

# Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur der Studienrichtung  
„Industrieller Umweltschutz, Entsorgungstechnik und Recycling“ an der  
Montanuniversität Leoben.

## Methode zur Trennung von Flusen aus Shredder-Sandfraktion

erstellt am

**Institut für Aufbereitung und Veredlung**

**Vorgelegt von:**

Vladica Cakic  
0035217

**Betreuer:**

Univ.Ass. Prof. DI. Dr. mont. Andreas Böhm  
Hon. Univ. Prof. DI. Dr. mont. Hans Kolb

Leoben, Juni 2014

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **AFFIDAVIT**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

## **DANKSAGUNG**

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie für die Unterstützung während meines Studiums.

Ich möchte mich auch bei Herrn Univ. Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Böhm für die umfassende Unterstützung, zahlreiche Ratschläge und entscheidende Lösungsvorschläge bei der Erstellung dieser Masterarbeit bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Hon. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Hans Kolb, der bei dieser wissenschaftliche Arbeit zahlreichen Ratschläge einbrachte.

Im Rahmen dieser Masterarbeit war vor allem die Mitarbeit des Labors des Instituts für Aufbereitung und Veredelung sehr wichtig und große Hilfe, wofür ich mich bei allen Labormitarbeitern ausdrücklich bedanke.

## **Kurzfassung**

### **Methode zur Trennung von Flusen aus Shredder-Sandfraktion**

Für die Aufbereitung der Shredder-Leichtfraktion wurden verschiedene Verfahren (z.B. das VW-SiCon-Verfahren, Verfahren der TBS-Technische Behandlungssysteme GmbH, das Scholz-Verfahren) entwickelt. Das Ziel liegt dabei in der Trennung und Rückgewinnung von Wertstoffen, um zu deponierende Abfallmengen zu verringern bzw. gesetzlich vorgeschriebene Verwertungsquoten zu erfüllen. Gleichzeitig muss die Wirtschaftlichkeit für den Anlagenbetreiber sichergestellt sein.

Bei der Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion fällt u.a. die sog. Shredder-Sandfraktion als Schadstoffslenke an, deren Wertstoffpotential (Metallanteile) noch nicht genutzt wird. Die größte Herausforderung in der physikalischen Aufbereitung dieses Stoffstromes stellt neben der stark schwankenden Zusammensetzung der Anteil an Flusen dar. Die teils stark schadstoffbelasteten Textil- und Kunststofffasern neigen zusammen mit den übrigen Bestandteilen wie Metalldrähten, Kunststoffen oder Glas zu Agglomeratbildung, was die konventionellen Methoden der Sortierung an ihre technischen Grenzen bringt.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Probe „Shreddersand“ hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung und aufbereitungstechnischen Merkmale im Wege über eine aufbereitungstechnische Merkmalsklassenanalyse charakterisiert. Unterschiedliche Möglichkeiten der Flusenabtrennung durch physikalische und thermische Verfahren werden im Labormaßstab geprüft.

Die technischen Grenzen der Wirkung der Feinkorndichtesortierung auf Wendelscheidern für diesen Rohgutttyp werden im Pilotmaßstab erarbeitet. Eine Verfahrenskombination aus trockener Flusenabtrennung und nasser Metallanreicherung wird getestet und der Aufbereitungserfolg auf Basis von Metallbilanzen hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes der Produkte diskutiert.

## **Abstract**

### **Method for the separation of lint from shredder-sand fraction**

The goal of processing shredder light fraction on the one hand is to reduce the amount of waste to be landfilled, strictly obeying the recycling rates given in legal regulations. On the other hand the process has to be profitable. Various methods (eg the VW SiCon process, Proceedings of the TBS-related processing systems GmbH the Scholz method) were developed.

The biggest challenge in recovering the valuable materials by physical separation methods is the so called lint fraction. The partly heavily contaminated textile and plastic fibres tend to form agglomerates with the residual components as e.g. copper wires, elastomers and glass, thus limiting the efficiency of current physical separation methods.

Within this master thesis the method of property analysis was used to characterize a sample of shredder sand, combining laboratory separation techniques at monotonously increased property settings with chemical assays. Various physical and thermal techniques to separate the lint fraction were examined at laboratory scale.

The technical restrictions of the efficiency of spiral separators fed with shredder sand were elaborated at pilot scale. A pluralistic approach of dry separation of the lint fraction and wet processing of the residuals is discussed by means of metal balances with respect to an overall economic and ecologic use of the products.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>AUFGABESTELLUNG</b>	<b>3</b>
1.1	Problemstellung	3
1.1	Zielsetzung	4
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>5</b>
2.1	Gesetzliche Vorgaben	5
2.1.1	Altautoverordnungen	5
2.1.2	Elektro- und Elektronikaltgeräte Verordnung	7
2.1.3	Österreichisches Abfallwirtschaftsgesetz und Deponieverordnung	7
2.2	Stand der Technik bei der Aufbereitung in der Shredderanlage	8
2.2.1	Aufgabe und Funktion von Shredderanlagen	9
2.3	Aufkommen und Zusammensetzung der Shredder-Leichtfraktion	11
2.3.1	Stand der Technik zur Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion	16
2.4	Wesentliche Einsatzfelder für die Produkte aus Shredder -Leichtfraktionen	22
2.4.1	Kunststoffgranulate	22
2.4.2	Shredder-Flusenfraktion	23
2.4.3	Shredder-Sandfraktionen	25
<b>3</b>	<b>ROHGUT - CHARAKTERISIERUNG</b>	<b>29</b>
3.1	Probenbeschreibung und Vorbereitung	29
3.1.1	Chemische Zusammensetzung	30
3.2	Merkmalsklasseanalyse der Eingangsprobe	31
3.2.1	Siebanalyse	31
3.2.2	Dichte Bestimmung mit dem Helium-Pyknometer	33
3.3	Handklauben	34
3.4	Glühverlust- und Aschegehaltbestimmung	36
3.4.1	Durchführung des Glühverlustes	36
3.5	Schwimm-Sink Analyse	38
3.5.1	Auswertungen und Ergebnisse für die Schwimm-Sink-Analyse	38
3.6	Henry-Reinhardt Schaubild	40
3.7	Ergebnisse der Rohgutanalytik	47
3.8	Schwimm-Sink-Analyse mit der Fliehkraftunterstützung	48

---

---

<b>4</b>	<b>VORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG DER TRENNVERSUCHE VON FLUSEN VON SHREDDER – SANDFRAKTION (&lt; 4 MM)</b> .....	<b>51</b>
4.1	Stoffliche Trennversuche mit dem Wendelscheider .....	51
4.2	Versuchsdurchführungen und Ergebnisse .....	53
4.2.1	Versuche mit dem Wendelscheider (Humphreys Bauart) .....	54
4.2.2	Versuche mit dem Wendelscheider (FLS-Smidth - Bauart) .....	61
4.3	Trocken-Nass-Kombinationen zur Trennung der Shredder-Sandprobe .....	65
4.3.1	Trockene Dichtentrennung mit der Luftsetzmaschine .....	67
4.3.2	Stoffliche Dichtentrennung mittels Aufstromklassierer .....	74
4.3.3	Stoffliche Dichtentrennung mittels Nassherd .....	78
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE</b> .....	<b>85</b>
6.1	Literaturverzeichnisse .....	85
6.2	Abkürzungsverzeichnis .....	87
6.3	Tabellenverzeichnis .....	90
6.4	Abbildungsverzeichnis .....	92

---

# 1 Aufgabestellung

Das heute gängige Verfahren zur Aufbereitung von Fahrzeug-Schrotten, Elektroaltgeräte und Mischschrotten ist Shreddern. Der Zweck einer Shredderanlage ist die Auftrennung des Eingangsmaterials in diverse Stoffgruppen mit dem Ziel saubere Schrotte und Metalle (Aluminium, Edelstahl, Kupfer etc.) nach dem Aufschluss durch den Shredder zu gewinnen. Das Eingangsmaterial besteht nicht nur aus Eisen- und Nichteisen- -metallen, sondern auch aus Kunststoffen, mineralische Stoffen, Flusen, Holz, Glas, Gummi und Sonstigen Materialien. Die Anlage hat also den Zweck die Metalle von den Begleitstoffen zu trennen. Bei der Aufbereitung in Shredderanlagen entstehen vier Materialströme:

Fe-Metalle, NE-Metalle, Shredder-Schwerfraktion und Shredder-Leichtfraktion

Fe-Metalle und Ne – Metalle werden in Stahlwerken und Gießereien verwendet. Zur Gewinnung weiterer Wertstoffe aus Shredder-Leichtfraktion, die hauptsächlich Rückstände der Luftabsaugung des Shredders beinhaltet und die Shredder-Schwerfraktion, die hauptsächlich die größeren Kunststoffteile enthält, wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Grundlage ist eine mechanische Aufbereitung, deren Ziel in der Regel die Gewinnung einer oder mehrerer mineralischer, metallischer und einer (hoch)kalorischen Fraktion ist. [4, S. 207].

Durch verschiedene Zerkleinerungs-, Klassier-, und Sortierprozesse können aus der Shredder Leichtfraktion (SLF) fünf neue Fraktionen gewonnen werden: Shredderflusen, Shredder- oder Kunststoffgranulate, eine Fe- Fraktion, eine NE-Metallfraktion und Shredder-Sandfraktion.

Für die Shredder-Flusen und das Shredder- Kunststoffgranulat existieren bereits Verwertungswege. Die Shredder-Sandfraktion wurde bisher als Deponieeinsatzstoff verbracht oder in Bergwerken als Versatzmaterial genutzt, was mit Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in Zukunft aber nicht mehr praktikabel ist. Zum einen ist es fraglich, ob der Gesetzgeber das Verfüllen von Bergwerken langfristig als Recycling anerkennen wird. Zum anderen gehen wertvolle Metalle dabei verloren. [13, S. 8]

Da zukünftig nicht nur die Menge der Shredder-Rückstände und damit die Menge der Shredder-Sande steigen wird, sondern auch die Anteile an Buntmetallen in den Sanden, ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Rückgewinnung interessant. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Edelmetallen, Aluminium, Zink und Kupfer [10].

