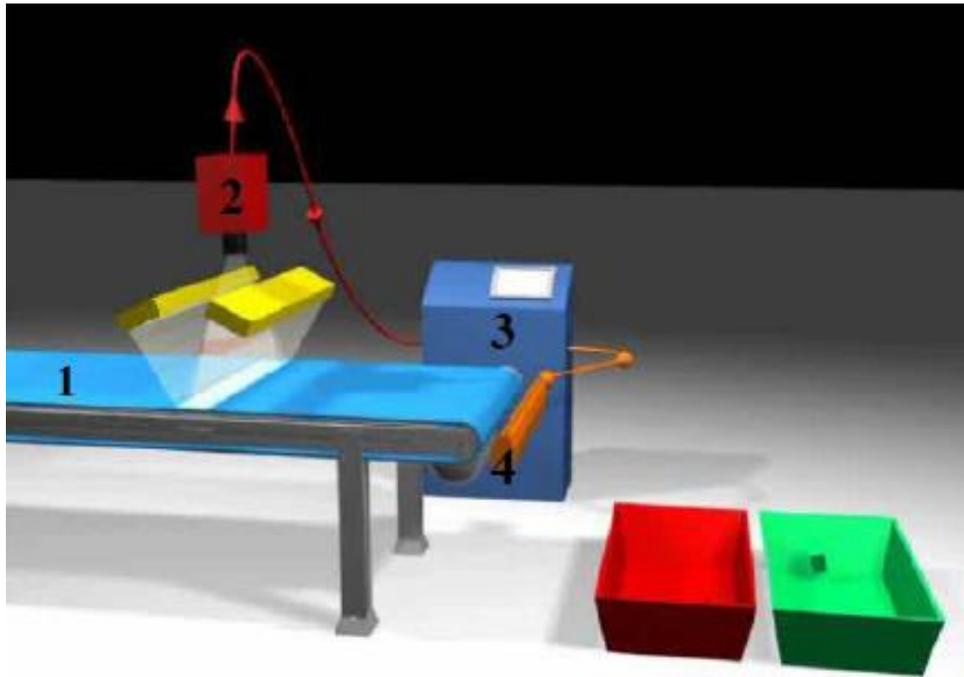


Abbildung 51: (1) Vereinzelungsband, (2) Strahlungsquelle-Detektorsystem, (3) Hochleistungsrechner, (4) Ausblasvorrichtung [31]

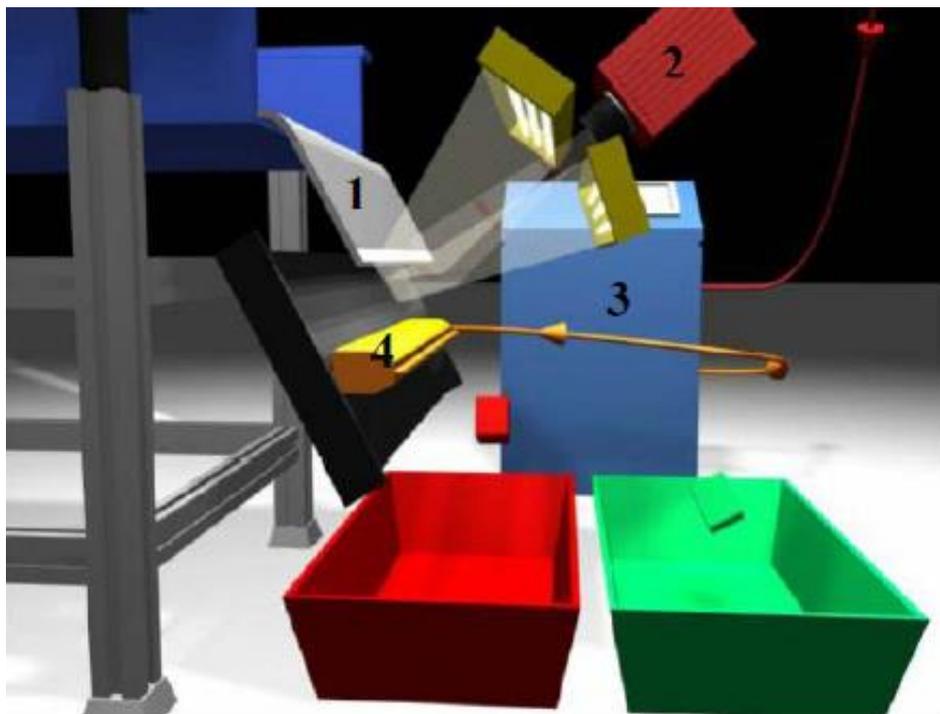


Abbildung 52: (1) Vereinzelungsrutsche, (2) Strahlungsquelle-Detektorsystem, (3) Hochleistungsrechner, (4) Ausblasvorrichtung [21]

6 Prozessschaubild einer Aufbereitungsanlage für Sekundärrohstoffe

Ein Beispiel für eine bestehende Anlage ist der Stammbaum zur Aufbereitung von weißer Ware und Elektronikschrott in Abbildung 53 der Firma METRAN aus [10].

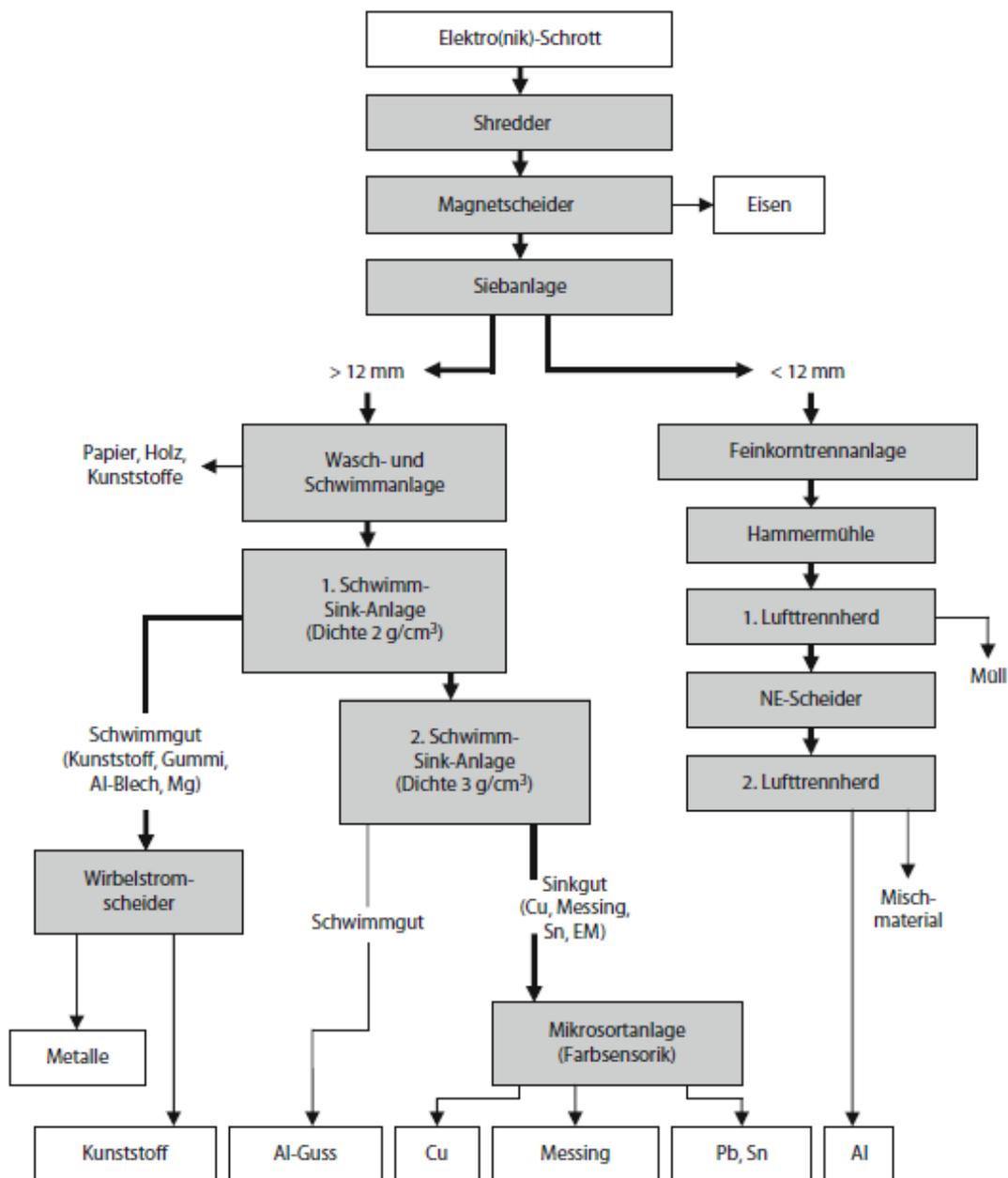


Abbildung 53: Prozessschaubild der Recyclinganlage METRAN [10]

Wie in dem Prozessschaubild zu sehen ist, wird als erster Schritt eine Zerkleinerung des zu verarbeitenden Elektronikschrottes durch einen Shredder durchgeführt. Ein nachfolgender Schwachfeldmagnetscheider schleust

starkmagnetische Bestandteile, wie Eisen, aus dem Gutstrom aus. Die anknüpfende Siebanlage trennt den Gutstrom in eine Grobfraction mit einer Partikelgröße von > 12 mm und eine Feinfraction mit < 12 mm Partikeldurchmesser.

Die Grobfraction wird auf eine nasse Linie mit einer Wasch- und Schwimmanlage aufgegeben. In dieser werden Holz, Papier und Kunststoffe durch eine Dichtetrennung in Wasser aus dem Gutstrom sortiert. Anschließend wird in einer Schwertrübe mit einer Dichte von $2,00 \text{ g/cm}^3$ eine Leichtfraction bestehend aus Kunststoffen mit einer Dichte zwischen $1,00$ und $2,00 \text{ g/cm}^3$, Gummi, Magnesiumbauteilen und Aluminiumblechen getrennt. Diese Leichtfraction wird zur Leiter-/Nichtleitertrennung auf einem Wirbelstromscheider weitergeleitet. Das Schwergut aus der ersten Schwimm-Sink-Anlage wird in einer zweiten bei einer Schwertrübedichte von $3,00 \text{ g/cm}^3$ neuerlich einer Dichtesortierung unterzogen. Das daraus resultierende Leichtgut besteht aus Aluminium. Das Schwergut wird zum Zwecke der Erstellung von hochreinen Metallkonzentraten in der sensorgestützten Sortieranlage „Mikrosort“ verarbeitet.

Die Feinfraction wird auf eine Feinkorntrennanlage aufgegeben. Unter dieser Bezeichnung ist ein Windsichter mit Zyklon und Filter zur Abtrennung von Feinstkorn, welches vor der nachfolgenden Hammermühle ausgeschleust wird, zu verstehen. Durch diesen Schritt können feinste Partikel ausgebracht und separat behandelt werden.

Dieser Schritt erfolgt, um feinste Partikel auszubringen und separat behandeln zu können. Bei der Hammermühle handelt es sich um einen Shredder, mit vertikaler Welle bestückt mit Hämmern, welcher den Aufschlussgrad der von Feinstkorn entfrachteten Fraction weiter erhöht. Darauffolgend ist ein erster Lufttrennherd in den Prozess geschaltet, welcher die Aufgabe der Leichtgutabtrennung vollzieht. Bei diesem Leichtgut handelt es sich um Kunststoff und Holz. Bei dem anschließenden Nichteisenscheider könnte es sich um eine Wirbelstromsortieranlage handeln, welche die übrig gebliebenen Metalle nach dem Trennmerkmal „elektrische Leitfähigkeit“ sortiert. Ein Wertstoffaustrag ist an dieser Stelle nicht angezeigt, was als Fehlinformation gedeutet werden kann. Weiters ist das Fehlen einer Gutvorbereitung durch Siebung für die nachfolgenden

Lufttrennherde an dieser Stelle als Mangelinformation zu deuten. Als letzter Schritt trennt ein Lufttrennherd den Gutstrom in eine Aluminium- und eine Mischfraktion.

Die Art der Apparate und die Verschaltung der Prozessabläufe von Aufbereitungsanlagen, im speziellen in der Sekundärrohstoffindustrie, stellen aufgrund der Konkurrenzsituation in der Regel Betriebsgeheimnisse dar. Sie werden daher, wenn überhaupt, stark vereinfacht dargestellt.

Die Informationen, welche durch das Prozessschaubild in Abbildung 53 wiedergegeben werden, sollten kritisch betrachtet werden. Gründe dafür liegen in den Angaben zur Linie der Feinfraktion < 12 mm. Es fehlt hier eindeutig ein Produktstrom. Das Fehlen der Angaben zur Funktion des Nichteisenscheiders und das Fehlen von Informationen bezüglich des Wertstoffaustrages können als Wahrung von Betriebsgeheimnissen des Unternehmens angesehen werden. Weiters ist auch der Gedanke hinter dem Prozessgang einer Nichteisentrennung mit nachgeschalteter Dichtentrennung zu hinterfragen, da die umgekehrte Reihenfolge aus Gründen der Reduzierung des Massestroms über den angenommenen Wirbelstromscheider sinnvoll erscheint.

Aus diesem Grund führt der einzige Weg, um zu einem plausiblen Anlagenschema zu kommen, über das Rohgut und dessen Analyse. Die Vorgehensweise wird im Folgenden Kapitel wiedergegeben.

7 Systematische aufbereitungstechnische Rohgutanalyse von Hütteneinsatzstoffen

Die Methode der aufbereitungstechnischen Rohgutanalyse nach der Praxis des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung dient dazu, alle für die Trennung eines Rohguts relevante Information in einer Effizienz zu beschaffen, wie sie nur Laborverfahren erreichen können. Sie besteht aus einer integralen Abfolge von experimenteller Laborversuchstätigkeit an einer repräsentativen Probe des Rohguts, um auslegungsrelevante Kennwerte für die Zerkleinerung, nutzbare physikalische Trennmerkmale, aufbereitungsrelevanten Phasenbestände, sowie dessen Elementaufbau und Verwachsungszustände (Stoffverbund) zu erhalten. Die Ergebnisse werden in Form von Bilanzen und im sogenannten Henry-Reinhardt-Schaubild zusammengefasst, welches bezogen auf einen interessierenden Wertstoff oder Schadstoff die Ergebnisse aller möglichen Zweiproduktentrennungen für ein physikalisches Trennmerkmal (Korngröße, Dichte, Magnetisierbarkeit) beinhaltet. Diese erlauben eine Vorhersage des bestmöglichen Trennergebnisses, was einerseits als Benchmark zur Beurteilung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit von Aufbereitungstätigkeit benötigt wird, andererseits als Grundlage für die Planung von technischen Aufbereitungsanlagen dient. [5]

Folgende Abfolge von Aufbereitungsversuchen stellt den Rahmen der Rohgutanalyse dar und wird an die Erfordernisse des jeweiligen Rohguts angepasst.

- Energieoptimierte Zerkleinerung
 - Ergebnis: reproduzierbare Kornverteilungen, Energieaufwand für die Zerkleinerung, Darstellung in Form von Merkmalsverteilungen
- Mehrdimensionale Merkmalsklassenanalytik
 - Ergebnis Merkmalsverteilungen in Form von Summenhäufigkeitsverteilungen

- Ermittlung des Stoff- und Phasenbestand in den Merkmalsklassen
 - Ergebnis: Art der Phasen deren Elementaufbau bzw. Verwachsungszustand

Daraus kann die Verteilung eines Wert- oder Schadstoffes auf die Phasen in Kombination mit trennrelevanten Eigenschaften ermittelt werden.

Die Rohgutanalyse der drei vorliegenden Materialien wird dahingehend angepasst, dass es keine energieoptimierte Zerkleinerung gab, da die Partikelgröße bereits ausreichend war. Als Trennmerkmale werden die Magnetisierbarkeit und die Dichte gewählt.

Die Merkmalsklassenanalyse wird allgemein in Form einer Summenhäufigkeitsverteilung ausgewertet. Ein Beispiel dafür stellt die häufig benötigte Durchgangs- oder Rückstandverteilung für das Merkmal Korngröße dar. In gleicher Weise wird mit dem Kennwert für die Magnetisierung oder der Dichte verfahren. Diese Merkmalskurve wird mit der Summenmasseverteilung eines Stoffgehaltes (Wert- und/ oder Schadstoff), die auch als Grundverwachsungskurve (Henry-Reinhardt-Schaubild) bezeichnet wird, kombiniert. Durch fortgesetzte Ermittlung der mittleren Gehalte (z.B. graphisch durch Flächenausgleich) für die Produktmassen, die sich bei stetiger Erhöhung der Lage des Trennschnittes einstellen, gelangt man zu den sogenannten Summenkurven. Diese geben die mittleren Stoffgehalte in den Trennprodukten aller möglichen Trennschnitte einer Zweiproduktentrennung an. Grundverwachsungskurve und Summenkurve bilden die Grundbestandteile des Henry-Reinhardt-Schaubildes.

Über die Masseanteile gelingt es eine Beziehung zwischen Trennmerkmal und zugehörigen mittleren Gehalten in den Trennprodukten herzustellen. Dies sei an 2 Beispielen in den nachfolgenden Henry-Reinhardt-Schaubildern erläutert.

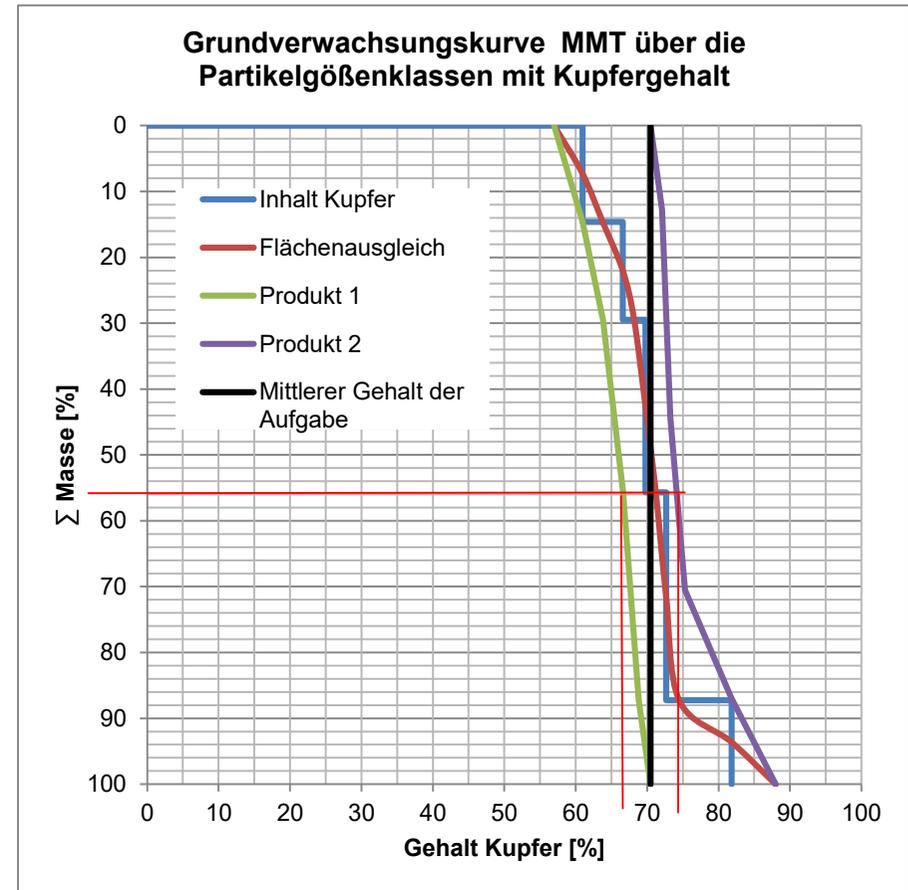
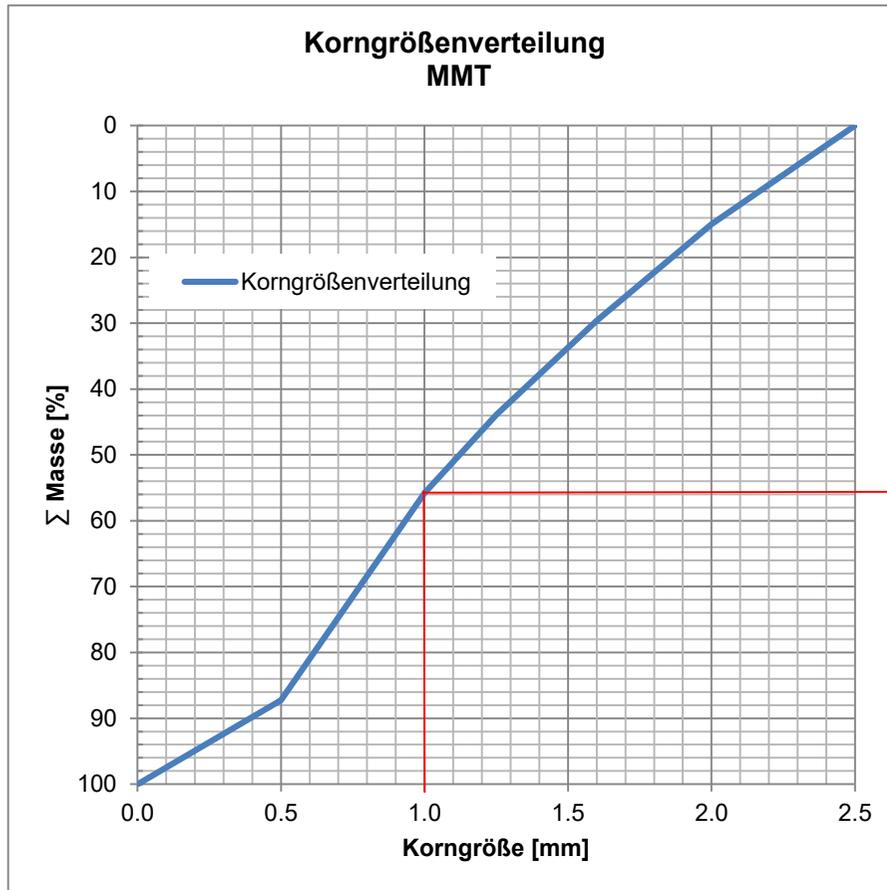


Abbildung 54: Grundverwachsungskurve MMT mit Summenkurven und Korngrößendurchgangsverteilung

Die Grundverwachsungskurve zeigt eine Zunahme des Kupfergehaltes bei abnehmender Korngröße. Die Summenkurven, in diesem Fall der Korngrößentrennung, die Grobgutkurve (Produkt 1) und Feingutkurve (Produkt 2), geben die mittleren Kupfergehalte in den Produkten bei Trennung bei einer bestimmten Korngröße an.

Aus den Summenkurven in Abbildung 54 ist abzulesen, dass alleine durch eine Siebung bei 1 mm ein Produkt > 1 mm mit 55 Masse-% und 66 % Kupfergehalt (Produkt 1 Linie) und ein Produkt < 1 mm mit 45 Masse-% und 74 % Kupfergehalt (Produkt 2 Linie) erstellt werden kann. Diese graphische Auswertung erlaubt vorherzusagen, welche bestmöglichen Qualitäten Produkte aus Sortier- oder Klassierprozessen erreichen können.

In Abbildung 55 ist die Summenmasseverteilung über dem Merkmal Magnetisierbarkeit ausgedrückt durch die Flussdichte des Magnetscheiders dem Henry-Reinhardt-Schaubild für Chrom bestehend aus Grundverwachsungskurve und den Summenkurvenkurven für die Magnetprodukt und das unmagnetische Produkt gegenübergestellt.

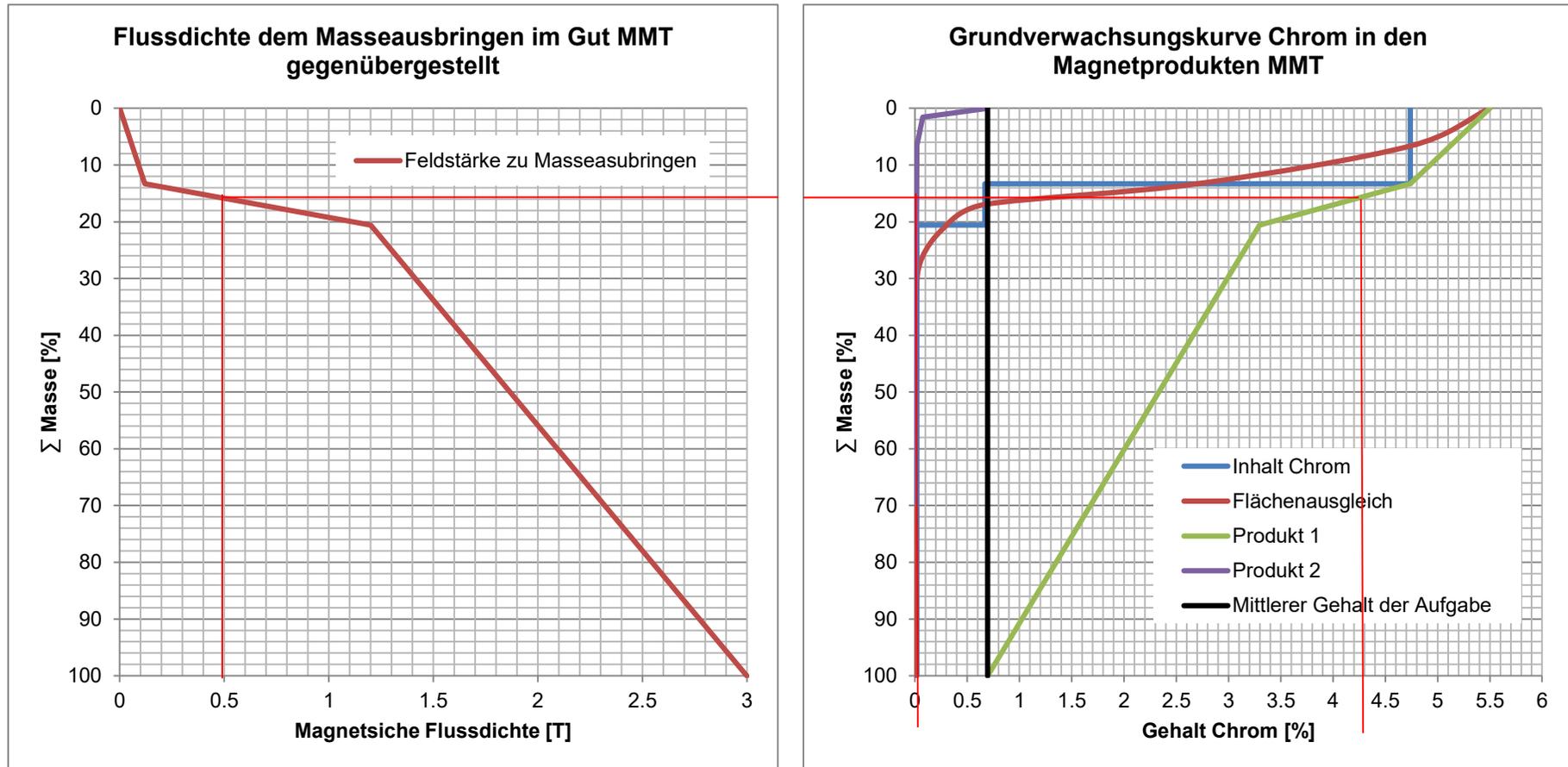


Abbildung 55: Erklärung des Henry-Reinhard-Schaubildes

Hier kann nun graphisch ermittelt werden, dass zum Beispiel bei einer Feldstärke von 0,5 T ein Produkt 1 mit 16 Masse-% und einem Gehalt an Chrom von 4,2 % ausgebracht werden kann. Dabei wird ein Produkt 2 mit 84 Masse-% und fast 0 % Chrom erhalten. Ebenso kann der Rückschluss für die benötigte Feldstärke bei einem vorgegebenen Chromgehalt gemacht werden.

7.1 Merkmalsklassen- und Elementanalyse

Als erster Schritt wurde eine mehrdimensionale Merkmalsklassenanalyse durchgeführt. Die untersuchten Merkmale umfassten die Korngröße (durch Siebanalyse), die magnetische Suszeptibilität (durch analysenscharfe Magnetscheidung) und die Stoffdichte (durch Schwimm-Sink-Analyse). Dies ist schematisch in Abbildung 56 dargestellt.

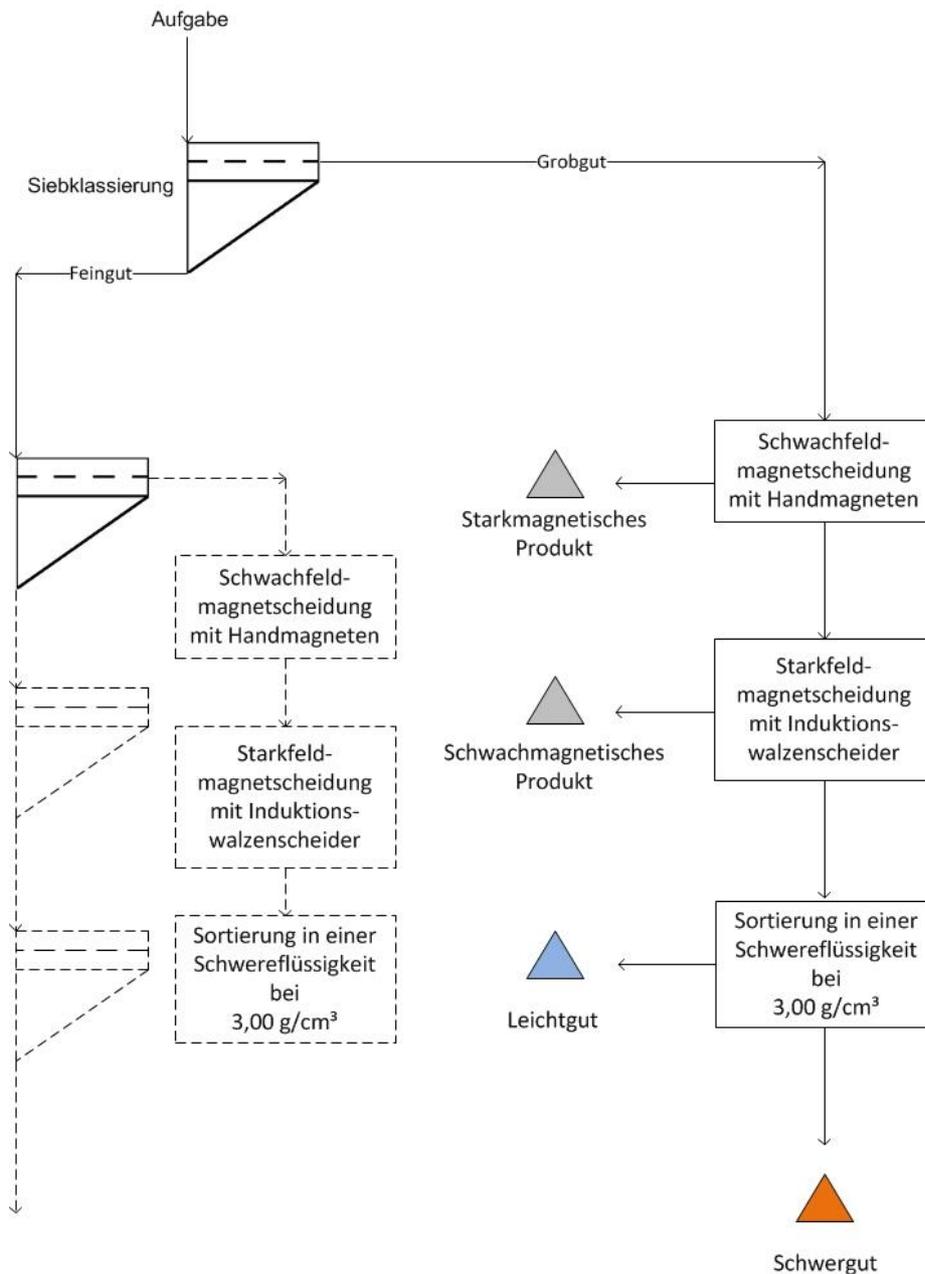


Abbildung 56: Merkmalsklassenanalyse schematisch, durchgeführt am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben

Die in der Einleitung des Kapitels genannte Bestimmung der Bruchcharakteristik und des Zerkleinerungswiderstandes finden im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung, da die Rohgüter bereits in einer den Hütteneinsatzstoffen entsprechenden Partikelgröße vorliegen. Für eine analysenscharfe Sortierung der Partikel in ihre jeweilige Merkmalsklasse, ist eine Siebung vor dem Sortierschritt erforderlich. Die Einteilung der Siebfraktionen wird an jedes Rohgut angepasst und durch analysenscharfe Handsiebung mit Laborsieben durchgeführt. Nach der Einteilung in Partikelgrößenklassen durch Siebung werden die Klassen separat durch einen Handmagneten mit einer Flussdichte von 0,12 T, mit einem vorab gemessenen Magnetkraftverlauf, von starkmagnetischen Bestandteilen getrennt. Im nächsten Schritt wird das Material durch einen Induktionswalzenscheider vom Typ *Humbold Wedag* mit einer Flussdichte von > 1,2 T von schwachmagnetischen Partikeln entfrachtet. Die Versuchstechnik mit dem Induktionswalzenscheider liefert bei geringer Aufgabe das bestmögliche Trennergebnis. Ziel ist eine Abreicherung von Edelstählen und somit den vermuteten Chromträgern zu erreichen [33]. Somit gelingt eine magnetische Fraktionierung bei zwei Flussdichten bzw. eine Einteilung jeder Kornklasse in stark-, schwach- und unmagnetisches Produkt. Das übrig gebliebene unmagnetische Produkt wird einer Dichtesortierung in der Schwereflüssigkeit (Natrium-Polywolframat) mit einer Dichte von 3,00 g/cm³, unterzogen. Als Schwergut wird eine Kupferfraktion mit Anteilen an Metallen und Legierungen mit einer Dichte von mehr als 3,00 g/cm³ erstellt. Das Leichtgut sollte hauptsächlich aus Aluminium, Kunststoffen und organischen Bestandteilen bestehen. Auf einen weiteren Dichtesortierschritt wird verzichtet, da die Erzeugung eines Aluminiumkonzentrats durch neuerliche Sortierung, bei einer Dichte der Schwereflüssigkeit von 2,00 g/cm³ nicht Ziel dieser Arbeit ist. Die erzeugten Fraktionen sind in Anhang A abgebildet. Diese Vorgehensweise liefert analysenscharfe physikalisch getrennte Fraktionen die nachfolgend auf ihre elementare Zusammensetzung untersucht werden.

Im Labor der Montanwerke Brixlegg AG werden die Merkmalsklassen nasschemisch auf ihre elementare Zusammensetzung analysiert. Basierend auf einem Aufschluss in Königswasser, werden die Konzentrationen der Metalle in den erstellten Lösungen in einem ICP-OS Gerät gemessen. Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind jedoch, laut Aussage des Laborleiters, mit einem nicht

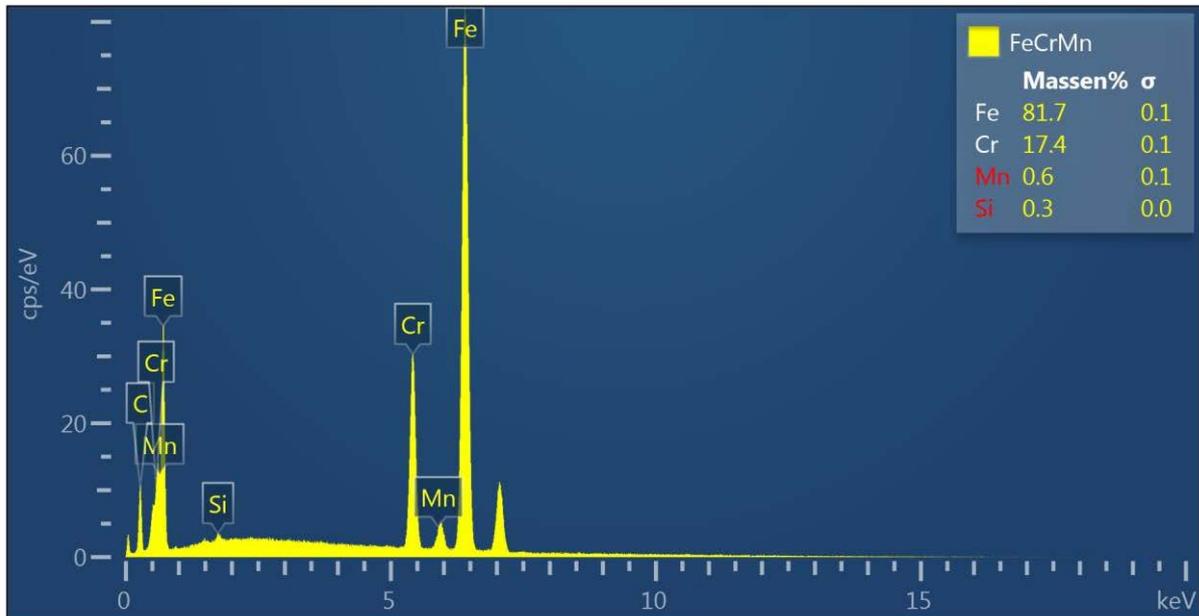
abschätzbar großen Analysenfehler behaftet, da die Auswertungssoftware des verwendeten ICP-OS Gerätes nicht auf derartige Materialien programmiert ist. Trotz der Ungenauigkeit liefern die Ergebnisse eine Einschätzung der Größenordnung der Konzentration der einzelnen Metalle. Weiters kann eine Aussage über An- und Abreicherungs Vorgänge getroffen werden.

Da die chemische Elementanalyse einen quantitativen Überblick der enthaltenen Elemente ermöglicht, jedoch keine Auskunft über die genaue Zusammensetzung der enthaltenen Elementverbindungen gibt, wird in einem letzten Schritt eine Phasenanalyse durchgeführt.

7.2 Phasenanalyse und Elementverteilung auf Phasen

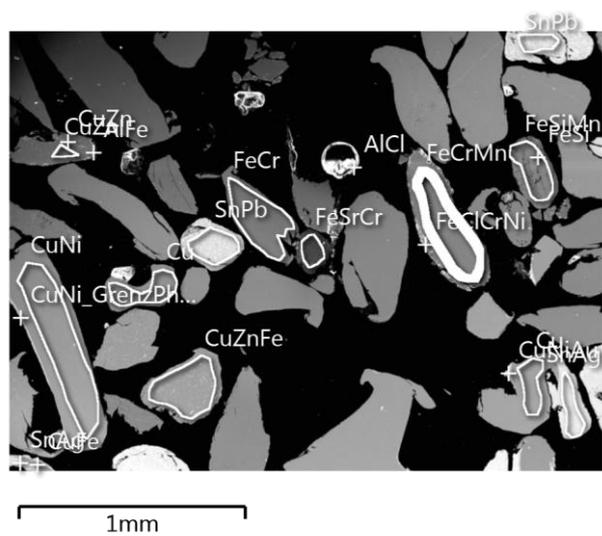
Eine Phasenanalyse gibt Rückschluss auf die Art und elementare Zusammensetzung von Phasen einer Merkmalsklasse. Vier der zuvor erstellten Merkmalsklassen des Rohguts MMT werden einer Analyse auf dem Rasterelektronenmikroskop des Lehrstuhls für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben unterzogen. Aufgrund der zu geringen Massen der erzeugten Merkmalsklassen der beiden anderen Materialien (LOACKER und WURZER) konnte eine Schliffpräparaterstellung nicht durchgeführt werden. Auf den Seiten 83 bis 86 wird, für einen Überblick der Analysen, ein Ergebnis pro Merkmalsklasse abgebildet. Die vollständigen Ergebnisse sind dem Anhang C zu entnehmen.

MMT 0,5/0 mm MP 0,12 T

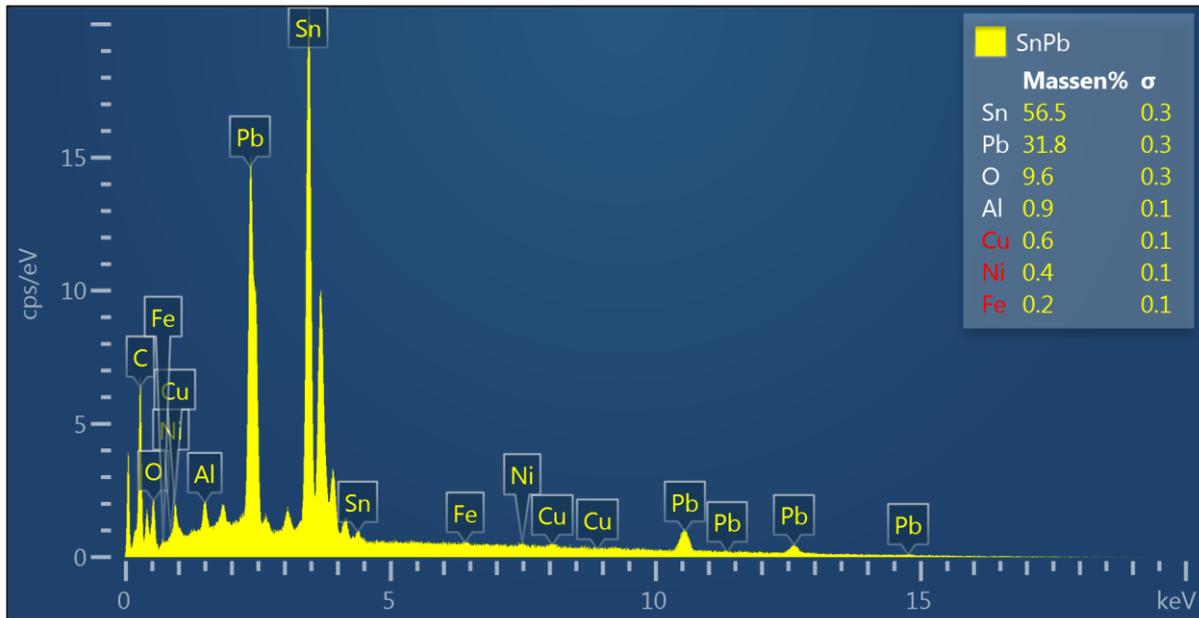


Element	Massen%	Massen% Sigma
Si	0.29	0.04
Cr	17.36	0.12
Mn	0.60	0.09
Fe	81.75	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

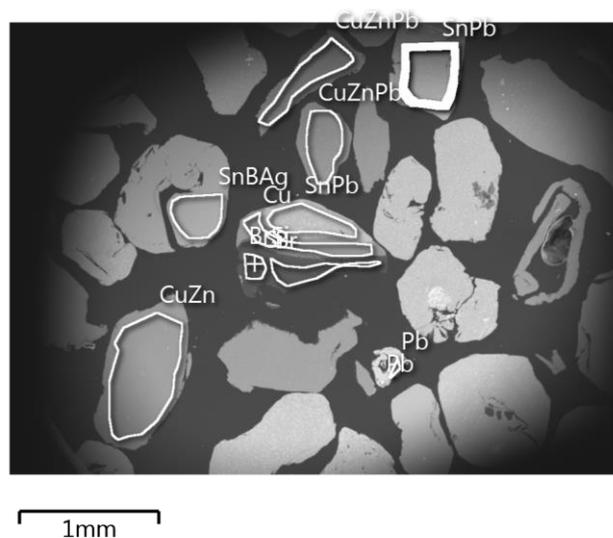


MMT 1/0,5 mm MP 1,2T

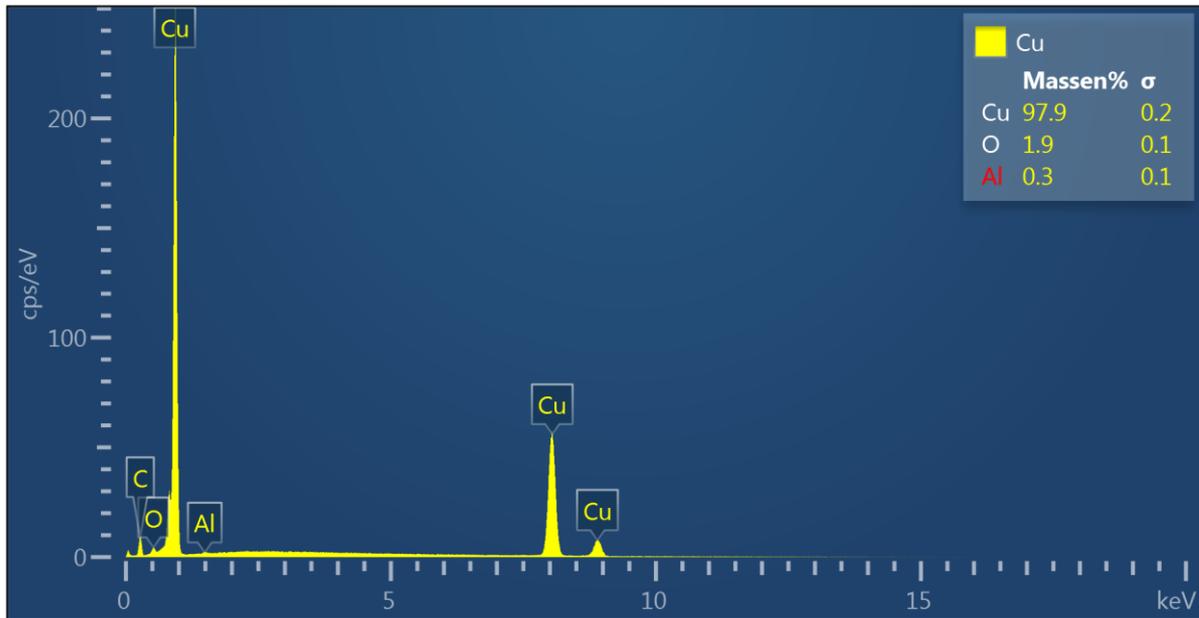


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	9.64	0.35
Al	0.89	0.05
Fe	0.24	0.08
Ni	0.36	0.10
Cu	0.58	0.12
Sn	56.48	0.34
Pb	31.82	0.30
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

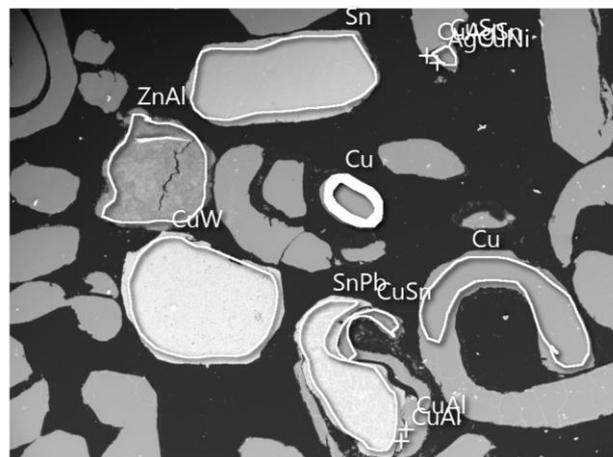


MMT 1/0,5 mm SG



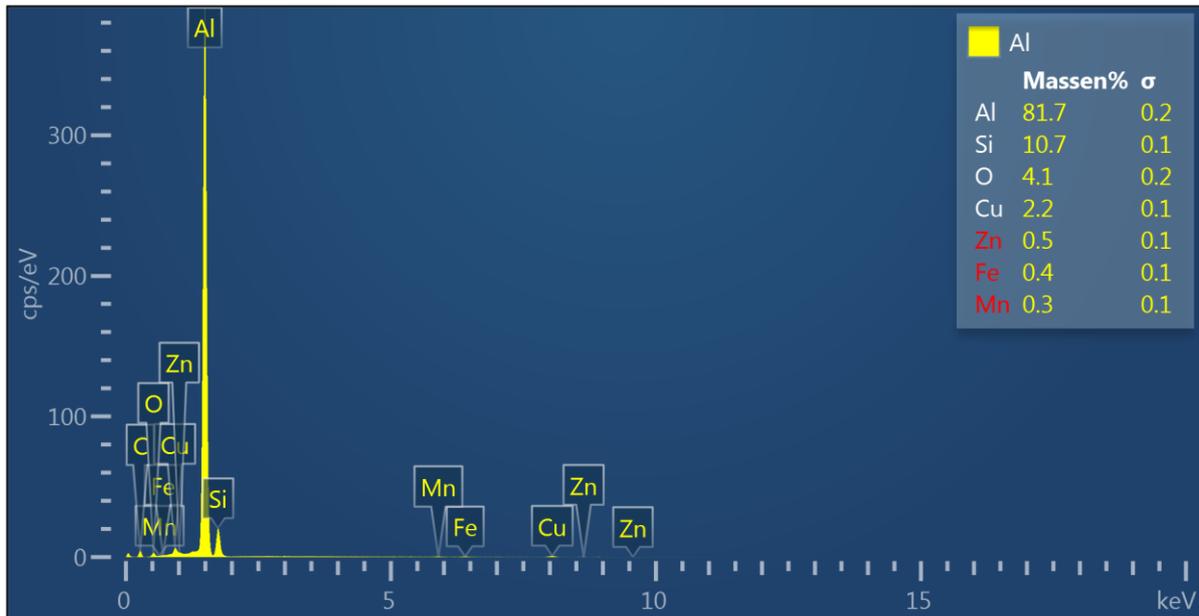
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	1.88	0.14
Al	0.26	0.07
Cu	97.85	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5

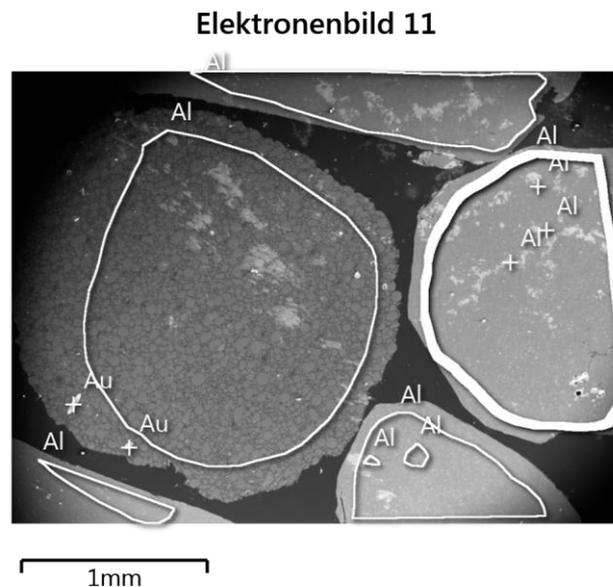


1mm

MMT 2/1,6 mm LG



Element	Massen%	Massen% Sigma
O	4.11	0.17
Al	81.71	0.22
Si	10.74	0.11
Mn	0.32	0.05
Fe	0.45	0.06
Cu	2.17	0.10
Zn	0.50	0.09
Gesamt:	100.00	



Aus diesen Phasenanalysen ist ersichtlich, dass eine Häufung an Chrom-Eisenverbindungen sowie Nickel-Eisenverbindungen in den Magnetprodukten stattgefunden hat. Weiters kann bestätigt werden, dass der Sortierschritt nach dem Merkmal „Dichte“ ein Kupferkonzentrat mit Verunreinigungen an Zinn-Zink-Bleiverbindungen hervorgebracht hat, sowie ein Leichtgut mit Aluminiumverbindungen.

7.3 Versuch der Entwicklung einer Nachreinigungsstufe für die vorliegenden Fraktionen

Zur Entwicklung eines kostengünstigen Schnellverfahrens am Einsatzort der Hütte, zur Prüfung einer geeigneten Menge von Rohmaterial < 10 mm auf nicht verwertbare Feinanteile für den Schachtofen und abtrennbare Anteile nach Kornform, Korngröße und Stoffdichte wurde ein Zickzacksichterstand aufgebaut und adaptiert. Trennmerkmal ist das aus Korngröße, Dichte, und Kornform zusammengesetzte Merkmal der Endfallgeschwindigkeit, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Bei fraktionierender Versuchsführung gelingt es einerseits das bestmögliche Trennergebnis ohne vorhergehende Behandlung (z. B. Siebung) zu finden, andererseits wird das Analysenergebnis verbessert für eine Aufgabenprobe durch eine größere Anzahl von Einzelanalysen in den Fallgeschwindigkeitsklassen, die zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt werden. Bei präparativer Vorbehandlung durch Siebung kann konzentriert das Ergebnis in Richtung verbesserter Dichtentrennung geführt werden. Dieses Verfahren soll die einfache und kostengünstige Abtrennung der Leichtfraktion aus dem Metallkonzentrat gewährleisten und eine Aussage über den enthaltenen Anteil an Kupfer liefern. Dem auf dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben aufgebauten Zickzacksichterstand wird zur Abtrennung des ausgebrachten Leichtgutes aus dem Luftstrom ein Hochleistungszyklon nach *Brunnmair* [34] nachgeschaltet. Der Zickzacksichter und der Hochleistungszyklon werden in saugender Fahrweise betrieben. Um das Lüfterrad schadlos zu halten, wird dem Seitenkanalverdichter ein Feinkornfilter vorgeschaltet. Zur Einstellung der Drehzahl des Seitenkanalverdichters bzw. der Strömungsgeschwindigkeit wird ein Frequenzumrichter verwendet. Einen Überblick über diesen Prozess bietet Abbildung 57.

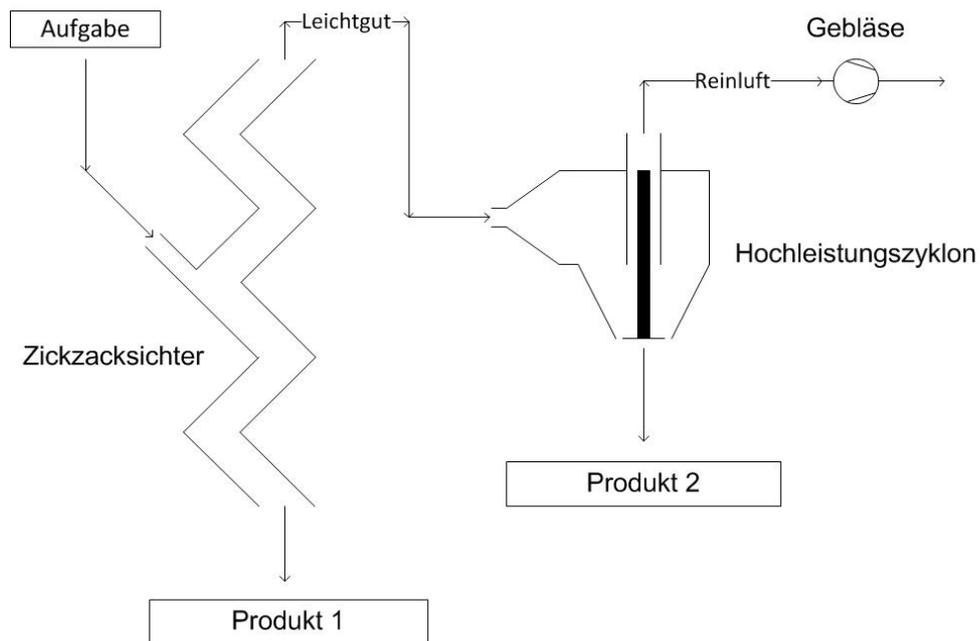


Abbildung 57: Versuchsaufbau des Zickzacksichters und Hochleistungszyklons schematisch

Der verwendete Hochleistungszyklon wurde von Prem, wie in seiner Bakkalaureatsarbeit [35] beschrieben nach Vorgaben aus [34], gebaut. Die praktische Umsetzung dieser Schaltung ist in Abbildung 58 dargestellt.

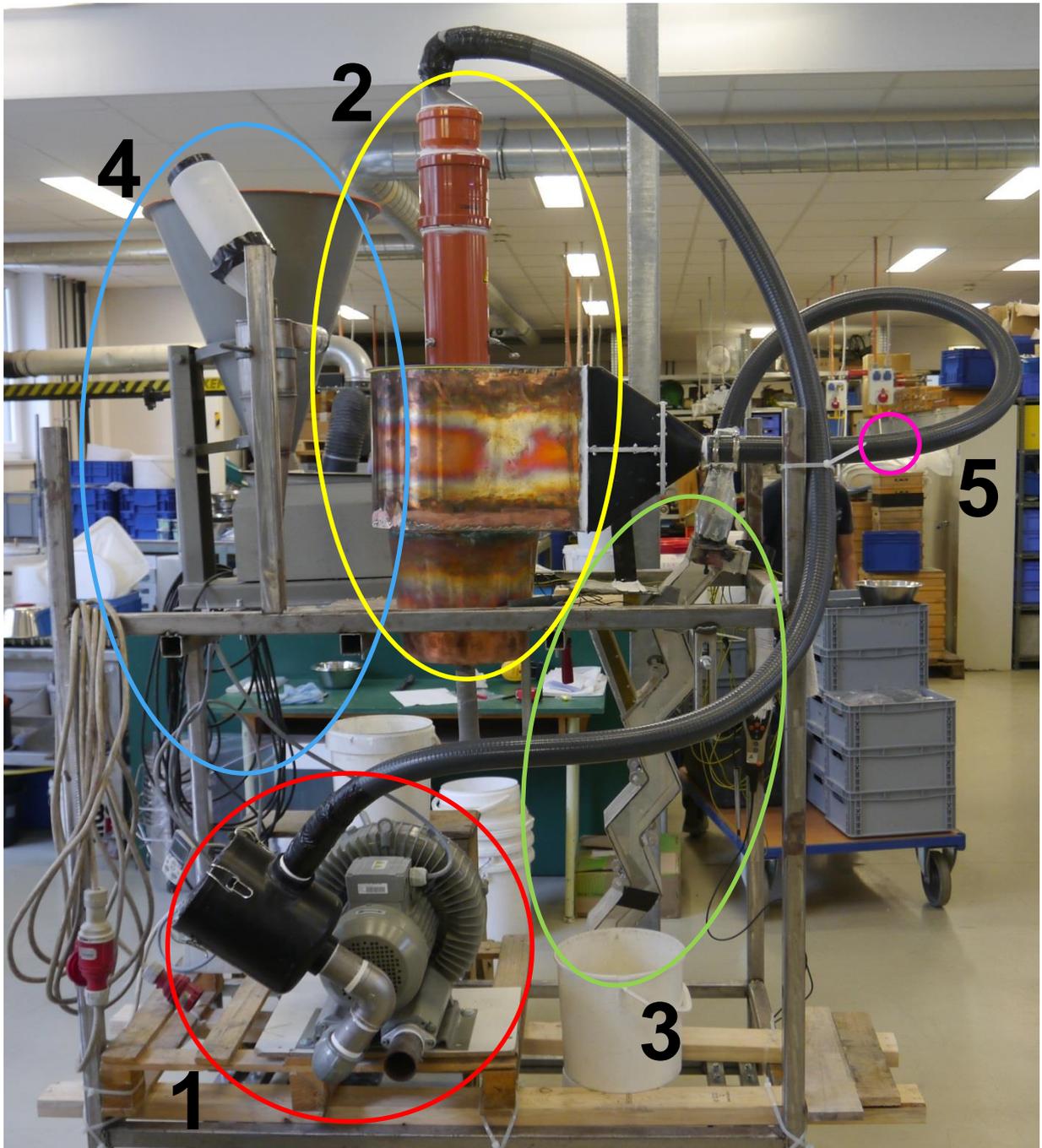


Abbildung 58: Praktische Umsetzung des Prozesses Zickzacksichter und Hochleistungszyklon am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung. (1) Roter Kreis: Seitenkanalverdichter; (2) Gelber Kreis: Hochleistungszyklon; (3) Grüner Kreis: Zickzacksichter; (4) Blauer Kreis: Aufgabereinrichtung mit Vibrorinne; (5) Rosa Kreis: Punkt für Strömungsmessung im Leerrohr.

Um die Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter bei unterschiedlichen Frequenzen des Seitenkanalverdichters festzustellen, wird die Leerrohrgeschwindigkeit der Luft an dem in Abbildung 58 eingezeichneten Messpunkt (5) mit einer Staurohrsonde in der Kernströmung gemessen. Die Vermessung der Querschnittsfläche des Zickzacksichters ergibt eine

Durchschnittsfläche von 0,008 m² und jene des Rohres vom Zickzacksichter zum Hochleistungszyklon 0,001 m². Unter der Annahme der *Kontinuitätsgleichung nach Venturi* und einem konstanten Druck kann somit auf die Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter rückgerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Messung werden in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter

Drehzahl Seitenkanalverdichter	[m/s] Staurohr	[m/s] Zickzacksichter
[Hz]	v ₁	v ₂
0	0	0,00
5	3,9	0,68
10	9,2	1,61
15	14,4	2,53
20	19,2	3,37
25	23,8	4,18
30	28,5	5,00
35	33	5,79
40	37,3	6,55
45	41,5	7,28
50	45,6	8,00

Abbildung 59 zeigt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter bei Änderung der Drehzahl des Seitenkanalverdichters. Dieser Verlauf kann als linear angesehen werden.

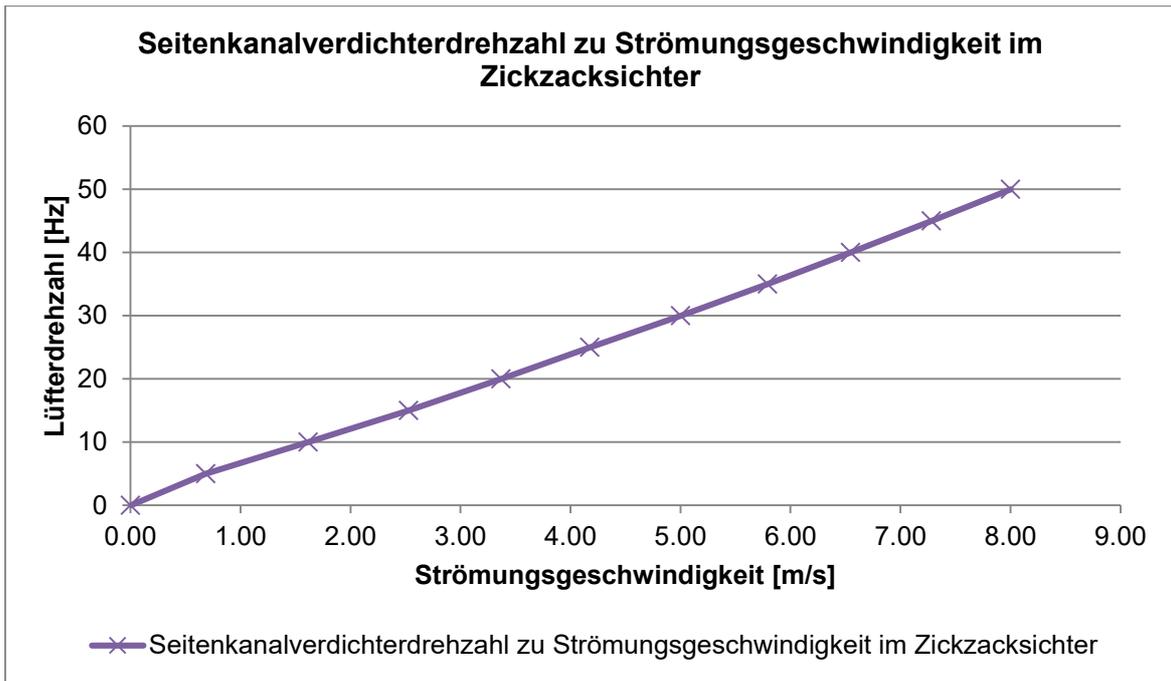


Abbildung 59: Seitenkanalverdichterzahl aufgetragen auf die berechnete Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter

Eine Berechnung der ausgebrachten Korngröße der verschiedenen Stoffe abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter ergibt, mit einer Dichte von $1,17 \text{ kg/m}^3$ und einer dynamischen Viskosität von $1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$ für Luft bei $298,15 \text{ K}$, die in Tabelle 13 gezeigten Ergebnisse.

Tabelle 13: Ausgetragene Korngröße in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter

Ausgetragenen Korngröße in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter				
Stoff	Dichte	Kornformfaktor	v_e	Korngröße
	[kg/m ³]	[-]	[m/s]	[mm]
Kupfer	8930	4,5	0,68	0,02
			1,61	0,12
			2,53	0,29
			3,37	0,51
			4,18	0,79
			5,00	1,13
			5,79	1,51
			6,55	1,93
			7,28	2,39
			8,00	2,88
Aluminium	2700	4,5	0,68	0,07
			1,61	0,39
			2,53	0,95
			3,37	1,69
			4,18	2,60
			5,00	3,73
			5,79	5,00
			6,55	6,38
			7,28	7,90
			8,00	9,54
Leichtfraktion	2200	4,5	0,68	0,09
			1,61	0,48
			2,53	1,17
			3,37	2,08
			4,18	3,19
			5,00	4,57
			5,79	6,13
			6,55	7,84
			7,28	9,70
			8,00	11,71

Diese Tabelle zeigt, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 8,00 m/s Kupferpartikel mit 2,88 mm, Aluminiumpartikel mit 9,54 mm und Leichtpartikel, mit einer maximalen Dichte von 2200 kg/m³, mit 11,71 mm maximalem Partikeldurchmesser ausgetragen werden.

Die durchgeführten Versuche, basierend auf dem beschriebenen Prozess mit den von den Montanwerken Brixlegg AG zur Verfügung gestellten Materialien, ohne im Vorfeld eine Klassierung durchzuführen, lieferten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Als Grund hierfür wird das zu breite Partikelgrößenspektrum der beinhaltenden Phasen angeführt. Damit ein sehr trennscharfes Ergebnis erhalten wird, muss eine vorhergehende Einteilung in sehr enge Partikelgrößenklassen erfolgen um die Problematik der Gleichfälligkeit, wie in Kapitel 5.3.1.3 beschrieben, zu minimieren. Die Versuche und Berechnungen zeigen, dass eine optimale Sortierung in einem Zickzacksichter das bestmögliche Ergebnis für eine Fraktion bestehend aus nur einer definierten Partikelgröße mit unterschiedlichen Dichten der Partikel liefert. Eine weitere negative Eigenschaft ist die geringe Durchsatzrate eines einzelnen Zickzacksichters. In den Versuchen konnte nur ein Durchsatz von 30 kg/h mit dem in Abbildung 58 dargestellten Aufbau erzielt werden. Der geringe Durchsatz resultiert aus den sich bildenden Wirbelwalzen aus Partikeln mit Grenzkorngröße, welche immer dichter werden und zum Erliegen der Trennwirkung führen.

8 Ergebnisse der Rohgutanalyse der untersuchten Hütteneinsatzstoffe

Das Aufzeigen von Potential in der Aufbereitung wird im Rahmen dieser Arbeit als Schlussfolgerung aus den vorliegenden Ergebnissen der Rohgutanalyse und der damit verbundenen chemischen sowie Phasenanalyse abgehandelt. Die Resultate sind als bestmögliches Trennergebnis im Labormaßstab zu sehen.

In Tabelle 14 werden die geforderten Grenzwerte an Störstoffen für Hütteneinsatzstoffe, laut Angaben der Montanwerke Brixlegg AG, angegeben. Da sie die angeführten Probleme in der Pyrometallurgie verursachen, gilt es diese einzuhalten.

Tabelle 14: Angaben zu Grenzwerten über Störstoffe in den Hütteneinsatzstoffen laut Montanwerke Brixlegg AG

Störelement	LG-Mat	HG-Mat	Bemerkung Problem
Al, Cr, Refraktäre	je < 3%	je < 3%	verursachen höheren Schlackenschmelzpunkt sowie mehr Menge
Organik (Fett, Kunststoff, Öl, Holz etc.)	je < 2%	je < 2%	Chargierprobleme (Ausflammen, Zuwachsen des Ofenkopfes) sowie erhöhte CO- und Kohlenwasserstoff- Emissionen im Abgas

Die in Tabelle 14 bezeichnete Organik wird nachfolgend als Kunststoff geführt. Als LG werden in Tabelle 14 Low Grade Materialien bezeichnet, welche Einsatz im Schachtofen finden. HG bezeichnet High Grade Material, dieses wird zu einem späteren Zeitpunkt in den pyrometallurgischen Prozess eingeschleust. Als weitere Wertstoffe im pyrometallurgischen Prozess werden Zinn, Zink und Blei angesehen, da diese über die Gasphase der Öfen ausgebracht und als Mischung verkauft werden können. Aus der Vermutung, dass die Chromträger als Edelstähle (z.B. X5CrNi 18-10 oder X5CrN 18-10 welche häufigen Einsatz finden) zu identifizieren sind, wird das Trennmerkmal der „magnetische Suszeptibilität“ gewählt. Edelstähle können durch ein Magnetfeld mit mindestens 1,2 T Flussdichte abgetrennt werden. Die magnetischen Eigenschaften eines Edelstahls können auf seine Gefügezusammensetzung zurückgeführt werden. So besitzen ferritische, martensitische und austenitisch-ferritische Edelstähle ferromagnetische Eigenschaften. Die in der allgemeinen Verwendung üblichen austenitischen

Edelstähle können einen Magnetismus aufweisen, wenn sich beispielweise der Austenit durch Kaltverformung in Martensit umwandelt. Die magnetischen Eigenschaften können, außer durch die richtige Gefügebildung, auch durch Zulegieren von Nickel in gewissem Maße beeinflusst werden. [33]

Das Trennmerkmal der Dichte ergibt sich aus der Tatsache, dass reines Kupfer eine Dichte von 8920 kg/m^3 , Aluminium 2700 kg/m^3 und Kunststoffe bis zu 1800 kg/m^3 aufweisen. Dies legt die Vermutung einer erfolgreich durchzuführenden Sortierung nach dem Merkmal „Dichte“ nahe.

8.1 Übersichtsresultate aus der Merkmalsklassenanalyse

Einen Überblick über die Ergebnisse der chemischen Elementanalyse geben Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17. Die gesamten Ergebnisse der chemischen Analysen sind in Anhang B zu finden. KS bezeichnet in den Tabellen die Kunststofffraktion. Der Gehalt an Kunststoff wird durch Auswiegen des unlöslichen Rückstandes nach Aufschluss mit Königswasser bestimmt. Aufgrund fehlender Informationen über den Herstellungsprozess, kann keine Ableitung einer Aussage über eine optimale Verfahrensweise bei der Erstellung der vorliegenden Materialien am Produktionsort getätigt werden.

Tabelle 15: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes MMT in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut

Bezeichnung	Partikelgröße	Masse	Gehalt [%]					Masseausbringen an magnetischen Partikeln [%]		Masseausbringen an Schwer- und Leichtgut [%]	
			[mm]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	0,12 T	>1,2 T	SG
MMT	>2,0	14,60	11,74	1,09	60,98	5,71	1,04	10,90	2,78	72,90	13,43
	2,0/1,6	14,86	4,53	0,71	70,46	4,84	0,53	11,50	5,12	73,84	9,54
	1,6/1,0	26,20	4,89	0,81	69,77	4,38	0,35	14,77	9,58	71,39	4,26
	1,0/0,5	31,58	0,23	0,54	72,67	3,93	0,00	14,06	7,85	77,53	0,45
	0,5/0	12,75	0,13	0,36	81,85	3,81	0,00	13,21	8,97	77,10	0,72
	Aufgabe	100,00	3,76	0,69	71,05	4,43	0,32	13,30	7,30	74,64	4,76

Tabelle 16: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes LOACKER in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut

Bezeichnung	Partikelgröße	Masse	Gehalt [%]					Masseausbringen an magnetischen Partikeln [%]		Masseausbringen an Schwer- und Leichtgut [%]	
			[mm]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	0,12 T	>1,2 T	SG
LOACKER	>2,0	49,45	3,96	0,11	57,65	0,68	6,72	1,36	0,45	64,71	33,48
	2,0/1,0	20,33	2,38	0,03	75,06	0,21	7,33	1,62	2,82	85,87	9,68
	1,0/0	30,22	3,82	0,04	80,87	0,52	4,57	2,34	4,51	82,35	10,79
	Aufgabe	100,00	3,60	0,08	68,21	0,53	6,20	1,71	2,16	74,35	21,78

Tabelle 17: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes WURZER in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut

Bezeichnung	Partikelgröße	Masse	Gehalt [%]					Masseausbringen an magnetischen Partikeln [%]		Masseausbringen an Schwer- und Leichtgut [%]	
			Al	Cr	Cu	Fe	KS	0,12 T	>1,2 T	SG	LG
WURZER	[mm]	[%]									
	>0,5	3,27	25,71	0,06	37,85	0,60	15,71	14,28	23,29	19,37	43,06
	0,5/0,315	7,68	34,07	0,00	21,81	0,41	19,59	12,52	15,44	10,93	61,11
	0,315/0	89,05	34,21	0,03	47,35	0,48	7,42	2,81	10,12	40,46	46,61
	Aufgabe	100,00	33,92	0,03	45,08	0,48	8,63	3,93	10,96	37,50	47,61

In Tabelle 15 ist ersichtlich, dass der Gehalt von Aluminium, Chrom und Kunststoffen in der Fraktion > 2,00 mm erhöht ist und Kupfer einen steigenden Gehalt hin zur Fraktion 0,5/0 mm aufweist. Ebenso sind in den Rohgütern LOACKER und WURZER die Gehalte an Kupfer hin zur kleinsten Partikelklasse ansteigend. Aluminium und Kunststoff sind in ihnen über alle Partikelgrößen verteilt. Chrom ist in allen Rohgütern nur in sehr geringem Maße vorhanden.

8.2 MMT

Beim Hütteneinsatzstoff MMT handelt es sich, wie aus den dazugehörigen Abbildungen in Anhang A ersichtlich, um Partikel die eine kubische Form besitzen. Die chemische Analyse, welche in Anhang B zu finden ist, zeigt dass das Rohgut Gehalte von 3,76 % Aluminium, 0,69% Chrom, 4,43% Eisen, 0,32 % Kunststoff und 71,05 % Kupfer aufweist. Die durchgeführte Siebanalyse ergibt die in Abbildung 60 illustrierte Partikelgrößenverteilung.

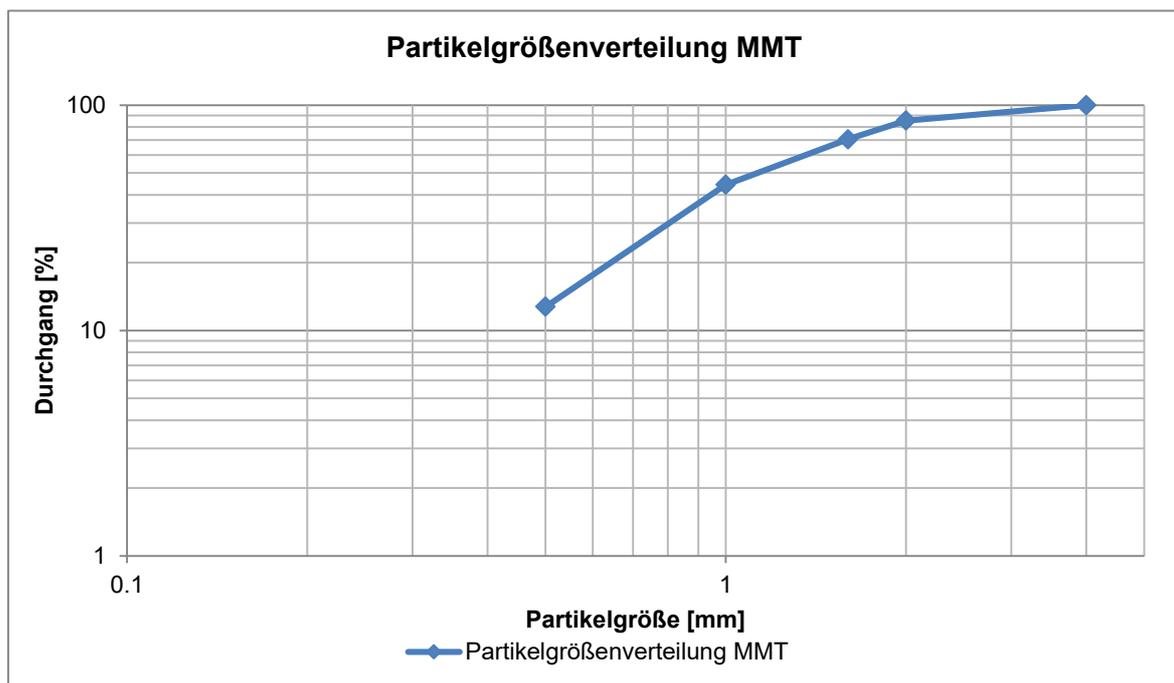


Abbildung 60: Partikelgrößenverteilung MMT

Aus dieser Partikelgrößenverteilung ist ersichtlich, dass 87,25 % der Partikel eine Größe von mehr als 0,5 mm besitzen. Basierend auf den Ergebnissen der chemischen Analyse (siehe Tabelle 22) ist abzuleiten, dass die durchgeführte Schwachfeldmagnetscheidung einen positiven Effekt auf die Abreicherung der

Chromträger in den jeweiligen Klassen aufweist. Ersichtlich ist dies, aus dem klassenbezogenen Inhaltsausbringen bei dem die Werte zwischen 83,88 % im Größten und 96,38 % im Feinsten liegen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Chromträger in einem starkmagnetischen Bestandteil des Gutes konzentriert werden. Ebenfalls konnten Eisenträger mit steigender Tendenz durch die Schwachfeldmagnetscheidung aus dem Gut ausgebracht werden. Anhand der dazugehörigen Phasenanalysen kann Edelstahl als Chromträger identifiziert werden, dies erklärt auch die korrelierenden Gehalte von Chrom und Eisen. Zu berücksichtigen ist, dass der Gesamtgehalt an Chrom im Rohgut MMT nur bei 0,69 % liegt. Der geforderte Maximalwert von 3 % wird dabei unterschritten. Der geforderte Grenzwert von 3 % für Aluminium im Rohgut wird überschritten. Die Untersuchungen zeigen, dass sich das Aluminium im Leichtgut der Dichtesortierung anreichert.

Die in Abbildung 61 dargestellte Grundverwachsungskurve für Kupfer in den einzelnen Partikelgrößenklassen zeigt eine Gleichverteilung des Kupferinhalts.

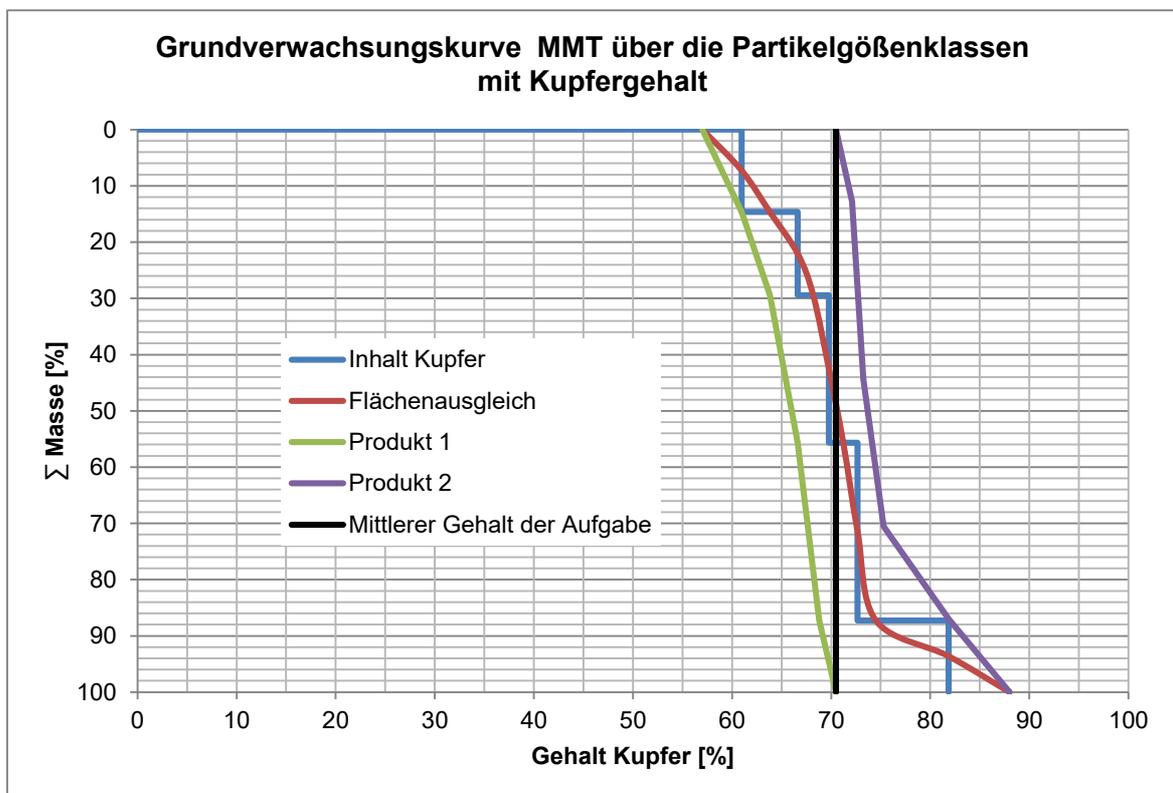


Abbildung 61: Verwachsungsverhältnisse in MMT von Kupfer über das Masseausbringen in den Kornklassen aufgetragen

Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse mit den dazugehörigen Gehalten an untersuchten Elementen.

Tabelle 18: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse MMT, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung

Fraktion	Masseausbringen	Gehalt [%]				
	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS
0,12 T	13,30	0,89	4,74	41,13	31,35	0
1,2 T	7,30	3,88	0,67	41,21	2,64	0
SG	74,64	0,20	0,02	82,62	0,06	0
LG	4,76	84,14	0,01	2,08	0,53	8,44
Aufgabe	100	3,76	0,69	70,25	4,43	0,40

Mit dem Prozessschritt der Magnetscheidung wird eine Abreicherung des Chromgehaltes von 0,69 % in der Aufgabe hin zu 0,02 % im unmagnetischen Produkt (LG und SG zusammen) bei einem Masseausbringen von 79,4 % erreicht. Der Gehalt von 4,23 % Aluminium in diesem unmagnetischen Produkt ist durch einen Dichtesortierschritt auf 0,20 % im Schwergut zu begrenzen. Ein Verlust von 4,76 Masse-% mit einem Kupfergehalt von 2,08 % ist im Leichtgut zu beachten. Nach der durchgeführten Merkmalsklassenanalyse im Labormaßstab kann festgehalten werden, dass im Rohgut MMT ein maximales Masseausbringen an Schwergut mit 74,64 % mit einem Kupfergehalt von 82,62 %, einem Aluminiumgehalt von 0,20 %, einem Chromgehalt von 0,01 %, einem Eisengehalt von 0,53 % und einem Kunststoffgehalt von 0 % möglich ist. Dabei tritt ein nicht unbeträchtlicher Verlust an Kupfer in den Magnetprodukten von 20,6 Masse-% mit einem Gehalt von 41,2 % Kupfer auf, wohingegen der Gehalt an Kupfer von 70,25 % in der Aufgabe auf 82,62 % im Schwergut steigt.

Die Abbildung 62 zeigt Schaubilder zu den Verwachsungsverhältnissen in den Magnetprodukten des Rohguts MMT. Diese veranschaulichen eine Korrelation des Chromgehaltes mit dem Eisengehalt in den Magnetprodukten und bestätigen die Identifizierung der Chromträger als Edelstähle aus der Phasenanalyse. In Abbildung 63 sind die Verwachsungsverhältnisse des Schwer- und Leichtguts wiedergegeben. Diese und Tabelle 23 zeigen, dass Kunststoff und Aluminium vollständig aufgeschlossen vorliegen, da ihr Inhalt im unmagnetischen Produkt zu 100 % im Leichtgut ausgebracht werden kann.