## 1.1 Problemstellung

Für die Aufbereitung der Shredder-Sandfraktion besteht jedoch das Problem der großen Heterogenität des Abfalls, der eine komplexe Mischung aus unterschiedlichen Materialien darstellt.

---

Speziell fein- und feinstkörniges Material zeigt hohe Tendenz an bevorzugt an Schaumstoffen Plastik oder Metall anzuhängen. Es ist kaum möglich die Haftkräfte nur durch Siebung oder Sichtung zu lösen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die in der Shredder-Sandfraktion enthaltene Flusenfraktion eine wesentliche Beeinträchtigung bei der Anwendung aufbereitungstechnischer Sortierverfahren darstellt. Deren Neigung zur Bildung großvolumiger Agglomerate erschwert zum einen den Einsatz gängiger Sortierverfahren, wodurch es zu einer qualitativen Beeinträchtigung des Sortierergebnisses kommt [4].

## **1.1 Zielsetzung**

Ziel der Masterarbeit ist es, ein physikalisches Aufbereitungsverfahren zu entwickeln, mit dem die Flusen aus der Shredder-Sandfraktion abgetrennt werden und in weitere Folge Wertproduktfraktionen hergestellt werden können.

Dazu sollen an einer Probe Shreddersand nach einer aufbereitungstechnischen Charakterisierung der Bestandteile Aufbereitungsmethoden geprüft werden, die in der einschlägigen Fachliteratur noch nicht für diesen Zweck beschrieben worden sind. Ansätze sind im Labormaßstab zu erproben und bei Erfolg im Technikumsmaßstab zu überprüfen. Ergebnisse sind in Form von Metallbilanzen darzustellen.

## 2 Grundlagen

In folgenden Kapiteln erfolgt zuerst ein kurzer Überblick über die gesetzlichen Verordnungen für Altfahrzeuge – und Elektroaltgeräte in der EU und ebenso über die österreichische Abfallwirtschafts- und Deponieverordnung.

Des Weiteren wird auf den Stand der Technik bei der Aufbereitung in der Shredderanlage eingegangen. Um zu einem besseren Verständnis über die Materialflüsse der Shredderanlage und damit der Shredder-Leichtfraktion zu kommen, werden das Aufkommen, die Zusammensetzung und der Stand der Technik zur Aufbereitung der Shredder-Leichtfraktion beschrieben.

### 2.1 Gesetzliche Vorgaben

#### 2.1.1 Altfahrzeugverordnungen

Altfahrzeugverwertung und -entsorgung sind aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen gesetzlich geregelt.

Die EU-Altfahrzeug-Richtlinie (EU- Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG) beinhaltet gesetzliche Vorgaben für die Verwertungsquoten von Altfahrzeugen, die ab dem Jahr 2006 bis 2015 zu erfüllen sind. [11, S.6]

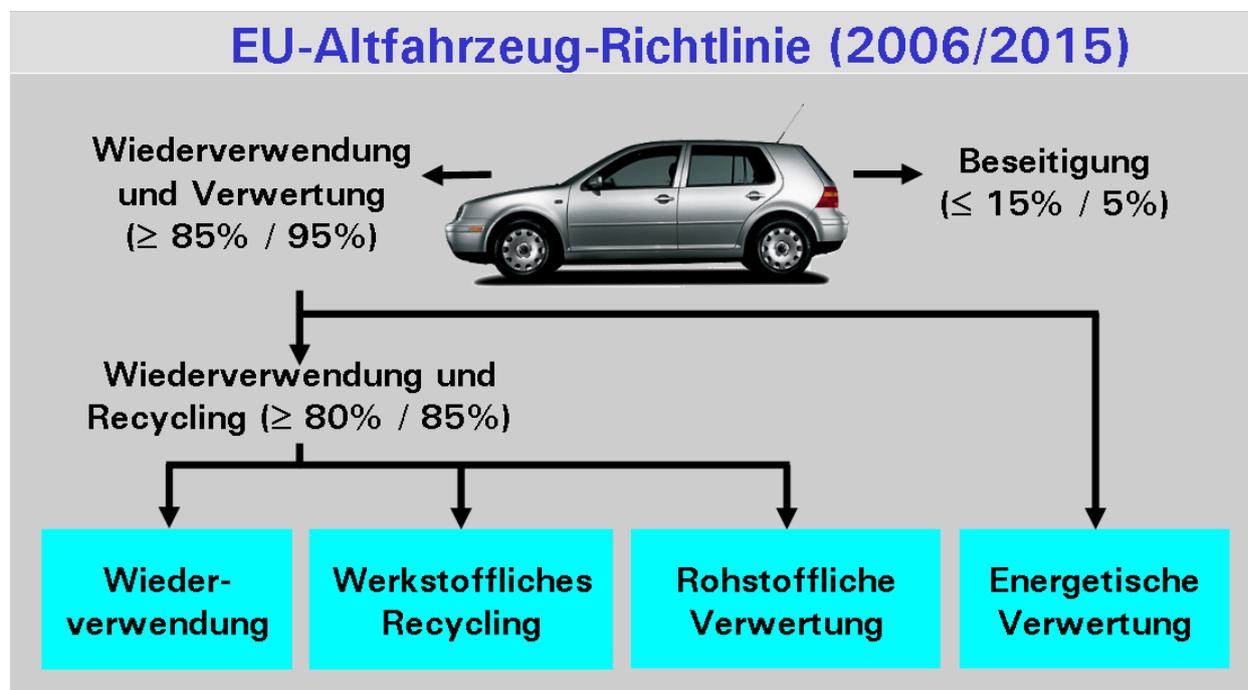


Abbildung 1- Vorgaben der EU-Altfahrzeug-Richtlinie (2000/53/EG) [11, S.6]

Die EU- Altfahrzeugrichtlinie schreibt seit 1.1.2006 eine stoffliche Verwertungsquote von 85% (davon max. 5 % energetisch) und ab 1.1.2015 eine Verwertungsquote von 95 % (davon 85 % stofflich und max. 10 % energetisch) für sämtliche ab diesem Zeitpunkt im Umlauf gebrachte Fahrzeuge vor. Der Letzthalter des Fahrzeuges wird zukünftig von den Entsorgungskosten freigestellt. „Dadurch ergeben sich notwendige Recycling- und Wiederverwertungspflichten für alle Fahrzeughersteller in Europa, sowie für sämtliche Fahrzeugimporteure auf dem europäischen Automarkt. [11, S.6]

Eine Typengenehmigung für neue Modelle wird es nur noch bei einem Nachweis einer 95%-igen Verwertungsquote geben. Darüber hinaus wird es Verbote für den Einsatz von bestimmten Materialien geben wie z.B. Blei, Cadmium, Quecksilber, oder Chrom.

Die Umsetzung der Richtlinie 2000/54/EG in nationales Recht erfolgte 2002 in Form der österreichischen Altfahrzeugverordnung.

Die Ziele der Aufbereitung von Shredderrückstand sind:

- Beitrag zur Erfüllung der Verwertungsquoten gemäß Altfahrzeugverordnung
- Rückgewinnung verwertbarer Fraktionen
- Stoffliche Verwertung dieser Fraktion ermöglichen, durch Produktion von „Qualitätsprodukten aus Abfall“. [9]

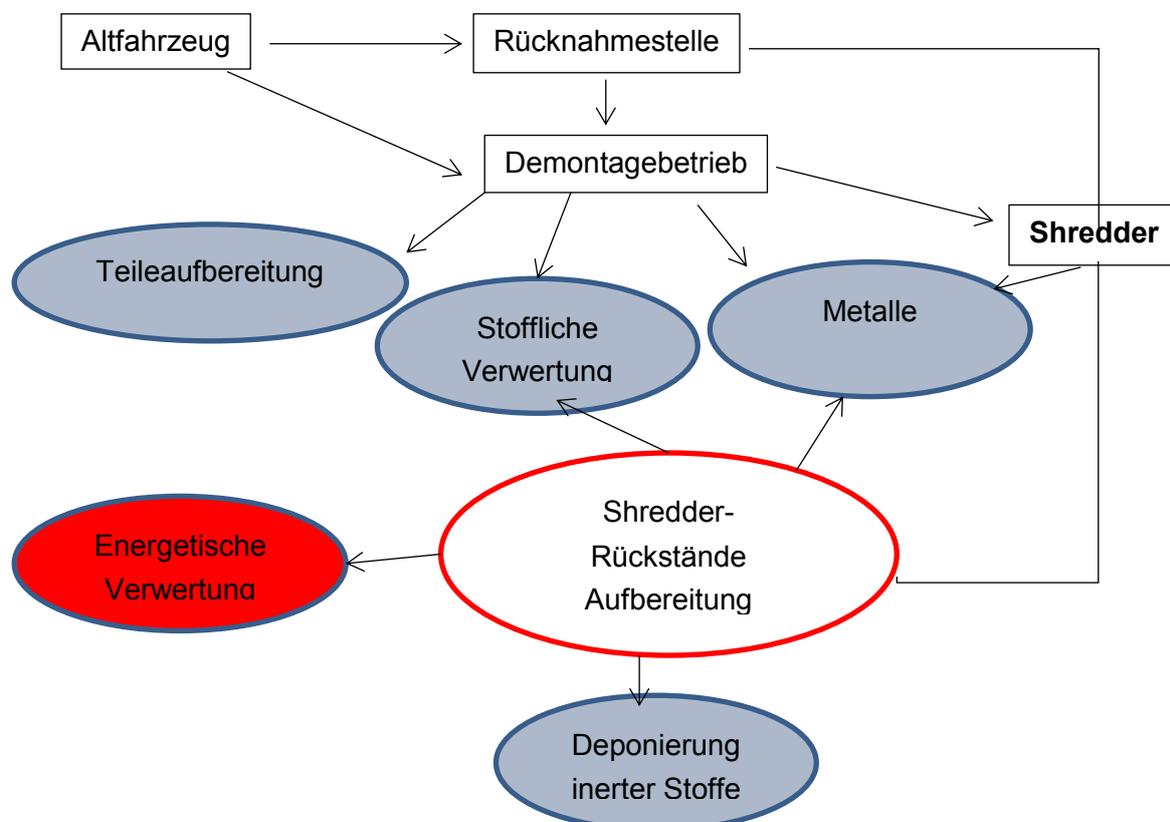


Abbildung 2- Stoffströme Altfahrzeugverwertung [9]