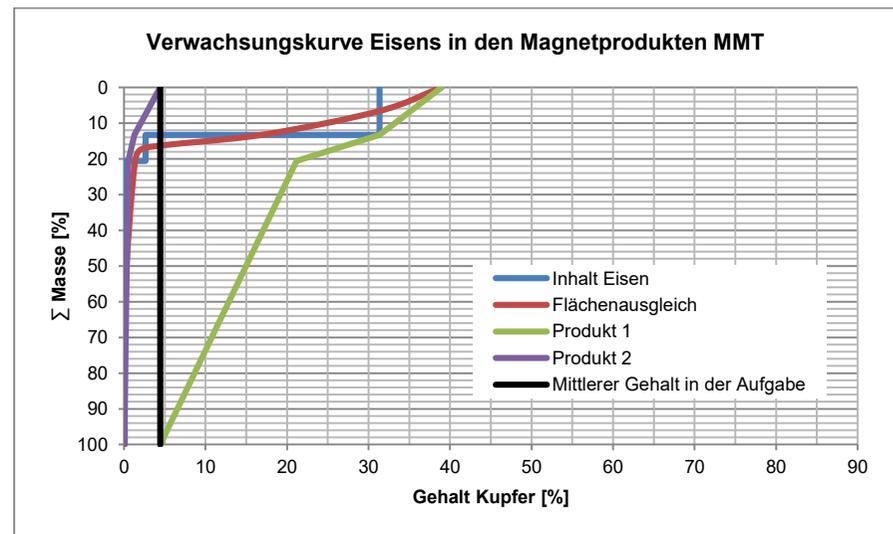
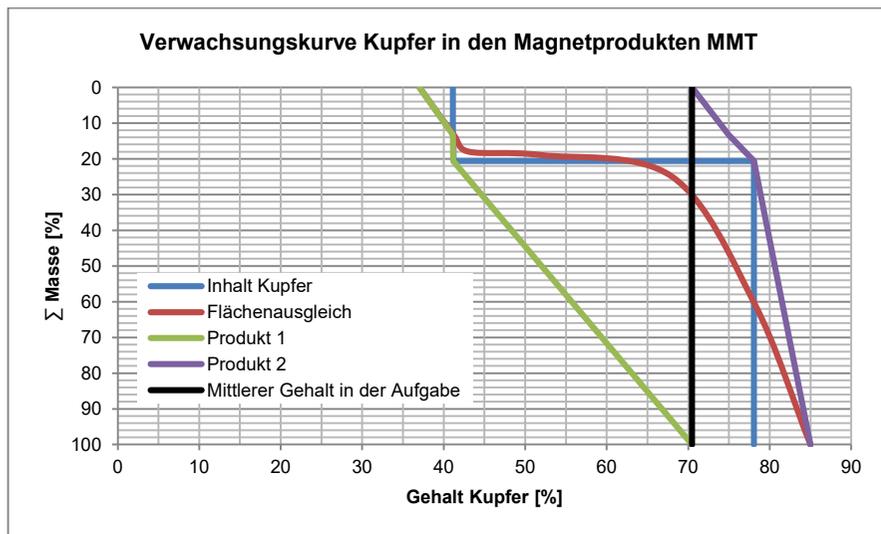
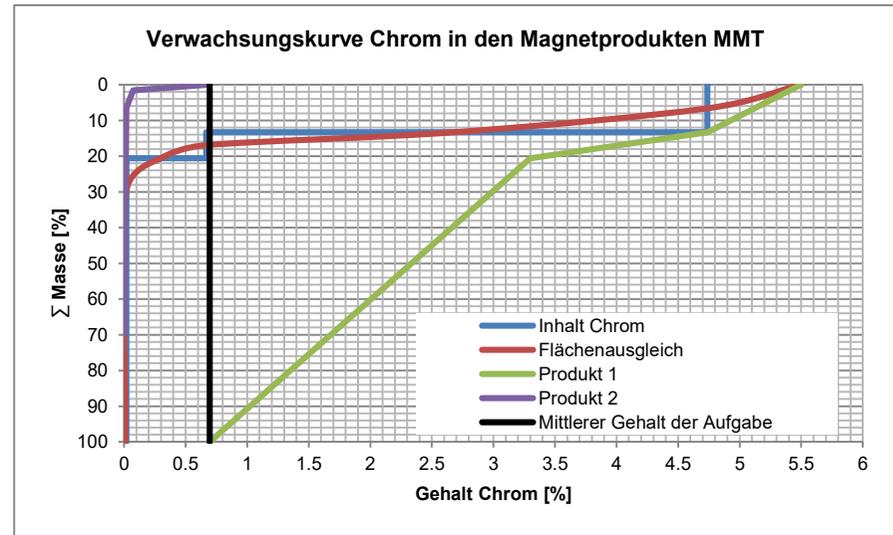
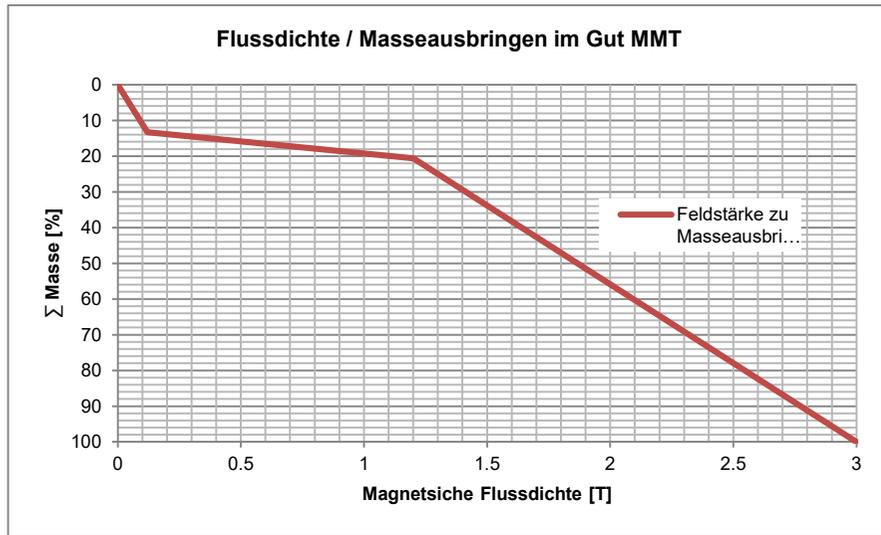


Abbildung 62: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von MMT

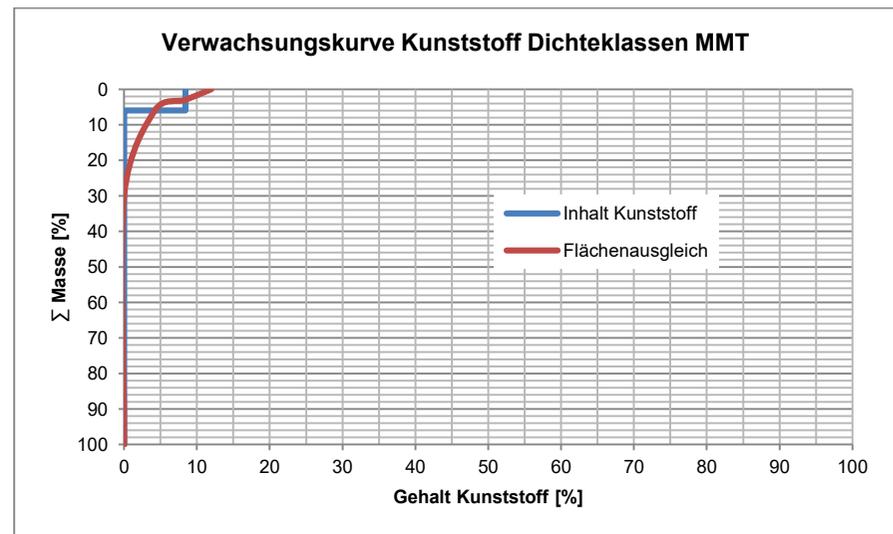
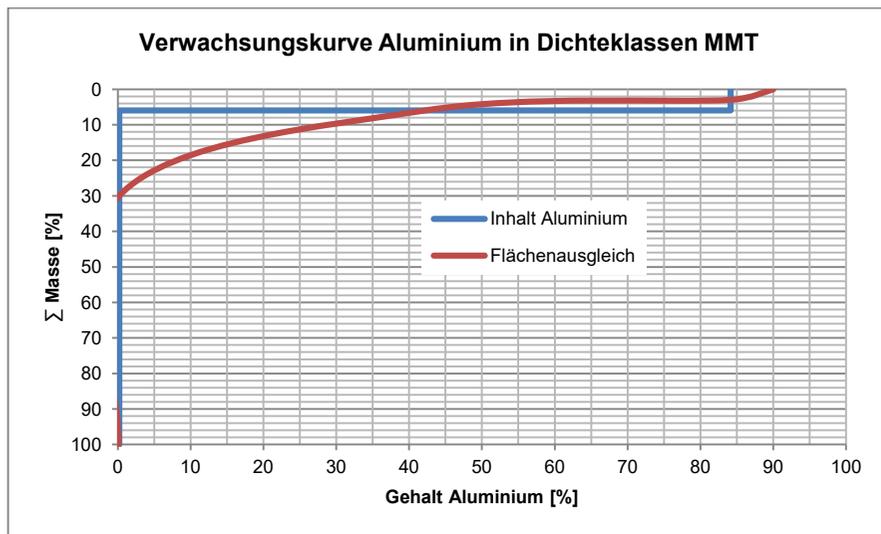
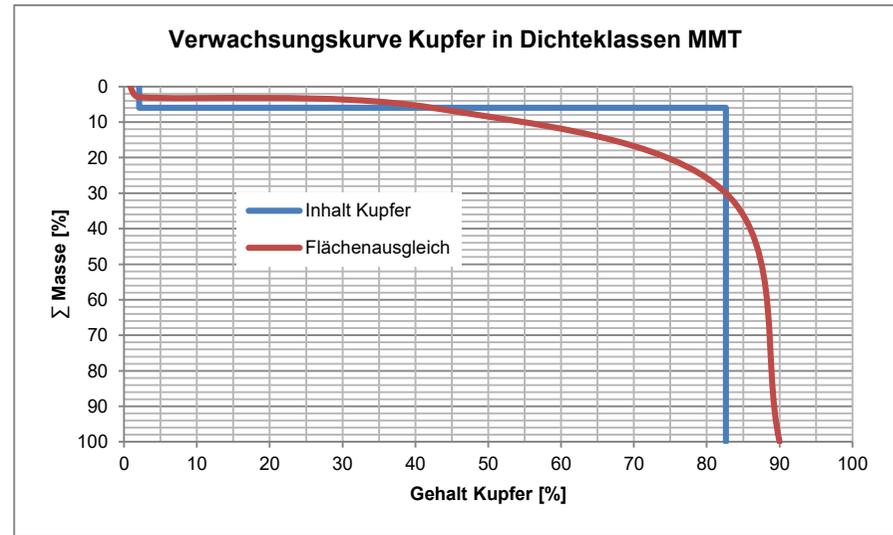
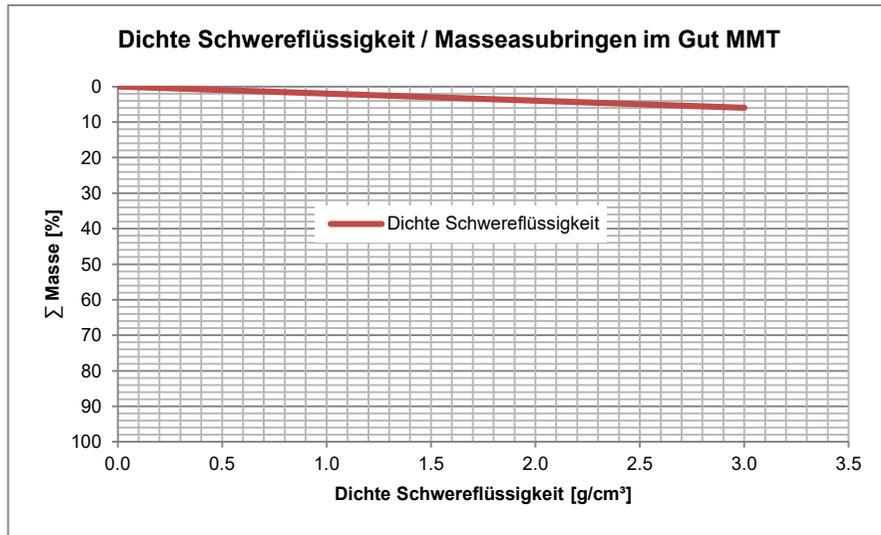


Abbildung 63: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von MMT

8.3 LOACKER

Das zu untersuchende Rohgut mit der Bezeichnung LOACKER ist ein Produkt bei dem die Metalle eine drahtige und die Kunststoffe eine körnige/flächige Struktur besitzen. Dies zeigen die dazu gehörenden Abbildungen in Anhang A. Die Betrachtung der Partikelgrößenverteilung in Abbildung 64 zeigt, dass 69,78 % der Partikel > 1,00 mm sind. Die rückgerechneten Werte aus den chemischen Analysen für die Gehalte in der Aufgabe ergeben eine Überschreitung der geforderten Grenzwerte an Aluminium und Kunststoffen.

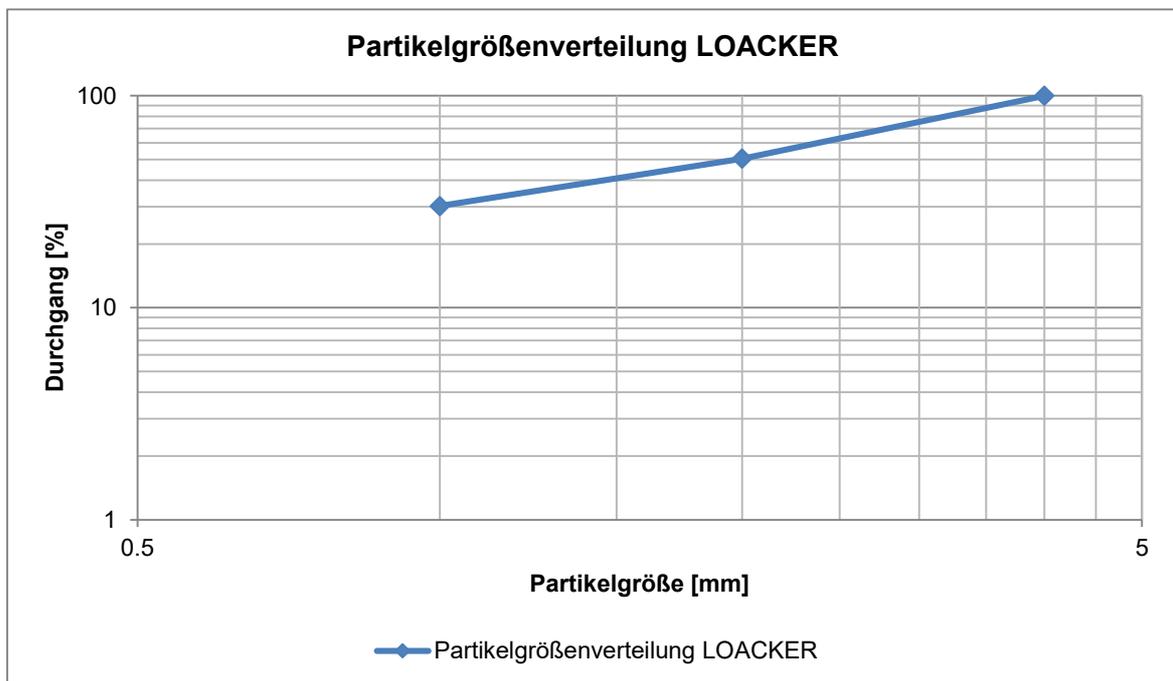


Abbildung 64: Verwachsungsverhältnisse in LOACKER von Kupfer über das Masseausbringen in den Kornklassen aufgetragen

Chrom ist nur in sehr geringen Mengen, 0,08 % in der Aufgabe, vorhanden. Dieser geringe Anteil kann jedoch durch Schwach- und Starkfeldmagnetscheidung im Labor ausgebracht werden, dies zeigt Tabelle 19. Aus Tabelle 27 (siehe Anhang B) ist ersichtlich, dass die Anteile an Aluminium und Kunststoff fast vollständig durch eine Dichtentrennung ausgebracht werden können. Die Grundverwachsungskurve in Abbildung 65 für Kupfer über die Partikelgrößenklassen zeigt eine Verteilung des Kupferinhaltes über alle Klassen.

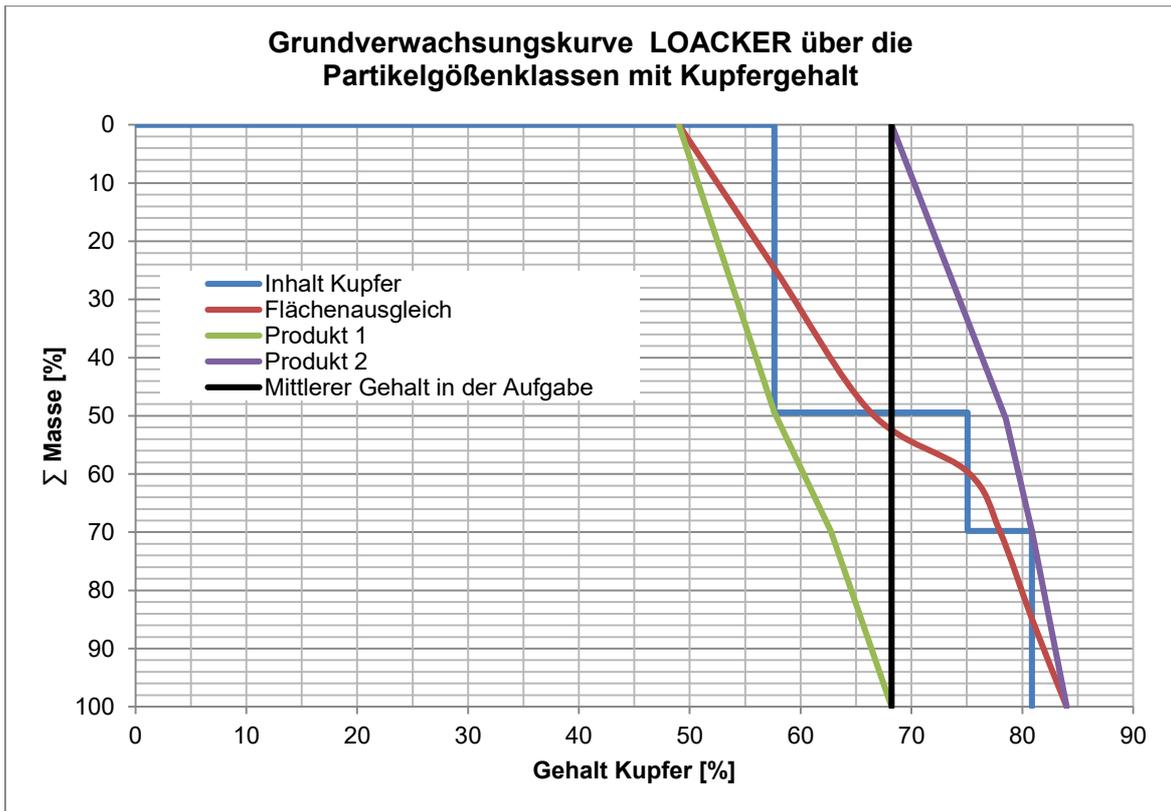


Abbildung 65: Grundverwachsungskurve LOACKER

Aus Tabelle 19 ist ableitbar, dass es im Labormaßstab möglich ist, ein Produkt durch Magnetscheidung und Dichtesortierung mit 88,97 % Kupfer, 0,08 % Aluminium und Werten von Chrom, Kunststoff und Eisen unter der Analysenschwelle bei einem Masseausbringen von 74,35 % zu erzeugen. Dabei ist aber ein Verlust von 25,65 Masse-% mit einem Kupfergehalt von 8,03 % zu berücksichtigen.

Tabelle 19: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse LOACKER, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung

Fraktion	Masseausbringen	Gehalt [%]				
	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS
0,12 T	1,71	9,13	4,06	16,07	28,89	26,36
1,2 T	2,16	12,38	0,26	32,01	1,88	29,22
SG	74,35	0,08	0,00	88,97	0,00	0,00
LG	21,78	14,29	0,00	5,03	0,00	23,48
Aufgabe	100,00	3,59	0,08	68,20	0,53	6,20

Die in Abbildung 66 dargestellten Verwachsungsverhältnisse im Magnetprodukt des Rohguts LOACKER, zeigen eine Konzentration der Chrom- und Eisenträger in

den Magnetprodukten, woraus ein sehr hoher Aufschlussgrad ableitbar ist. Ebenso legen die in Abbildung 67 veranschaulichten Verwachsungsverhältnisse in den Produkten der Dichtesortierung einen sehr hohen Aufschlussgrad nahe.

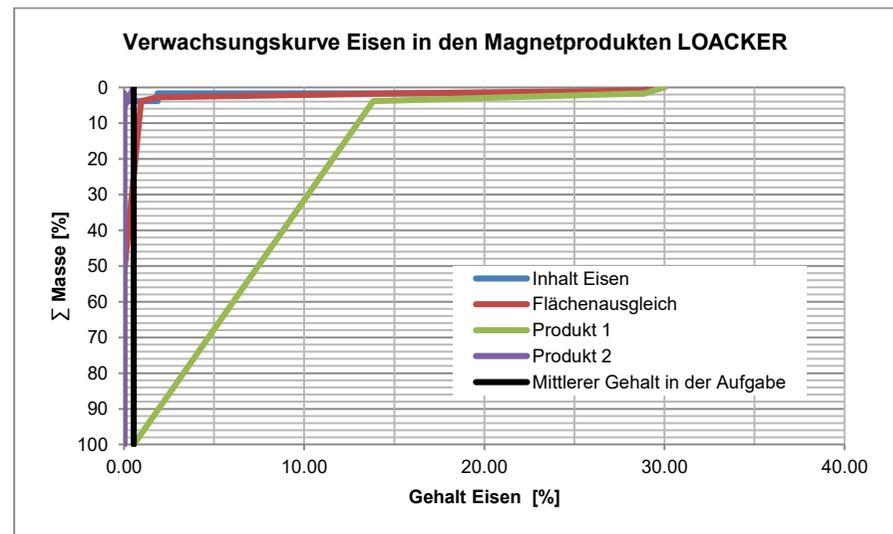
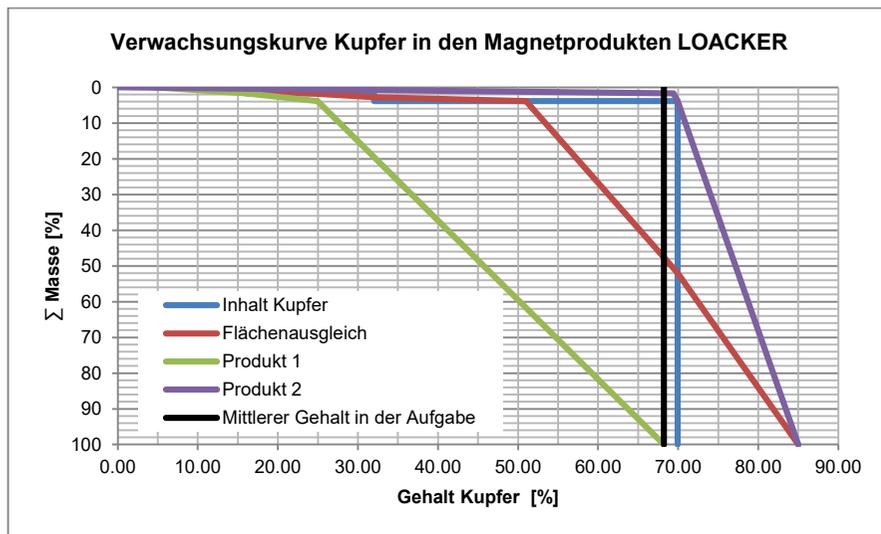
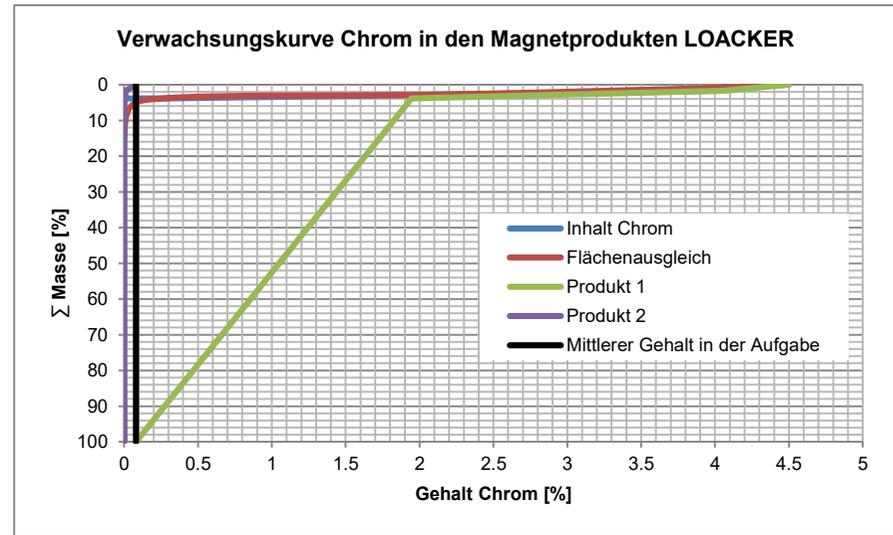
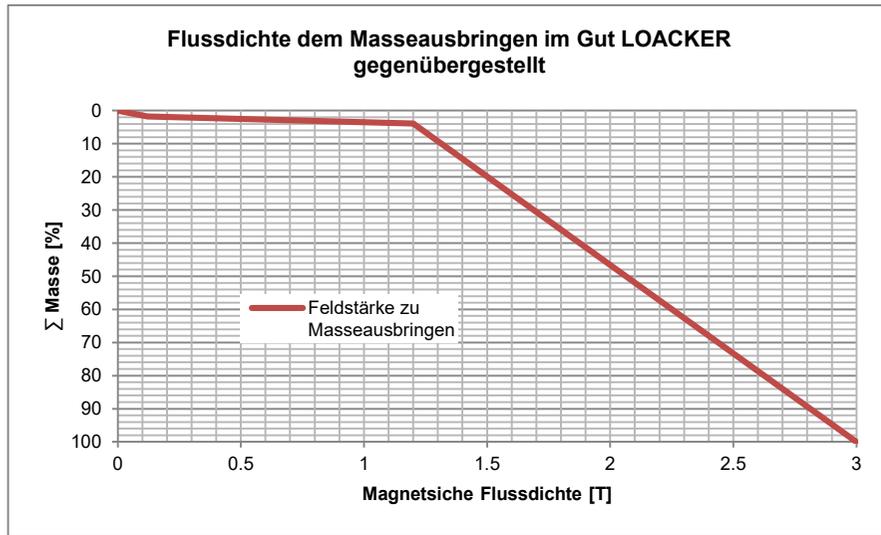


Abbildung 66: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von LOACKER

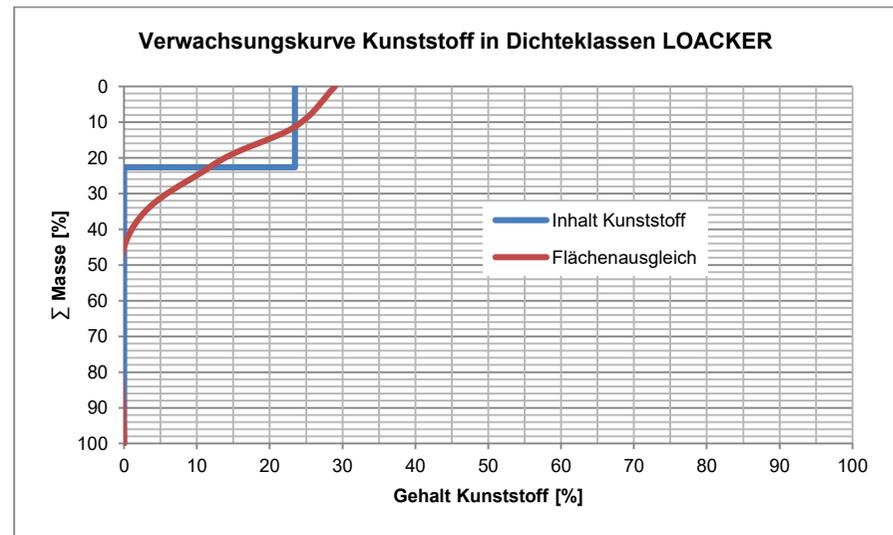
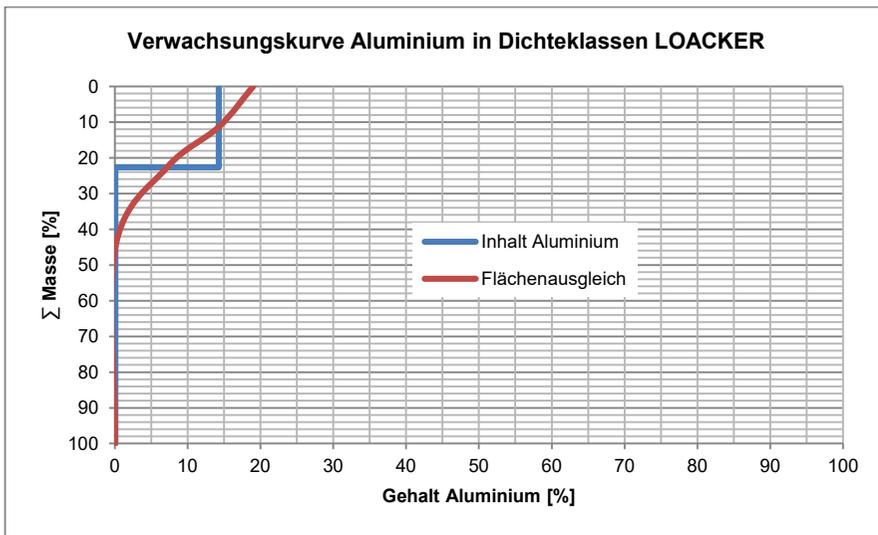
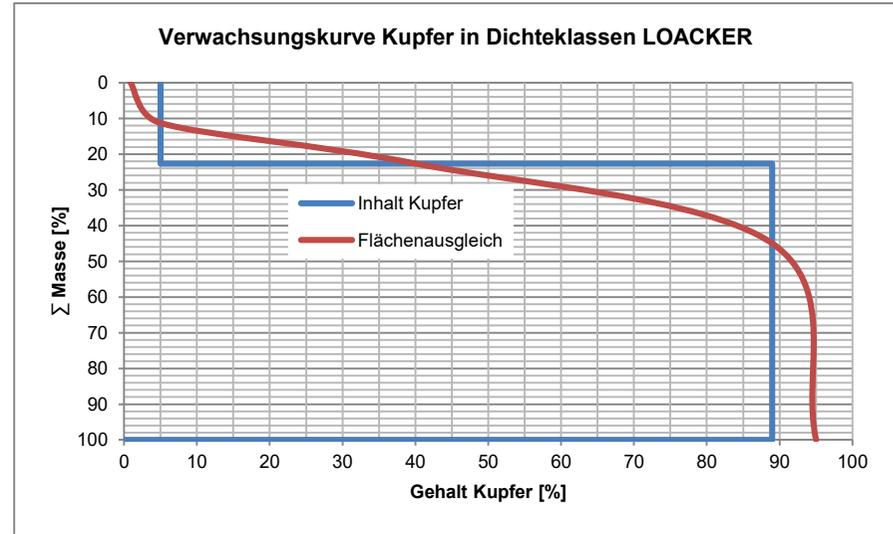
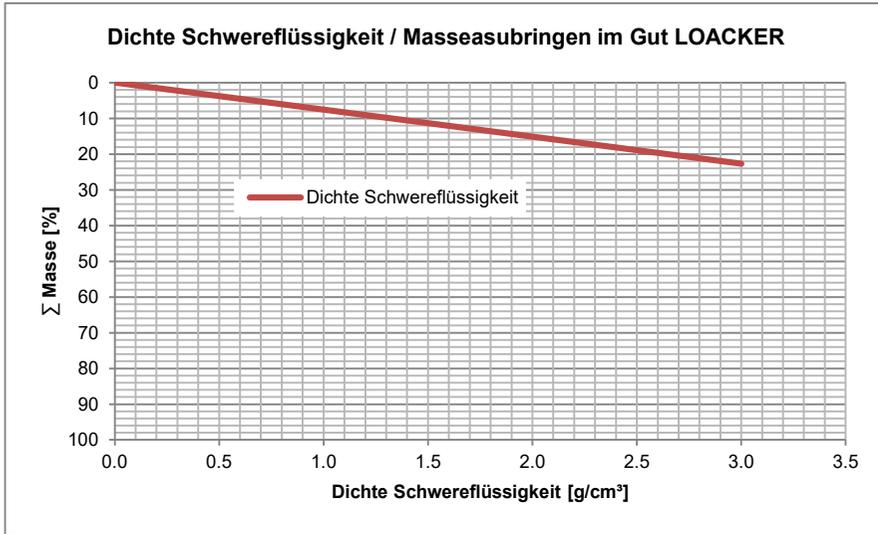


Abbildung 67: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von LOACKER

8.4 WURZER

Beim Produkt WURZER handelt es sich um ein Rohgut mit sehr geringer Partikelgröße. Diesen Schluss lässt die Betrachtung von Abbildung 68 zu, in der 89,05 % der Partikel kleiner als 0,315 mm sind. Die geforderten Gehalte an Störstoffen für Hütteneinsatzstoffe werden bei Aluminium und Kunststoff überschritten. Chrom ist nur in sehr geringem Maße, 0,03 %, in der Aufgabe enthalten.

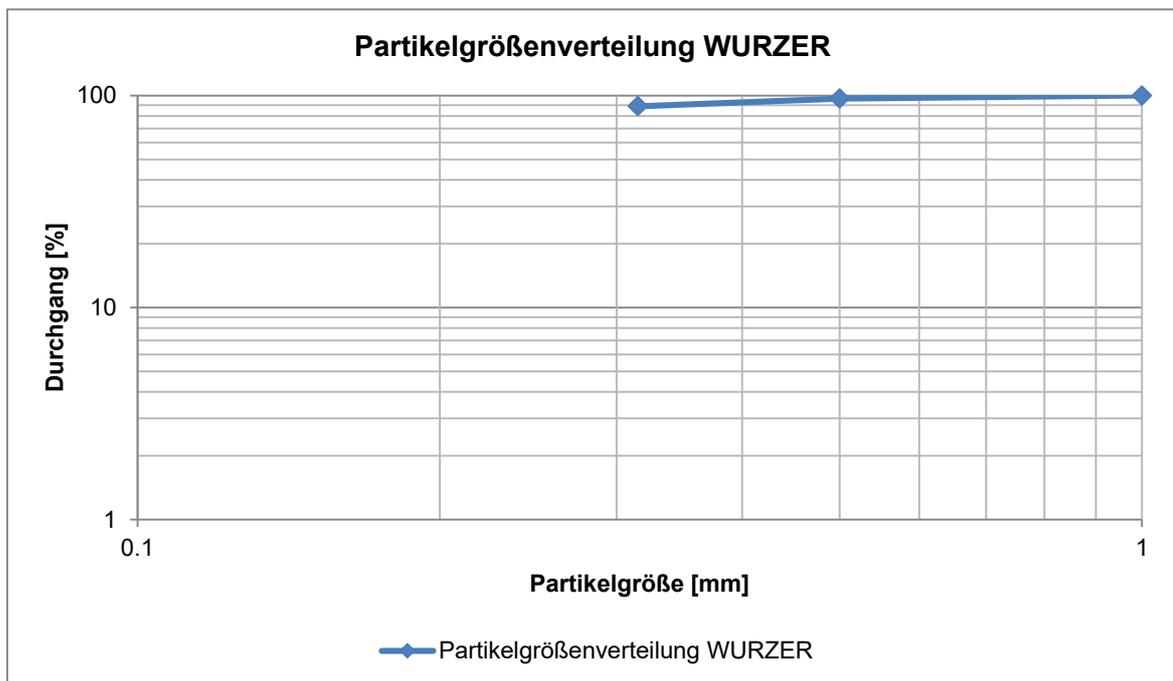


Abbildung 68: Partikelgrößenverteilung WURZER

Die in Abbildung 69 abgebildete Grundverwachsungskurve des Kupfers über alle Partikelgrößenklassen zeigt eine starke Abnahme des Gehaltes von 37,85 % in der Klasse > 0,5 mm hin zu 21,81 % in der Klasse 0,5/0,315 mm. In der Klasse 0,315/0 mm steigt der Kupfergehalt auf 47,35 %.

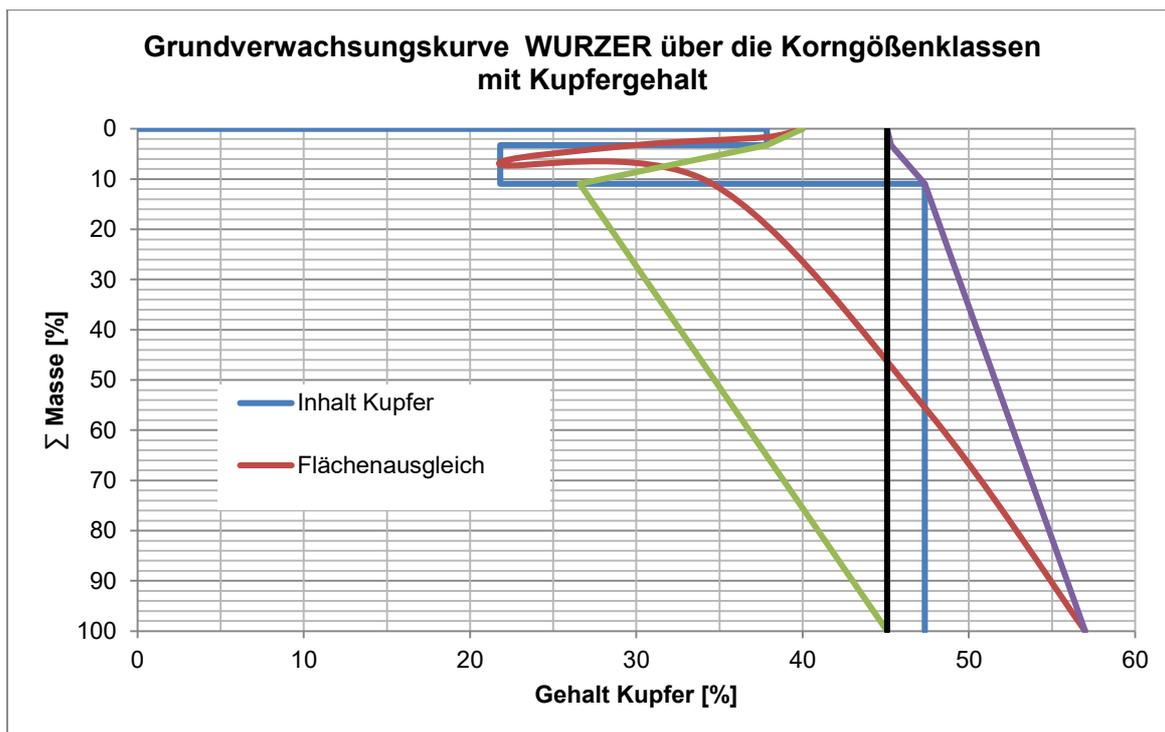


Abbildung 69: Grundverwachsungskurve WURZER

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse in Verbindung mit den Ergebnissen der chemischen Analyse wiedergegeben. Diese zeigen, dass eine Kupferfraktion im Schwergut mit 94,83 % Kupfergehalt, 1,18 % Aluminiumgehalt und Chrom-, Eisen- und Kunststoffgehalten unter der Analysenschwelle im Labormaßstab erzeugt werden kann. Dies aber nur unter dem Effekt eines geringen Masseausbringens von 37,50 % und eines Kupfergehaltsverlustes von 15,23 % in den restlichen 62,5 Masse-%. Das enthaltene Chrom von 0,03 % in der Aufgabe kann vollständig in die Magnetprodukte überführt werden.

Tabelle 20: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse WURZER, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung

Fraktion	Masseausbringen	Gehalt [%]				
	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS
0,12 T	3,93	28,72	0,58	23,39	10,43	6,43
1,2 T	10,96	31,10	0,04	19,62	0,57	17,98
SG	37,50	1,18	0,00	94,83	0,00	0,00
LG	47,61	60,79	0,00	13,55	0,02	13,45
Aufgabe	100,00	33,92	0,03	45,08	0,48	8,62

Ebenso ist es möglich, den enthaltenen Kunststoff in die Magnetfraktionen und in das Leichtgut zu bringen. Die in Abbildung 70 und Abbildung 71 veranschaulichten Verwachsungsverhältnisse zeigen eine Konzentration von Chrom und Eisen in den Magnetprodukten, sowie die Konzentration von Aluminium und Kunststoff im Leichtgut der Dichtentrennung. Die klar ausgeprägten Grenzen der Inhaltsverteilung für Chrom und Eisen zeigen einen sehr hohen Aufschlussgrad des untersuchten Rohguts.