### **2.1.2 Elektro- und Elektronikaltgeräte Verordnung**

Die Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlamentes und des Europäischen Rates von 27. Jänner 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte hat als Ziel vorrangig die Vermeidung von Abfällen und darüber hinaus die Wiederverwendung und das Recycling von Elektro- und Elektronik-Altgeräten. Dadurch soll die jährlich anfallende Abfallmenge reduziert werden und gleichzeitig sollen wertvolle Rohstoffe durch hohe Verwertungsquoten in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. [23, S.6]

Je nach Gerätetyp müssen Verwertungsquoten von >70 % und Recyclingquoten von mindestens 50 % erreicht werden. [25,S.32]

Aus der Sicht Umweltschutzes bestehen die Elektro- und Elektronikgeräten aus einer Mischung von recyclebaren und nicht recyclebaren Schadstoffen, die nicht einfach zu berechnen sind. Zu den Komponenten mit einem besonders hohen Gehalt an schädlichen Stoffen zählen Quecksilber, PCB-haltige Kondensatoren, Bildschirmer, PUR-Schäume FCKW-haltige und Leiterplatten. [19]

Die ÖNORM S 16 (Ausgabe: 2005-09-01): Verwertung und Beseitigung von Elektro- und Elektronik-Altgeräte enthält Angaben zur Demontage und Schadstoffentfrachtung von EAG in Fraktionen oder Teilen, wobei diese mittlerweile in der Abfallbehandlungspflichtenverordnung detailliert geregelt sind. Darüber hinaus enthält die Norm eine Liste jener Abfälle – getrennt nach gefährlich und nicht gefährlich – die bei der Demontage von EAG als Fraktionen oder Teile anfallen. [19, S.34]

### **2.1.3 Österreichisches Abfallwirtschaftsgesetz und Deponieverordnung**

Die Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates von 19. November 2008 über Abfälle besagt, dass die Abfallvermeidung die oberste Priorität der Abfallwirtschaft sein sollte und dass stofflichem Recycling der Vorzug vor der energetischen Verwertung von Abfällen zu geben ist. [2, S.13]

Die Ziele der Abfallwirtschaft in Österreich sind:

- Umweltverträglichkeit
- Schonung von Rohstoff- und Energieressourcen
- Geringst möglicher Verbrauch von Deponievolumen
- Abfallbehandlung vor der Deponierung, sodass keine Gefährdung für nachfolgende Generationen entsteht (Vorsorgeprinzip) [2, S.13]

Wichtige Voraussetzung für die bestmögliche Verwertung und Behandlung von Abfällen ist die stoffspezifisch getrennte Sammlung oder nachträgliche Sortierung. Dafür wurden in den letzten Jahren mehrere Verordnungen auf Basis des Abfallwirtschaftsgesetzes in Österreich erlassen.

---

Zur Erreichung der Ziele wurde insbesondere die Deponie-Verordnung erlassen, in der strenge Qualitätsanforderungen an die noch abzulagernden Abfälle und Rückstände aus der Abfallbehandlung festgelegt wurden. Dies betrifft auch den Gehalt an organischem Kohlenstoff, der ein Maß für biochemische Umsetzbarkeit und damit für die Bildung von Deponiegasen und organisch verunreinigtem Sickerwasser aus der Deponierung darstellt. [2, S.13]

Die Ziele und Grundsätze gemäß Abfallwirtschaftsgesetz wurden durch die Deponieverordnung konkretisiert, sodass Abfälle mit mehr als 5 % organisch gebundenem Kohlenstoff (> 5 % TOC) und einem Heizwert mit mehr als 6.600 KJ/kg Trockensubstanz in Österreich nicht mehr deponiert werden dürfen. Damit ist eine Deponierung von unbehandelten Shredder Rückständen nicht mehr möglich. [19]

## 2.2 Stand der Technik bei der Aufbereitung in der Shredderanlage

In Österreich existieren 6 Shredderanlagen, welche die Aufbereitung von Altfahrzeugen, Haushalts- und Mischschrott, Elektro- und Elektronikschrott sowie Fraktionen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen betreiben.

In der folgenden Tabelle sind die alle bestehenden Shredder- und Post-Shredder-Anlagen in Österreich dargestellt.

Tabelle 1: Shredder- und Post-Shredder-Anlagen in Österreich [7, S.106]

<b>Anlagen zur Behandlung von Metallabfällen (Shredder und Post-Shredder) im 2010</b>		
<b>Bundesland</b>	<b>Betreiber</b>	Kapazitäten in t/Jahr
Niederösterreich	Metall Recycling GmbH, Amstetten	65 000
Niederösterreich	Scholz Rohstoffhandel GmbH, Laxenburg	135 000
Oberösterreich	Gebrüder Gratz GmbH, Lambach	80 000
Steiermark	Fritz Kuttin GmbH, Knittelfeld	120 000
Tirol	Tiroler Shredder GmbH, Hall	50 000
Vorarlberg	Loacker Recycling GmbH, Götzis	80 000
<b>Summe Shredder</b>	<b>6</b>	<b>539 000</b>
Niederösterreich	Metran Rohstoff Aufbereitung GmbH, Kematen	120 000
Oberösterreich	TBS-Technische Behandlungssysteme GmbH, Enns	95 000
Steiermark	Recyclingpark Eisenerz GmbH&Co KG	69 800
<b>Summe Post-Shredder</b>	<b>3</b>	<b>248 800</b>

Als größter österreichischer Altfahrzeugverwerter und Schrottaufbereiter betreibt die Scholz Rohstoffhandel GmbH in Laxenburg (ca. 20 km südlich von Wien) die neueste Shredderanlage Österreichs, zur Aufbereitung von Altfahrzeugen und verschiedenster Schrottsorten.

### 2.2.1 Aufgabe und Funktion von Shredderanlagen

Die Aufgabe von Shredderanlagen besteht in der Trennung und Zerkleinerung von schrott- und metallhaltigen Verbunden mit dem Ziel, hochwertige Eisen- (Fe) und Nichteisen- (NE) Metallfraktionen zu erzeugen, um diese wieder der Metallgewinnung zuzuführen.

Zentrales Element einer Shredderanlage ist der Shredder. Hier werden die Autowracks durch rotierende Hämmer über eine amboßartige Schlagkante in Stücke gerissen und so lange zerkleinert, bis Teile durch einen Rost ausgetragen werden können.

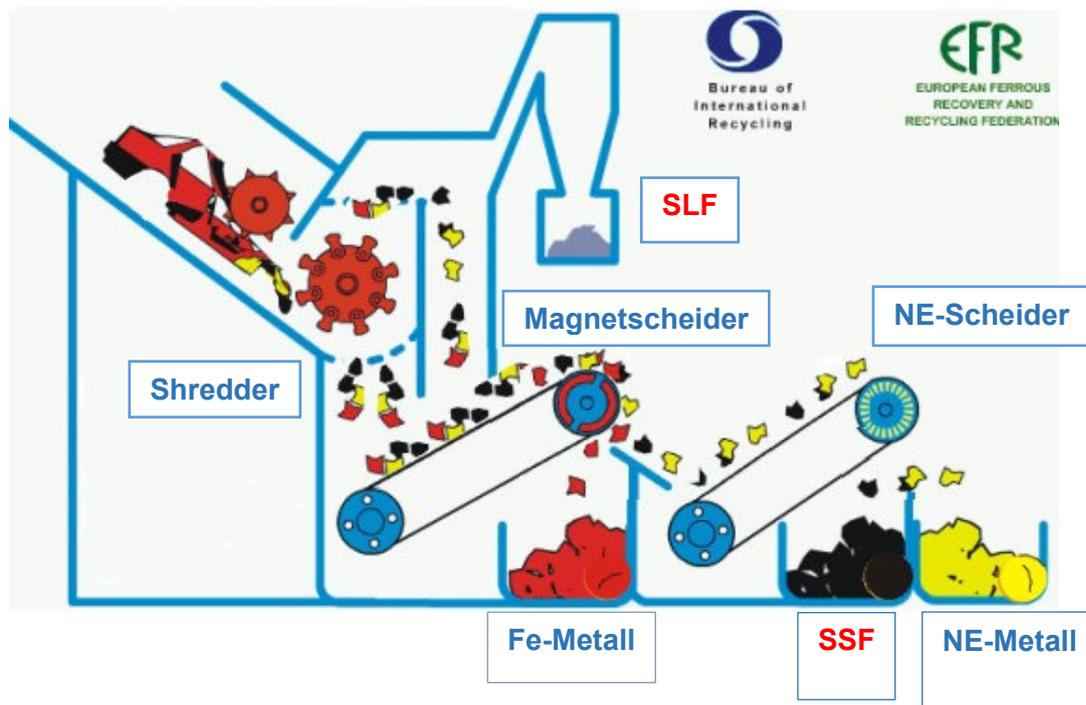


Abbildung 3- Prinzip einer Altfahrzeug-Verwertung-Shredderanlage [9]

Hinter dem Shredder werden flugfähige Bestandteile über eine Entstaubungsanlage abgesaugt. Die Abtrennung der Partikel erfolgt mittels Windsichtung.

In dieser Stufe werden nun alle flugfähigen Stoffe (Windsichter-Leichtfraktion), z. B. Flusen, Folien und Schaumstoffe, von den schwereren Teilen (Windsichter-Schwerfraktion) getrennt, die aus Metallen, Kunststoffen, Holz sowie verschiedenen Verbunden bestehen.

Mittels angeschlossenen Magnet und Wirbelstromscheider werden eine ferromagnetische und eine NE-Fraktion abgetrennt.