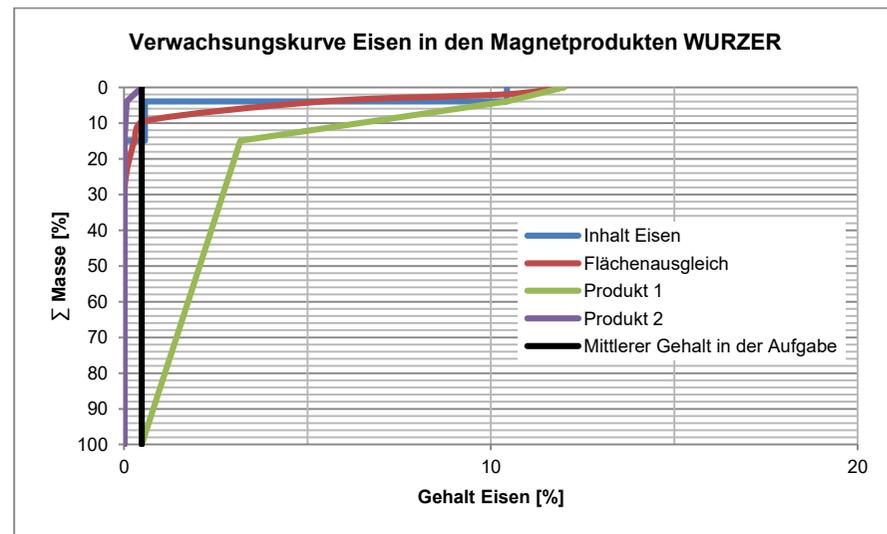
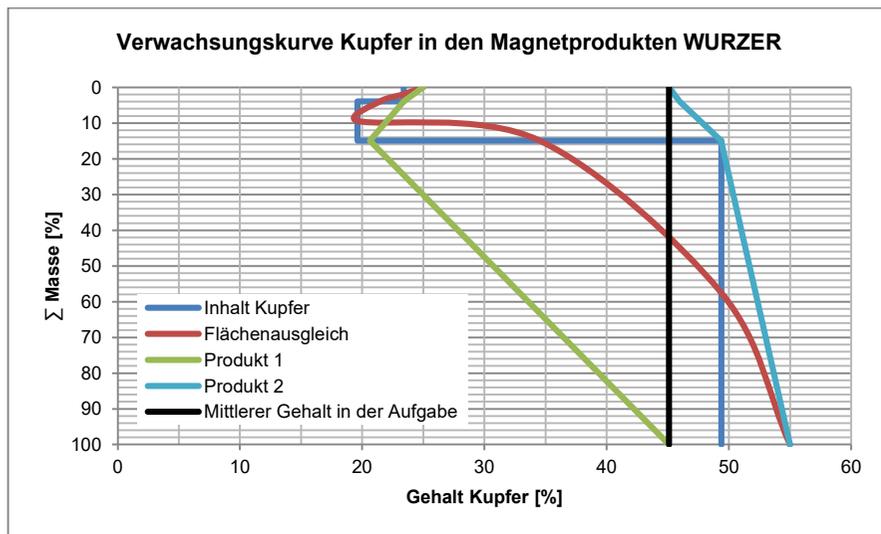
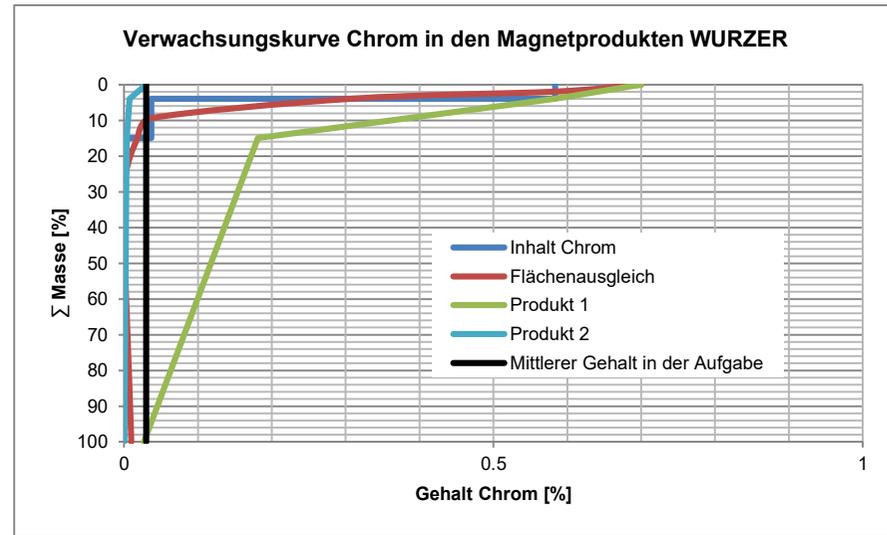
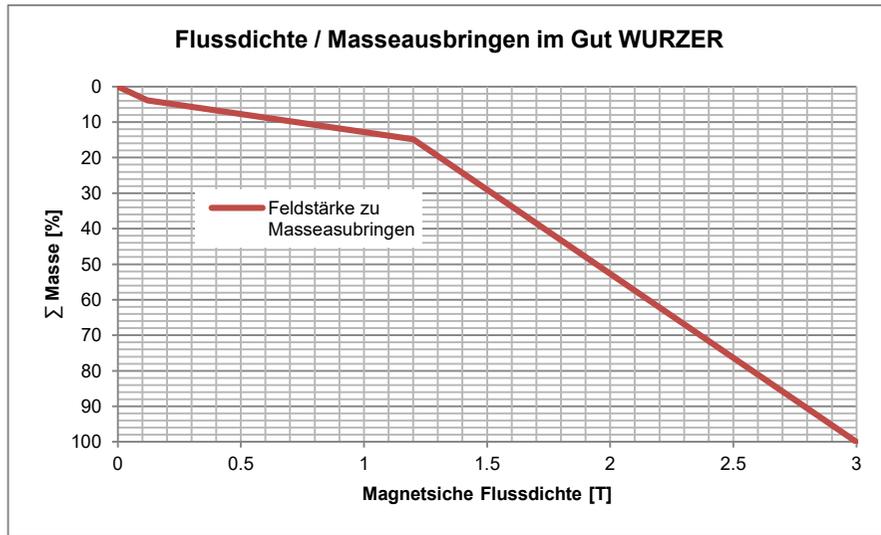


Abbildung 70: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von WURZER

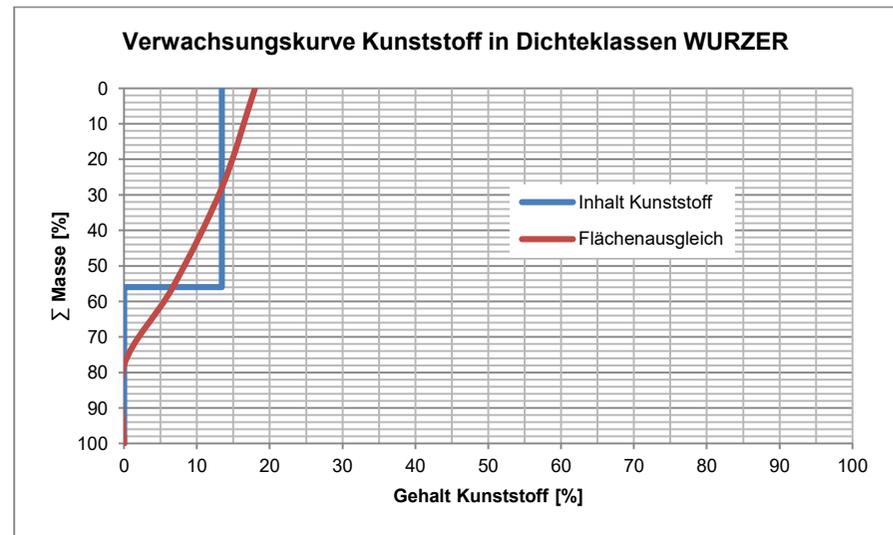
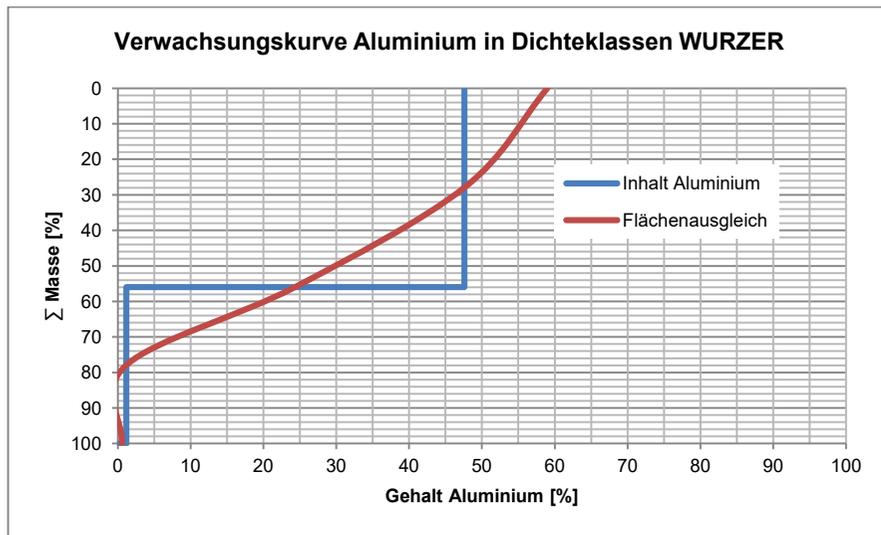
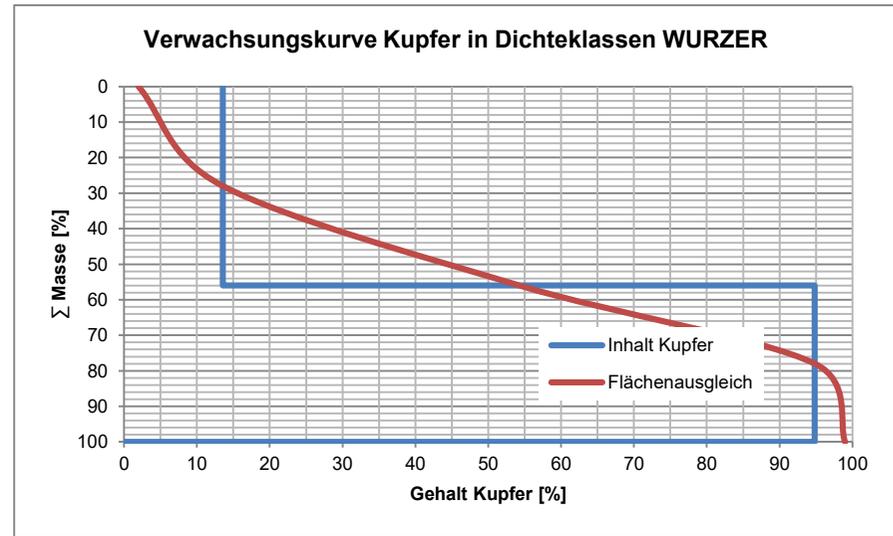
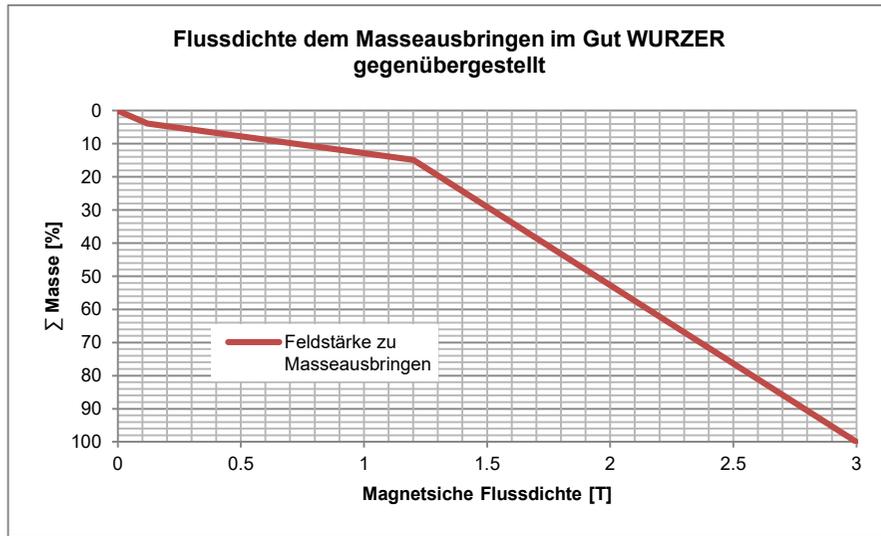


Abbildung 71: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von WURZER

9 Diskussion der Ergebnisse

In der Diskussion der Ergebnisse werden die Resultate der Merkmalsklassenanalyse und chemischen- sowie Phasenanalyse der untersuchten Rohgüter zusammengefasst und Möglichkeiten einer weiteren Aufbereikbaarheit der Materialien, wie sie zur Untersuchung vorlagen, aufgezeigt.

Über alle Rohgüter kann ausgehend von den präsentierten Ergebnissen gesagt werden, dass eine Trennung nach dem Merkmal der magnetischen Suszeptibilität zum Erreichen des Ziels der Abreicherung von Chromträgern genutzt werden kann. Bei allen drei untersuchten Gütern konnte, auch bei geringem Gehalt in der Aufgabe, der Inhalt an Chrom in die Magnetprodukte überführt werden. Eine damit korrelierende Konzentration an Eisen in eben diesen Magnetprodukten wurde ebenfalls erzielt.

Anhand des in den Ergebnissen ersichtlichen Sortiererfolgs in einer Schwereflüssigkeit, nach dem Trennmerkmal der Dichte, kann der Schluss gezogen werden, dass die Rohgüter einen hohen Aufschlussgrad besitzen. Die erzielten Gehalte an Störstoffen unterschreiten in allen Schwergütern des Sortierschrittes die geforderten Grenzwerte der Montanwerke Brixlegg AG. Zudem konnte in allen Schwergütern der Gehalt an Kupfer, ausgehend vom Gehalt in der Aufgabe, verbessert werden. Ebenfalls wurde der Gehalt an Kunststoff in allen drei Schwergütern unter den Analysenschwellenwert gebracht. Das enthaltene Aluminium wurde hauptsächlich im Leichtgut ausgetragen.

Die Verteilung der Elemente Chrom, Eisen und Aluminium in den gezeigten Phasen bestätigt die getroffenen Annahmen, dass eine Magnetscheidung in Kombination mit einer Dichtesortierung zum Ziel einer möglichst optimalen Aufgabe für den Einsatz im Schachtofen führt. Wobei der Gehalt an Kupfer mit über 80 % im Bereich einer Einsatzmöglichkeit im Flammofen liegt.

Die angestrebte Überlegung, über das weitere Vorgehen und die Möglichkeiten die im Labormaßstab erzielten Ergebnisse in einen Industriemaßstab umzusetzen, ergibt drei Möglichkeiten.

Die erste Möglichkeit wäre die Einführung einer diagnostischen Aufbereitungstechnik im kleinen Maßstab vor Ort, welche zur Entlastung und Unterstützung der Bemusterung bzw. Qualitätssicherung beiträgt. Hier gilt es, als erstes den Grundsatz einer repräsentativen Probenahme zu berücksichtigen. Diesen beschreiben *Böhm* in [36] und *Schubert* in [37]. Ohne diesen kann und wird kein Ergebnis einer Rohgutanalyse jemals zu Aussagen führen, die in einen größeren Maßstab umgesetzt werden können. Jede Aufbereitungsanlage ist maßgeschneidert aus einer oder mehreren Rohgutanalysen einer repräsentativ entnommenen Probe. Weiters ist es nicht möglich durch eine subjektive optische Beurteilung eine Gehaltsbestimmung durchzuführen oder zu beurteilen falls nach einem erfolgten Sortierschritt in einer Aufbereitungsanlage wieder minderwertiges Gut zu einem Konzentrat gemengt wurde. Zur Veranschaulichung sei darauf hingewiesen, dass sich zum Beispiel Kupfer und Kunststoff beim Transport vom Herstellungsort zum Verwendungsort durch Erschütterungen und der daraus resultierenden Sortierung nach der Anfangsfallbeschleunigung, wie in Kapitel 5.3.1.3 beschrieben, entmischen und Schichten aus Partikeln höherer und geringerer Dichte bilden. Eine Möglichkeit einer schnellen Analysemethode der Einsatzstoffe vor Ort, wäre die Installation eines diagnostischen Schwach- und eines diagnostischen Starkfeldmagnetscheiders. Werden diese mit repräsentativen Proben beschickt, lässt sich eine Aussage über das Masseausbringen an enthaltenen stark- und schwachmagnetischen Fraktionen treffen. Die Analysen der in dieser Arbeit untersuchten magnetischen Fraktionen haben gezeigt, dass sich dort Chromträger befinden. Ebenfalls kann ein exakteres Ergebnis aus den chemischen Analysen der erstellten Fraktionen der Aufgabe erhalten werden. Die Untersuchung mit Magnetscheidern ist jedoch auf dafür entsprechende Partikelgrößen beschränkt. Eine diagnostische Sortierung nach dem Merkmal Dichte in trockener Fahrweise, wie zum Beispiel mit einem Lufttrennherd oder einem Windsichter, ist schwieriger umzusetzen, da eine ausreichend enge Partikelgrößeneinteilung vorab durchzuführen wäre. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Anschaffung solcher Geräte mit erheblichen Kosten verbunden ist. Eine Kosten-/Nutzenanalyse über das Einsparungspotential an Verhaldungskosten für Schlacke zu den Anschaffungskosten für diese Analysenapparate muss vorab durchgeführt werden. Diese kann an dieser Stelle

wegen zu geringen Informationen über die Verhaldungskosten nicht gezeigt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Nachreinigung von Hütteneinsatzstoffen besteht darin, eine Aufbereitungsanlage am Ort der Montanwerke Brixlegg AG zu installieren. Eine Variante eines solchen Aufbereitungsganges ist in Abbildung 72 dargestellt.

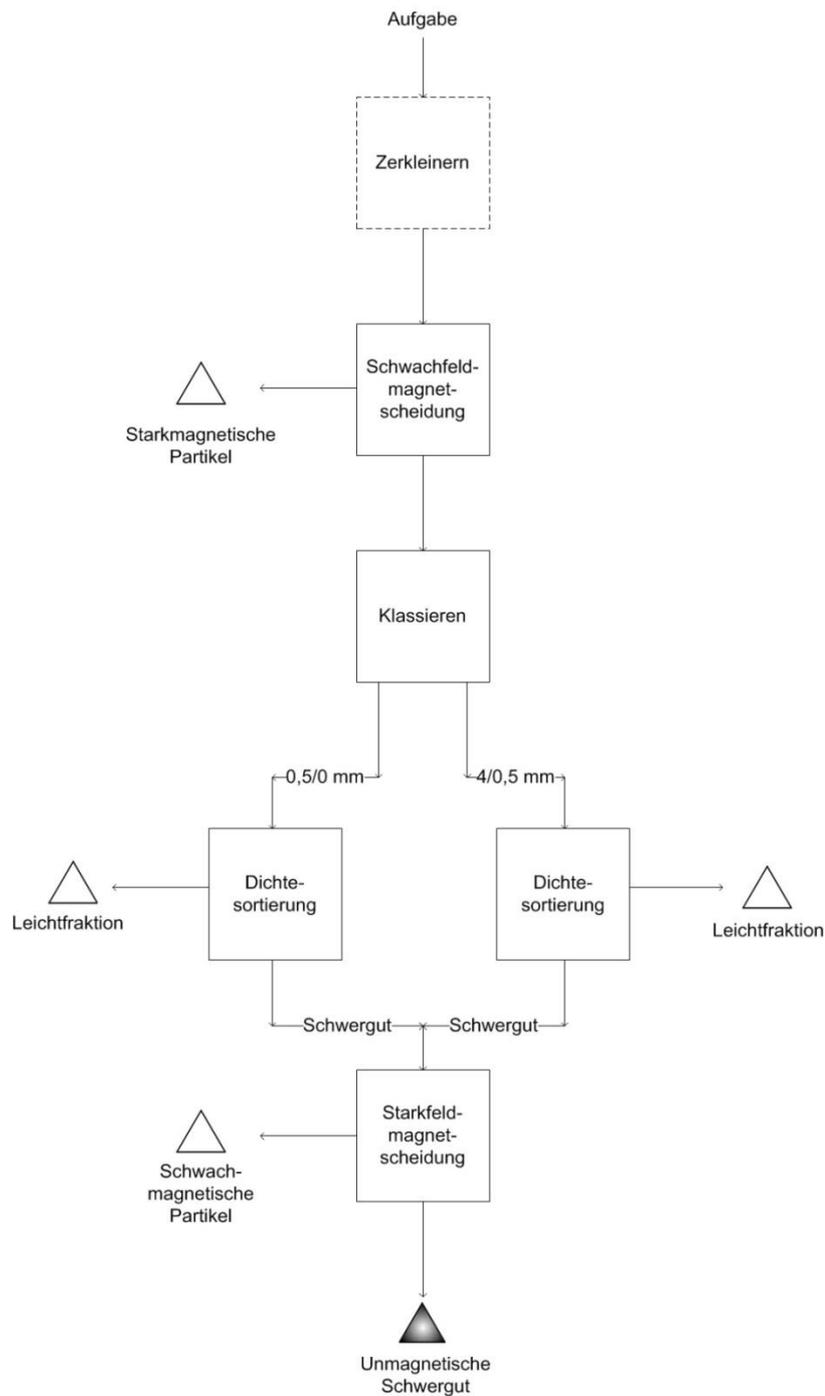


Abbildung 72: Mögliche Variation eines Aufbereitungsganges

Der angedeutete Zerkleinerungsschritt kann in der Aufbereitung von Nichteisenmetallen enthaltenden Stoffen, wie Kabelschrotten, durch eine Schneidmühle mit hoher Drehzahl ausgeführt werden. Die Firma *Guidetti Srl.* in Italien bietet dazu das Aggregat Turbo 625 an. Durch diese Schneidmühle kann der Aufschlussgrad, bei einer Aufgabepartikelgröße von < 30 mm, von noch im Verbund vorliegenden Kabeln, erhöht werden. Das auszuwählende Aggregat muss an die Erfordernisse des Aufgabegutes angepasst werden. Wenn die Partikel bereits in einer passenden Größe vorliegen, kann darauf verzichtet werden. Ein Schwachfeldmagnetscheider trennt aus dem Gutstrom starkmagnetische Partikel. Darauf folgt eine Klassierung in definierte Partikelgrößenklassen die in der nachfolgenden Dichtesortierung verarbeitet werden können. Hier zum Beispiel angedeutet mit den Klassen 0,5/0 mm und 4/0,5 mm. Auch andere Einteilungen der Klassierschritte sind möglich. Die Dichtesortierung kann mittels Lufttrennherden ausgeführt werden. Dabei wird der Trennschnitt bei 8 bis 8,5 g/cm³ eingestellt, um ein möglichst störstoffreies Kupferkonzentrat zu erhalten. Die Leichtfraktion enthält in diesem Fall alle Phasen, welche eine geringere Dichte als die angegebene Trennschnittlage besitzen. Nach dem Zusammenführen der Schwergüter werden diese nochmals durch einen Starkfeldmagnetscheider von schwachmagnetischen Partikel entfrachtet um ein möglichst hochgradiges Konzentrat zu gewährleisten. Die Einführung dieser Anlage bedingt eine Investition und eine Lernphase im Umgang mit der Anlage. Eine grobe Abschätzung der Kosten ergibt ein Investment von 600.000 € (120.000 € Zerkleinerungsaggregat, 50.000 € je Stark- und Schwachfeldmagnetscheider, 30.000 € für einen Klassierapparat, 250.000 € für zwei Lufttrennherde, 100.000 € für Herstellungs- und Errichtungskosten am Ort der Anlage) bei Neuanschaffung der Aggregate. Auch ist dieses Verfahren, ohne Zerkleinerungsschritt nur für eine maximale Partikelgröße in der Aufgabe von 8 mm geeignet. Begrenzt wird es durch die verarbeitbare Partikelgröße auf Lufttrennherden. Die Kosten für die Arbeitskraft zum Betrieb der Anlage sind hier nicht berücksichtigt. Weiters ist die Frage der Verwertung der erstellten nicht verwertbaren Fraktionen der Magnetscheidung und Dichtesortierung vorab zu klären. Zudem muss ein größerer Platzbedarf und die Kosten für eine Lagerhaltung berücksichtigt werden. Ein letzter wichtiger Punkt ist die Tatsache, dass eine Lernphase von mindestens einem Jahr im Umgang mit der Anlage

benötigt wird. Es darf nicht davon ausgegangen werden, dass die Anlage sofort nach ihrer Errichtung tadellose Ergebnisse liefert. Dies hängt maßgeblich von den verarbeiteten Materialien und den Einstellparametern der Anlage ab. Der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben kann zur Entwicklung und Umsetzung so einer Anlage an dieser Stelle seine Unterstützung anbieten. Der Vorteil der Errichtung einer solchen Anlage wäre eine zielgerichtete Erstellung von Materialien oder Mixturen, die anschließend in die Öfen chargiert werden können. Wiederum ist durch eine Kosten-/Nutzenanalyse der Rentabilität der vorgestellten Möglichkeit auszuarbeiten.

Die dritte Möglichkeit beschreibt die Variante mit den Lieferanten und Produzenten der zu verwertenden Fraktionen neue Kaufverträge, welche Gehalte an Störstoffen bereits im Vorfeld limitieren, auszuhandeln. Kosten für eine Aufbereitungsanlage oder Verhaldungskosten für Schlacke, aus der zweiten Möglichkeit, könnten eingespart werden. Unter Berücksichtigung der erwähnten momentanen Einkaufsstrategie in Kapitel 1.3 muss ein neues Bewertungssystem für den Handel mit sekundären Rohstoffen eingeführt werden, welches neben den Gehalten an Kupfer auch die Gehalte an etwaigen Störstoffen berücksichtigt. Im Gegenzug sollten aber auch Gehalte an verwertbaren anderen enthaltenen Metallen (Pb, Zn, Sn, Au, Ag etc.) bezahlt werden. Damit wird dem Produzenten der Materialien ein Anreiz für eine Adaptierung oder Verbesserung seines bestehenden Aufbereitungsganges geboten. Somit könnte die Entsorgungs- bzw. Verwertungsproblematik von Störstoffen auf die Lieferanten umgelegt werden. Ein weiterer Effekt wäre das Umgehen eines pyrometallurgischen Prozesses (dem Schachtofen), der durch die geringeren Gehalte an Störstoffen obsolet wird. Alle diese Maßnahmen implizieren aber immer eine Verteuerung der Einsatzstoffe was mit eingesparten Kosten in der Entsorgung von Restfraktionen gegengerechnet werden muss.

10 Ausblick

Weiterführende Untersuchungen sollten die Eintragsmöglichkeiten von Chrom in den Prozess betrachten. Von den untersuchten Materialien konnte keines einen Chromgehalt aufweisen, der massive Auswirkungen auf den Schachtofen besitzt.

Die Kosten-/Nutzenanalyse, für die im Kapitel 9 angeführten Möglichkeiten der Vorgehensweise, muss mit bekannten Kostenpunkten durchgeführt werden. Diese Analyse sollte in Abhängigkeit der Kosten für die Reduzierung eines Störstoffes um einen Prozentpunkt im Verhältnis zu den Einsparungen für Entsorgungskosten von dadurch entstehender Schlacke betrachtet werden. Zudem muss das Verhältnis von Störstoffreduzierung zu damit verbundenem aufbereitungstechnischem Aufwand betrachtet werden.

11 Anhang A – Abbildungen

11.1 MMT



Abbildung 73: Rohgut MMT bei Anlieferung am 22.06.2017, m=3878,79 g



Abbildung 74: MMT, Siebfraktion >2,0 mm

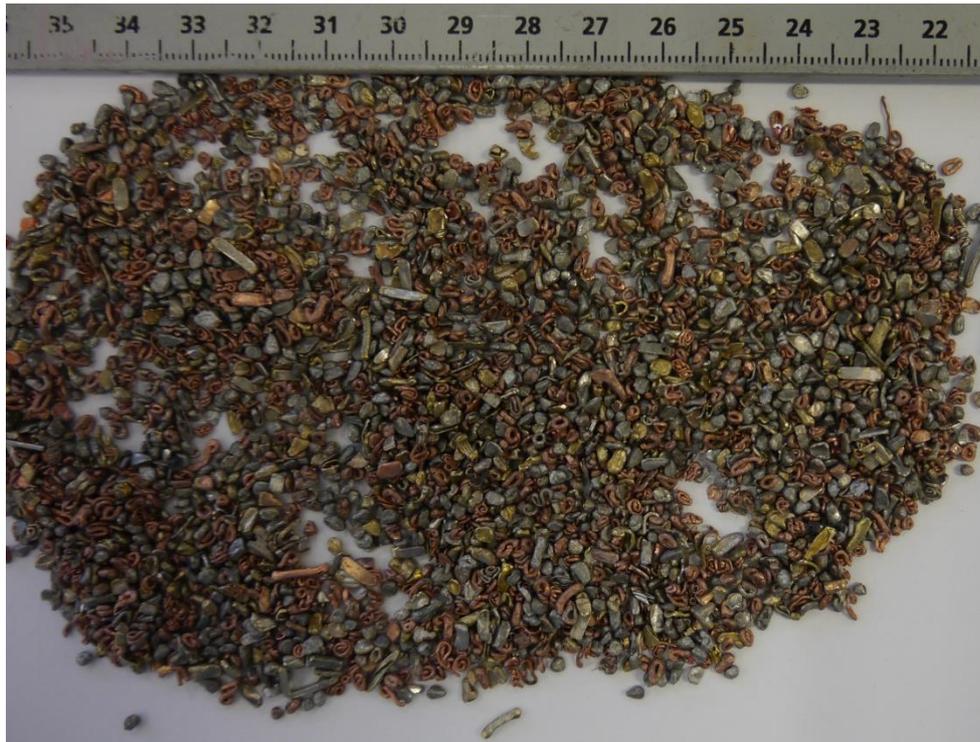


Abbildung 75: MMT, Siebfraktion 2,0/1,6 mm



Abbildung 76: MMT, Siebfraktion 1,6/1,0 mm



Abbildung 77: MMT, Siebfraktion 1,0/0,5 mm



Abbildung 78: MMT, Siebfraktion 0,5/0 mm



Abbildung 79: MMT, Magnetprodukt 0,12 T >2,0 mm



Abbildung 80: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 2,0/1,6 mm



Abbildung 81: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 1,6/1,0 mm



Abbildung 82: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 1,0/0,5 mm



Abbildung 83: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 0,5/0 mm



Abbildung 84: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, >2,0 mm



Abbildung 85: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 2,0/1,6 mm



Abbildung 86: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 1,6/1,0 mm



Abbildung 87: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 1,0/0,5 mm

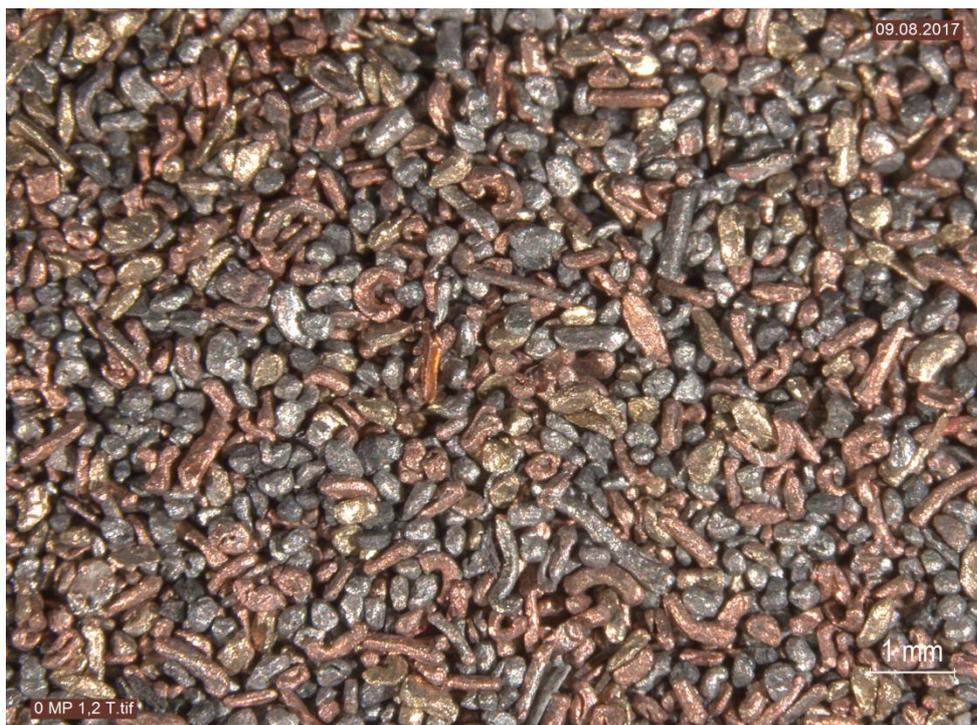


Abbildung 88: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 0,5/0 mm



Abbildung 89: MMT, Schwergut, >2,0 mm

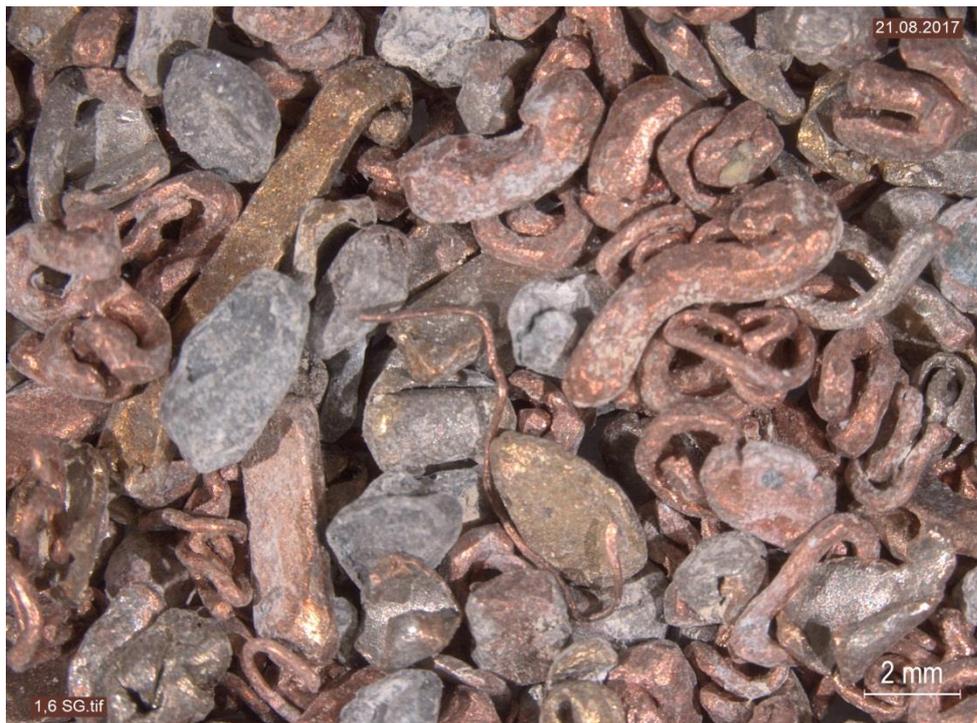


Abbildung 90: MMT, Schwergut, 2,0/1,6 mm



Abbildung 91: MMT, Schwergut, 1,6/1,0 mm



Abbildung 92: MMT, Schwergut, 1,0/0,5 mm



Abbildung 93: MMT, Schwergut, 0,5/0 mm



Abbildung 94: MMT, Leichtgut, >2,0 mm



Abbildung 95: MMT, Leichtgut, 2,0/1,6 mm



Abbildung 96: MMT, Leichtgut, 1,6/1,0 mm

11.2 LOACKER



Abbildung 97: Rohgut LOACKER bei Anlieferung am 22.06.2017, m=2348,69 g



Abbildung 98: LOACKER, Siebfraktion >2,0 mm



Abbildung 99: LOACKER, Siebfraction 2,0/1,0 mm



Abbildung 100: LOACKER, Siebfraction 1,0/0 mm



Abbildung 101: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, >2,0 mm



Abbildung 102: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, 2,0/1,0 mm



Abbildung 103: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, 1,0/0 mm



Abbildung 104: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, >2,0 mm



Abbildung 105: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, 2,0/1,0 mm



Abbildung 106: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, 1,0/0 mm



Abbildung 107: LOACKER, Schwergut, >2,0 mm

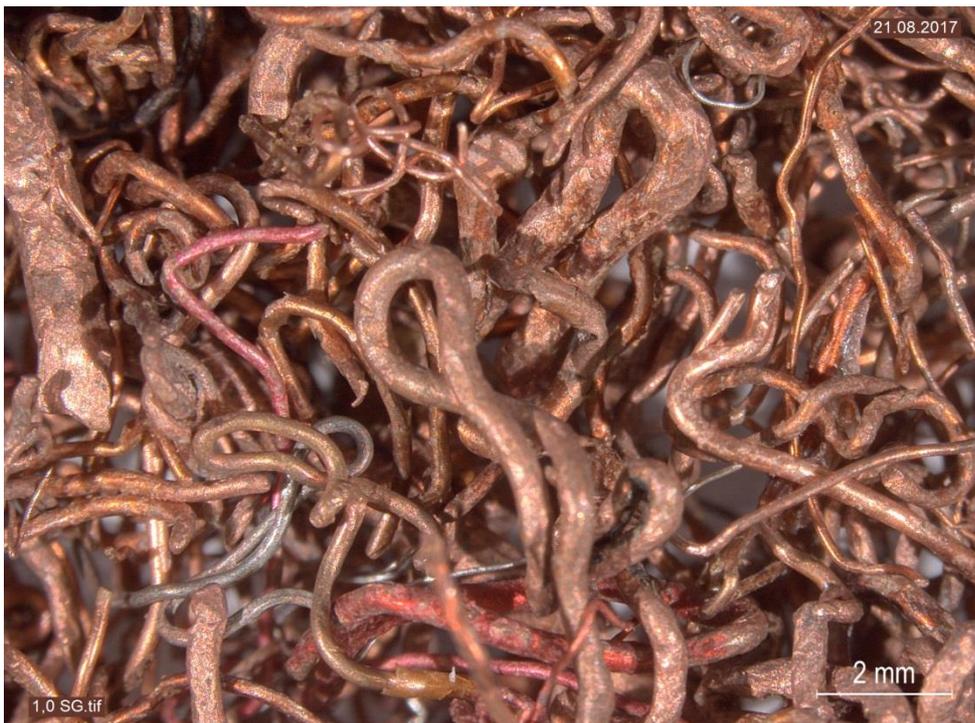


Abbildung 108: LOACKER, Schwergut, 2,0/1,0 mm



Abbildung 109: LOACKER, Schwergut, 1,0/0 mm



Abbildung 110: LOACKER, Leichtgut, >2,0 mm



Abbildung 111: LOACKER, Leichtgut, 2,0/1,0 mm



Abbildung 112: LOACKER, Leichtgut, 1,0/0 mm

11.3 WURZER



Abbildung 113: Rohgut WURZER bei Anlieferung am 22.06.2017, m=2970,86 g



Abbildung 114: WURZER, Siebfraktion >0,5 mm



Abbildung 115: WURZER, Siebfraction 0,5/0,315 mm



Abbildung 116: WURZER, Siebfraction 0,315/0 mm



Abbildung 117: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, >0,5 mm



Abbildung 118: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, 0,5/0,315 mm



Abbildung 119: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, 0,315/0 mm



Abbildung 120: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, >0,5 mm



Abbildung 121: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, 0,5/0,315 mm



Abbildung 122: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, 0,315/0 mm



Abbildung 123: WURZER, Schwergut, >0,5 mm



Abbildung 124: WURZER, Schwergut, 0,5/0,315 mm



Abbildung 125: WURZER, Schwergut, 0,315/0 mm



Abbildung 126: WURZER, Leichtgut, >0,5 mm



Abbildung 127: WURZER, Leichtgut, 0,5/0,315 mm



Abbildung 128: WURZER, Leichtgut, 0,315/0 mm

12 Anhang B – Tabellen

Unter der Kategorie REST sind Metalle zusammengefasst die neben den genannten ebenfalls auftreten können, so zum Beispiel Blei, Zink und Zinn. Diese sind aber nicht Teil der Untersuchung.

12.1 MMT

Tabelle 21: Siebanalyse MMT

Siebanalyse MMT															
Partikelgröße	Masse	Durchgang	Rückstand	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]					
[mm]	[%]	[%]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
> 2,0	14,60	85,40	14,60	11,75	1,09	60,98	5,71	1,04	19,43	45,67	22,97	12,64	18,83	37,94	14,43
2,0/1,6	14,86	70,53	29,47	4,53	0,71	70,46	4,84	0,53	18,93	17,93	15,32	14,05	16,33	39,56	13,83
1,6/1,0	26,20	44,33	55,67	4,89	0,81	69,77	4,38	0,35	19,80	34,05	30,64	25,94	25,88	22,50	26,40
1,0/0,5	31,58	12,75	87,25	0,23	0,54	72,67	3,93	0,00	22,63	1,90	24,51	32,56	28,02	0,00	36,35
0,5/0	12,75	0,00	100,00	0,13	0,36	81,85	3,81	0,00	13,85	0,45	6,56	14,81	10,95	0,00	8,99
Σ	100,00			3,76	0,69	71,05	4,43	0,32	19,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 22: Magnetscheidung MMT

Magnetscheidung MMT														
Partikelgröße	Suszeptibilität	Masse	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]					
[mm]	[T]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>2,00	<0,12	10,90	0,83	8,40	26,29	46,36	0,00	18,13	0,77	83,88	4,70	88,43	0,00	10,17
	<1,2	2,78	6,31	2,70	36,45	10,14	0,00	44,41	1,49	6,87	1,66	4,94	0,00	6,36
	UMP	86,32	13,30	0,12	66,15	0,44	1,21	18,79	97,74	9,25	93,64	6,63	100,00	83,48
	Σ	100,00	11,75	1,09	60,98	5,71	1,04	19,43	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,0/1,6	<0,12	11,50	1,73	5,19	33,30	37,30	0,00	22,49	2,35	83,54	5,75	88,09	0,00	14,13
	<1,2	5,12	8,24	2,30	40,30	10,14	0,00	39,03	5,00	16,46	3,10	10,65	0,00	10,91
	UMP	83,38	9,38	0,00	72,82	0,07	1,28	16,45	92,65	0,00	91,15	1,25	100,00	74,95
	Σ	100,00	8,44	0,71	66,61	4,87	1,07	18,30	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,6/1,0	<0,12	14,77	1,73	5,19	42,28	28,30	0,00	22,51	5,23	94,55	8,95	95,49	0,00	16,78
	<1,2	9,58	6,88	0,46	43,61	1,85	0,00	47,20	13,51	5,45	5,99	4,04	0,00	22,82
	UMP	75,65	5,24	0,00	78,46	0,03	0,46	15,82	81,27	0,00	85,07	0,46	100,00	60,40
	Σ	100,00	4,88	0,81	69,78	4,38	0,35	19,81	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,0/0,5	<0,12	14,06	0,16	3,67	46,76	27,41	0,00	22,00	9,82	95,81	9,05	98,04	0,00	13,67
	<1,2	7,85	0,81	0,29	40,91	0,98	0,00	57,02	28,02	4,19	4,42	1,96	0,00	19,78
	UMP	78,08	0,18	0,00	80,53	0,00	0,00	19,29	62,15	0,00	86,53	0,00	0,00	66,55
	Σ	100,00	0,23	0,54	72,67	3,93	0,00	22,63	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00
0,5/0	<0,12	13,21	0,12	2,60	45,58	28,56	0,00	23,15	11,65	96,38	7,36	99,16	0,00	22,05
	<1,2	8,97	0,17	0,14	38,91	0,36	0,00	60,42	11,45	3,62	4,26	0,84	0,00	39,08
	UMP	77,83	0,13	0,00	92,95	0,00	0,00	6,92	76,91	0,00	88,38	0,00	0,00	38,87
	Σ	100,00	0,13	0,36	81,85	3,80	0,00	13,86	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00

Tabelle 23: Dichtesortierung MMT

Dichtesortierung MMT															
Partikelgröße	Dichte	Masse	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]						
[mm]	[g/cm ³]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	
>2,00	>3,00	84,45	0,24	0,13	78,01	0,42	0,00	21,20	1,53	96,81	99,59	80,80	0,00	95,27	
	<3,00	15,55	84,21	0,02	1,73	0,54	7,77	5,72	98,47	3,19	0,41	19,20	100,00	4,73	
	Σ	100,00	13,30	0,12	66,15	0,44	1,21	18,79	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
2,0/1,6	>3,00	88,56	0,14	0,00	81,93	0,00	0,00	17,92	1,36	0,00	99,64	0,00	0,00	96,49	
	<3,00	11,44	80,82	0,00	2,29	0,64	11,21	5,05	98,64	0,00	0,36	100,00	100,00	3,51	
	Σ	100,00	9,38	0,00	72,82	0,07	1,28	16,45	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
1,6/1,0	>3,00	94,36	0,29	0,00	82,97	0,00	0,00	16,75	5,15	0,00	99,79	0,00	0,00	99,90	
	<3,00	5,64	88,24	0,00	2,91	0,48	8,09	0,28	94,85	0,00	0,21	100,00	100,00	0,10	
	Σ	100,00	5,24	0,00	78,46	0,03	0,46	15,82	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
1,0/0,5	>3,00	99,30	0,18	0,00	80,53	0,00	0,00	19,29	99,30	0,00	99,30	0,00	0,00	99,30	
	<3,00	0,70	Zu geringe Probenmasse							0,70	100,00	0,70	100,00	100,00	0,70
	Σ	100,00	0,18	0,00	80,53	0,00	0,00	19,29	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
0,5/0	>3,00	99,07	0,13	0,00	92,95	0,00	0,00	6,92	99,07	0,00	99,07	0,00	0,00	99,07	
	<3,00	0,93	Zu geringe Probenmasse							0,93	100,00	0,93	100,00	100,00	0,93
	Σ	100,00	0,13	0,00	92,95	0,00	0,00	6,92	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Tabelle 24: Gesamtbilanz für das Rohgut MMT

Fraktion	Masse	Partikelgröße [mm]	m _{i,j} [%]	Gehalt [%]						Massenverteilung [%]						aufgabebezogenes Ausbringen [%]						kornklassenbezogenes Ausbringen [%]					
	[%]			Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
MP 1, 0,12 T	13,30	> 2,0	11,97	0,83	8,4	26,29	46,36	0	18,13	11,11	21,22	7,65	17,70	0,00	9,91	0,35	19,29	0,59	16,67	0,00	1,46	0,77	84,15	4,70	88,44	0,00	10,17
		2,0/1,6	12,85	1,73	5,19	33,3	37,3	0	22,49	24,88	14,08	10,41	15,29	0,00	13,20	0,79	12,80	0,80	14,40	0,00	1,95	4,39	83,52	5,43	88,65	0,00	13,67
		1,6/1,0	29,10	1,73	5,19	42,28	28,3	0	22,51	56,33	31,88	29,92	26,27	0,00	29,92	1,78	28,98	2,30	24,74	0,00	4,41	5,23	94,56	8,95	95,48	0,00	16,78
		1,0/0,5	33,41	0,16	3,67	46,76	27,41	0	22	5,98	25,87	37,98	29,20	0,00	33,57	0,19	23,52	2,92	27,50	0,00	4,95	9,93	95,77	9,05	98,04	0,00	13,67
		0,5/0	12,67	0,12	2,6	45,58	28,56	0	23,15	1,70	6,95	14,04	11,54	0,00	13,39	0,05	6,32	1,08	10,87	0,00	1,97	11,98	96,47	7,36	99,15	0,00	22,06
		Σ	100,00	0,89	4,74	41,13	31,35	0,00	21,89	100	100	100	100	0	100	3,16	90,91	7,70	94,17	0,00	14,73						
MP 2, 1,2 T	7,30	> 2,0	5,56	6,31	2,7	36,45	10,14	0	44,41	9,05	22,46	4,92	21,31	0,00	4,79	0,68	1,58	0,21	0,93	0,00	0,91	1,49	6,90	1,66	4,93	0,00	6,35
		2,0/1,6	10,42	8,24	2,3	40,3	10,14	0	39,03	22,15	35,86	10,19	39,94	0,00	7,88	1,67	2,53	0,43	1,74	0,00	1,50	9,31	16,48	2,93	10,73	0,00	10,56
		1,6/1,0	34,38	6,88	0,46	43,61	1,85	0	47,2	61,02	23,66	36,38	24,04	0,00	31,45	4,60	1,67	1,54	1,05	0,00	6,00	13,49	5,44	5,99	4,05	0,00	22,82
		1,0/0,5	33,97	0,81	0,29	40,91	0,98	0	57,02	7,10	14,74	33,72	12,58	0,00	37,54	0,53	1,04	1,43	0,55	0,00	7,16	28,06	4,23	4,42	1,96	0,00	19,78
		0,5/0	15,67	0,17	0,14	38,91	0,36	0	60,42	0,69	3,28	14,79	2,13	0,00	18,34	0,05	0,23	0,63	0,09	0,00	3,50	11,53	3,53	4,26	0,85	0,00	39,09
		Σ	100,00	3,88	0,67	41,21	2,65	0,00	51,60	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	7,53	7,04	4,23	4,36	0,00	19,07						
UMP, (SG+LG)	79,40	> 2,0	15,87	13,30	0,11	66,15	0,44	1,21	18,79	49,95	100,00	13,32	84,89	47,43	18,11	44,61	2,05	11,73	1,25	47,43	11,99	97,74	8,96	93,64	6,63	100,00	83,48
		2,0/1,6	15,60	4,69	0,00	77,44	0,04	0,63	17,19	17,32	0,00	15,33	6,87	24,40	16,29	15,47	0,00	13,51	0,10	24,40	10,78	86,30	0,00	91,64	0,62	100,00	75,77
		1,6/1,0	24,96	5,25	0,00	78,45	0,03	0,46	15,82	31,02	0,00	24,85	8,24	28,17	23,97	27,70	0,00	21,89	0,12	28,17	15,87	81,28	0,00	85,06	0,47	100,00	60,40
		1,0/0,5	31,07	0,18	0	80,53	0	0	19,29	1,32	0,00	31,75	0,00	0,00	36,38	1,18	0,00	27,96	0,00	0,00	24,08	62,02	0,00	86,53	0,00	0,00	66,56
		0,5/0	12,50	0,13	0	92,95	0	0	6,92	0,38	0,00	14,74	0,00	0,00	5,25	0,34	0,00	12,98	0,00	0,00	3,48	76,49	0,00	88,38	0,00	0,00	38,85
		Σ	100	4,23	0,02	78,80	0,08	0,40	16,47	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	89,30	2,05	88,07	1,47	100,00	66,20						
Aufgabe	100,00	> 2,0	14,6	11,74	1,09	60,98	5,71	1,04	19,43	45,64	22,92	12,53	18,84	47,43	14,36	45,64	22,92	12,53	18,84	47,43	14,36	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		2,0/1,6	14,86	4,53	0,71	70,46	4,84	0,53	18,92	17,93	15,32	14,74	16,24	24,40	14,23	17,93	15,32	14,74	16,24	24,40	14,23	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1,6/1,0	26,2	4,89	0,81	69,77	4,38	0,35	19,82	34,08	30,65	25,73	25,91	28,17	26,28	34,08	30,65	25,73	25,91	28,17	26,28	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1,0/0,5	31,59	0,23	0,54	72,67	3,93	0,00	22,63	1,91	24,56	32,31	28,05	0,00	36,19	1,91	24,56	32,31	28,05	0,00	36,19	100,00	100,00	100,00	100,00	-	100,00
		0,5/0	12,75	0,13	0,36	81,85	3,81	0,00	13,86	0,45	6,55	14,69	10,96	0,00	8,95	0,45	6,55	14,69	10,96	0,00	8,95	100,00	100,00	100,00	100,00	-	100,00
		Σ	100	3,76	0,69	71,05	4,43	0,32	19,76	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00					

12.2 LOACKER

Tabelle 25: Siebanalyse LOACKER

Siebanalyse LOACKER															
Partikelgröße	Masse	Durchgang	Rückstand	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]					
[mm]	[%]	[%]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>2,0	49,45	50,55	49,45	3,96	0,11	57,65	0,68	6,73	30,88	54,43	75,06	41,80	62,49	53,67	71,37
2,0/1,0	20,33	30,22	69,78	2,38	0,03	75,05	0,21	7,34	14,99	13,45	8,69	22,37	8,08	24,06	14,25
1,0/0	30,22	0,00	100,00	3,82	0,04	80,87	0,52	4,57	10,18	32,12	16,25	35,83	29,43	22,27	14,38
Σ	100,00	-	-	3,59	0,08	68,20	0,53	6,20	21,39	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 26: Magnetscheidung LOACKER

Magnetscheidung LOACKER														
Partikelgröße	Suszeptibilität	Masse	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]					
[mm]	[T]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>2,00	0,12	1,36	10,96	8,11	19,14	48,04	8,40	5,35	3,78	96,78	0,45	96,81	1,70	0,24
	>1,2	0,45	10,70	0,82	18,65	4,82	47,47	17,54	1,21	3,22	0,14	3,19	3,15	0,25
	UMP	98,19	3,83	0,00	58,36	0,00	6,52	31,29	95,02	0,00	99,40	0,00	95,15	99,51
	Σ	100,00	3,96	0,11	57,65	0,68	6,73	30,88	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,0/1,0	0,12	1,62	8,31	1,52	12,37	9,32	48,74	19,74	5,68	76,82	0,27	71,18	10,79	2,14
	>1,2	2,82	12,95	0,26	25,46	2,17	24,84	34,32	15,37	23,18	0,96	28,82	9,56	6,46
	UMP	95,55	1,96	0,00	77,58	0,00	6,11	14,34	78,95	0,00	98,77	0,00	79,65	91,40
	Σ	100,00	2,38	0,03	75,05	0,21	7,34	14,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1,0/0	0,12	2,34	7,77	1,40	14,87	19,80	33,02	23,15	4,76	80,72	0,43	88,98	16,93	5,33
	>1,2	4,51	12,42	0,17	36,93	1,27	28,11	21,09	14,66	19,28	2,06	11,02	27,76	9,34
	UMP	93,15	3,31	0,00	84,66	0,00	2,71	9,33	80,58	0,00	97,51	0,00	55,31	85,33
	Σ	100,00	3,82	0,04	80,87	0,52	4,57	10,18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 27: Dichtesortierung LOACKER

Dichtesortierung LOACKER														
Partikelgröße	Dichte	Masse	Gehalt [%]					Inhaltsausbringen [%]						
[mm]	[g/cm ³]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>2,00	>3,00	65,91	0,01	0,00	87,64	0,00	0,00	12,35	0,17	0,00	98,97	0,00	0,00	26,01
	<3,00	34,09	11,21	0,00	1,77	0,00	19,11	67,91	99,83	0,00	1,03	0,00	100,00	73,99
	∑	100,00	3,83	0,00	58,36	0,00	6,52	31,29	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00
2,0/1,0	>3,00	89,87	0,04	0,00	85,75	0,00	0,00	14,21	1,83	0,00	99,32	0,00	0,00	89,09
	<3,00	10,13	19,03	0,00	5,19	0,00	60,34	15,44	98,17	0,00	0,68	0,00	100,00	10,91
	∑	100,00	1,96	0,00	77,58	0,00	6,11	14,34	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00
1,0/0	>3,00	88,41	0,19	0,00	92,94	0,00	0,00	6,88	5,00	0,00	97,06	0,00	0,00	65,20
	<3,00	11,59	27,10	0,00	21,48	0,00	23,41	28,01	95,00	0,00	2,94	0,00	100,00	34,80
	∑	100,00	3,31	0,00	84,66	0,00	2,71	9,33	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00

Tabelle 28: Gesamtbilanz für das Rohgut LOACKER

Fraktion	Masse	Partikelgröße	mi,j	Gehalt [%]						aufgabebesetzogenes Ausbringen [%]						kornklassenbezogenes Ausbringen [%]					
	[%]	[mm]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
MP1 0,12 T	1,71	> 2,0	39,35	10,96	8,11	19,14	48,04	8,40	5,35	2,05	72,64	0,19	60,47	0,91	0,17	3,77	96,76	0,45	96,79	1,70	0,24
		2,0/1,0	19,27	8,31	1,52	12,37	9,32	48,74	19,74	0,76	6,67	0,06	5,75	2,59	0,30	5,67	77,06	0,27	71,16	10,77	2,13
		1,0/0	41,38	7,77	1,40	14,87	19,80	33,02	23,15	1,53	13,19	0,15	26,21	3,77	0,77	4,75	81,03	0,43	89,00	16,92	5,32
		Σ	100,00	9,13	4,06	16,07	28,89	26,36	15,49	4,34	92,50	0,40	92,42	7,27	1,24						
MP2 1,2 T	2,16	> 2,0	10,31	10,70	0,82	18,65	4,82	47,47	17,54	0,66	2,43	0,06	2,01	1,70	0,18	1,22	3,24	0,15	3,21	3,18	0,26
		2,0/1,0	26,56	12,95	0,26	25,46	2,17	24,84	34,32	2,07	1,99	0,21	2,33	2,30	0,92	15,37	22,94	0,96	28,84	9,55	6,46
		1,0/0	63,13	12,42	0,17	36,93	1,27	28,11	21,09	4,71	3,09	0,74	3,24	6,18	1,34	14,65	18,97	2,06	11,00	27,75	9,34
		Σ	100,00	12,38	0,26	32,00	1,87	29,24	24,24	7,44	7,50	1,01	7,58	10,19	2,45						
UMP (SG+LG)	96,13	> 2,0	50,51	3,83	0,00	58,37	0,00	6,51	31,29	51,70	0,00	41,55	0,00	51,05	71,02	95,02	0,00	99,40	0,00	95,12	99,51
		2,0/1,0	20,21	1,96	0,00	77,59	0,00	6,11	14,33	10,61	0,00	22,10	0,00	19,17	13,02	78,97	0,00	98,78	0,00	79,67	91,41
		1,0/0	29,28	3,31	0,00	84,66	0,00	2,71	9,33	25,91	0,00	34,94	0,00	12,33	12,28	80,60	0,00	97,51	0,00	55,33	85,34
		Σ	100,00	3,30	0,00	69,95	0,00	5,32	21,43	88,22	0,00	98,58	0,00	82,54	96,32						
Aufgabe	100	> 2,0	49,45	3,96	0,11	57,65	0,68	6,72	30,88	54,42	75,07	41,80	62,48	53,67	71,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		2,0/1,0	20,33	2,38	0,03	75,06	0,21	7,33	14,99	13,44	8,65	22,37	8,07	24,05	14,24	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		1,0/0	30,22	3,82	0,04	80,87	0,52	4,57	10,18	32,15	16,27	35,83	29,45	22,28	14,39	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Σ	100,00	3,60	0,08	68,21	0,53	6,20	21,39	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						

12.3 WURZER

Tabelle 29: Siebanalyse WURZER

Siebanalyse WURZER															
Partikelgröße	Masse	Durchgang	Rückstand	Gehalt [%]						Inhaltsausbringen [%]					
[mm]	[%]	[%]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>0,5	3,27	96,73	3,27	25,70	0,06	37,85	0,60	15,71	20,09	2,48	7,11	2,75	4,07	5,96	5,54
0,5/0,315	7,68	89,05	10,95	34,07	0,00	21,81	0,41	19,59	24,12	7,71	0,53	3,71	6,57	17,44	15,60
0,315/0	89,05	0,00	100,00	34,21	0,03	47,35	0,48	7,42	10,51	89,81	92,35	93,54	89,36	76,60	78,86
Σ	100,00	-	-	33,92	0,03	45,08	0,48	8,62	11,87	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 30: Magnetscheidung WURZER

Magnetscheidung WURZER														
Partikelgröße	Suszeptibilität	Masse	Gehalt [%]					Inhaltsausbringen [%]						
[mm]	[T]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>0,5	<0,12	14,28	22,19	0,33	44,60	3,20	9,02	20,67	12,32	80,13	16,82	76,24	8,20	14,69
	<1,2	23,29	24,35	0,05	30,03	0,56	10,18	34,83	22,06	19,87	18,48	21,96	15,10	40,39
	UMP	62,43	27,01	0,00	39,22	0,02	19,30	14,45	65,62	0,00	64,69	1,80	76,71	44,92
	Σ	100,00	25,70	0,06	37,85	0,60	15,71	20,09	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,5/0,315	<0,12	12,52	24,77	0,01	29,40	2,14	9,92	33,77	9,10	66,96	16,87	64,97	6,34	17,53
	<1,2	15,44	14,51	0,00	10,09	0,19	18,51	56,70	6,58	33,04	7,14	7,28	14,59	36,31
	UMP	72,04	39,88	0,00	23,01	0,16	21,50	15,45	84,32	0,00	75,99	27,75	79,07	46,16
	Σ	100,00	34,07	0,00	21,81	0,41	19,59	24,12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,315/0	<0,12	2,81	31,46	0,85	17,12	14,98	4,61	30,98	2,58	85,51	1,01	87,10	1,74	8,27
	<1,2	10,12	33,85	0,04	19,99	0,62	18,57	26,94	10,02	14,49	4,27	12,90	25,34	25,95
	UMP	87,07	34,34	0,00	51,51	0,00	6,21	7,94	87,40	0,00	94,71	0,00	72,92	65,78
	Σ	100,00	34,21	0,03	47,35	0,48	7,42	10,51	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 31: Dichtesortierung WURZER

Dichtesortierung WURZER														
Partikelgröße	Dichte	Masse	Gehalt [%]					Inhaltsausbringen [%]						
[mm]	[g/cm ³]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
>0,5	>3,00	31,03	3,20	0,00	95,31	0,00	0,00	1,49	3,68	0,00	75,41	0,00	0,00	3,19
	<3,00	68,97	37,73	0,00	13,98	0,03	27,98	20,28	96,32	0,00	24,59	0,00	100,00	96,81
	Σ	100,00	27,01	0,00	39,22	0,02	19,30	14,45	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00
0,5/0,315	>3,00	15,17	2,26	0,00	95,70	0,00	0,00	2,04	0,86	0,00	63,09	0,00	0,00	2,00
	<3,00	84,83	46,61	0,00	10,01	0,19	25,35	17,85	99,14	0,00	36,91	0,00	100,00	98,00
	Σ	100,00	39,88	0,00	23,01	0,16	21,50	15,45	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00
0,315/0	>3,00	46,47	1,12	0,00	94,80	0,00	0,00	4,08	1,51	0,00	85,52	0,00	0,00	23,89
	<3,00	53,53	63,18	0,00	13,93	0,00	11,61	11,29	98,49	0,00	14,48	0,00	100,00	76,11
	Σ	100,00	34,34	0,00	51,51	0,00	6,21	7,94	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00

Tabelle 32: Gesamtbilanz für das Rohgut WURZER

Fraktion	Masse	Partikelgröße	mi,j	Gehalt [%]						Masseverteilung [%]						kornklassenbezogenes Ausbringen [%]					
	[%]	[mm]	[%]	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest	Al	Cr	Cu	Fe	KS	Rest
MP1 0,12 T	3,93	> 0,5	11,88	22,19	0,33	44,60	3,20	9,02	8,07	0,31	5,73	0,46	3,10	0,49	0,81	12,33	80,19	16,83	76,12	8,20	14,70
		0,5/0,315	24,46	24,77	0,01	29,40	2,14	9,92	27,14	0,70	0,36	0,63	4,27	1,11	2,74	9,10	100,00	16,87	64,81	6,34	17,53
		0,315/0	63,66	31,46	0,85	17,12	14,98	4,61	64,79	2,32	79,09	0,95	77,75	1,34	6,53	2,58	85,51	1,02	87,03	1,75	8,28
		Σ	100,00	28,72	0,58	23,39	10,44	6,43	100,00	3,33	85,18	2,04	85,12	2,93	10,08						
MP2 1,2 T	10,96	> 0,5	6,95	24,35	0,05	30,03	0,56	10,18	7,88	0,55	1,42	0,51	0,88	0,90	2,24	22,06	19,81	18,48	21,73	15,10	40,39
		0,5/0,315	10,82	14,51	0,00	10,09	0,19	18,51	19,98	0,51	0,00	0,27	0,47	2,54	5,67	6,58	0,00	7,14	7,10	14,59	36,30
		0,315/0	82,23	33,85	0,04	19,99	0,62	18,57	72,14	8,99	13,40	4,00	11,59	19,40	20,46	10,01	14,49	4,27	12,97	25,33	25,94
		Σ	100,00	31,10	0,04	19,62	0,57	17,98	100,00	10,05	14,82	4,77	12,94	22,84	28,36						
UMP (SG+LG)	85,11	> 0,5	2,40	27,02	0,00	39,22	0,02	19,30	4,04	1,63	0,00	1,78	0,09	4,57	2,49	65,61	0,00	64,69	2,15	76,70	44,91
		0,5/0,315	6,50	39,88	0,00	23,01	0,16	21,50	11,70	6,50	0,00	2,82	1,85	13,79	7,20	84,32	0,00	75,98	28,09	79,07	46,16
		0,315/0	91,10	34,34	0,00	51,51	0,00	6,21	84,26	78,49	0,00	88,59	0,00	55,86	51,87	87,40	0,00	94,71	0,00	72,93	65,78
		Σ	100,00	34,53	0,00	49,36	0,01	7,52	100,00	86,62	0,00	93,19	1,94	74,22	61,56						
Aufgabe	100,00	> 0,5	3,27	25,71	0,06	37,85	0,60	15,71	5,53	2,48	7,15	2,75	4,07	5,95	5,53	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,5/0,315	7,68	34,07	0,00	21,81	0,41	19,59	15,60	7,71	0,36	3,72	6,59	17,44	15,60	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,315/0	89,05	34,21	0,03	47,35	0,48	7,42	78,86	89,81	92,50	93,54	89,34	76,60	78,86	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
		Σ	100,00	33,92	0,03	45,08	0,48	8,63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00						

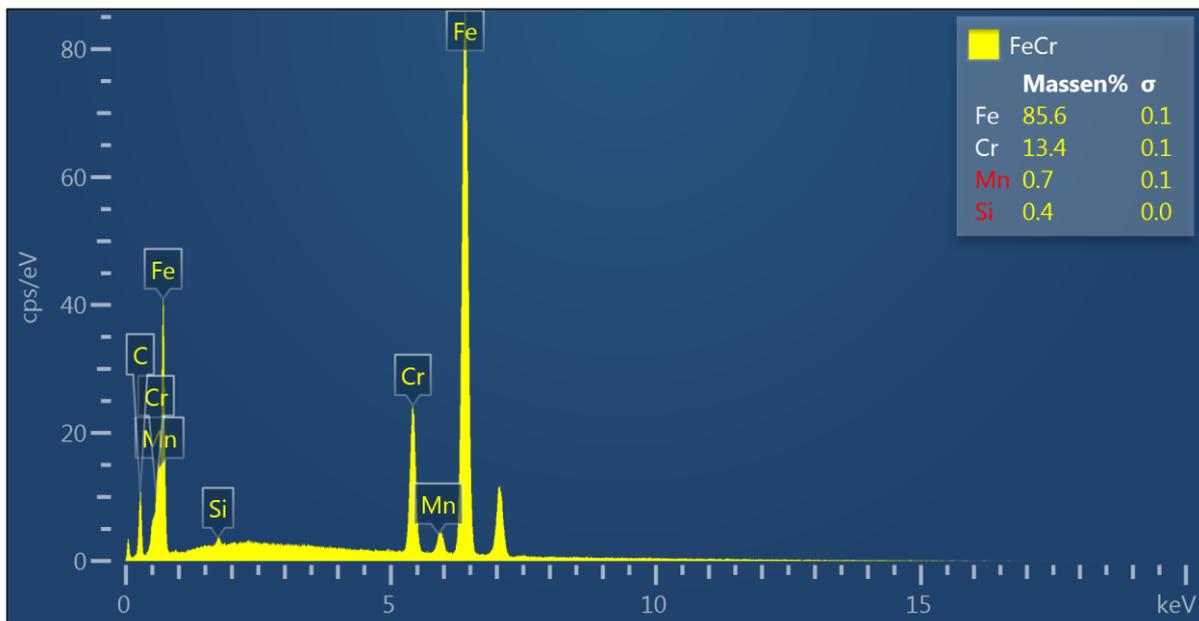
13 Anhang C – Phasenanalysen

13.1 0,5/0 mm MP 0,12 T



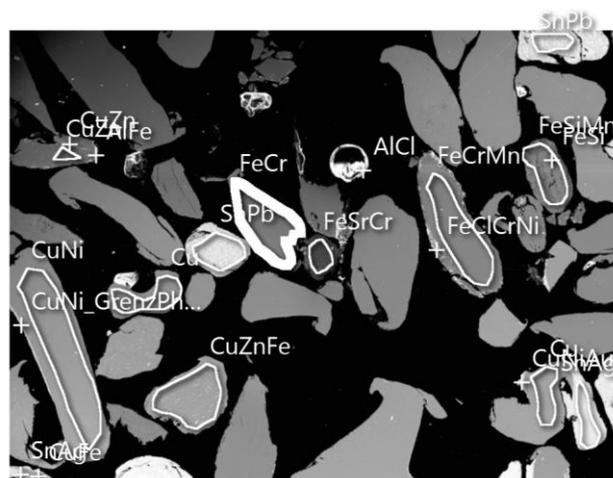
Abbildung 129: Schliffpräparat 0,5/0 mm 0,12 T

0,5/0 mm MMP 0,12 T



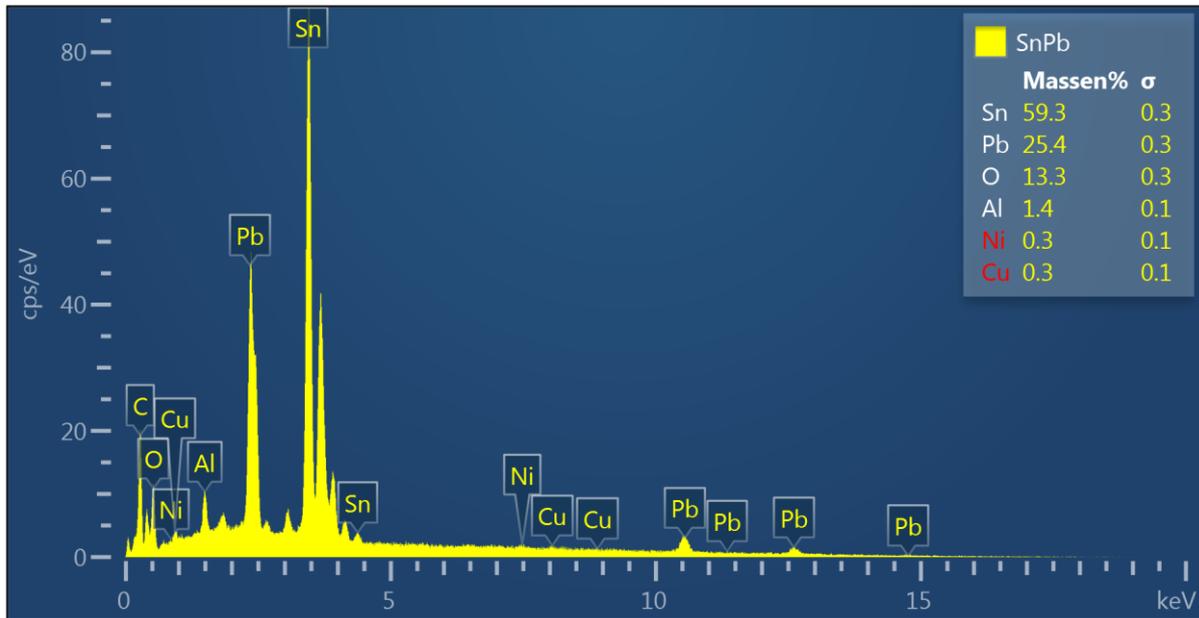
Element	Massen%	Massen% Sigma
Si	0.37	0.04
Cr	13.36	0.11
Mn	0.68	0.09
Fe	85.59	0.14
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7



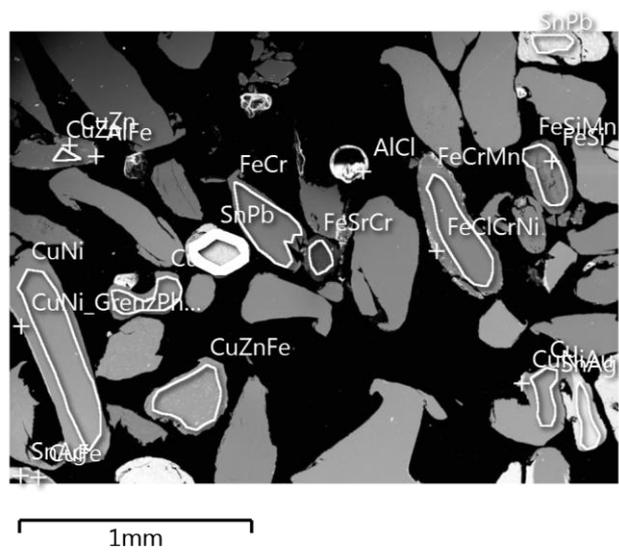
1mm

0,5/0 mm MP 0,12 T

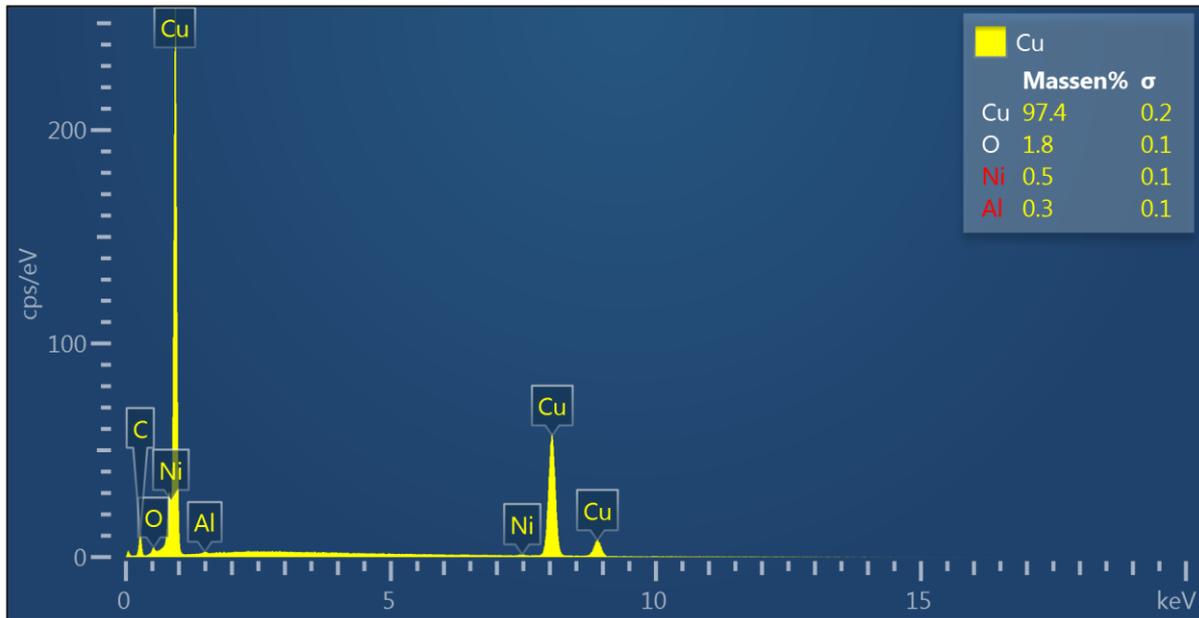


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	13.31	0.35
Al	1.38	0.06
Ni	0.32	0.10
Cu	0.29	0.11
Sn	59.32	0.34
Pb	25.38	0.28
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

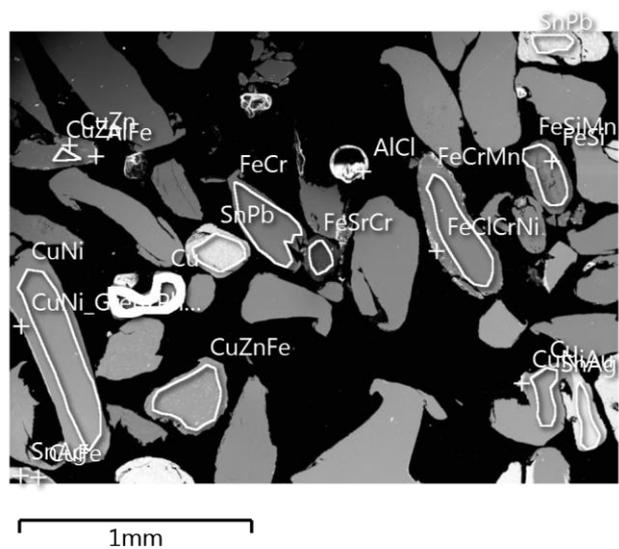


0,5/0 mm MP 0,12 T

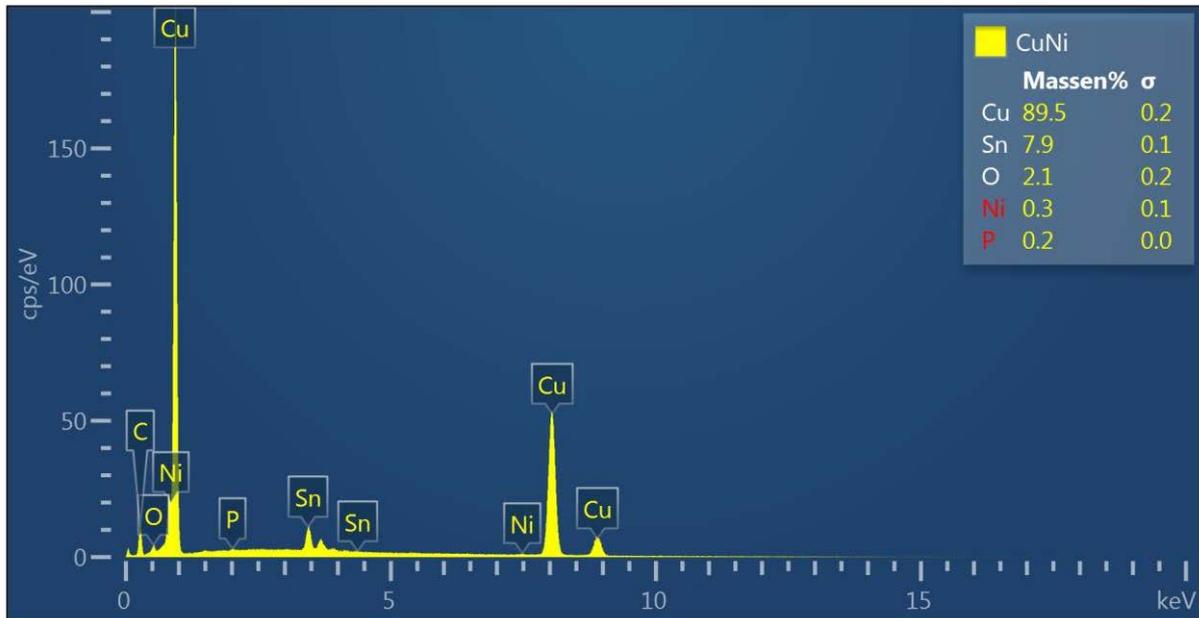


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	1.76	0.14
Al	0.33	0.07
Ni	0.54	0.10
Cu	97.37	0.18
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

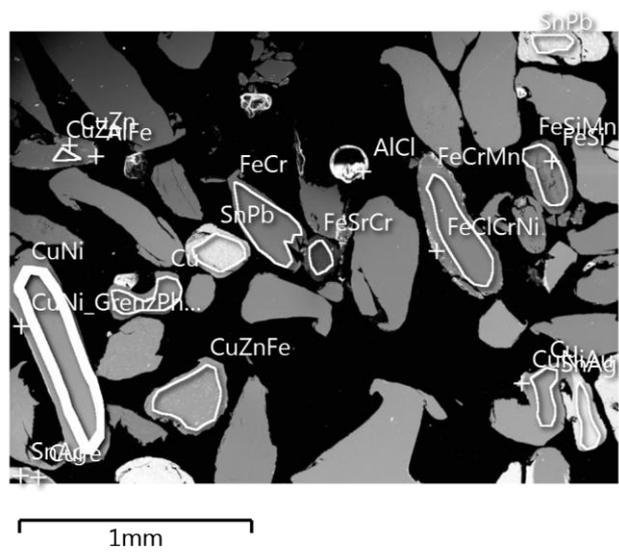


0,5/0 mm MP 0,12 T

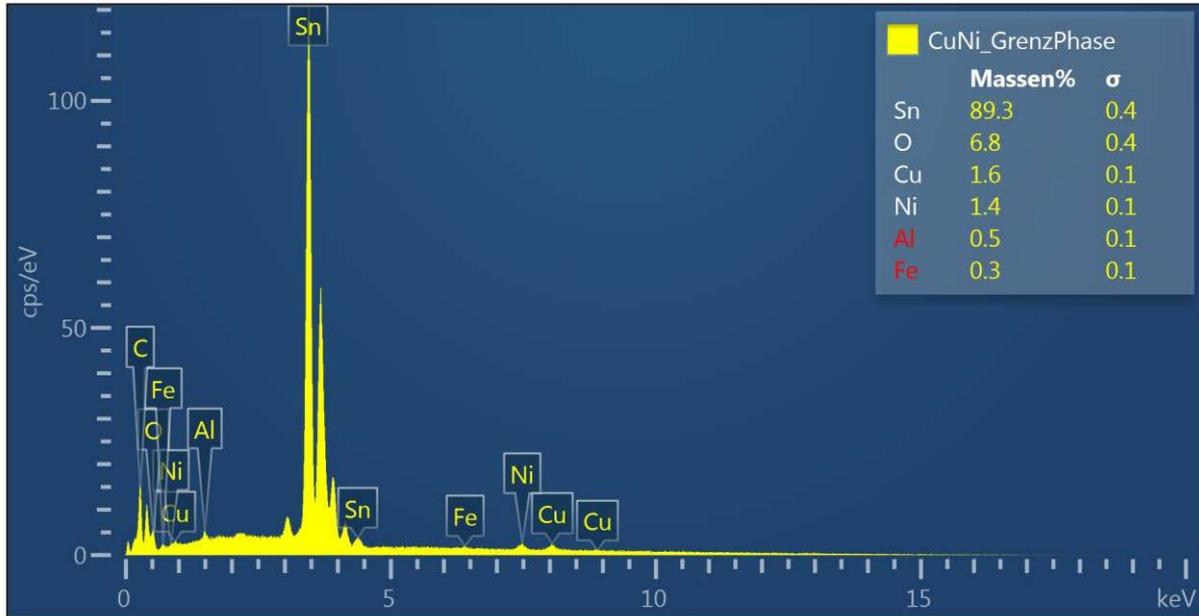


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.10	0.16
P	0.19	0.05
Ni	0.33	0.09
Cu	89.51	0.22
Sn	7.87	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

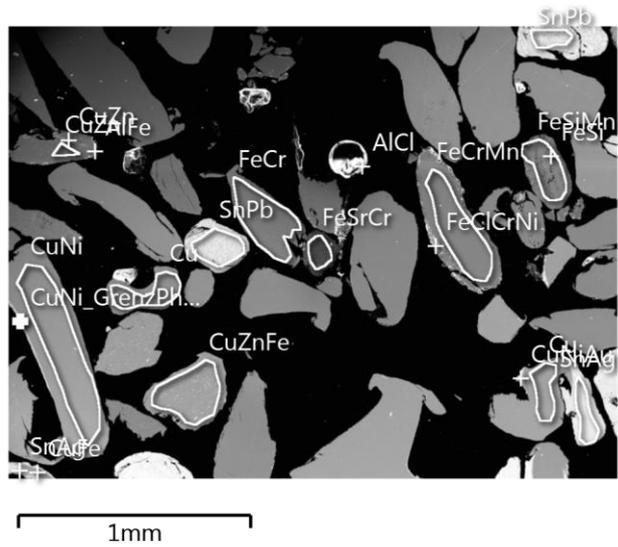


0,5/0 mm MP 0,12 T

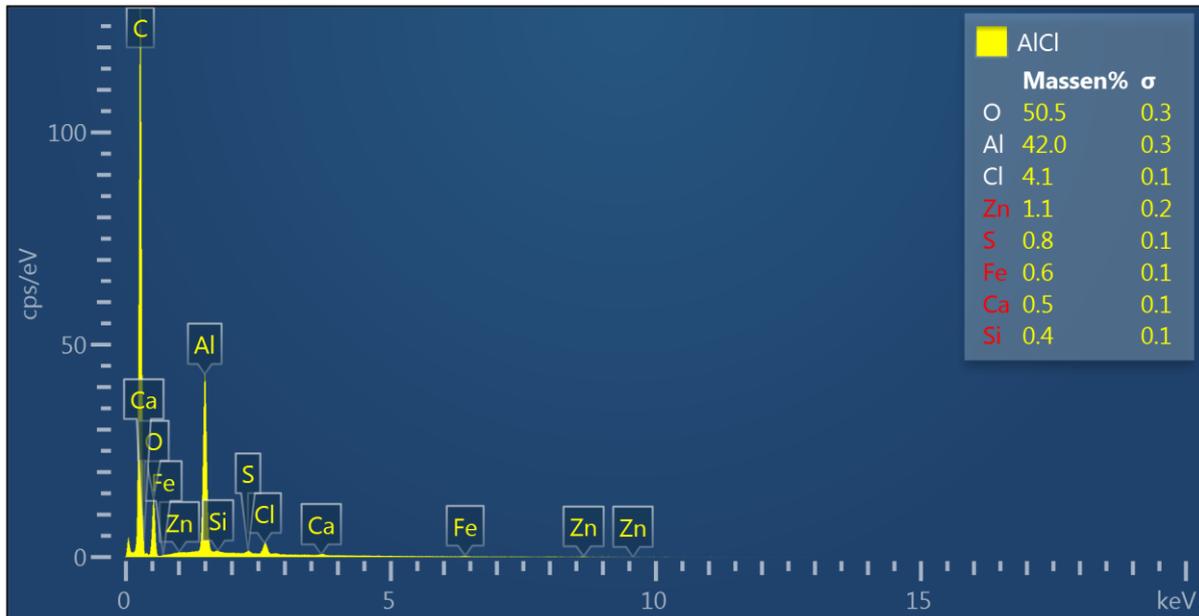


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	6.85	0.42
Al	0.50	0.06
Fe	0.29	0.09
Ni	1.40	0.12
Cu	1.63	0.14
Sn	89.34	0.44
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

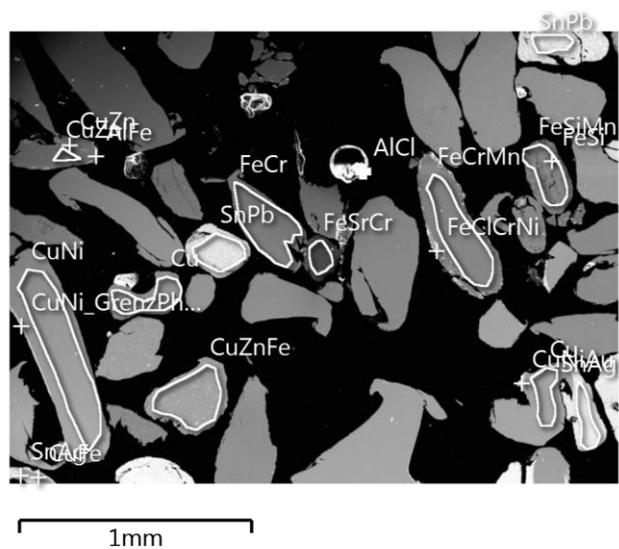


0,5/0 mm MP 0,12 T

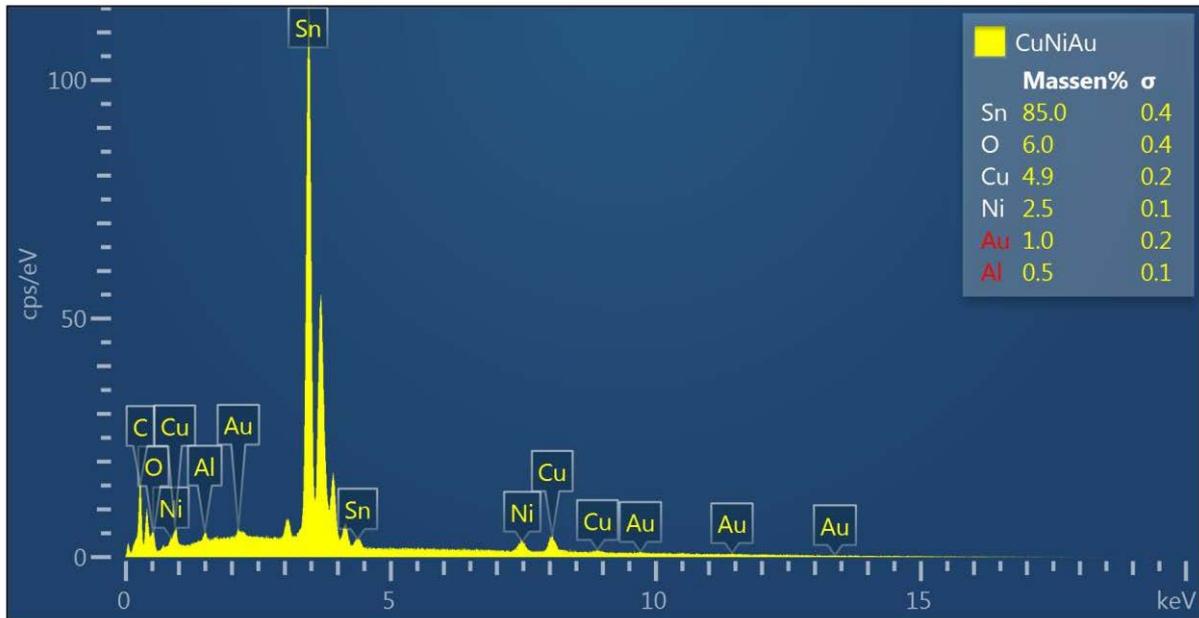


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	50.51	0.34
Al	41.96	0.30
Si	0.42	0.11
S	0.83	0.09
Cl	4.06	0.11
Ca	0.51	0.08
Fe	0.59	0.12
Zn	1.10	0.21
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