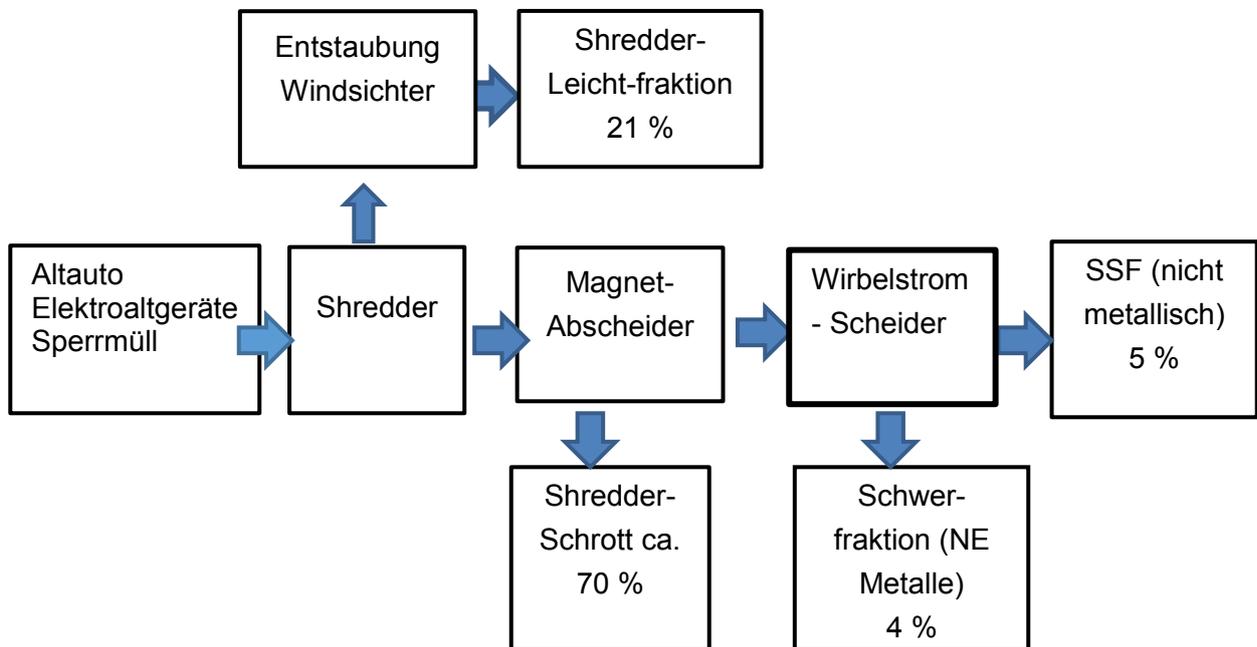


Abbildung 4: Materialfluß einer Shredderanlage

Bei der Zerkleinerung in Shredderanlagen entstehen demnach vier Materialströme:

- Fe-Fraktion
- NE- Fraktion
- Shredder-Schwerfraktion (größere Kunststoffteile, Mineralik)
- Shredder Leichtfraktion (hauptsächlich Rückstände der Luftabsaugung)

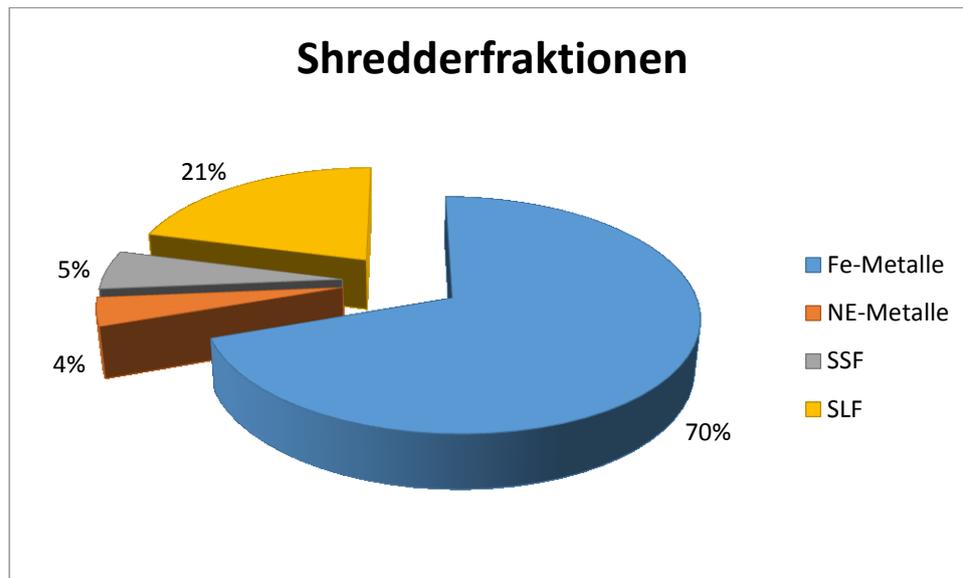


Abbildung 5: Prozentuelle Massenanteil den Materialströme [8, S. 201]

### 2.3 Aufkommen und Zusammensetzung der Shredder-Leichtfraktion

In praktisch allen trocken arbeitenden Shredderanlagen wird ein Windsichter zur Abtrennung leicht flugfähiger Stoffe eingesetzt. Dieser bildet nach dem Shredder, der den Schrott zerkleinert und verdichtet, die zweite Verfahrensstufe. Das Leichtgut dieses Sichters wird als Shredder – Leichtfraktion (SLF) bezeichnet.

Bei der Shredder-Leichtfraktion handelt es sich um ein heterogenes Gemisch der im Automobilbau und in Elektroaltgeräten verwendeten Einsatzstoffe (Kunststoffe, Elastomere, Schaume, Textilien, Glas sowie verschiedene Restmetalle), die in ihrer Zusammensetzung starken Schwankungen unterliegen.

Für die Altabbehandlung gilt, dass die Shredder Leichtfraktion am gesamten Shreddervormaterial ca. 25 Masse % betrug. Durch den kontinuierlichen Anstieg von Kunststoffen, Leichtmetallen und elektronischen Systemen in Fahrzeugen, wird dieser Wert bis 2015 voraussichtlich auf 34 Masse-% steigen (Reinhard & Richers 2004). [17, S.82]

Der Jahresanfall der Shredder-Leichtfraktionen in Deutschland beträgt 450.000-650.000 Tonnen und etwa 65.000Tonnen in Österreich. [26, S.11]

Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung der Shredder-Leichtfraktion war schon Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Darüber hinaus ist die Zusammensetzung der Shredderrückstände abhängig von der Art des angelieferten Schrottes und unterliegt nicht

nur kurzfristigen, sondern auch mittelfristigen Schwankungen entsprechend der wirtschaftlichen Entwicklung auf dem Schrottmarkt.

Die Shredder-Leichtfraktion besteht im Wesentlichen aus:

- **Organischen, gut brennbaren Materialien:**
  - ♦ Kunststoffen (z.B. Polyvinylchlorid(PVC), Polyurethan(PU), Polystyrol(PS), Polyethylen(PE) etc.),
  - ♦ Elastomere(Gummi),
  - ♦ Flusen (Mischung aus leichten, porösen und faserigen Werkstoffen, entstammen hauptsächlich von Textilien und Schaumstoffen),
  - ♦ Holz, Papier
  - ♦ Lacksplitter und Spachtelmassen
- **Feinkörnigen mineralischen Anteilen**
  - ♦ Sand , Rost, Lacksplitter
- **Inert Stoffen**
  - ♦ Glas
  - ♦ Keramik
- **Metallteilchen**
  - ♦ Eisen
  - ♦ NE-Metallen (Al, Cu, etc.)
  - ♦ Drähte

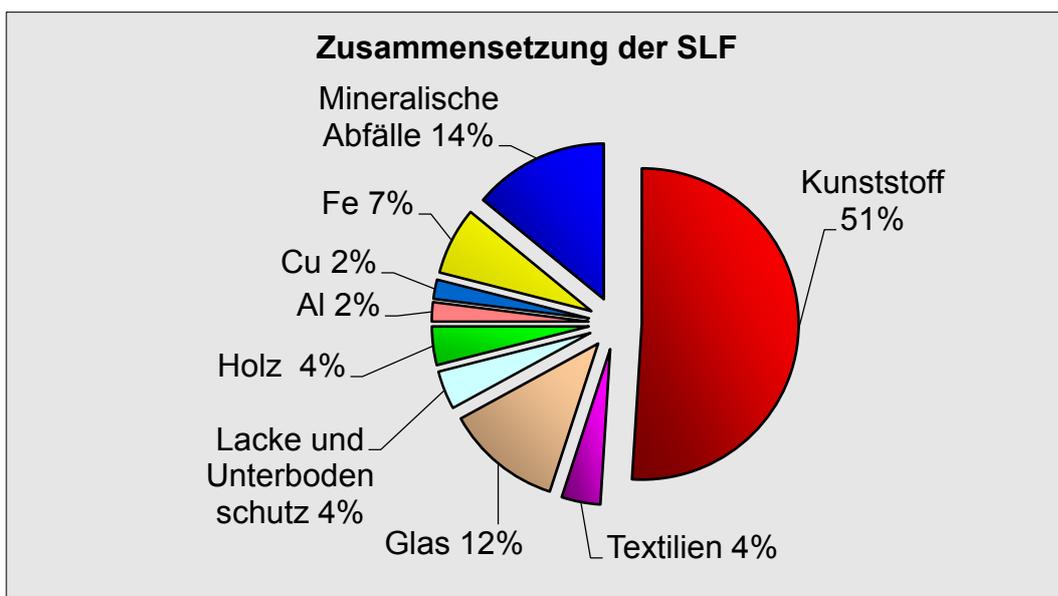


Abbildung 6: Zusammensetzung der Shredder-Leichtfraktion [27, S.8]

Eine Studie in Deutschland (Destatis, Letztendliche Verbrauch der Shredder-Leichtfraktionen) hat einen prozentuellen Anteil der Entsorgungswege der SLF in Periode von 2004 bis 2009 dargestellt. [12]