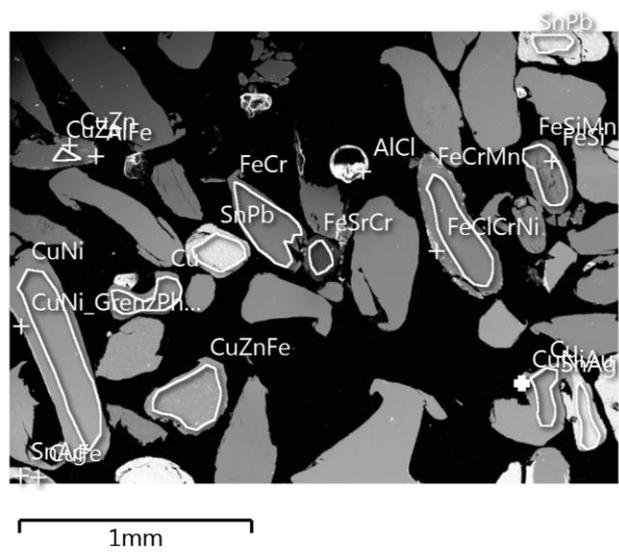


0,5/0 mm MP 0,12 T

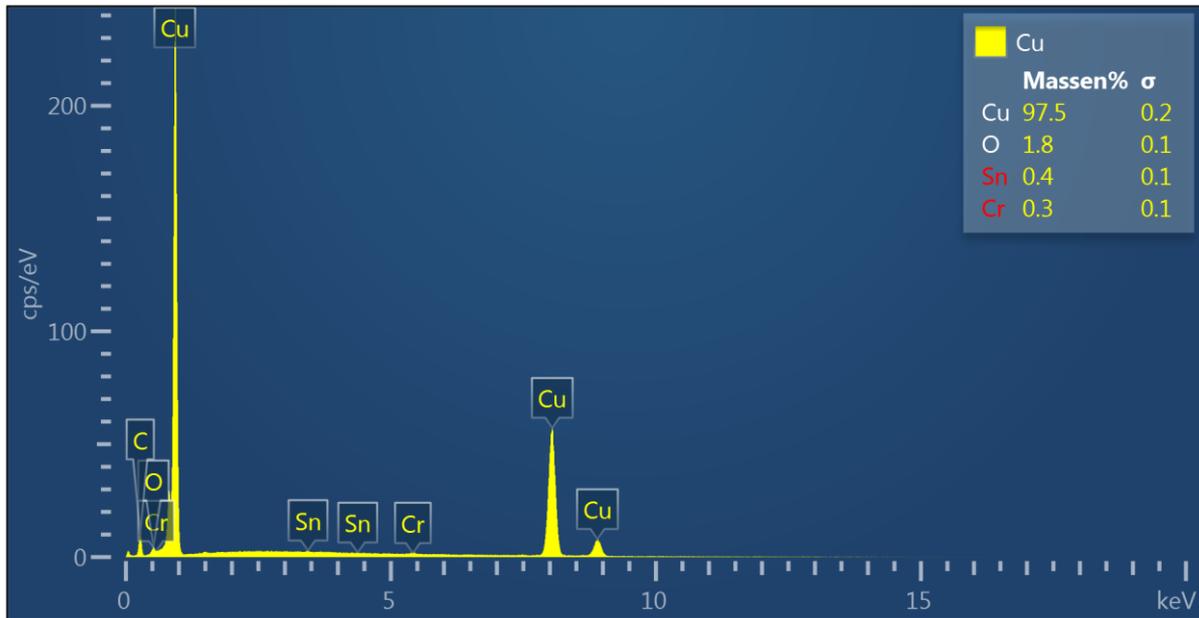


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	6.01	0.40
Al	0.51	0.06
Ni	2.50	0.13
Cu	4.93	0.16
Sn	85.04	0.44
Au	1.00	0.19
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

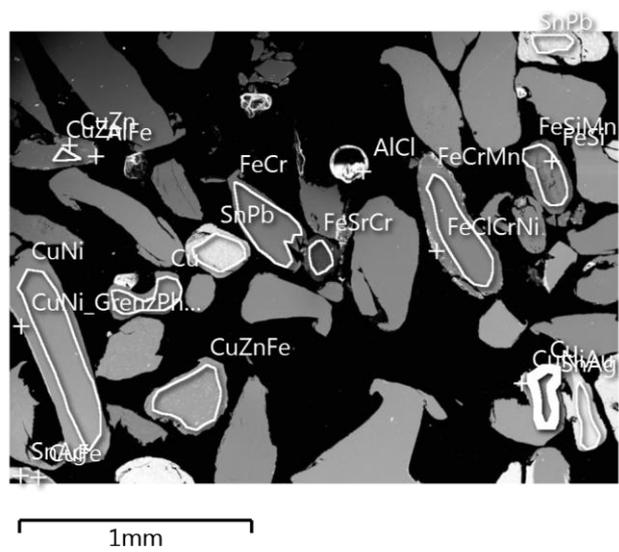


0,5/0 mm MP 0,12 T

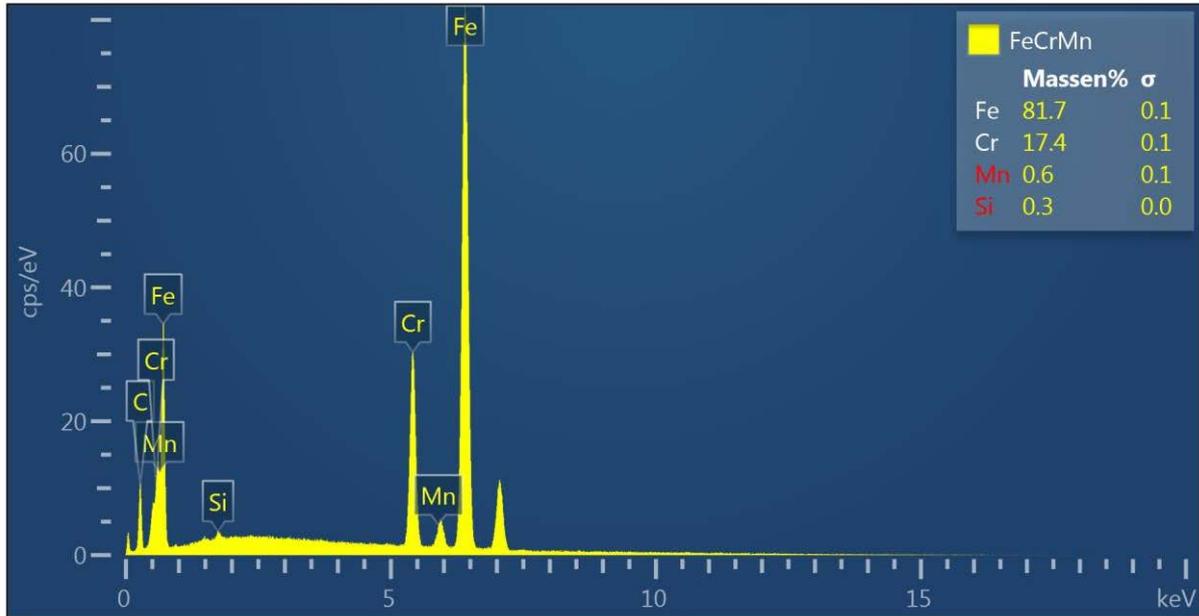


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	1.85	0.15
Cr	0.26	0.06
Cu	97.52	0.19
Sn	0.37	0.11
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

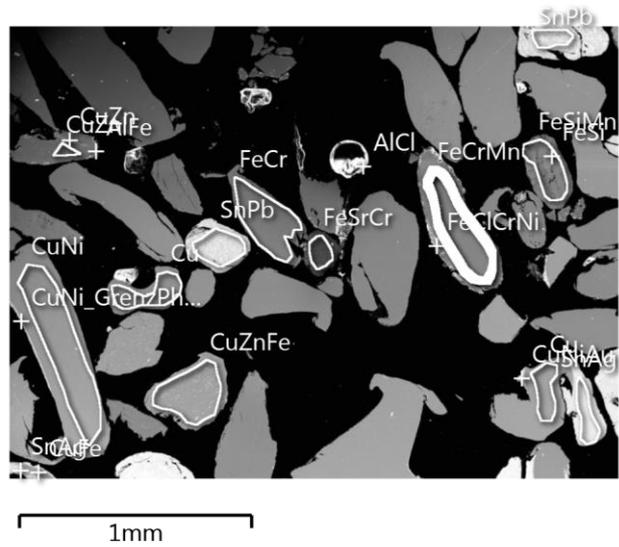


0,5/0 mm MP 0,12 T

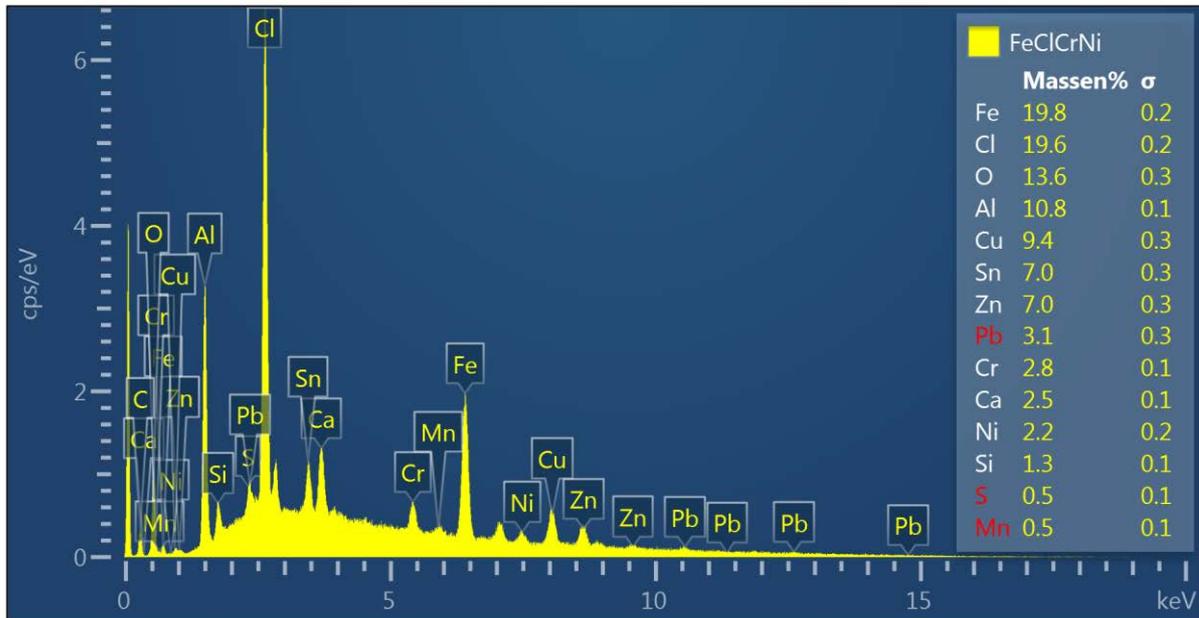


Element	Massen%	Massen% Sigma
Si	0.29	0.04
Cr	17.36	0.12
Mn	0.60	0.09
Fe	81.75	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

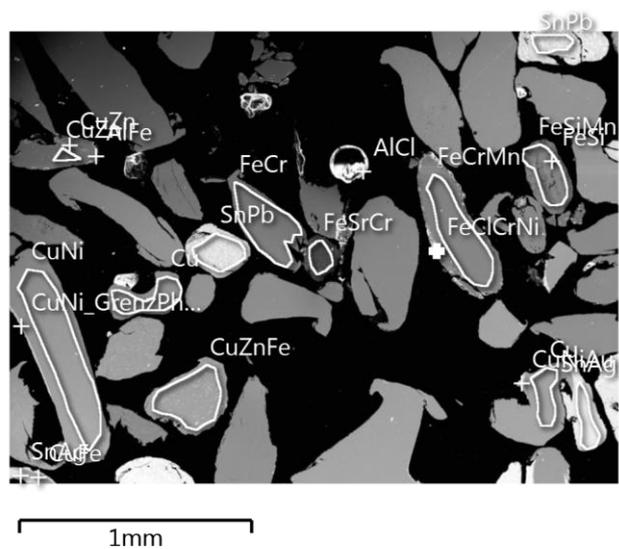


0,5/0 mm MP 0,12 T

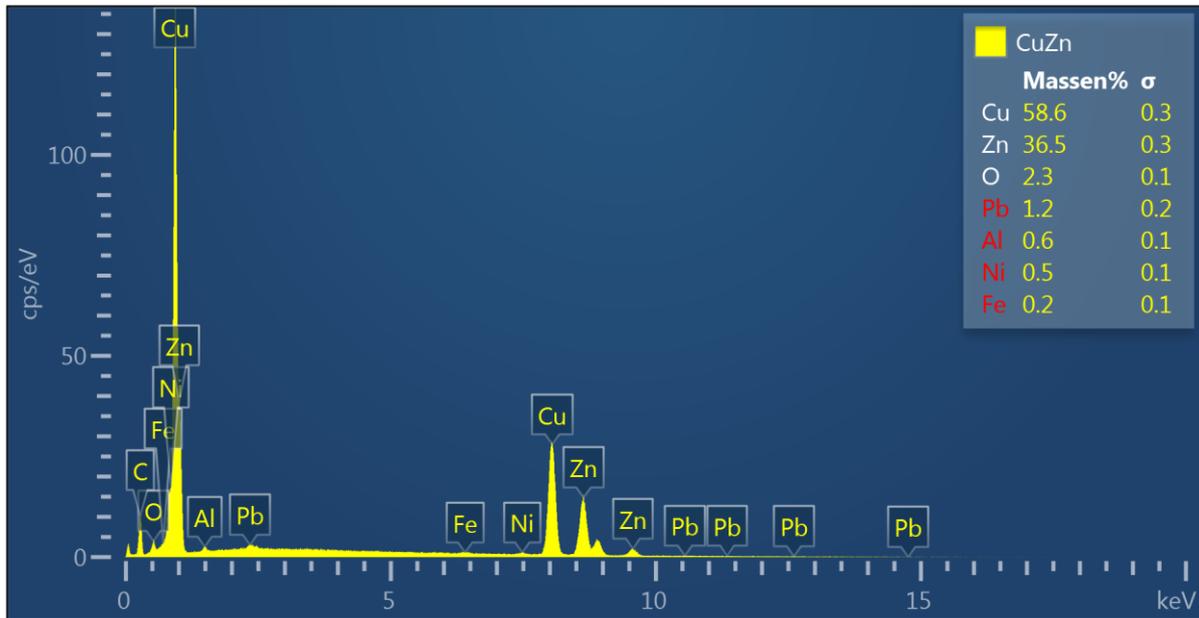


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	13.59	0.29
Al	10.77	0.13
Si	1.30	0.06
S	0.54	0.07
Cl	19.57	0.19
Ca	2.46	0.11
Cr	2.77	0.13
Mn	0.53	0.13
Fe	19.84	0.24
Ni	2.22	0.18
Cu	9.37	0.25
Zn	6.98	0.28
Sn	7.00	0.25
Pb	3.06	0.34
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

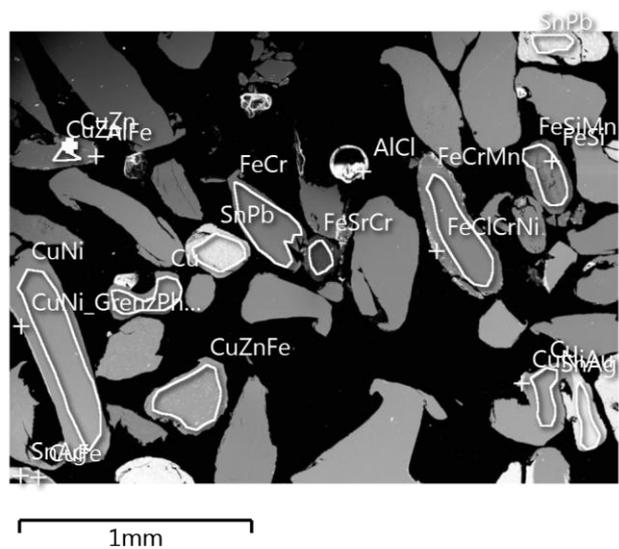


0,5/0 mm MP 0,12 T

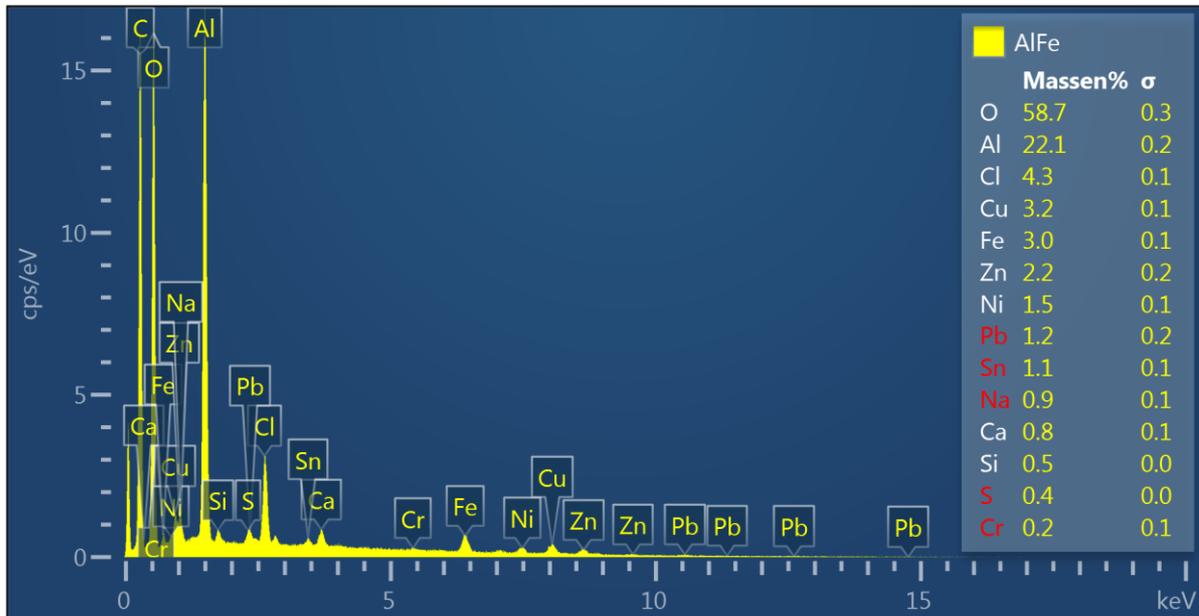


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.35	0.14
Al	0.62	0.07
Fe	0.22	0.06
Ni	0.53	0.08
Cu	58.63	0.32
Zn	36.50	0.29
Pb	1.15	0.21
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

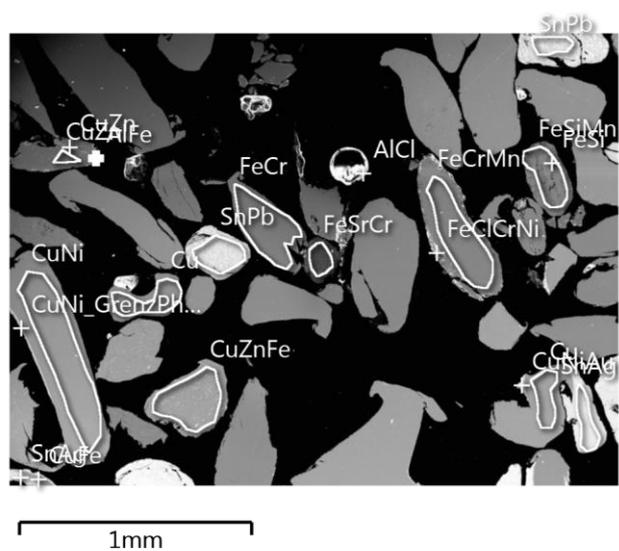


0,5/0 mm MP 0,12 T

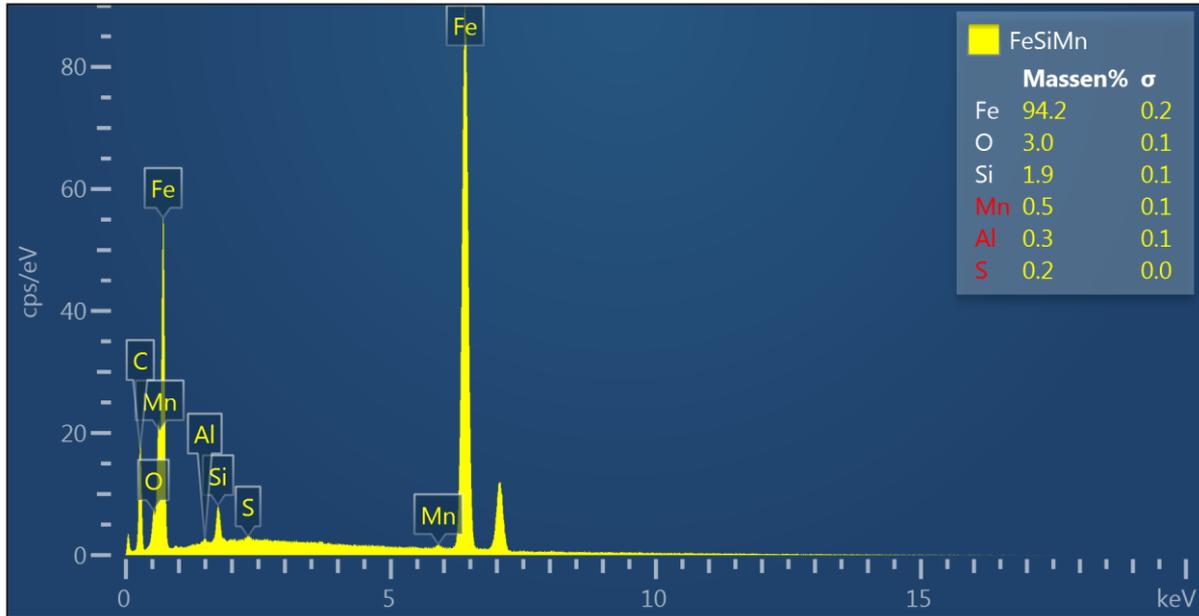


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	58.70	0.28
Na	0.89	0.10
Al	22.06	0.15
Si	0.53	0.05
S	0.42	0.04
Cl	4.32	0.07
Ca	0.84	0.05
Cr	0.19	0.06
Fe	2.95	0.10
Ni	1.49	0.10
Cu	3.16	0.14
Zn	2.17	0.15
Sn	1.11	0.12
Pb	1.17	0.20
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

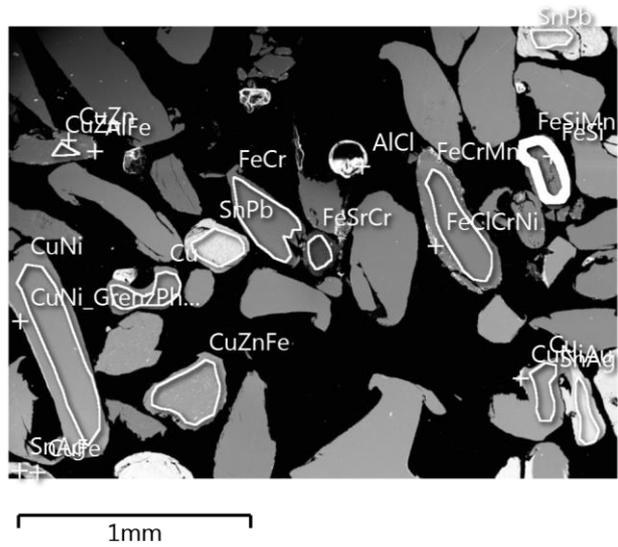


0,5/0 mm MP 0,12 T

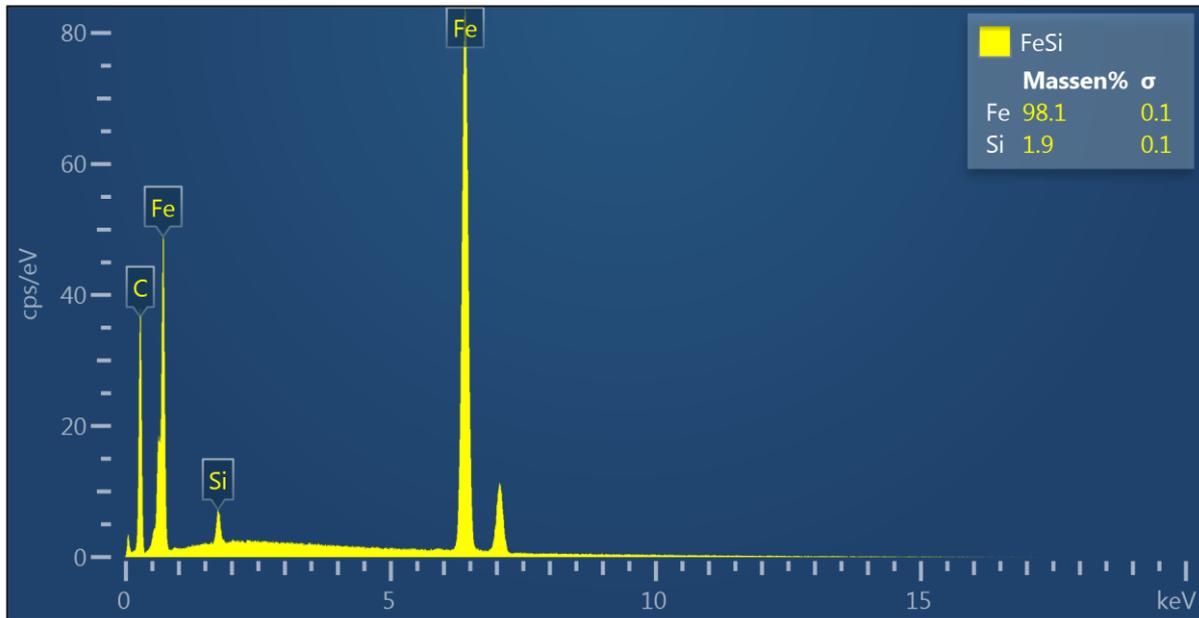


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.97	0.14
Al	0.27	0.05
Si	1.89	0.06
S	0.18	0.04
Mn	0.46	0.07
Fe	94.24	0.17
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

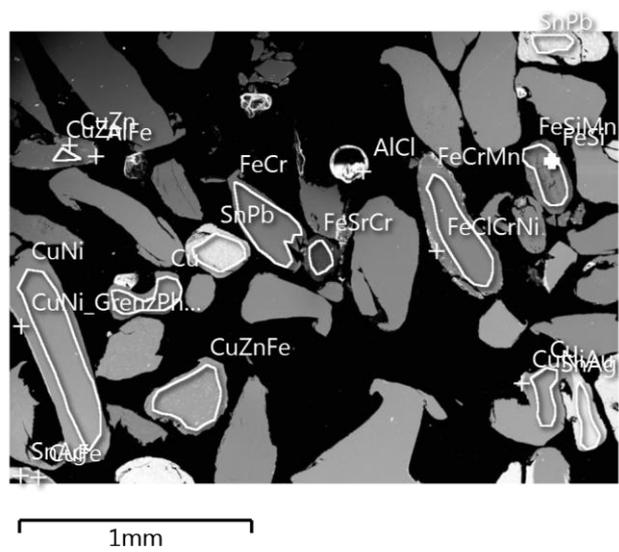


0,5/0 mm MP 0,12 T

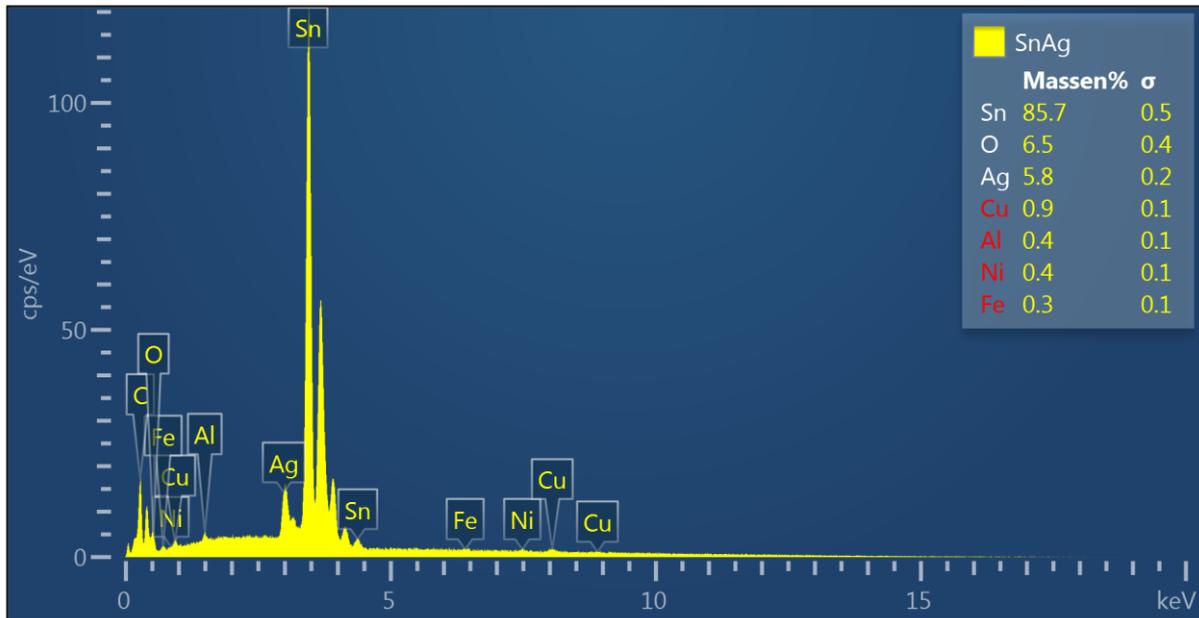


Element	Massen%	Massen% Sigma
Si	1.86	0.06
Fe	98.14	0.06
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

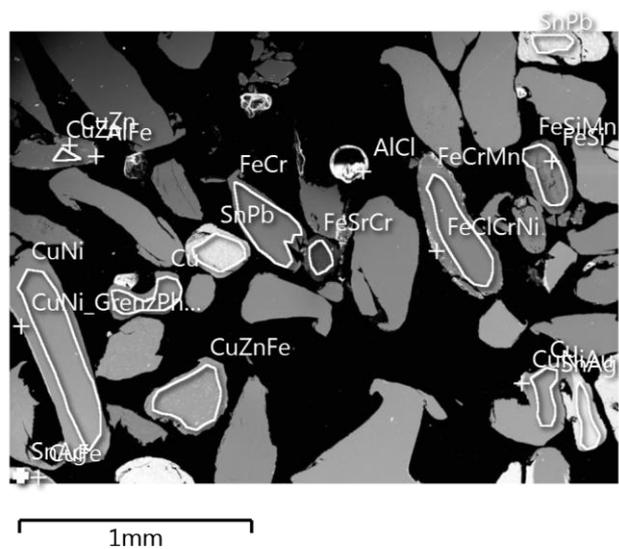


0,5/0 mm MP 0,12 T



Element	Massen%	Massen% Sigma
O	6.45	0.43
Al	0.41	0.06
Fe	0.26	0.09
Ni	0.40	0.11
Cu	0.90	0.13
Ag	5.85	0.16
Sn	85.73	0.45
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 7

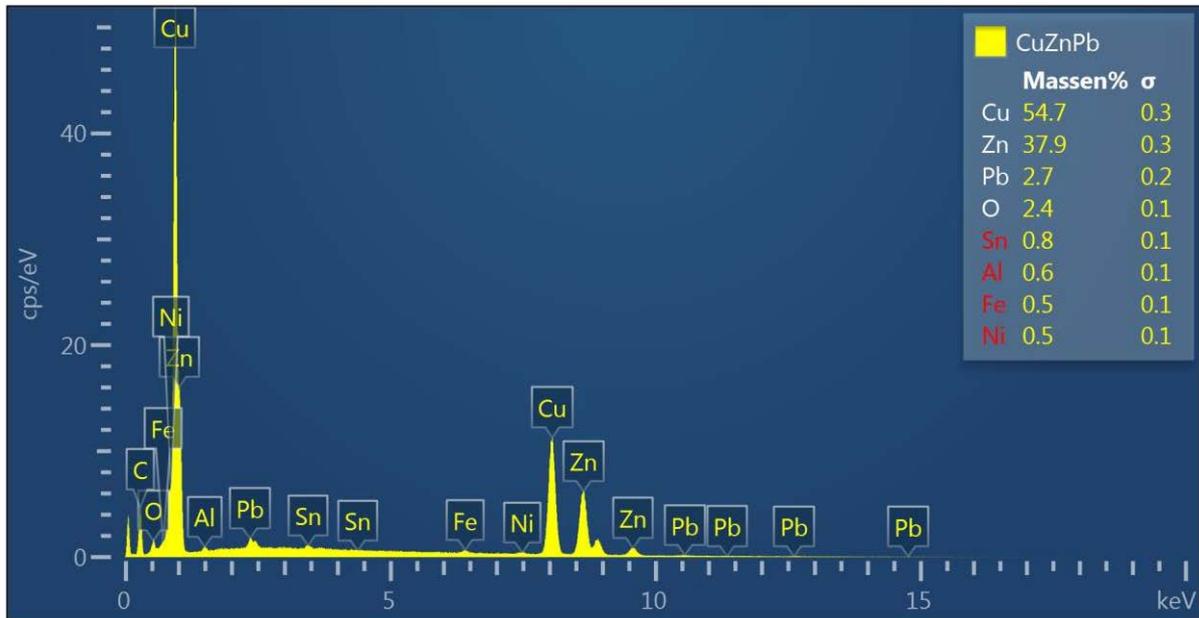


13.2 1,0/0,5 mm MP 1,2 T



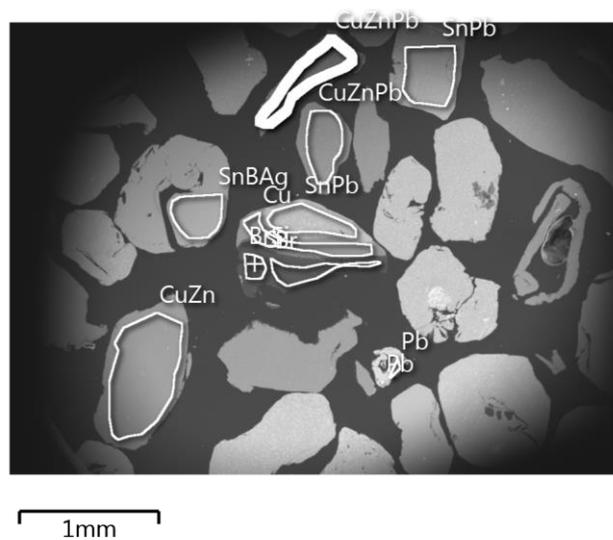
Abbildung 130: Schliffpräparat 1,0/0,5 mm 1,2 T

1/0,5 mm MP 1,2T

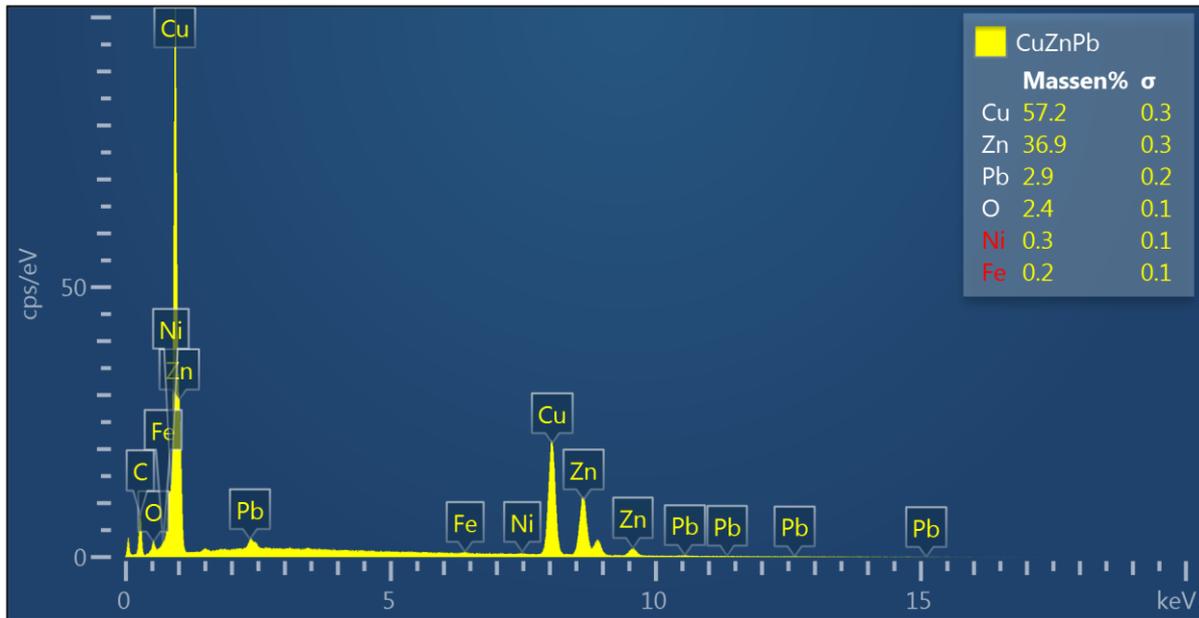


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.42	0.15
Al	0.58	0.07
Fe	0.51	0.07
Ni	0.48	0.08
Cu	54.70	0.31
Zn	37.85	0.29
Sn	0.80	0.11
Pb	2.65	0.22
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

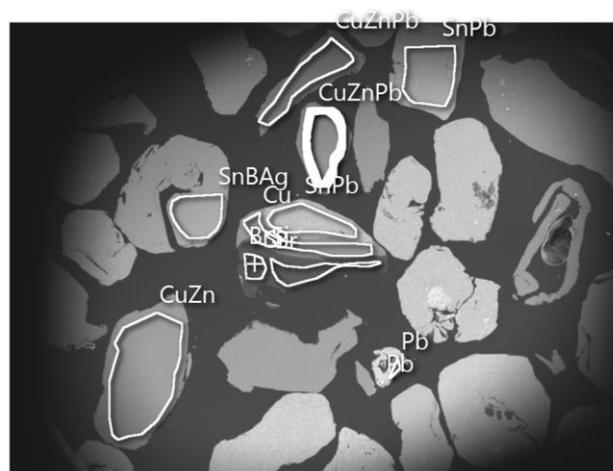


1/0,5 mm MP 1,2T

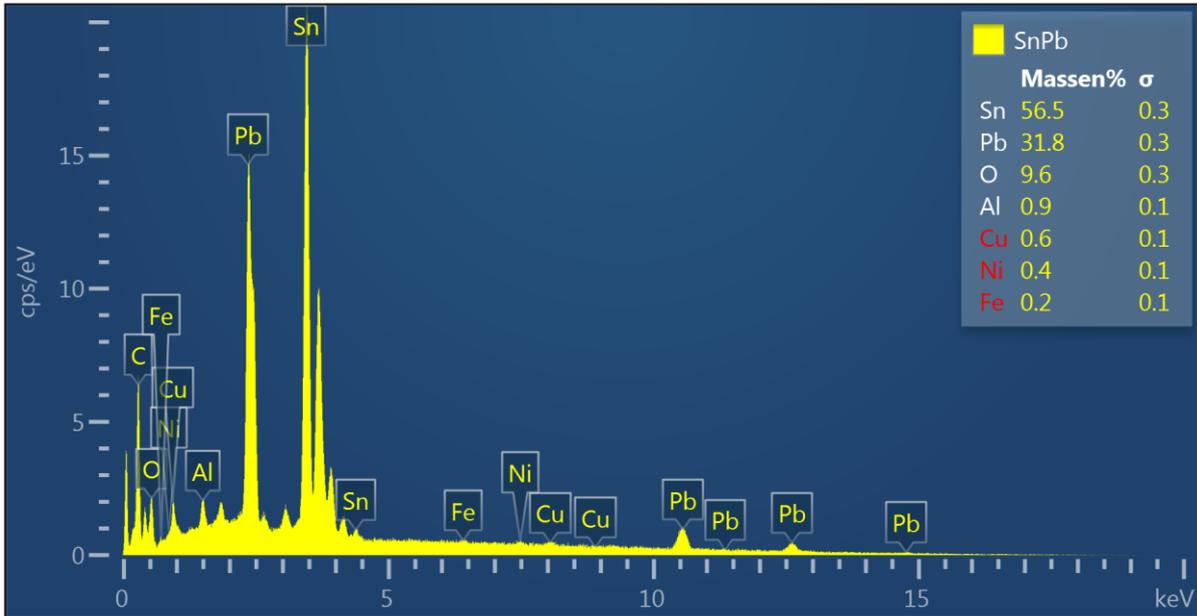


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.43	0.15
Fe	0.24	0.06
Ni	0.27	0.08
Cu	57.23	0.31
Zn	36.93	0.29
Pb	2.89	0.22
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13



1/0,5 mm MP 1,2T

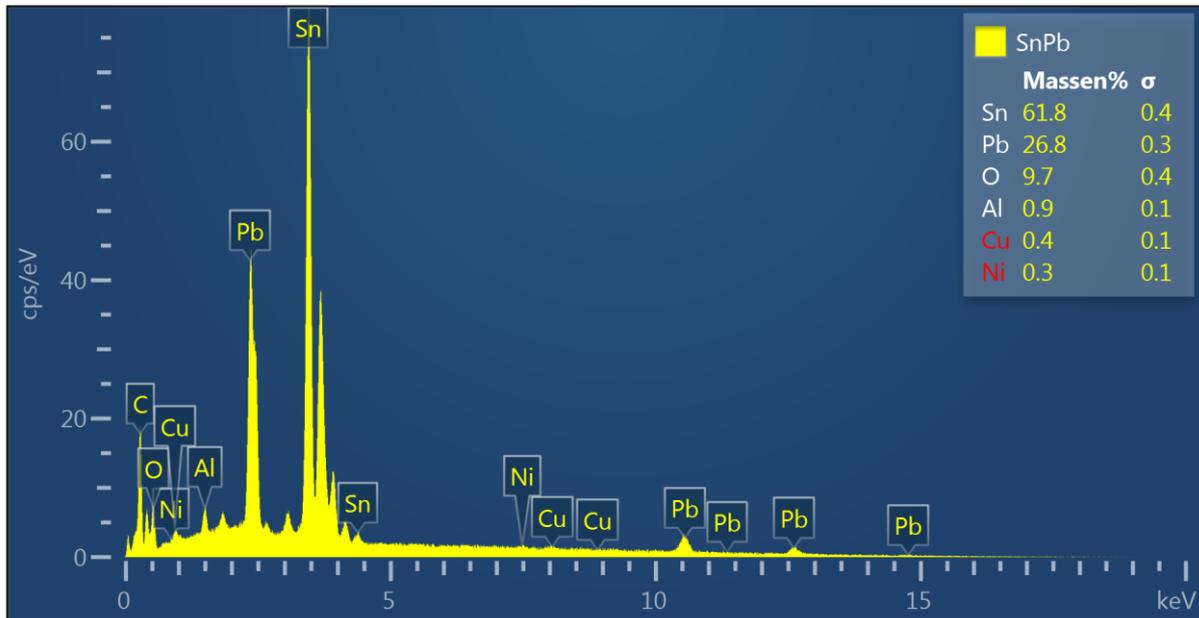


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	9.64	0.35
Al	0.89	0.05
Fe	0.24	0.08
Ni	0.36	0.10
Cu	0.58	0.12
Sn	56.48	0.34
Pb	31.82	0.30
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