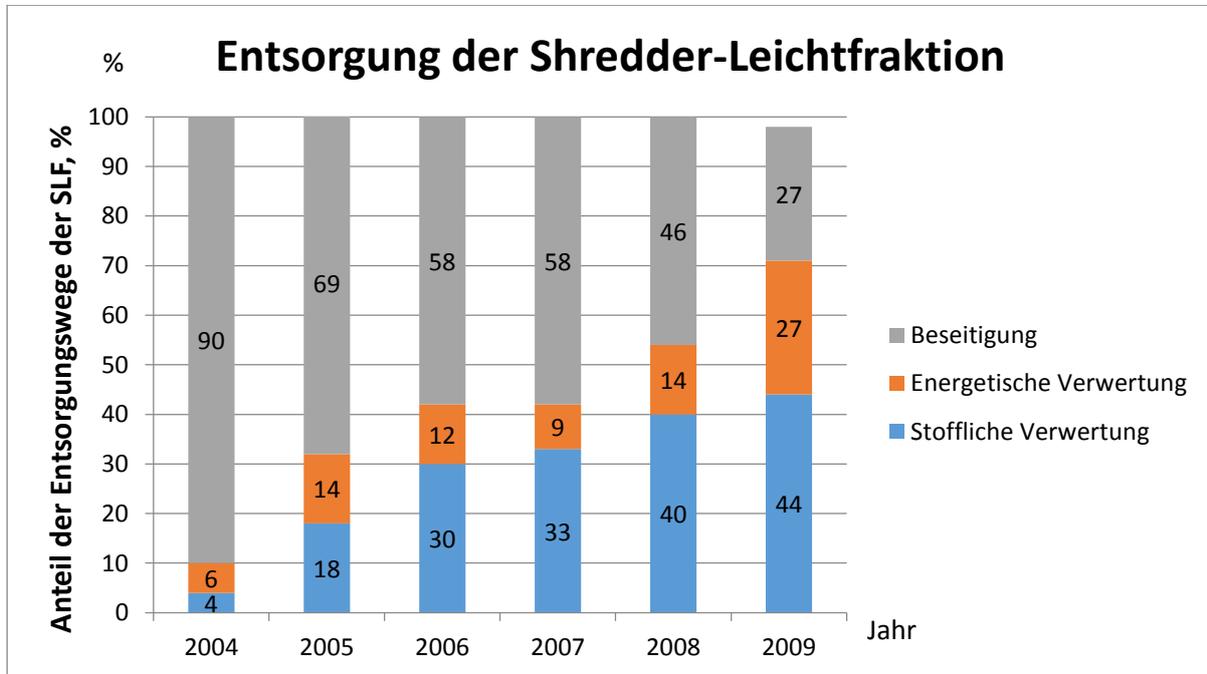


Abbildung 7: Entsorgung der Shredder-Leichtfraktion in Deutschland vom Jahr 2004 bis 2009 [12]

Diese Abbildung zeigt, dass die stoffliche Verwertung kontinuierlich steigt und im Jahr 2009 bereits 44 Prozent stofflich verwendet wurden.

Folgende Tabelle zeigt die Brennstoffanalyse der Shredder-Leichtfraktion aus der gemeinsamen Behandlung von Altagos, Industrieabfall und Sperrmüll. Im Vergleich zu Hausmüll weist die Shredder-Leichtfraktion aus Altagos stark erhöhte Schadstoffkonzentrationen auf (Reinhardt & Richers 2004). [17, S.92]

Tabelle 2 - Brennstoffeigenschaften und Schadstoffgehalte der Shredder-Leichtfraktion [12]

Parameter		Mittelwert	Schwankung
Feuchtigkeit	Gew. %	6,7	0,1-18
Asche	Gew. %	52,7	25-80
Heizwert	MJ/kg	13	7-20
C	Gew. %	32,6	20-47
H	Gew. %	4,1	2-6
N	Gew. %	0,9	0,2-1,8
O	Gew. %	7	3-11
S	Gew. %	0,6	0,1-1,4
Cl	Gew. %	1,8	0,5-3
Al	mg/kg	20.000	10.000-20.000
As	mg/kg	28,5	20-35
Cd	mg/kg	61,2	40-80
Co	mg/kg	100	25-160
Cr	mg/kg	1.200	340-1.300
Cu	mg/kg	11.400	3.300-30.000
Hg	mg/kg	2,1	1-3
Mg	mg/kg	8.7000	8.000-10.000
Ni	mg/kg	1.200	400-2.800
Pb	mg/kg	5.100	300-14.000

Eine Studie (2006) des Landesamtes Nordrheinwestfalen (NRW) zeigt die Schadstoffe in der Shredder-Leichtfraktion, die diese zu einem besonders überwachungsbedürftigen Abfall machen. [18]

Tabelle 3 - Schadstoffe in Shredder-Leichtfraktion [18]

<b>Schadstoffe in SLF (19 10 03)</b>	
Schadstoff	80. Perzentil (mg/kg)
Antimon	340
Blei	8.000
Cadmium	58
Nickel	1.100
Quecksilber	6
<b>PCB</b>	<b>53</b>
<b>Kohlenwasserstoff</b>	<b>22.000</b>
Benzo(a)pyren	4
<b>Chlor</b>	<b>13.000</b>

Die Tabelle zeigt, dass PCB, Kohlenwasserstoff und Chlor im roten Bereich über den Grenzwerten liegen. Der Chloranteil der Shredder-Leichtfraktion ist laut Aussagen des LANUV-NRW (Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz-Nordhein-Westfalen) 2006 - höher als 1,3% in der gesamten Abfallmasse. [18]

Durch konsequente und vollständige Entnahme von Betriebsmitteln bzw.- Flüssigkeiten aus den Altfahrzeugen kann die PCB- und KW- Belastung weitestgehend reduziert werden.

Die verbleibenden Shredder-Leichtfraktionen wurden in der Vergangenheit aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung weitestgehend ungenutzt deponiert.

Die zukünftigen Anforderungen aufgrund der verschiedenen gültigen Verordnungen erfordern dagegen zukünftig eine verfahrenstechnische Behandlung der Shredderrückstände.

### 2.3.1 Stand der Technik zur Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung stellt die Shredder-Leichtfraktion eine Herausforderung bei der Trenntechnik dar.

Für die Aufbereitung der Shredder-Leichtfraktionen wurden verschiedene Verfahren entwickelt, mit dem Ziel, einen Großteil der Wertstoffinhalte zu trennen, nutzbar zu machen und die Menge der zu deponierenden Abfälle deutlich zu reduzieren.

- **Trocken-Mechanische Verfahren**

Als Stand der Technik zur trocken-mechanische Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion sind folgende Verfahren zu nennen:

- VW Si-Con Verfahren – (Belgian Scrap Terminal NV, Antwerpen, Belgien; CFF Recycling S.a., Frankreich; Niedersachsen, Deutschland)
- Wesa- SLF-Verfahren, Firma R – Plus Recycling GmbH, Deutschland
- Verfahren der Scholz AG, Deutschland
- SRTL – Verfahren (Shredder Residue Treatment Line) Firma Gallo Sa (Belgien und Frankreich) [8, S.203]

In Österreich existieren drei Betrieben:

- Metran Rohstoff Aufbereitung GmbH, Kematen-Niederösterreich
- TBS - Verfahren Technische Behandlungssysteme GmbH, Enns, Oberösterreich
- RPE – Verfahren am Erzberg (Asamer-Gruppe) / Steiermark (siehe Kapitel 2, Tabelle 1)

- **Thermische Verfahren**

- Vergasung „Schwarze Pumpe“, Firma: Sustec Schwarze Pumpe GmbH, Dresden – DE
- Pyro Arc – Prozess, Firma: Pyro Arc, NO (Pilotanlage)
- Reshment – Verfahren, Conzepte Technik Umwelt AG, Voest Alpine GmbH & Co [8, S.203]

In dieser Masterarbeit wird der Fokus auf die Trenntechnologien in der stofflichen Verwertung gelegt, da diese Verfahren zur Erreichung der stofflichen Verwertungsziele der EU-Richtlinie beitragen können.

Die zentralen Aufbereitungsanlagen haben in der Regel nicht nur das Ziel die Metalle aus Shredder-Leichtfraktionen zu separieren, sondern gezielt auch alle anderen Stoffe (Kunststoffe, Gummi, Holz, Textilien, Steine, Glas usw.) in einzelne Gruppen aufzutrennen und einer entsprechenden Verwertung zuzuführen. [20, S. 9]

---

Um zu einem besseren Verständnis über die trocken-mechanische Aufbereitung zu gelangen, werden im folgenden Abschnitte drei trocken-mechanische Verfahren dargestellt.

### 2.3.1.1 Das Verfahren der Scholz AG

Das Scholz-Verfahren setzt auf ein kombiniertes Verfahren zur Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion (SLF) und Shredder-Schwerfraktion (SSF), aus der ebenfalls eine Mineralik- und eine Metallfraktion abgetrennt werden. Nach einer umfangreichen Aufbereitung mit mehreren Zerkleinerungs- und Klassierschritten erzeugt die Anlage mehreren Leichtfraktionen unterschiedlicher Zusammensetzung, die hauptsächlich Folien, Textilfasern, und Schaumstoffe bzw. Kunststoffe mit Holz und Gummi und geringe Metallanteile enthalten. [8, S213]