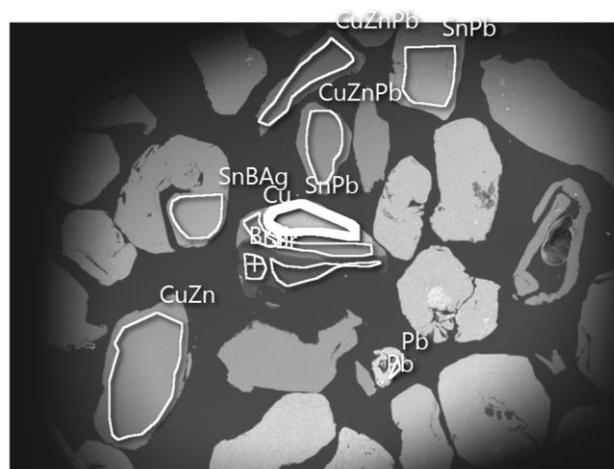


1/0,5 mm MP 1,2T

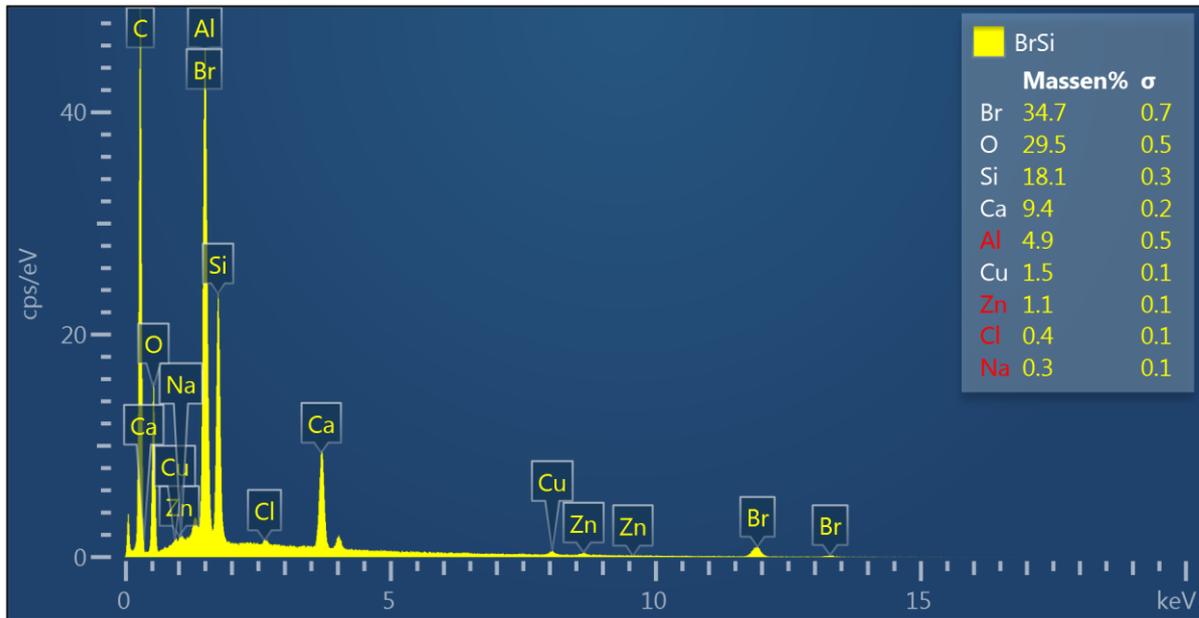


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	9.70	0.35
Al	0.92	0.05
Ni	0.30	0.10
Cu	0.41	0.12
Sn	61.84	0.35
Pb	26.82	0.28
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

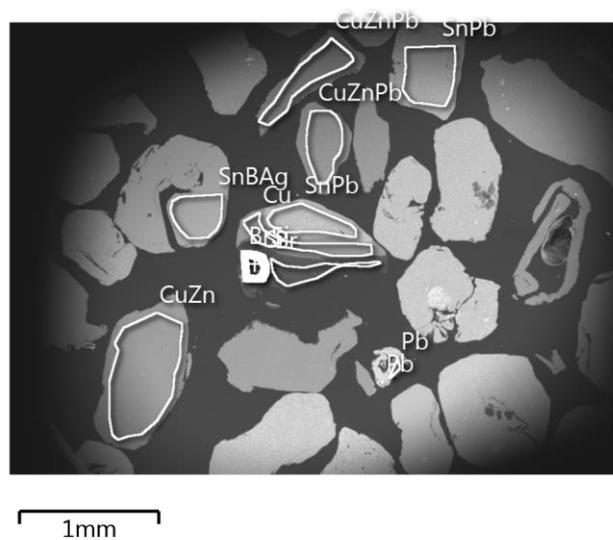


1/0,5 mm MP 1,2T

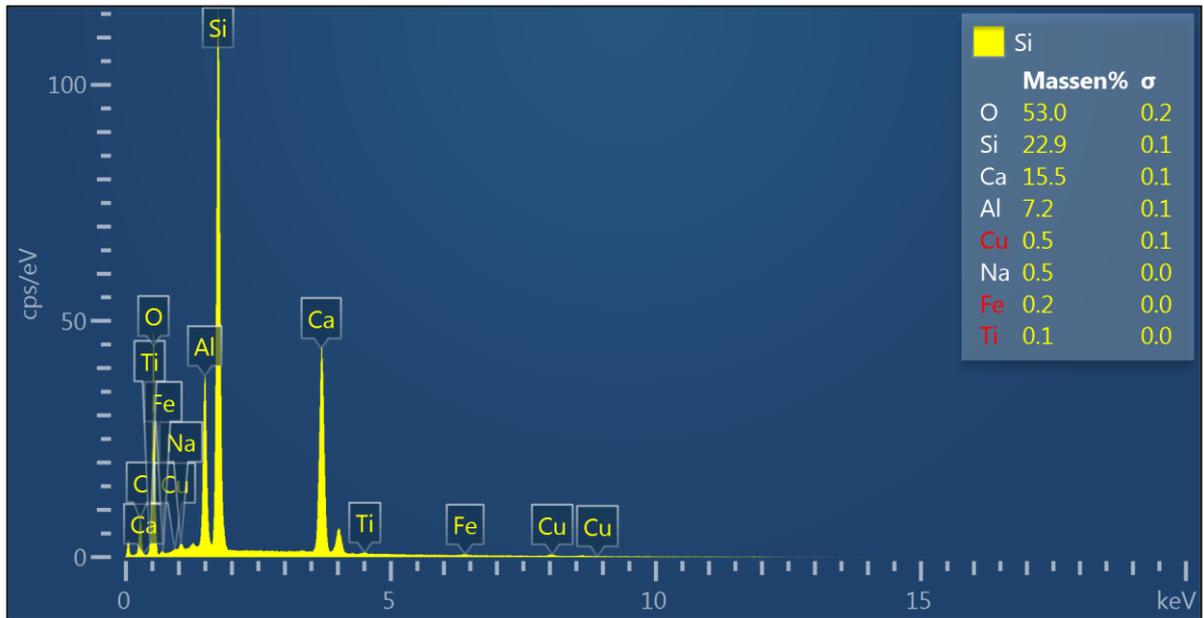


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	29.54	
Na	0.30	0.08
Al	4.91	0.51
Si	18.13	0.27
Cl	0.40	0.06
Ca	9.42	0.16
Cu	1.51	0.13
Zn	1.13	0.15
Br	34.67	0.74
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

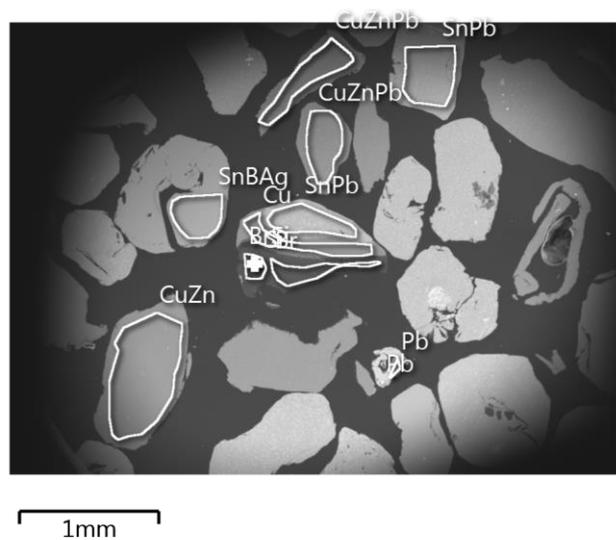


1/0,5 mm MP 1,2T

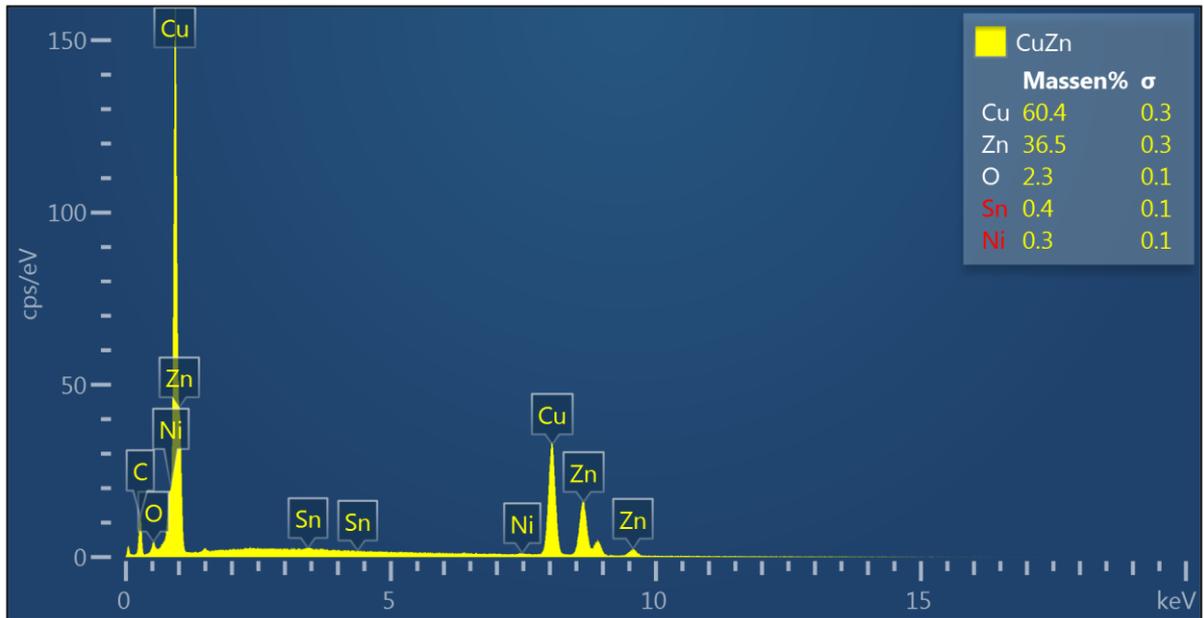


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	52.99	0.22
Na	0.48	0.04
Al	7.22	0.07
Si	22.91	0.13
Ca	15.53	0.10
Ti	0.15	0.03
Fe	0.18	0.04
Cu	0.54	0.07
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13

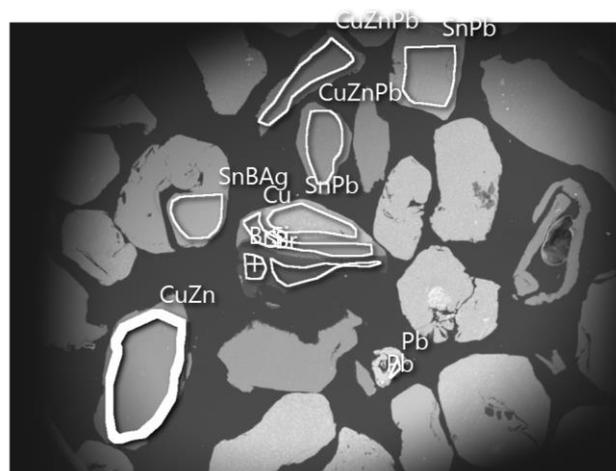


1/0,5 mm MP 1,2T



Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.35	0.15
Ni	0.30	0.08
Cu	60.37	0.29
Zn	36.54	0.28
Sn	0.44	0.11
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 13



13.3 1,0/0,5 mm SG

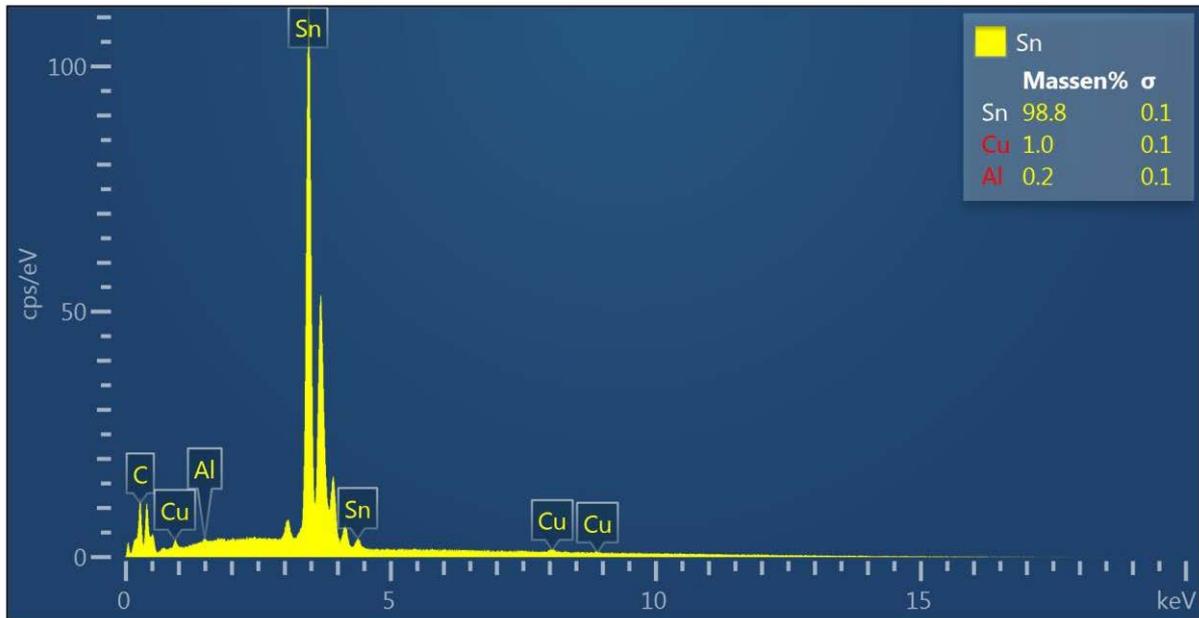
MMT
1/0,5 mm
3,07 g/cm³ SG



Einbettmittel: Härter Epoxide-Harz
Mischverhältnis: 1 : 4

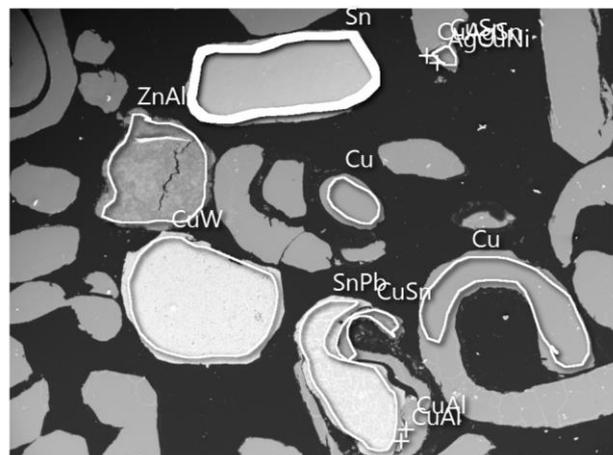
Abbildung 131: Schliffpräparat 1,0/0,5 SG

1/0,5 mm SG

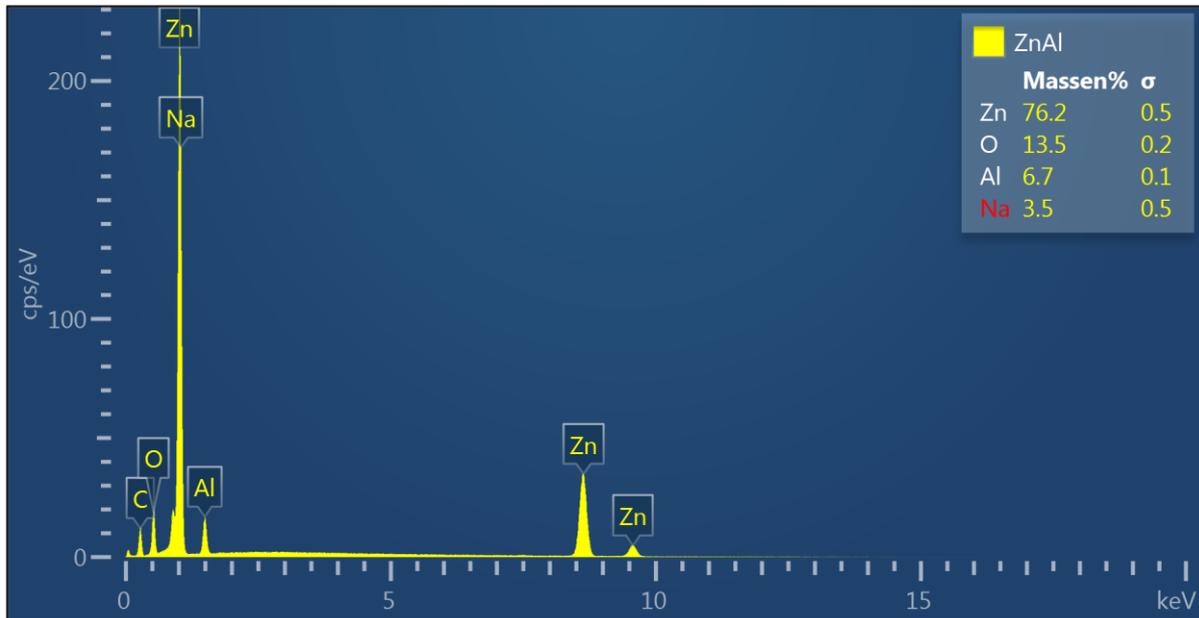


Element	Massen%	Massen% Sigma
Al	0.21	0.06
Cu	0.96	0.13
Sn	98.83	0.14
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5

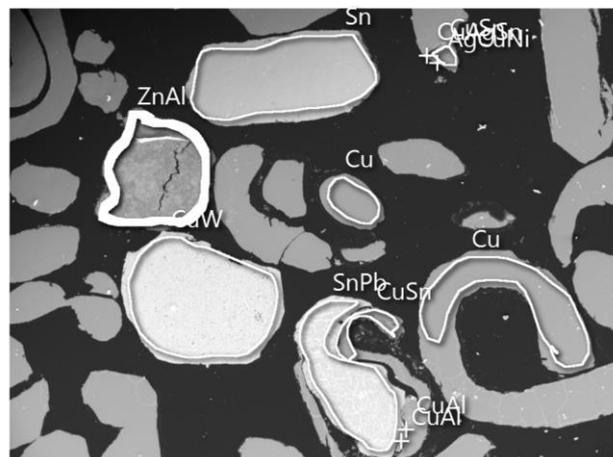


1/0,5 mm SG



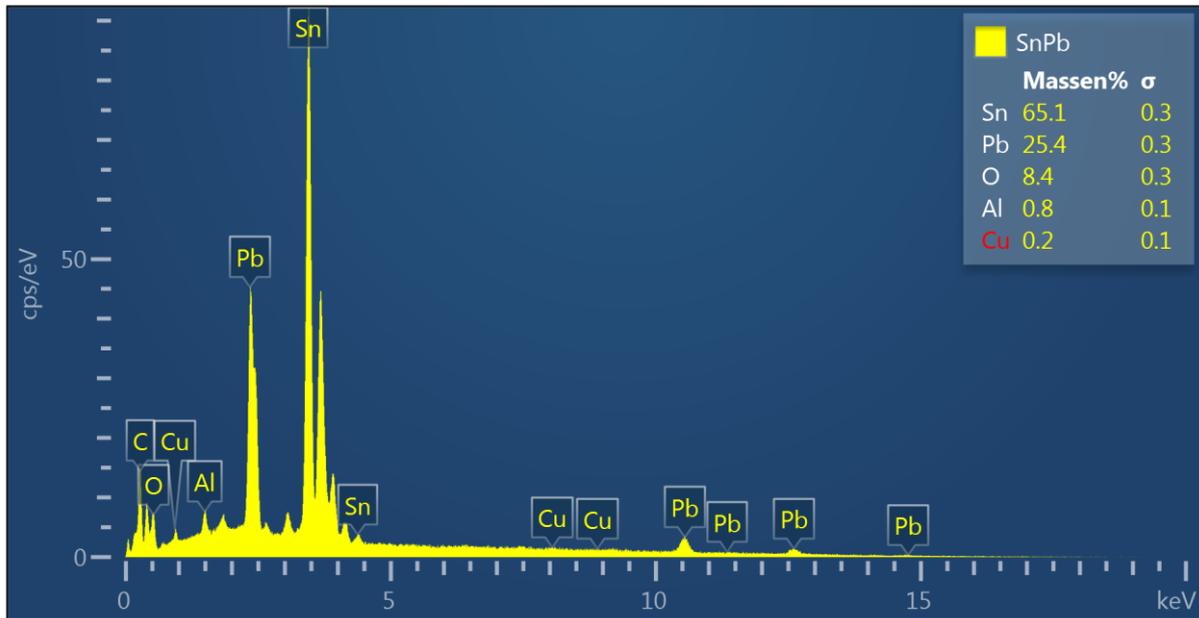
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	13.51	0.21
Na	3.53	0.51
Al	6.72	0.11
Zn	76.24	0.45
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



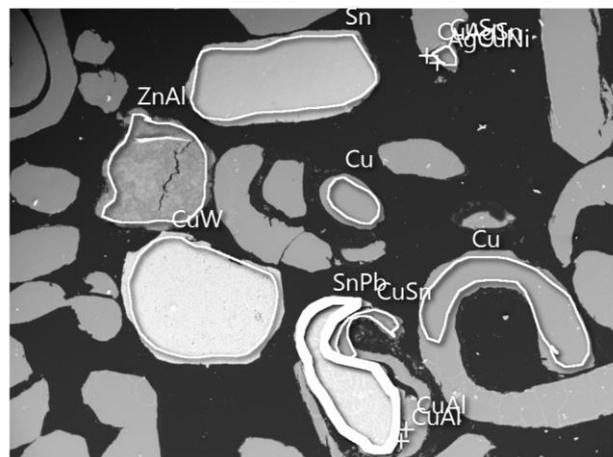
1mm

1/0,5 mm SG



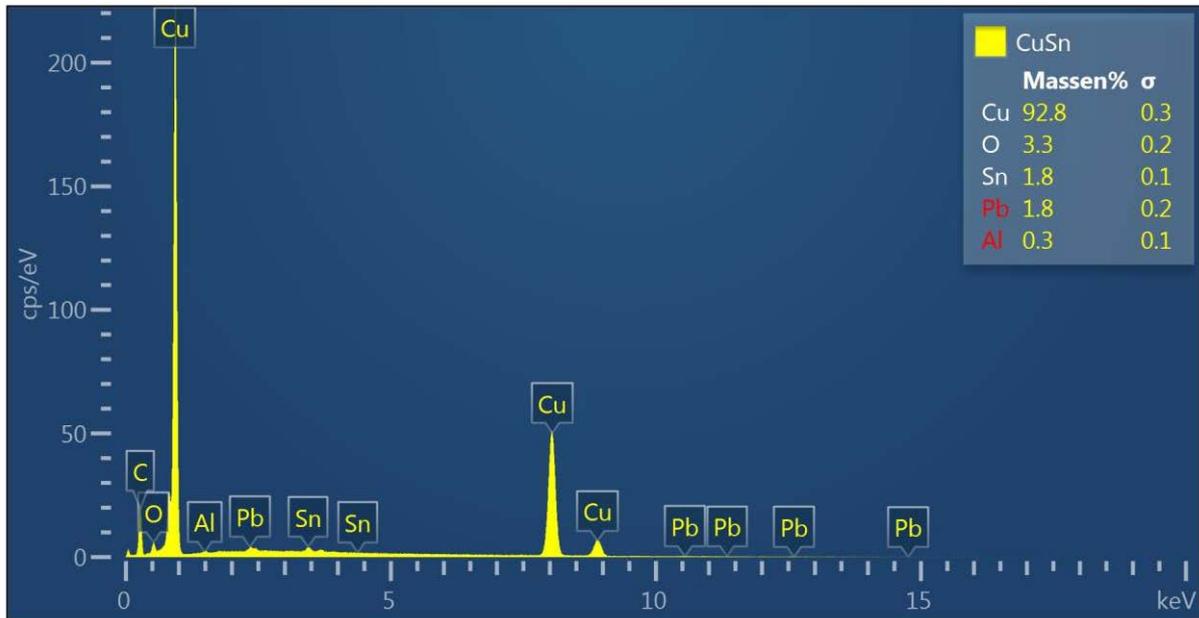
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	8.41	0.34
Al	0.84	0.05
Cu	0.23	0.11
Sn	65.07	0.34
Pb	25.44	0.27
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



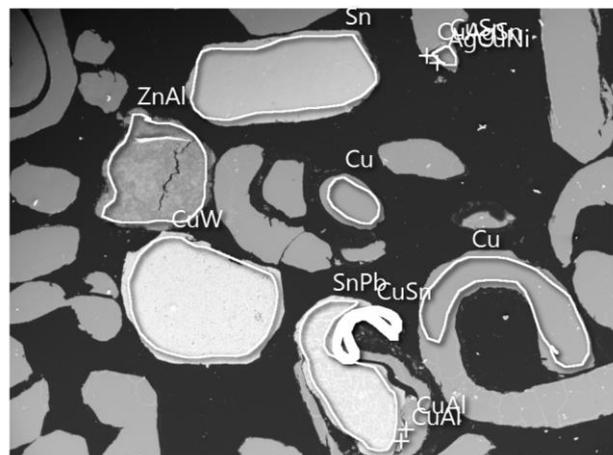
1mm

1/0,5 mm SG



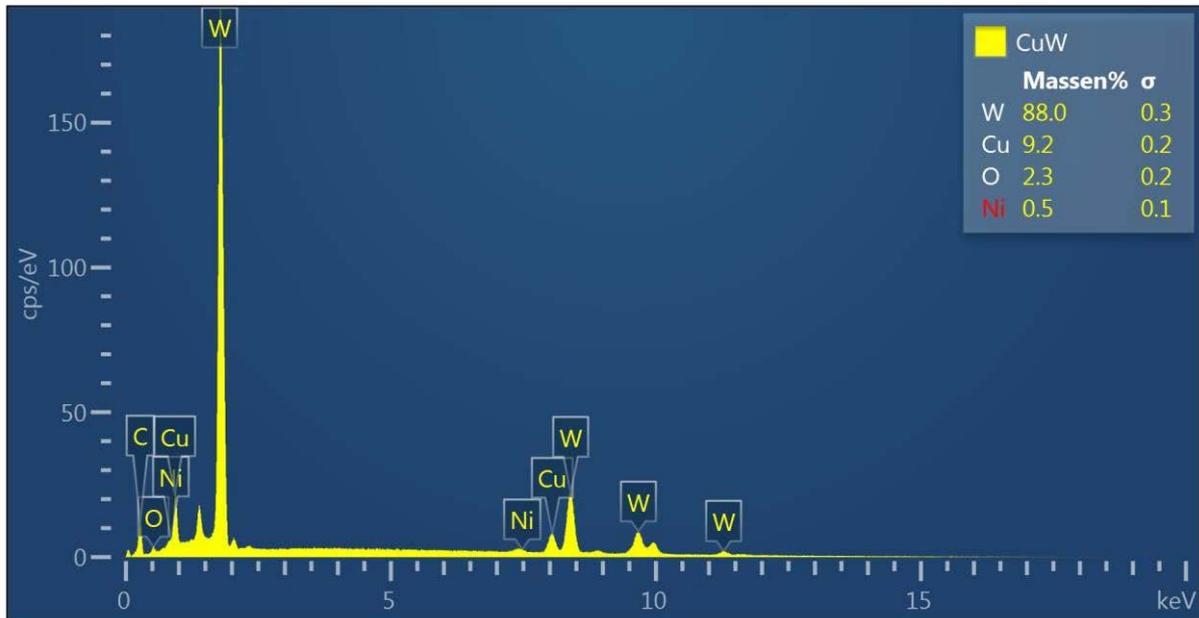
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	3.32	0.16
Al	0.32	0.07
Cu	92.79	0.29
Sn	1.79	0.12
Pb	1.77	0.22
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



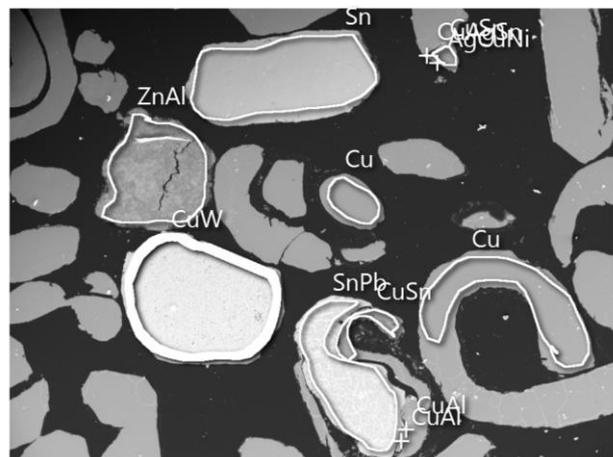
1mm

1/0,5 mm SG



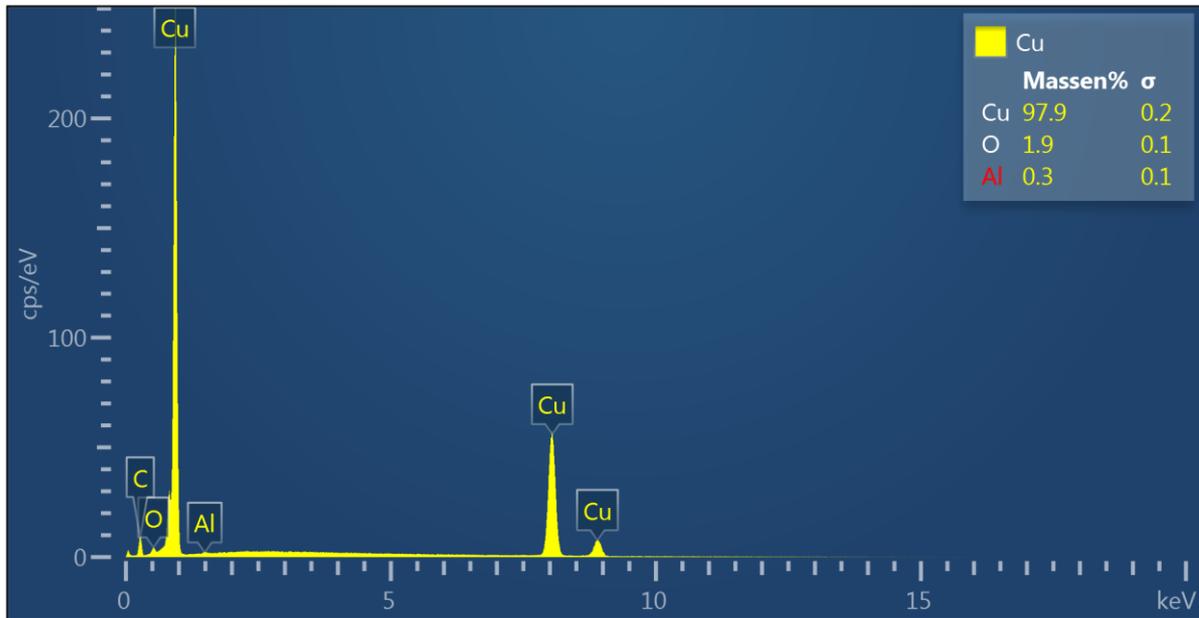
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.31	0.20
Ni	0.50	0.11
Cu	9.15	0.21
W	88.04	0.30
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



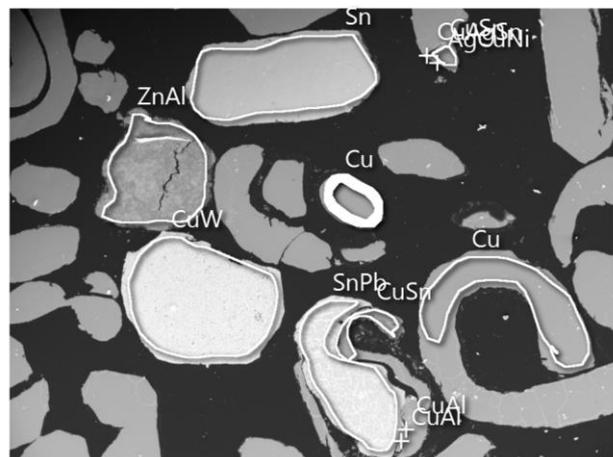
1mm

1/0,5 mm SG



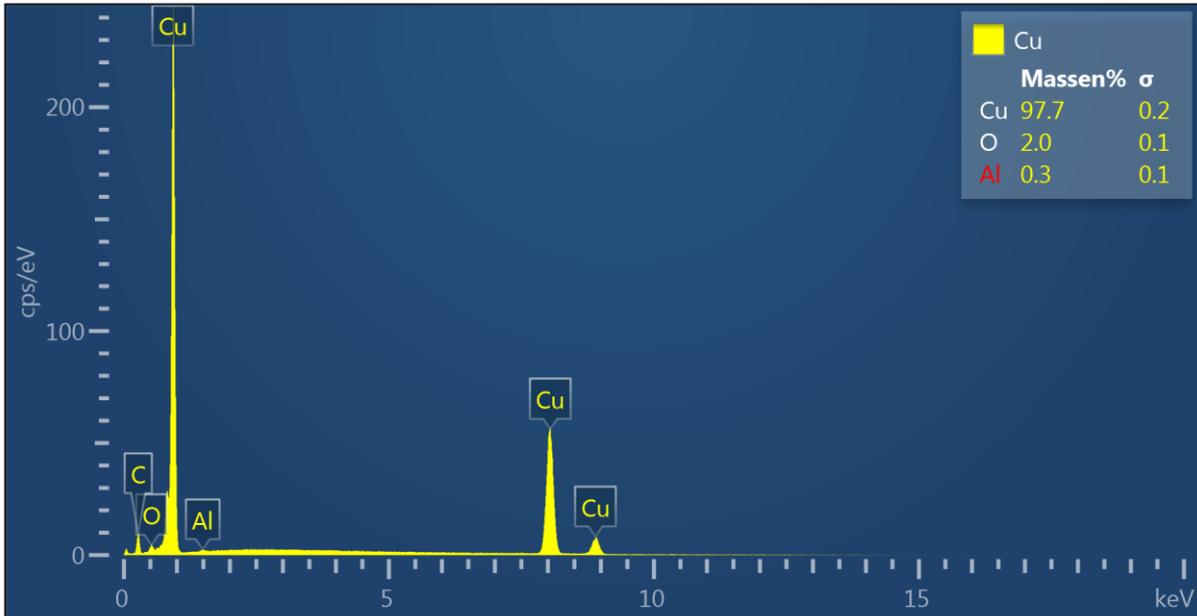
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	1.88	0.14
Al	0.26	0.07
Cu	97.85	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



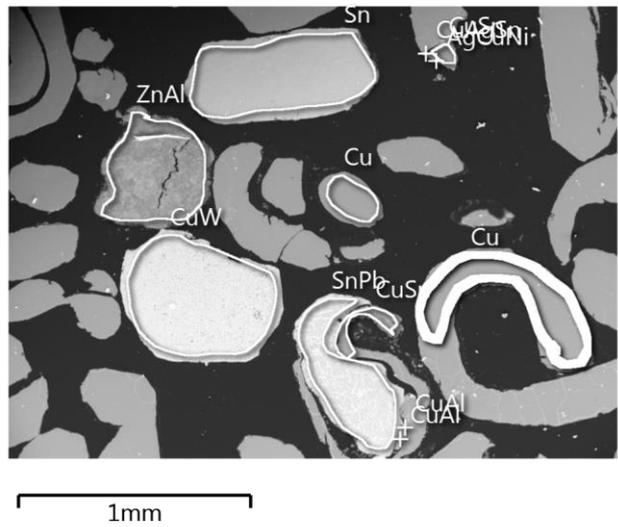
1mm

1/0,5 mm SG

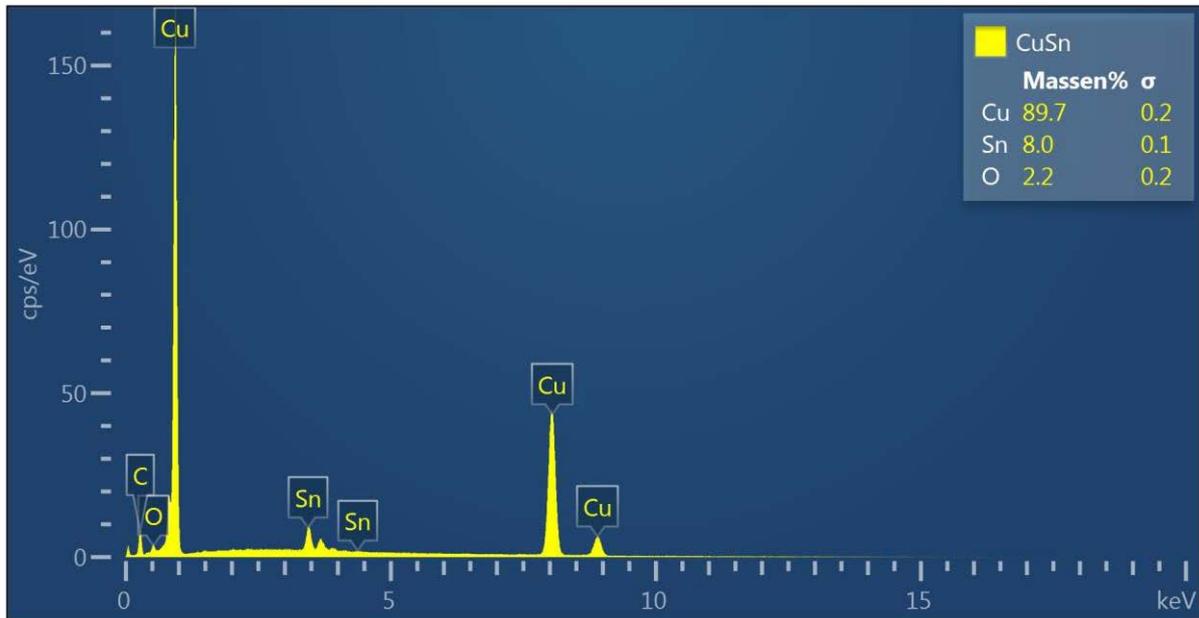


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.00	0.14
Al	0.30	0.07
Cu	97.70	0.15
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5

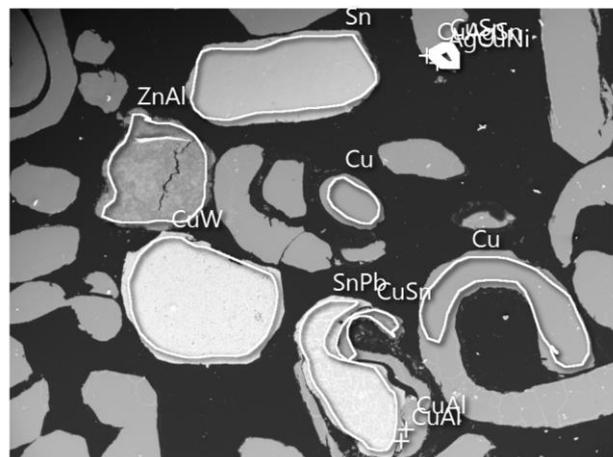


1/0,5 mm SG



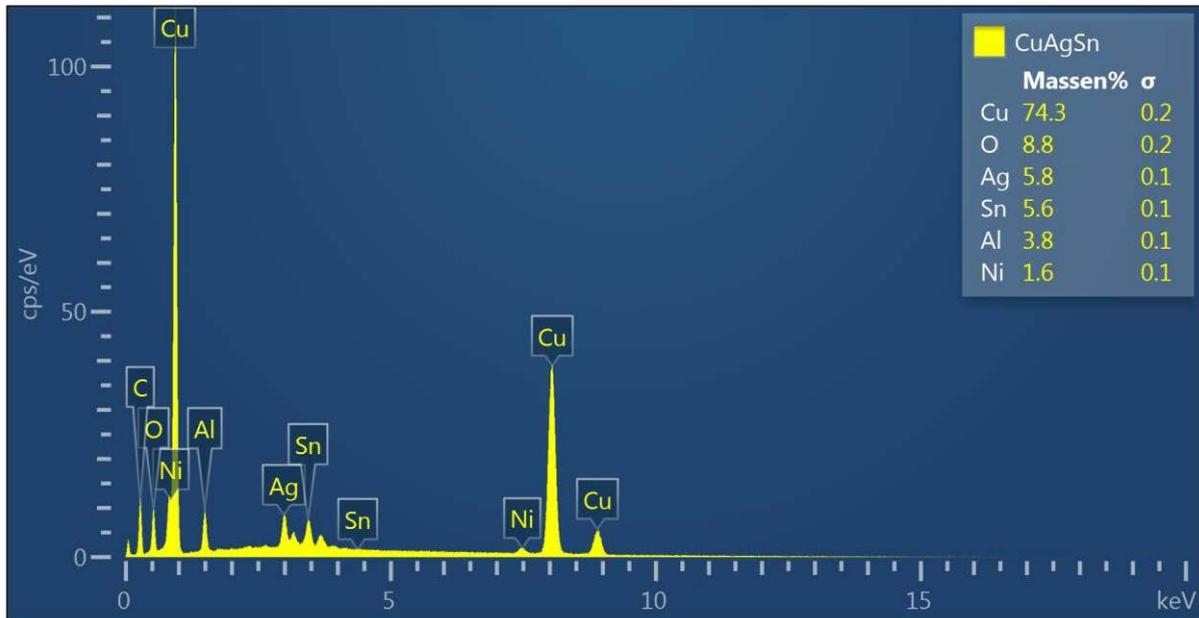
Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.23	0.16
Cu	89.73	0.20
Sn	8.03	0.14
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



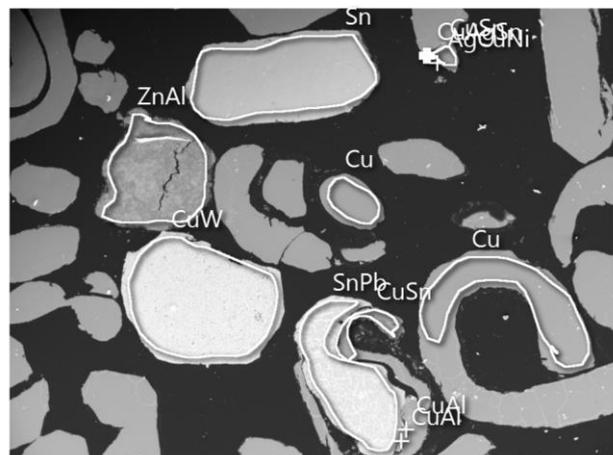
1mm

1/0,5 mm SG

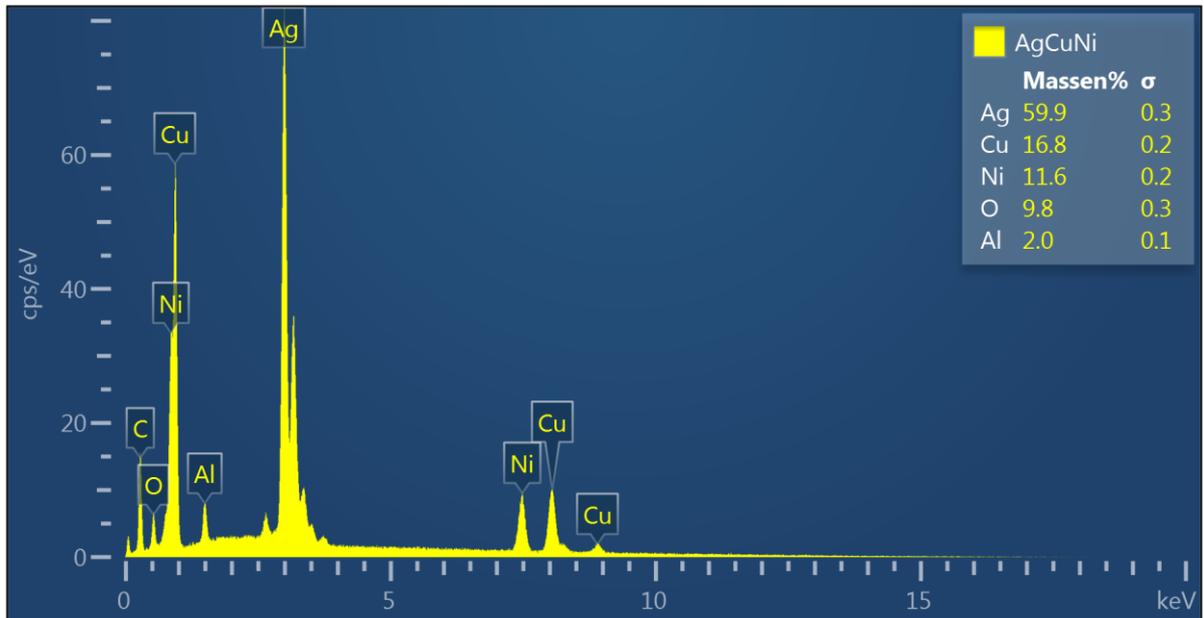


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	8.81	0.18
Al	3.80	0.08
Ni	1.62	0.10
Cu	74.29	0.25
Ag	5.83	0.14
Sn	5.64	0.13
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5

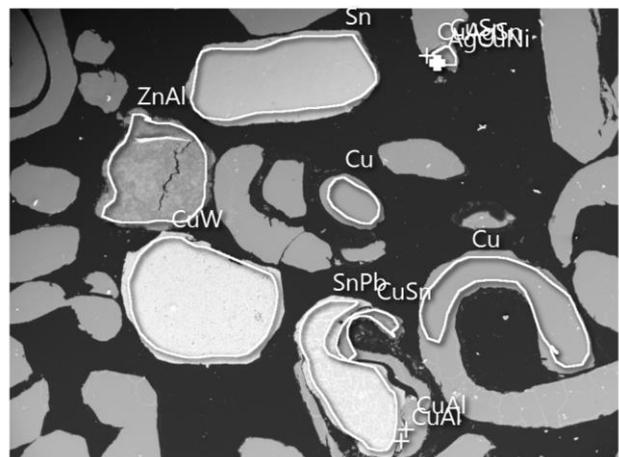


1/0,5 mm SG

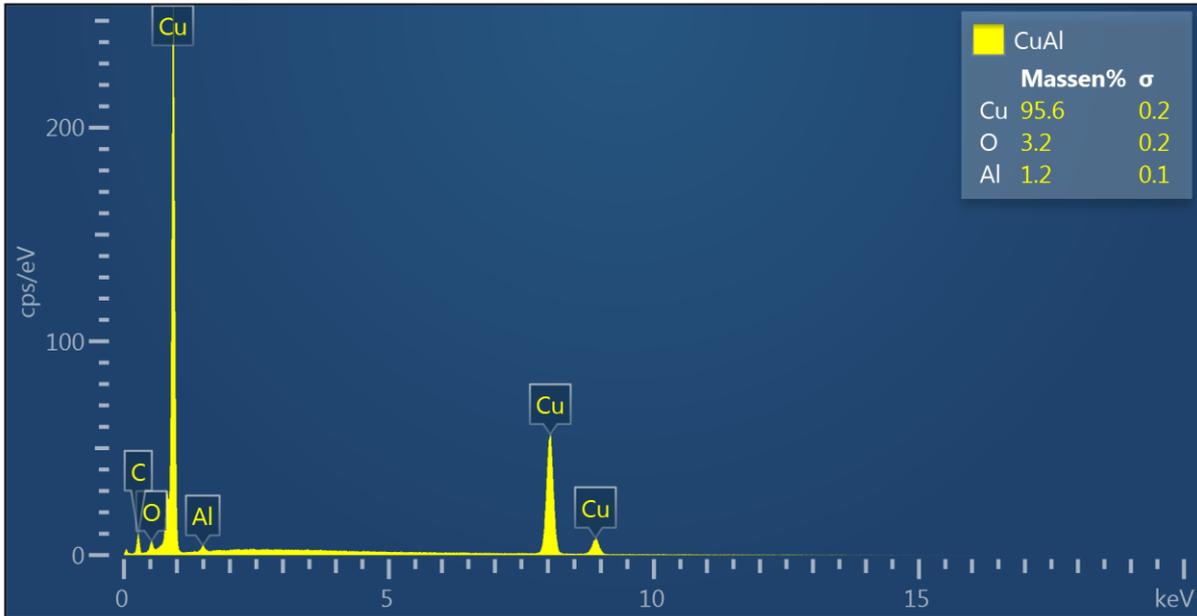


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	9.84	0.35
Al	1.96	0.07
Ni	11.58	0.18
Cu	16.76	0.22
Ag	59.86	0.33
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5

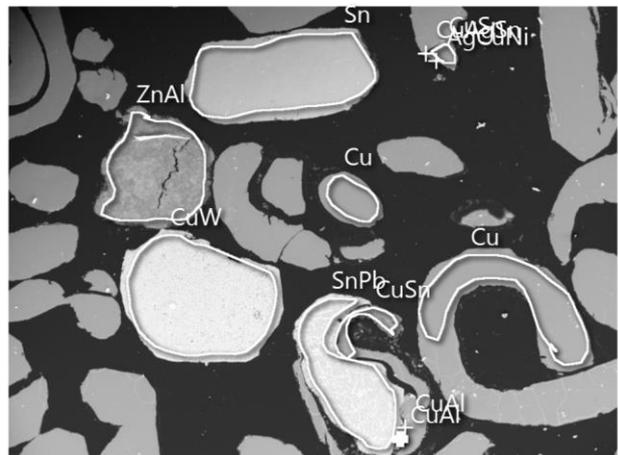


1/0,5 mm SG



Element	Massen%	Massen% Sigma
O	3.21	0.16
Al	1.22	0.08
Cu	95.57	0.18
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 5



1mm

13.4 2,0/1,6 mm LG

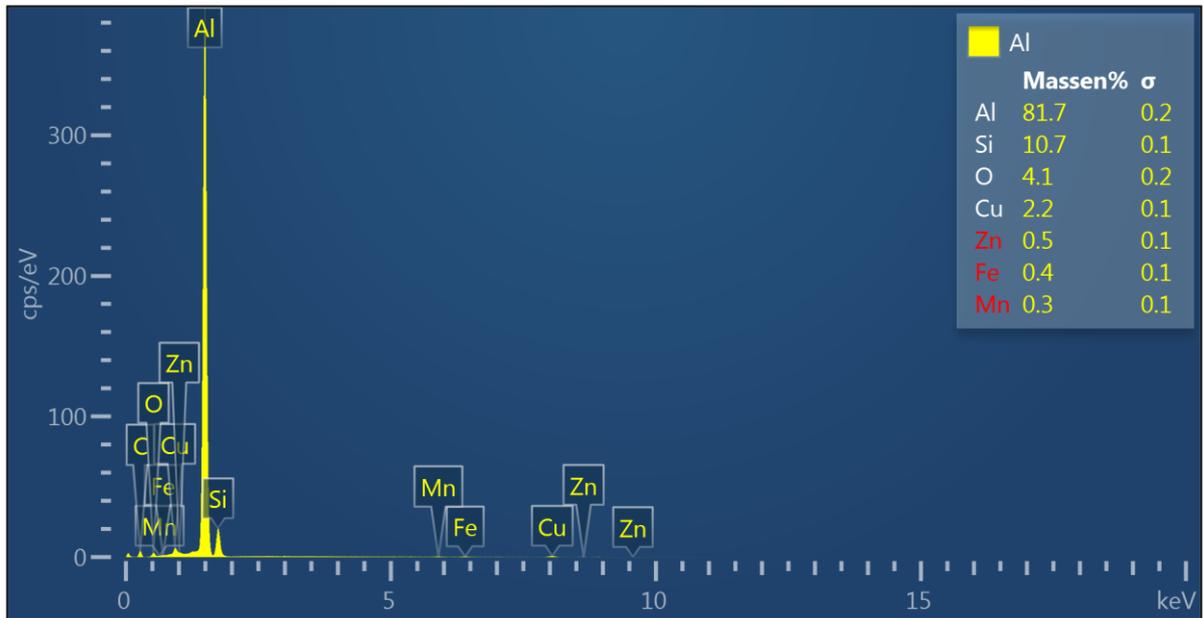
MMT
2/1,6 mm
3,07 g/cm³ LG



Einbettmittel: Härter Epoxide-Harz
Mischverhältnis: 1 : 4

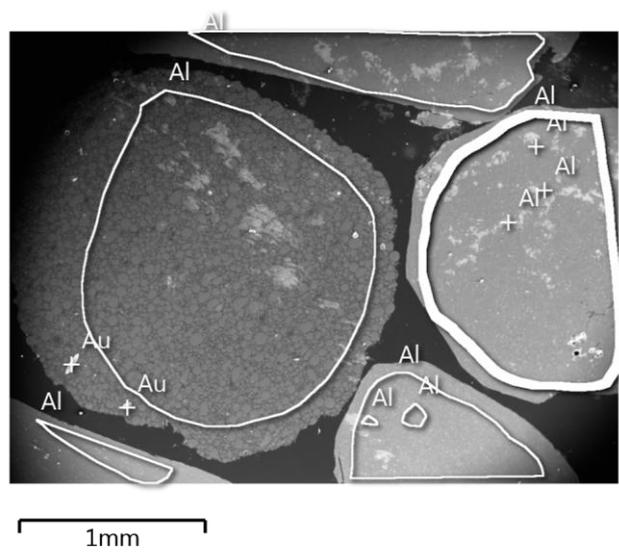
Abbildung 132: Schliffpräparat 2,0/1,6 LG

2/1,6 mm LG

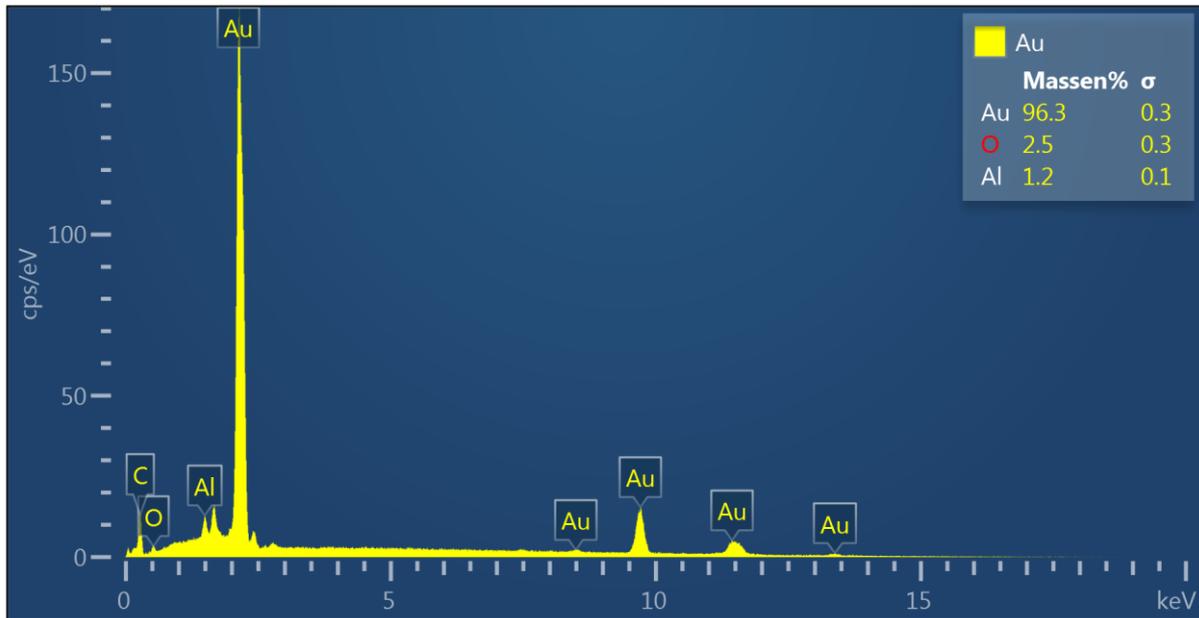


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	4.11	0.17
Al	81.71	0.22
Si	10.74	0.11
Mn	0.32	0.05
Fe	0.45	0.06
Cu	2.17	0.10
Zn	0.50	0.09
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 11

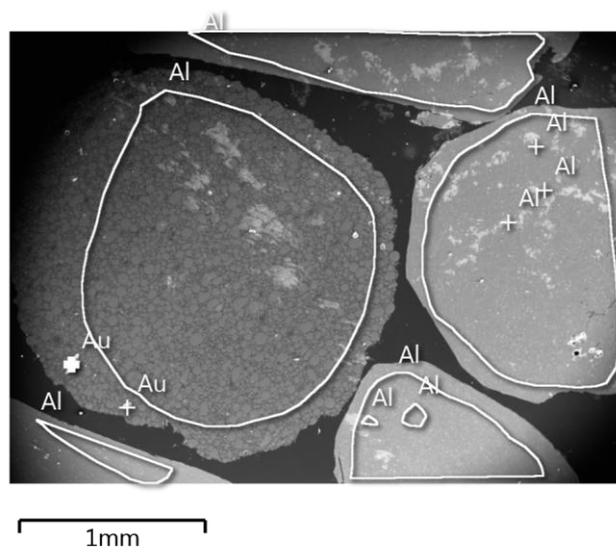


2/1,6 mm LG

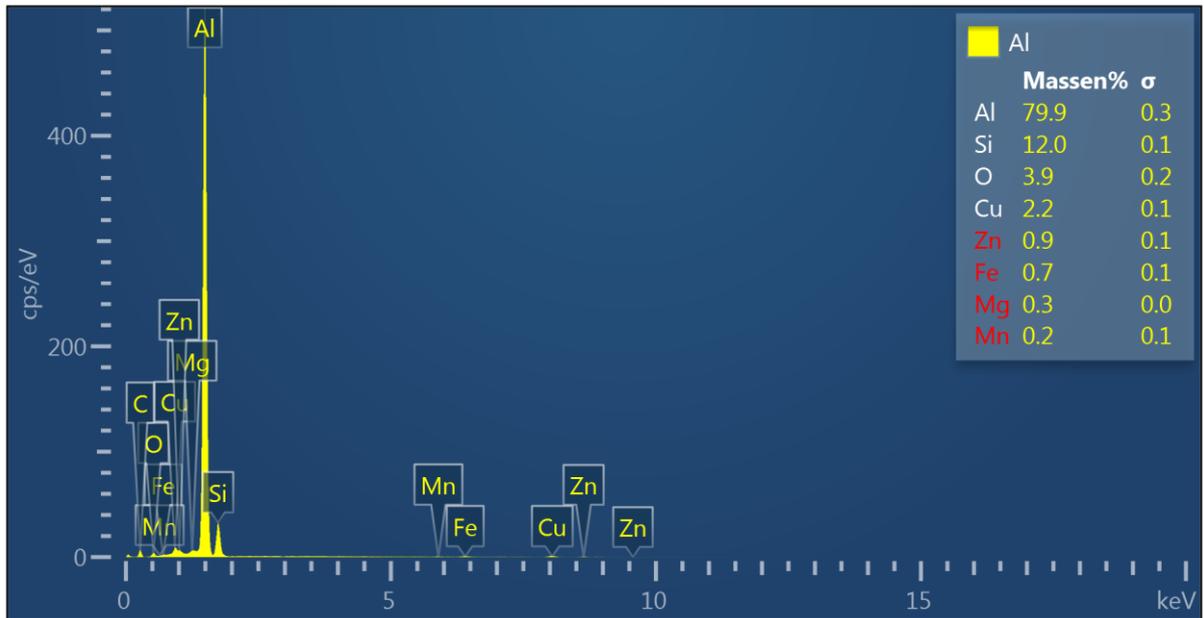


Element	Massen%	Massen% Sigma
O	2.54	0.26
Al	1.18	0.06
Au	96.28	0.26
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 11

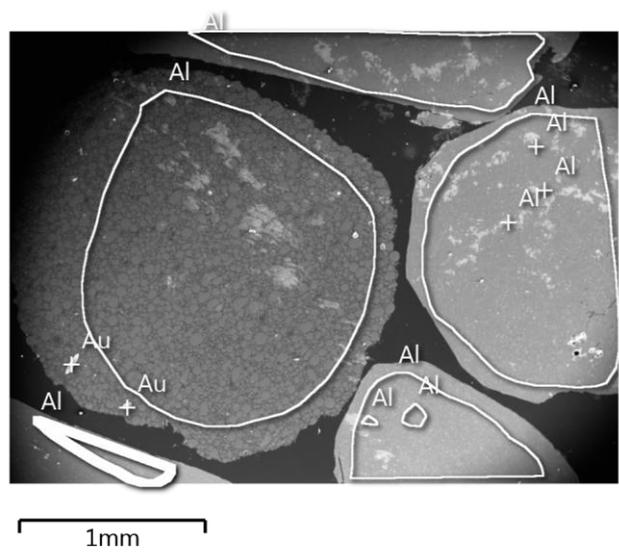


2/1,6 mm LG



Element	Massen%	Massen% Sigma
O	3.89	0.20
Mg	0.27	0.04
Al	79.88	0.27
Si	12.03	0.14
Mn	0.24	0.06
Fe	0.67	0.07
Cu	2.16	0.12
Zn	0.86	0.12
Gesamt:	100.00	

Elektronenbild 11



14 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Prozessschaubild der Montanwerke Brixlegg AG [1].....	8
Abbildung 2: Vergleichmäßigungshalde vor dem Schachtofen, Größenabschätzung durch das weiße DIN A4 Papiers in der linken Hälfte des Bildes	9
Abbildung 3: Ellingham Diagramm für Metalloxide [2]	11
Abbildung 4: Rohgut MMT bei Anlieferung.....	20
Abbildung 5: Rohgut LOACKER bei Anlieferung	20
Abbildung 6: Rohgut WURZER bei Anlieferung	20
Abbildung 7: Spannungs-Dehnungsdiagramm [9].....	22
Abbildung 8: Wirbelschneckenkühler der Messer Griesheim GmbH für eine kryogene Vorbehandlung [10]	24
Abbildung 9: Guillotineschere der Firma COPEX von vorne; Roter Kreis: Ober- und Untermesser sowie die dahinterliegende Zuführmulde Bild entstanden bei einer Anlagenbesichtigung	25
Abbildung 10: Verschiedene Vorverdichtereinrichtungen nach [7]	25
Abbildung 11: Metso Flügelbettschere schematisch [11]	26
Abbildung 12: Shredderbauarten, schematisch: (a) mit vertikal angeordnetem Rotor; (b) mit horizontal angeordnetem Rotor; (1) Rotor, (2) prismenförmiges Schlagelement, (3) ringförmiges Schlagelement, (4) Austragsvorrichtung, (5) Auswurfklappe, (6) Schrottzufuhr, (7) Amboss, (8) Schlagelemente (Hämmer); [12]	27
Abbildung 13: Shredderbauarten mit horizontal angeordnetem Rotor: (a) Shredder ohne Rost, (b) Shredder mit Austragsrost über dem Rotor, (c) Shredder mit Austragsrost unter dem Rotor, (d) Späneshredder, (e) Papiershredder [7].....	28
Abbildung 14: Shredder mit Austragsrost über dem Rotor [13]	29
Abbildung 15: Shredder mit Austragsrost über und unter dem Rotor [13]	29
Abbildung 16: Shredderbauart Kondirator [13]	29
Abbildung 17: Schematischer Aufbau verschiedener Schraubenreißer; (a, b) Rotorreißer für Sperrmüll und Gewerbeabfälle, (c) Rotorreißer für Aluminium- und PKW-Schrotte, (d) Schraubenreißer Bauart Bühler, Schweiz, (e) Schraubenreißer Bauart Herbold, Deutschland [7]	31

Abbildung 18: Verschieden ausgeführte Zerkleinerungselemente auf den Rotoren der Schraubenreißer von verschiedenen Herstellern; (a) Bauart Hölter, Gladbeck; (b) Bauart Bühler; (c) Bauart Zeno, Norken [15].....	31
Abbildung 19: Einteilung der Rotorscheren nach [8]	33
Abbildung 20: Bauarten von Rotorscheren [15]: (a) Rotorschere mit einem horizontal angeordneten Rotor, Bauart Alpine Augsburg, Deutschland; (b) Rotorschere mit zwei Rotoren, Bauart Hoger Maschinenbau; (c) Rotorschere mit zwei Rotoren, Bauart SID, Frankreich; (d) Rotorschere mit vier Rotoren und Siebrost, Bauart Untha, Deutschland [7]	34
Abbildung 21: Gestaltungsvarianten der Schneidscheiben bei Rotorscheren; (a) Bauart Hoger Maschinenbau GmbH, (b) Bauart MEWA, (c) Bauart Mercodor, (d) Bauart Untha [15]	35
Abbildung 22: Beispiele (schematisch) für Rotor-, Stator- und Messergestaltung bei langsamlaufenden einrotorigen Radialspaltscheren; (a, b, d, e) Flachrotoren; (c, f) Profilrotor; schraffiert: Rotor, schwarz: Statormesser; dunkelgrau: Schneidwerkzeug [15]	35
Abbildung 23: Querstromzerspaner [10].....	36
Abbildung 24: Einteilung der Siebe nach der Siebgutbewegung [6]	37
Abbildung 25: Vibrostangensizer mit ungefähren Angaben von Partikelgrößen über die verschiedenen Stangendecks[19].....	39
Abbildung 26: Einteilung von Wurfsieben nach der Art ihrer Schwingung [17].....	39
Abbildung 27: Auf Klemmkorn wirkende Kräfte, a) bei einem Linearschwinger, b) bei einem Kreisschwinger [18].....	40
Abbildung 28: Schematisches Bewegungsprinzip eines Spannwellensiebes[18].	41
Abbildung 29: Schematische Siebgutbewegung auf einem Spannwellensieb [20]	41
Abbildung 30: Bewegungsschema eines Taumelsiebes [17]	42
Abbildung 31: Bereich der Anfangsfallbeschleunigung und Endfallgeschwindigkeit aufgetragen über den Geschwindigkeitsgradienten und die Zeit [22].....	44
Abbildung 32: Zickzacksichter; (a) Einkanalsichter, (b) Trennprinzip, (c) Mehrkanalsichter, (A) Aufgabepunkt, (G) Grobgutaustrag, (F) Feingutaustrag, (L) Luftströmung [17]	46
Abbildung 33: Schematisches Funktionsprinzip eines Kegelsichters [17]	47
Abbildung 34: Prinzip eines Querstromsichtprozesses [10]	48
Abbildung 35: Funktion eines Querstromsichters nach [21]	48
Abbildung 36: Funktionsprinzip des LTH [23].....	49

Abbildung 37: Prinzip einer Pulssetzmaschine (Remer Setzmaschine) [25]	51
Abbildung 38: Schwertrübetrommelscheider mit Hubaustrag [20]	53
Abbildung 39: Wirkprinzip für die Trennung auf Magnetscheidern: (a) Ablenksortierung (Trommelmagnetscheider mit oberer Aufgabe), (b) Aushebesortierung (Trommelmagnetscheider mit unterer Aufgabe), (c) Rückhaltesortierung (Matrix- bzw. Hochgradientenmagnetscheider), (A) Aufgabegut, (M) Magnetprodukt; (UM) unmagnetisches Produkt [6]	54
Abbildung 40: Langsam laufender Trockentrommelscheider mit oberer Aufgabe; (1) feststehendes Magnetsystem, (2) Pole, (3) Aufgabevorrichtung, (4) rotierende Trommel, (5) Gehäuse mit verstellbarem Produktteller, (A) Aufgabepunkt, (M) Magnetprodukt; (UM) unmagnetisches Produkt [6]	56
Abbildung 41: Aushebemagnetscheider über dem Produktförderband [10]	57
Abbildung 42: Anordnung von Überbandmagnetscheidern, (a) Querbandanordnung, (b) Überkopfanordnung, (c) Vorkopfanordnung [6]	57
Abbildung 43: Arbeitsweise eines Wirbelstromscheiders mit konzentrischem Polrad; (1) Förderband, (2) rotierende Bandtrommel, (3) rotierendes Polrad, (L) leitendes Produkt, (NL) nichtleitendes Produkt, (Fe) ferromagnetisches Produkt [6]	58
Abbildung 44: Wirkende Kräfte auf ein leitendes Partikel im Einwirkungsbereich des Polrades eines Wirbelstromscheiders; (F_G) Schwerkraft, ($F_{rep,r}$ bzw. $F_{rep,t}$) radiale bzw. tangentielle Komponente der Abstoßungskraft, (T) Drehmoment; (F_R) Reibungskraft [6]	59
Abbildung 45: Wirbelstromscheider mit exzentrischem Polrad, (a) Wirkbereich des Wechselfeldes [6]	62
Abbildung 46: Bauarten von Wirbelstromscheidern verschiedener Hersteller, schematisch; (a) Eriez, Wagner, Goudsmit; (b) Gantry; (c) Steinert; (d) Älmhults-EI-Merk; (e) Exner-Werth/Steinert; (A) Aufgabepunkt, (L) leitendes Produkt, (NL) nicht leitendes Produkt, (Fe) ferromagnetisches Produkt [6]	62
Abbildung 47: Auflademechanismus durch (a) Kontaktpolarisation und (b) im Koronafeld; (L) Leiter, (NL) nicht Leiter [6]	65
Abbildung 48: Schematisches Funktionsprinzip eines elektrostatischen Walzenscheiders welcher mit Gut, welches durch Triboaufladung vorbehandelt wurde, beschickt wird [29]	66
Abbildung 49: Unterschiedliche Trennmodelle für die Sortierung auf Elektroscheidern: (a) Ablenksortierung auf einem elektrostatischen Walzenscheider, (b) Ablenksortierung in einem elektrostatischen Freifallscheider, (c) Ablenksortierung auf einem Koronawalzenscheider; (W) geerdete Walzenelektrode, (E) elektrostatische Gegenelektrode, (PI) Plattenelektrode, (K)	

Koronalelektrode, (A) Aufgabegut, (L) leitendes Produkt, (HL) halbleitendes Produkt, (NL) nicht leitendes Produkt [6].....	66
Abbildung 50: Wellenlängenbereich mit zugehöriger Sensortechnik und Anwendungsbeispiele für sensorgestützte Sortierer nach [32].....	70
Abbildung 51: (1) Vereinzelungsband, (2) Strahlungsquelle-Detektorsystem, (3) Hochleistungsrechner, (4) Ausblasvorrichtung [31].....	72
Abbildung 52: (1) Vereinzelungsrutsche, (2) Strahlungsquelle-Detektorsystem, (3) Hochleistungsrechner, (4) Ausblasvorrichtung [21].....	72
Abbildung 53: Prozessschaubild der Recyclinganlage METRAN [10].....	73
Abbildung 54: Grundverwachsungskurve MMT mit Summenkurven und Korngrößendurchgangsverteilung	78
Abbildung 55: Erklärung des Henry-Reinhard-Schaubildes	80
Abbildung 56: Merkmalsklassenanalyse schematisch, durchgeführt am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben	81
Abbildung 57: Versuchsaufbau des Zickzacksichters und Hochleistungszyklons schematisch	89
Abbildung 58: Praktische Umsetzung des Prozesses Zickzacksichter und Hochleistungszyklon am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung. (1) Roter Kreis: Seitenkanalverdichter; (2) Gelber Kreis: Hochleistungszyklon; (3) Grüner Kreis: Zickzacksichter; (4) Blauer Kreis: Aufgabeeinrichtung mit Vibrorinne; (5) Rosa Kreis: Punkt für Strömungsmessung im Leerrohr.	90
Abbildung 59: Seitenkanalverdichterdrehzahl aufgetragen auf die berechnete Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter.....	92
Abbildung 60: Partikelgrößenverteilung MMT.....	99
Abbildung 61: Verwachsungsverhältnisse in MMT von Kupfer über das Masseausbringen in den Kornklassen aufgetragen.....	100
Abbildung 62: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von MMT ..	102
Abbildung 63: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von MMT..	103
Abbildung 64: Verwachsungsverhältnisse in LOACKER von Kupfer über das Masseausbringen in den Kornklassen aufgetragen.....	104
Abbildung 65: Grundverwachsungskurve LOACKER.....	105
Abbildung 66: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von LOACKER	107
Abbildung 67: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von LOACKER	108

Abbildung 68: Partikelgrößenverteilung WURZER	109
Abbildung 69: Grundverwachsungskurve WURZER	110
Abbildung 70: Verwachsungsverhältnisse in den Magnetprodukten von WURZER	112
Abbildung 71: Verwachsungsverhältnisse in Schwer- und Leichtgut von WURZER	113
Abbildung 72: Mögliche Variation eines Aufbereitungsganges	116
Abbildung 73: Rohgut MMT bei Anlieferung am 22.06.2017, m=3878,79 g	120
Abbildung 74: MMT, Siebfraktion >2,0 mm	120
Abbildung 75: MMT, Siebfraktion 2,0/1,6 mm.....	121
Abbildung 76: MMT, Siebfraktion 1,6/1,0 mm.....	121
Abbildung 77: MMT, Siebfraktion 1,0/0,5 mm.....	122
Abbildung 78: MMT, Siebfraktion 0,5/0 mm	122
Abbildung 79: MMT, Magnetprodukt 0,12 T >2,0 mm	123
Abbildung 80: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 2,0/1,6 mm	123
Abbildung 81: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 1,6/1,0 mm	124
Abbildung 82: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 1,0/0,5 mm	124
Abbildung 83: MMT, Magnetprodukt 0,12 T, 0,5/0 mm	125
Abbildung 84: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, >2,0 mm	125
Abbildung 85: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 2,0/1,6 mm	126
Abbildung 86: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 1,6/1,0 mm	126
Abbildung 87: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 1,0/0,5 mm	127
Abbildung 88: MMT, Magnetprodukt 1,2 T, 0,5/0 mm	127
Abbildung 89: MMT, Schwergut, >2,0 mm	128
Abbildung 90: MMT, Schwergut, 2,0/1,6 mm.....	128
Abbildung 91: MMT, Schwergut, 1,6/1,0 mm.....	129
Abbildung 92: MMT, Schwergut, 1,0/0,5 mm.....	129
Abbildung 93: MMT, Schwergut, 0,5/0 mm.....	130
Abbildung 94: MMT, Leichtgut, >2,0 mm.....	130
Abbildung 95: MMT, Leichtgut, 2,0/1,6 mm	131
Abbildung 96: MMT, Leichtgut, 1,6/1,0 mm	131

Abbildung 97: Rohgut LOACKER bei Anlieferung am 22.06.2017, m=2348,69 g	132
Abbildung 98: LOACKER, Siebfraktion >2,0 mm	132
Abbildung 99: LOACKER, Siebfraktion 2,0/1,0 mm	133
Abbildung 100: LOACKER, Siebfraktion 1,0/0 mm	133
Abbildung 101: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, >2,0 mm	134
Abbildung 102: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, 2,0/1,0 mm	134
Abbildung 103: LOACKER, Magnetprodukt 0,12 T, 1,0/0 mm	135
Abbildung 104: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, >2,0 mm	135
Abbildung 105: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, 2,0/1,0 mm	136
Abbildung 106: LOACKER, Magnetprodukt 1,2 T, 1,0/0 mm	136
Abbildung 107: LOACKER, Schwergut, >2,0 mm	137
Abbildung 108: LOACKER, Schwergut, 2,0/1,0 mm	137
Abbildung 109: LOACKER, Schwergut, 1,0/0 mm	138
Abbildung 110: LOACKER, Leichtgut, >2,0 mm	138
Abbildung 111: LOACKER, Leichtgut, 2,0/1,0 mm	139
Abbildung 112: LOACKER, Leichtgut, 1,0/0 mm	139
Abbildung 113: Rohgut WURZER bei Anlieferung am 22.06.2017, m=2970,86 g	140
Abbildung 114: WURZER, Siebfraktion >0,5 mm	140
Abbildung 115: WURZER, Siebfraktion 0,5/0,315 mm	141
Abbildung 116: WURZER, Siebfraktion 0,315/0 mm	141
Abbildung 117: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, >0,5 mm	142
Abbildung 118: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, 0,5/0,315 mm	142
Abbildung 119: WURZER, Magnetprodukt 0,12 T, 0,315/0 mm	143
Abbildung 120: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, >0,5 mm	143
Abbildung 121: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, 0,5/0,315 mm	144
Abbildung 122: WURZER, Magnetprodukt 1,2 T, 0,315/0 mm	144
Abbildung 123: WURZER, Schwergut, >0,5 mm	145
Abbildung 124: WURZER, Schwergut, 0,5/0,315 mm	145
Abbildung 125: WURZER, Schwergut, 0,315/0 mm	146
Abbildung 126: WURZER, Leichtgut, >0,5 mm	146

Abbildung 127: WURZER, Leichtgut, 0,5/0,315 mm	147
Abbildung 128: WURZER, Leichtgut, 0,315/0 mm	147
Abbildung 129: Schliffpräparat 0,5/0 mm 0,12 T	160
Abbildung 130: Schliffpräparat 1,0/0,5 mm 1,2 T	178
Abbildung 131: Schliffpräparat 1,0/0,5 SG	186
Abbildung 132: Schliffpräparat 2,0/1,6 LG.....	199

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Angaben zu Grenzwerten über Störstoffe in den Hütteneinsatzstoffen für den Schachtofen laut Montanwerke Brixlegg AG	15
Tabelle 2: Übersicht der Resultate der Rohgutanalyse	17
Tabelle 3: Bruchverhalten von Sekundärrohstoffen und Abfällen [8].....	22
Tabelle 4: Einteilung der Zerkleinerungsapparate nach ihrer Beanspruchungsart [8]	23
Tabelle 5: Durchsätze an Stahlleichtschrott bis zum Erreichen der Betriebsgrenze der Bauteile eines Shredders, nach [14]	30
Tabelle 6: Einteilung der Windsichter nach Anströmrichtung und wirkendem Kraftfeld nach [22]	45
Tabelle 7: Einteilung von Stoffen nach der zur Trennung benötigten Flussdichte [12]	55
Tabelle 8: Angaben zu Stoffparametern für die Trennung auf einem Wirbelstromscheider, (γ) spezifische elektrische Leitfähigkeit, (ρ) Dichte, (γ/ρ) Stoffparameter von nichtmagnetischen Metallen und NE-Legierungen [16].....	60
Tabelle 9: Anwendungsmöglichkeiten für Wirbelstromscheider [12, 26]	61
Tabelle 10: Trennprinzipien von Wirbelstrom- und Elektroscheidern nach ihrem Trennmerkmal gegenübergestellt [30].....	64
Tabelle 11: Aufzählung der Trennmerkmale und der zugehörigen Sensorsysteme für eine automatisierte sensorgestützte Sortierung [31]	69
Tabelle 12: Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter	91
Tabelle 13: Ausgetragene Korngröße in Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit im Zickzacksichter.....	93
Tabelle 14: Angaben zu Grenzwerten über Störstoffe in den Hütteneinsatzstoffen laut Montanwerke Brixlegg AG	95
Tabelle 15: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes MMT in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut.....	97
Tabelle 16: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes LOACKER in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut.....	97
Tabelle 17: Resultate aus der chemischen Analyse des Gutes WURZER in Partikelgrößenklassen, (SG) Schwergut, (LG) Leichtgut.....	98

Tabelle 18: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse MMT, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung.....	101
Tabelle 19: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse LOACKER, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung.....	105
Tabelle 20: Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse WURZER, (0,12 T) Magnetprodukt der Schwachfeldscheidung, (1,2 T) Magnetprodukt der Starkfeldscheidung.....	110
Tabelle 21: Siebanalyse MMT	148
Tabelle 22: Magnetscheidung MMT	149
Tabelle 23: Dichtesortierung MMT	150
Tabelle 24: Gesamtbilanz für das Rohgut MMT	151
Tabelle 25: Siebanalyse LOACKER	152
Tabelle 26: Magnetscheidung LOACKER	153
Tabelle 27: Dichtesortierung LOACKER	154
Tabelle 28: Gesamtbilanz für das Rohgut LOACKER	155
Tabelle 29: Siebanalyse WURZER	156
Tabelle 30: Magnetscheidung WURZER.....	157
Tabelle 31: Dichtesortierung WURZER.....	158
Tabelle 32: Gesamtbilanz für das Rohgut WURZER.....	159

16 Literaturverzeichnis

- [1] BRIXLEGG, Montanwerke: *Beschreibung der technischen Anlage der Montanwerke Brixlegg AG*. Technische Beschreibung. Brixlegg, 2011. – Technische Beschreibung
- [2] PAWLEK, Franz: *Metallhüttenkunde*. Berlin, New York : Walter de Gruyter & Co., 1983
- [3] WRIENZ, Martin Hartwig: *Probleme in der Pyrometallurgie durch Störstoffe*. Interview mit Christian Hoy. Brixlegg, 04.04.2017
- [4] WRIENZ, Martin Hartwig: *Einkaufsstrategie und Probleme in den Montanwerken Brixlegg*. Interview mit Marc Filip. Brixlegg, 04.04.2017
- [5] FLACHBERGER, Helmut ; BÖHM, Andreas: Aufbereitungstechnische Untersuchung als wesentliche Grundlage für die Verfahrensgestaltung in Aufbereitungsanlagen, Bd. 159. In: *Berg- und Hüttenmännisches Monatsheft*, S. 235–245
- [6] SCHUBERT, Heinrich (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Schüttgut. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003 (1)
- [7] NICKEL, Werner: *Recycling Handbuch : Strategien - Technologien - Produkte*. 1. Aufl. NICKEL, Werner (Hrsg.). Düsseldorf : VDI Verlag, 1996
- [8] WOLDT, Dirk: *Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißern*. Freiberg, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik. Dissertation. 2004
- [9] BERGMANN, Wolfgang: *Werkstofftechnik 1 : Struktureller Aufbau von Werkstoffen - Metallische Werkstoffe - Polymerwerkstoffe - Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe*. Grundlagen und Anwendung. 6. aktualisierte Auflage. München : Carl Hanser Verlag München, 2008
- [10] MARTENS, Hans: *Recyclingtechnik : Fachbuch für Lehre und Praxis*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- [11] METSO: *N-Serie Flügelbettschere/-presse/-logger (NCS) : Robust, zuverlässig, effizient und einfache Installation*. URL <http://www.metso.com/contentassets/77bb8538cb0c45bda85364530947c662/ncs-german.pdf> – Überprüfungsdatum 2017-05-02
- [12] SCHUBERT, Gert: *Aufbereitung metallischer Sekundärrohstoffe : Aufkommen - Charakterisierung - Zerkleinerung*. 1. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1983

- [13] METSO: *ZZ, ZS und ZK Metall Shredder*. Lindeman. URL <https://www.yumpu.com/de/document/view/21163902/zz-zs-und-zk-metall-shredder-metso-materials-technology/7> – Überprüfungsdatum 2017-05-02
- [14] SCHUBERT, Gert: Aufbereitung der NE-Metallschrotte und NE-metallhaltiger Abfälle, Bd. 32. In: *Aufbereitungstechnik 1991*, 78-89, 352-358
- [15] JÄCKEL, Hans-Georg ; SCHUBERT, Gert: *Zerkleinerung von Abfällen mittels Rotorscheren, Rotorreißern und Schraubenreißern*. Weinheim, 25.10.1996 (Chemie Ingenieur Technik)
- [16] ANDRITZ MEWA GMBH: *Universal Cross-flow shredder QZ : Gently opening up of material composites*. URL <http://www.andritz.com/de/index/products-and-services/pf-detail.htm?productid=35085> – Überprüfungsdatum 2017-05-03
- [17] STIEß, Matthias: *Mechanische Verfahrenstechnik 1*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995
- [18] SCHUBERT, Heinrich (Hrsg.): *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe : Band I. Körnerkollektive, Aufbereitungs- und Trennerfolg, Zerkleinerung, Klassierung*. 4. Aufl. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1988 (1)
- [19] MORGENSEN ALLGAIER-GROUP: *Vibro-Stangensizer*. URL <http://www.mogensen.de/de/siebtechnik-vibro-stangensizer.htm> – Überprüfungsdatum 2017-05-04
- [20] BUNGE, Rainer: *Mechanische Aufbereitung : Primär- und Sekundärrohstoffe*. Schweiz : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012
- [21] BÖHM, Andreas: *Aufbereitung von Erstazbrennstoffen : Windsichtung*. Leoben, 2016
- [22] BÖHM, Andreas: *Grundzüge der Aufbereitung*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung. Vorlesungsunterlagen. 2016
- [23] IFE AUFBEREITUNGSTECHNIK GMBH: *Lufttrennherd*. Waidhofen a. d. Ybbs, 2008-2014
- [24] SCHUBERT, Heinrich (Hrsg.): *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe : Band II. Sortierprozesse*. 4. Aufl. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996 (2)
- [25] POLLMANN, J.: *Setzmaschinen in der Rohstoff- und Recyclingindustrie*. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 153 (2008), Nr. 6, S. 225–229

- [26] SCHUBERT, Heinrich: Wirbelstromsortierung - Grundlagen, Scheider, Anwendungen : Eddy-current Separation - Fundamentals, Separators, Application, Bd. 35. In: *Aufbereitungstechnik 1994*, 553-562
- [27] SCHUBERT, Gert ; WARLITZ, G.: Sortierung von Metall-Nichtmetall-Gemischen mittels Koronawalzenscheider, Bd. 35. In: *Aufbereitungstechnik 1994*, S. 449–456
- [28] TIPLER, Paul A. ; MOSCA, Gene: *Physik : Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 2. Aufl. : Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, 2006
- [29] HITACHI ZOSEN CORPORATION: *ES-30F*. URL http://nett21.gec.jp/jsim_data/waste/waste_2/html/doc_374.html – Überprüfungsdatum 2017-05-26
- [30] HAMOS ADVANCED SEPARATION TECHNOLOGIES: *Elektrostatische Metall/Kunststoff Separatoren hamos KWS*. URL <http://www.hamos.com/produkte/elektrostatische-separatoren,35,de,48> – Überprüfungsdatum 2017-05-26
- [31] WORTRUBA, Hermann: Stand der Technik der sensorgestützten Sortierung, 153 (2008). In: *Berg- und Hüttenmännisches Monatsheft*, S. 221–224
- [32] HARBECK, Hartmut ; KROOG, Harald: Neue Entwicklungen in der sensorgestützten Sortierung, Bd. 49. In: *Aufbereitungs Technik*, S. 4–11
- [33] FOFANOV, Denis ; HEUBNER, Ulrich; RISCH, Désirée (Mitarb.): *Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle*. Merkblatt 827. 1. Aufl. 2013. – Merkblatt 827
- [34] BRUNNMAIR, Erwin: *Entwicklung und Modellierung eines neuen Hochleistungszyklons zur Trennung von FEststoff/Gas-Gemischen*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung. Dissertation. 2010-05-07
- [35] PREM, Dominic: *Elektrostatisch unterstütztes Zyklonieren von Mineralproben*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung. Bakkalaureatsarbeit. 2017
- [36] BÖHM, Andreas: *Sampling and homogenisation*. Leoben
- [37] SCHUBERT, Heinrich (Hrsg.): *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe : Band III. Löse- und Laugeverfahrensstufen; Flüssigkeitsabtrennung; Agglomeration; Mischen und Vergleichmäßigen; Entstauben; Lagern; Fördern; Probenahme*. 2. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984 (3)