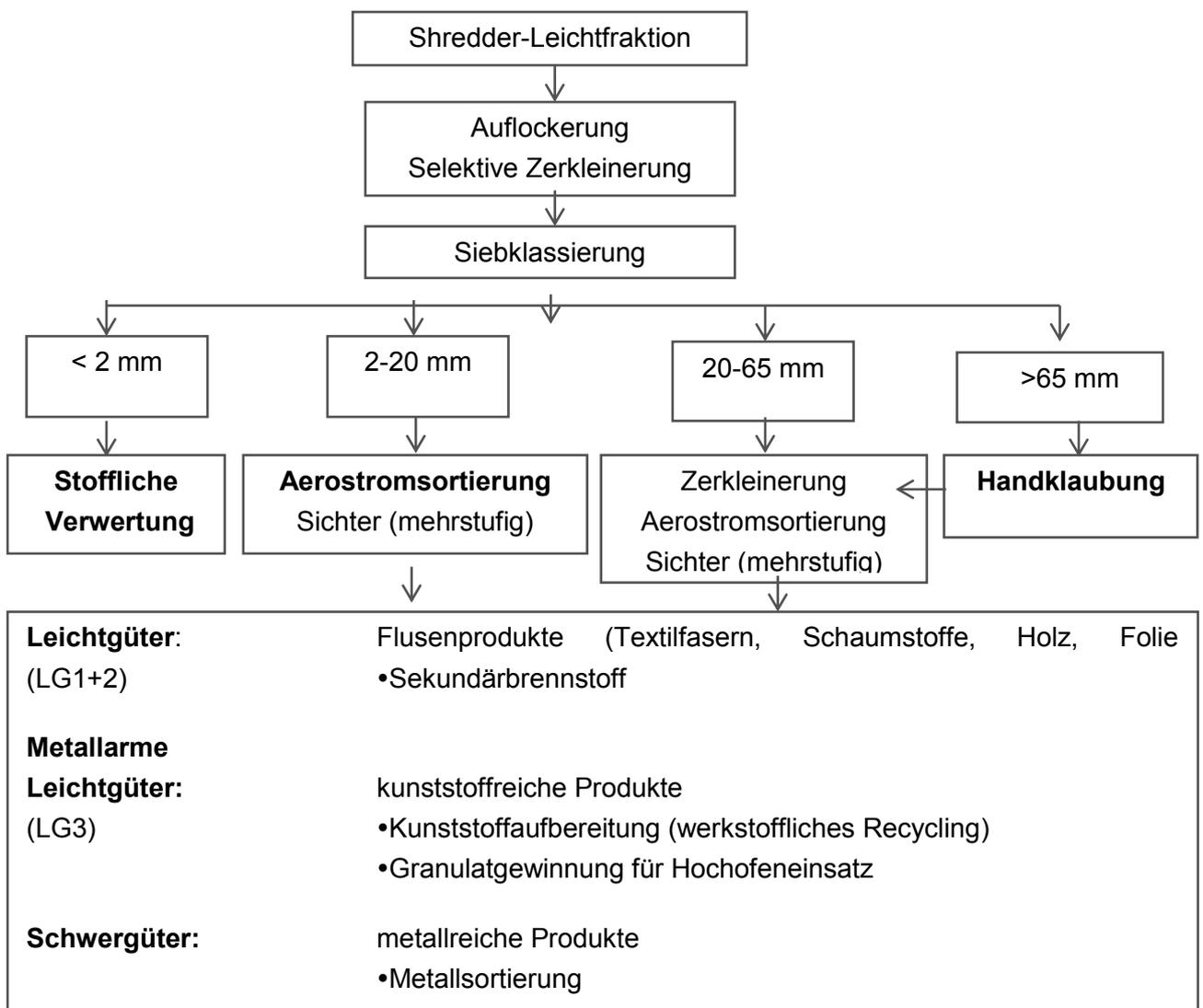


Abbildung 8: Aufbereitungsprozess der Shredder-Leichtfraktion bei den Fa. Scholz Recycling Ag & Co, Deutschland [15]

### 2.3.1.2 VW-Si Con Verfahren

Das VW-SiCon Verfahren ist ein mechanisches Aufbereitungsverfahren für Shredderrückstände, das im Rahmen einer Kooperation zwischen der Volkswagen AG und der SiCon GmbH entwickelt wurden. Durch mehrere Aufbereitungsschritte ist es möglich, auch den größten Teil der sonst ungenutzten Shredderrückstände einer weiteren Nutzung zuzuführen. Das mehrstufige Verfahren arbeitet mit mehrstufiger Zerkleinerung, Klassierung und Sortiertechnik auf Basis von Dichte, Kornform, Magnetisierbarkeit, elektrischer Leitfähigkeit und optischer Eigenschaften.

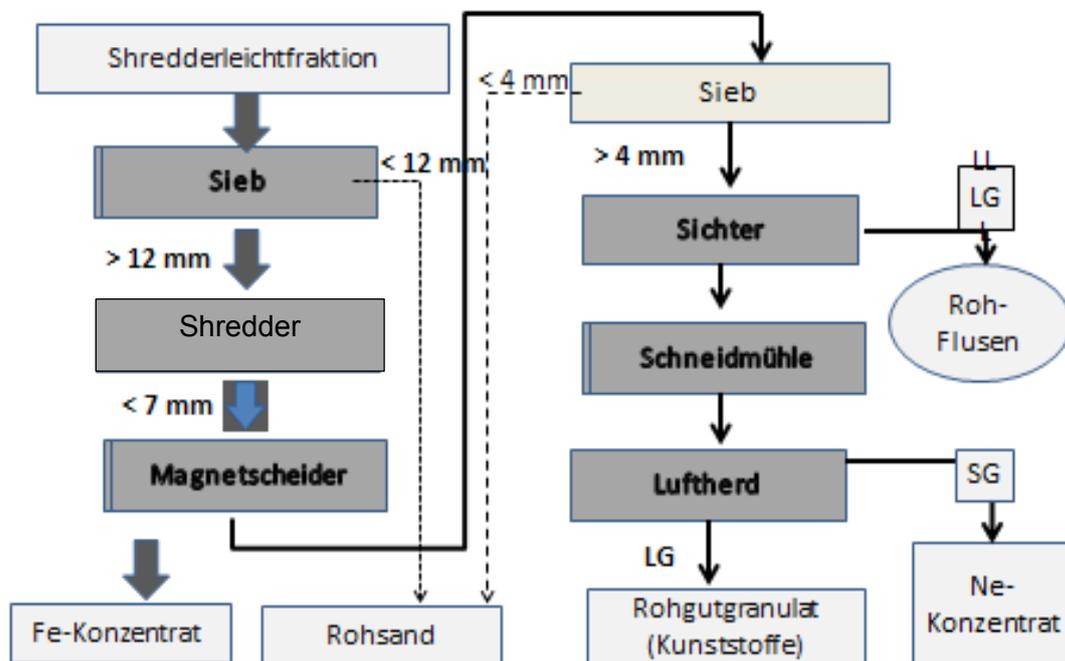


Abbildung 9: Vereinfachtes Fließbild der Aufbereitung von SLF nach dem VW-Si Con-Verfahren (LG-Leichtgut, SG-Schwergut) [1, S.266]

Im VW-SiCon Verfahren werden die Shredderrückstände zunächst weiter zerkleinert, um nachfolgend mittels Magnetscheider, Siebung und Windsichtung ein Fe-Konzentrat, eine Roh-Sandfraktion, eine Roh-Flusenfraktion, ein Roh-Granulat und ein Ne-Konzentrat abzutrennen.

Diese Fraktionen werden in weiteren Bearbeitungsstufen durch die gezielte Abreicherung von Störstoffen sowie durch die Einstellung optimaler physikalischer Parameter veredelt und auf die Anforderungen der nachfolgenden Anlagen eingestellt. Ziel der Veredelungsstufen ist die Erzeugung von Rohstoffen, die in großtechnischen Anlagen benötigt werden.

### 2.3.1.3 Verfahren der TBS Technische Behandlungssysteme GmbH

Die TBS GmbH ist seit 2006 am Standort in Enns (Österreich) im Einsatz. Das Ziel des Post-Shredderverfahrens ist eine möglichst vollständige Rückgewinnung der in der Shredder-Leichtfraktion noch vorhandenen Wertstoffe wie Kupfer und sonstige Buntmetalle, Fe-Metalle sowie Kunststoffgranulate. [8, S.201]

Durch eine innovative mehrstufige Klassierung, Zerkleinerung und Dichtentrennung (siehe Abbildung 10) gelingt es, etwa 60% der bisher beseitigten Wertstoffe zu verwerten.

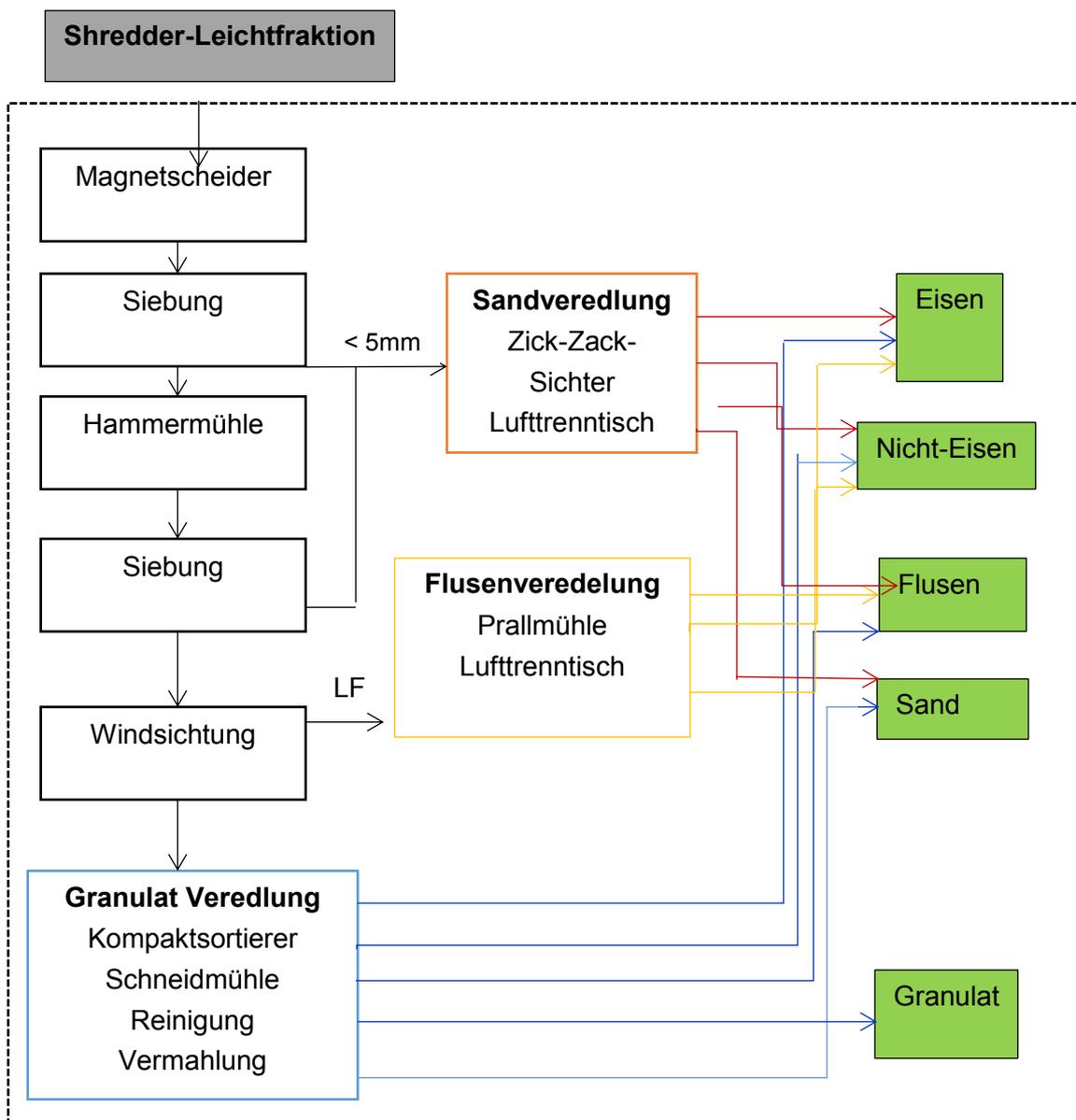


Abbildung 10: Post-Shreddertechnik, Fa. TBS, Enns [8, S.204]

Die Hauptfraktionen derzeit sind:

- Shredder-Flusen
- Kunststoffgranulate
- Fe- Fraktion
- , Ne-Metallfraktion
- Shredder-Sandfraktion.

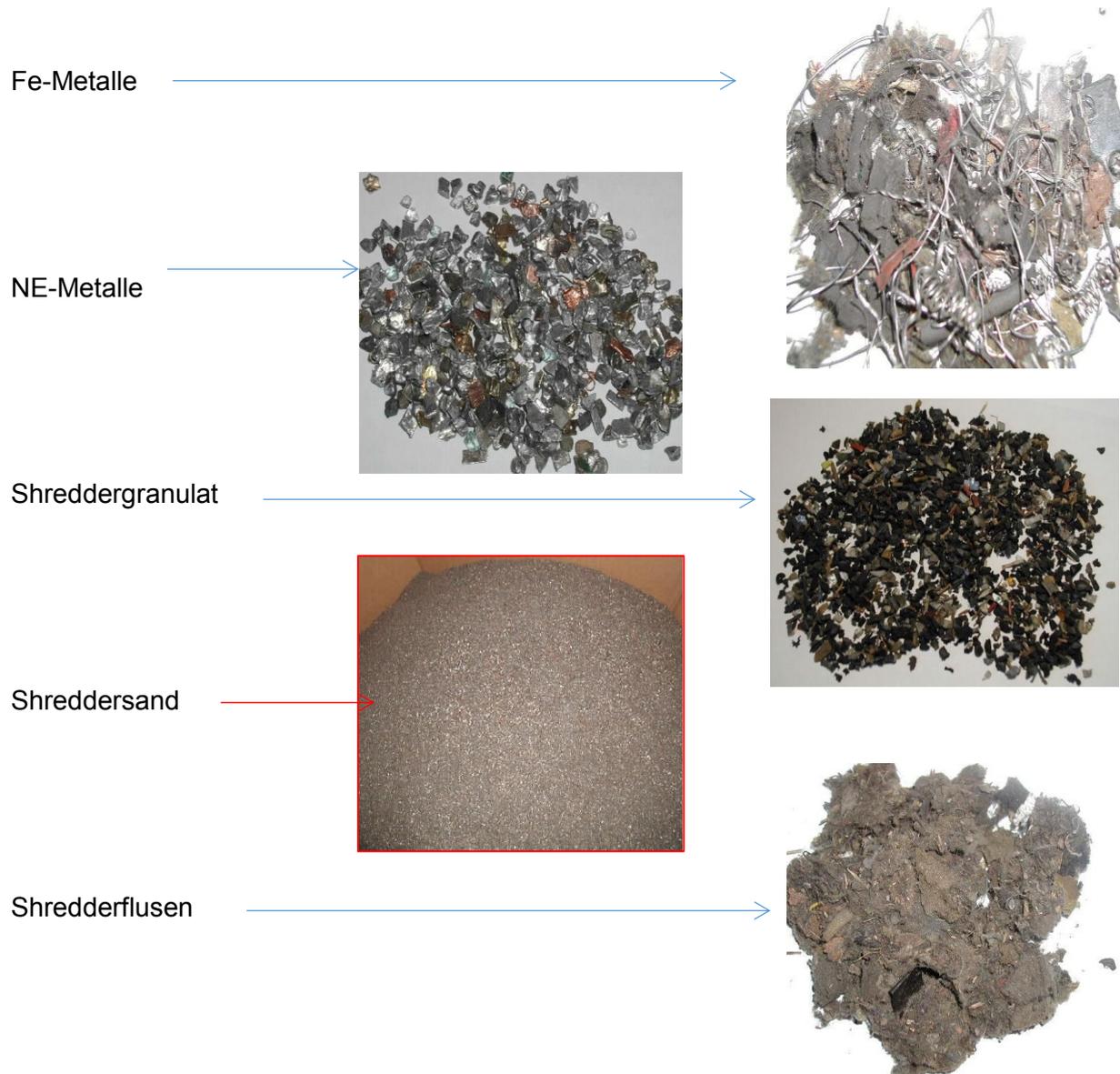


Abbildung 11: Produkte des Si-Con Verfahrens (TBS, Enns) [9]

Prozentueller Anteil für Produkte beträgt:

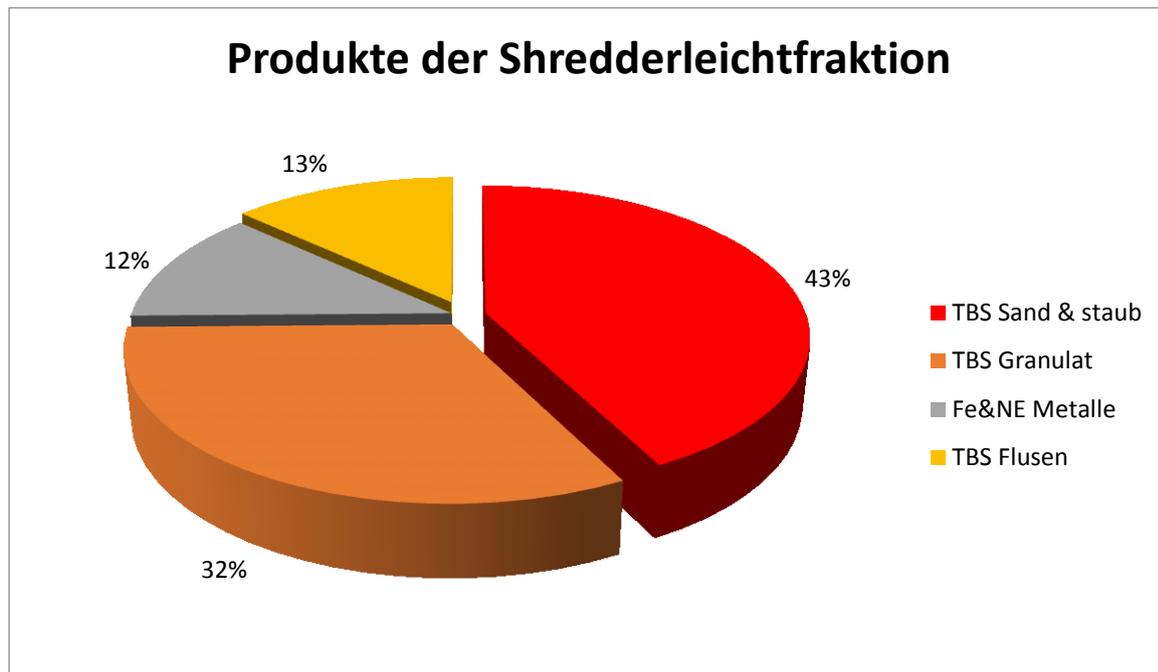


Abbildung 12: Prozentueller Massenanteil für Produkte der Post-Shredderanlage in Enns, Fa. „TBS“. [8.S.204]

Durch den vermehrten Einsatz diverser Trenntechnik und der mehrmaligen Kreislaufführung können hochreine Fraktionen erzielt werden. Metalle können daher verstärkt als Sekundärmetalle recycelt werden. Kunststoffe, wie Polyolefine, PS und ABS können eingeschmolzen und als Sekundärgranulat eingesetzt werden. Derzeit gibt es aber eine Reihe von abfallrechtlichen Problemen beim Absatz der erzeugten Fraktionen. Die aus SLF erzeugte inerte Fraktion kann noch nicht – wie beispielweise in Deutschland üblich im Bergversatz in Deponiestilllegungsmaßnahmen stofflich verwertet werden, sondern muss nach aufwendiger thermischer Behandlung deponiert werden. [8, S.203]

Der Einsatz von Flusen als Hilfsmittel zur Entwässerung von Klärschlamm wird in Deutschland als stoffliche Verwertung geplant, in Österreich als Beseitigung gesehen. [9]

Jedoch hat die Klärschlamm-trocknung, die für Verwertung der Flusen gedacht war, nicht die gewünschten Ergebnisse geliefert.

## 2.4 Wesentliche Einsatzfelder für die Produkte aus Shredder - Leichtfraktionen

### 2.4.1 Kunststoffgranulate

Das veredelte Shreddergranulat ist eine chlor- und metallarme Fraktion aus Hartkunststoffen, die in der Stahlherstellung eingesetzt werden kann. Beim Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofenprozess wird das Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff sowie die Stickstoffgehalte und die basische Schlackenbildungskomponenten ausgenutzt um primäre Reduktionsmittel wie Kohle oder Öl zu substituieren und dadurch Schwefelemissionen vermindert.

Das Granulat nutzt beispielsweise der Stahlhersteller Voestalpine in Linz zur Gewinnung von Roheisen aus Eisenerzen im Hochofenprozess. Durch die Reaktion von Granulat mit heißer Luft entstehen Kohlen-Monoxid und Wasserstoff-Gase, die benötigt werden, um den Eisenoxiden durch sogenannte Schmelzreduktion den Sauerstoff zu entziehen. Bei Voestalpine können jährlich bis zu 220.000 Tonnen Plastik eingesetzt werden, eine Menge, die sich aus Altautoverwertung alleine nicht erzielen lässt, weshalb auch Kunststoffe aus Verpackungen sowie Industrie- und Haushaltsabfälle eingesetzt werden. [13, S.7]

Grundsätzliche Verwertungsvarianten für Kunststoffe sind in folgender Grafik dargestellt.

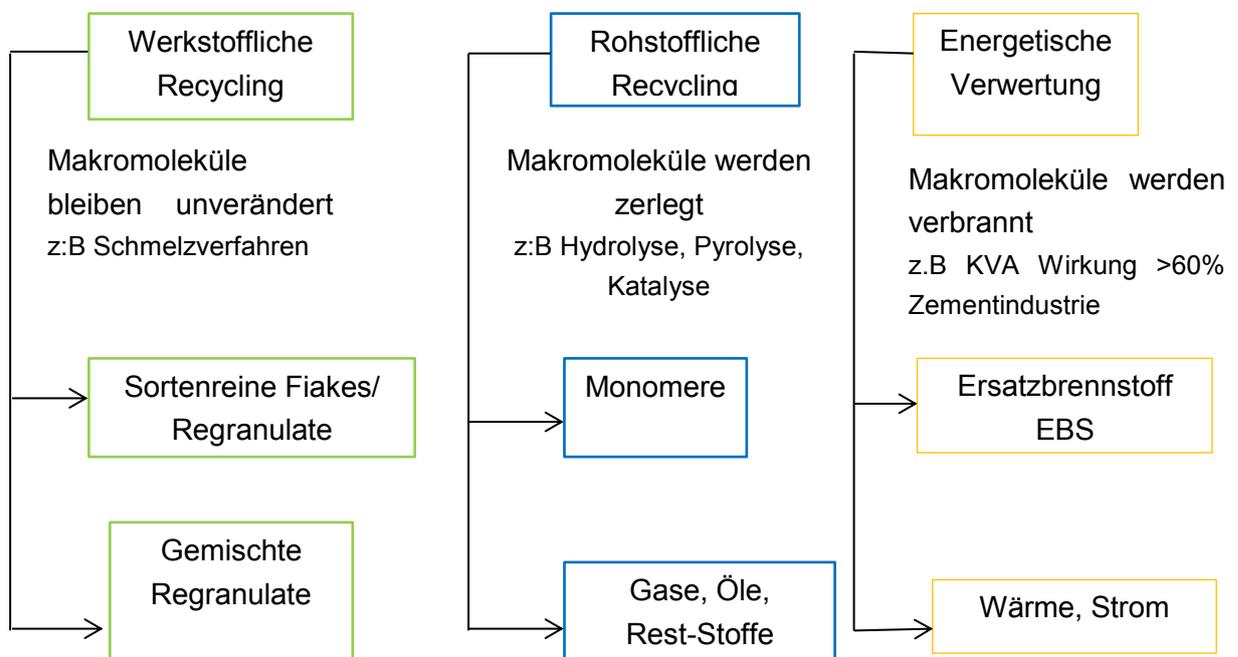


Abbildung 13: Grafik Übersicht Verwertungswege für Kunststoffe [16, S.35]

## 2.4.2 Shredder-Flusenfraktion

Shredderflusen sind eine Mischung aus leichten, porösen und faserigen Werkstoffen (entstammen hauptsächlich Textilien und Schaumstoffen.). Sie besitzen hohen Brennwert und einen Heizwert von ca. 23 MJ/kg.

Mögliche Einsatz der Shredderflusen als:

Entwässerungshilfsmittel: Ihre Bedeutung liegt darin, dass sie einen hohen Brennwert besitzen und ein Vielfaches ihres Eigengewichtes an Wasser aufnehmen können. Sie eignen sich daher zur Klärschlammkonditionierung. Dabei zeichnen sie sich durch eine Verbesserung der Entwässerungsfähigkeit des Klärschlammes in Kammerfilterpressen bzw. Zentrifugen, sowie durch die Erhöhung der Fördergeschwindigkeit des Schlamm-Flusengemisches in Rohrleitungen aus.

Reduktionsmittel: Durch den hohen Heizwert von ca. 23 MJ/kg kann man sie als Reduktionsmittel einsetzen und Flotationskohle/Kohlestaub in der Klärschlammverbrennung ersetzen.

Ersatzbrennstoff: Aufgrund des relativ hohen Heizwertes ist der Einsatz von Flusen als Ersatzbrennstoff (z.B in Zementwerken) nahe liegend. Dies ist jedoch aufgrund der relativ hohen Schadstoffgehalte schwierig.

**Die Emschergenossenschaft hatte zusammen mit der Sicon GmbH und der Volkswagen AG** ein System entwickelt, in dem feinkörnige Kohle durch Flusen aus Schredderrückständen ersetzt wird. In Zusammenarbeit mit dem Abnehmer wurden die spezifischen Anforderungen und die Aufbereitungsschritte zum Einsatz von Shredderflusen in der Klärschlammbelastung entwickelt. Das Material musste für die Zwecke der Emschergenossenschaft folgende Anforderungen erfüllen:

- Erhöhung des Entwässerungsgrades, d.h das Material muss drainierende Eigenschaften aufweisen,
  - Einstellung des erforderlichen Heizwertes,
  - keine Rückbelastung durch das Filtratwasser der Entwässerung in der Kläranlage,
  - keine Erhöhung der Emissionen bei der Verbrennung,
  - keine nachteilige Belastung der Asche,
  - anwendbar möglichst ohne technische Umrüstungen,
  - kostengünstig,
  - die dauerhafte Verfügbarkeit muss gesichert sein,
  - die derzeitigen Entsorgungswege auch über externe Entsorger bzw. Verwerter müssen möglich bleiben. [3, S.422-423]
-

VW-SiCon hatte eine Zielspezifikation formuliert, in denen neben Angaben zu Heizwerten, Aschegehalt usw. auch Grenzwerte für Schadstoffe wie Schwermetalle und Chlor vorgegeben sind.

Tabelle 4: Qualitätsanforderungen an die Shredderflusen- für Emscher Genossenschaft

<b>Elemente</b>	<b>Gew. %</b>
Chlor Cl	1,57 %
Schwefel S	2 %
	[mg/kg]
Zink Zn	17.500
Kupfer Cu	12.500
Blei Pb	6.000
Barium	6.000
Antimon Sb	500
Cadmium Cd	60
Selen Se	5
Beryllium Be	5
Thalium Tl	2,5
Quecksilber Hg	1
Chrom Cr	1.000
Zinn Sn	750
Nickel	500
Arsen As	50
Vanadium	50
Cobalt Co	50
Unterer HW	20 MJ/kg
Restfeuchte	1,5 Gew %

Eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Verwendung der Flusen ist bislang jedoch noch nicht geglückt. Ein Recycling der Flusenfraktion würde nicht nur die Wirtschaftlichkeit der SLF Aufbereitung erhöhen, sondern auch die Möglichkeit bieten, die Recyclingquote deutlich zu erhöhen.

**Die Technische Universität Wien (TU Wien)** hat ein Verfahren entwickelt und patentiert, mit dem Flusen der Shredder-Leichtfraktion (SLF), wie eine Fraktion aus dem Recycling von Altkraftfahrzeugen, einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Die Flusen haben einen beachtlichen Faseranteil, der eine Wiederverwendung nahelegt. [21]

In dem an der TU Wien entwickelten speziellen Aufbereitungsverfahren kann die Faserlängenverteilung durch die Wahl der Prozessparameter so eingestellt werden, dass diese weitgehend mit der von etablierten faserigen Additiven in der Bauindustrie übereinstimmt. Somit werden aus der SLF Flusen wie ein Recyclingprodukt hergestellt, die als Zuschlagstoff in der Bauindustrie (z:B in bituminösen Baustoffen oder in zementgebunden Baustoffen) eingesetzt werden können. [21]

Ausgangspunkte waren Untersuchungen die zeigen, dass die Flusenfraktion einen Faseranteil von rund 40 % enthält. Dieser Faseranteil verursacht zum einen die extrem schwierigen Handling Eigenschaften, die bislang eine wirtschaftliche Verwertung unmöglich machten. Zum anderen ist die Herstellung von Fasern teuer und energieintensiv, sodass eine Wiederverwendung des Fasermaterials nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch, von Vorteil ist. Als Alternative zu der üblich Deponierung oder Verbrennung der Flusenfraktion, wird aus der Abfallfraktion ein Recyclingprodukt hergestellt, das dann als Zuschlagsstoff in der Bauindustrie eingesetzt werden kann. Anstatt Entsorgungskosten zu entrichten, kann nunmehr ein Erlös erzielt werden. Weiteres erreicht man durch die Wiederverwendung des Fasermaterials eine beträchtliche Einsparung von Energie und Ressourcen und nicht zuletzt, kann die Recyclingquote von Altkraftfahrzeugen erhöht werden. [21]

### **2.4.3 Shredder-Sandfraktionen**

Shreddersand stellt eine Mischung aus Glas, feinkörnigem Eisen, Rost, dünnen Kupferkabeln, blei- und zinkhaltigen Stäuben, Kunststoffteilchen, Flusen sowie Lackresten dar.

Die Fraktion wurde bisher in Österreich als Deponieeinsatzstoff verbracht. In Deutschland wurde sie in Bergwerken als Versatzmaterial genutzt, was mit Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in Zukunft aber nicht mehr praktikabel ist.

Zum einen ist es fraglich, ob der Gesetzgeber das Verfüllen von Bergwerken langfristig als Recycling anerkennen wird. Zum anderen gehen wertvolle Metalle dabei verloren.

Daher müssen neue Wege gefunden werden, den Shredder-sand rohstofflich weiter zu verwerten. Da zukünftig die Anteile an Bundmetallen in den Sanden steigen werden, ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Rückgewinnung interessant. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Edelmetallen, Aluminium, Zink und Kupfer.

---

### 2.4.3.1 Stand der Technik zur Aufbereitung von Shredder-Sanden

In einem Verbundprojekt der Recylex GmbH, der Si Con GmbH, der Volkswagen AG und der Technischen Universität Clausthal wurde eine Shredder-Sandprobe auf Rückgewinnung von feinkörnigen Metallinhalten untersucht.

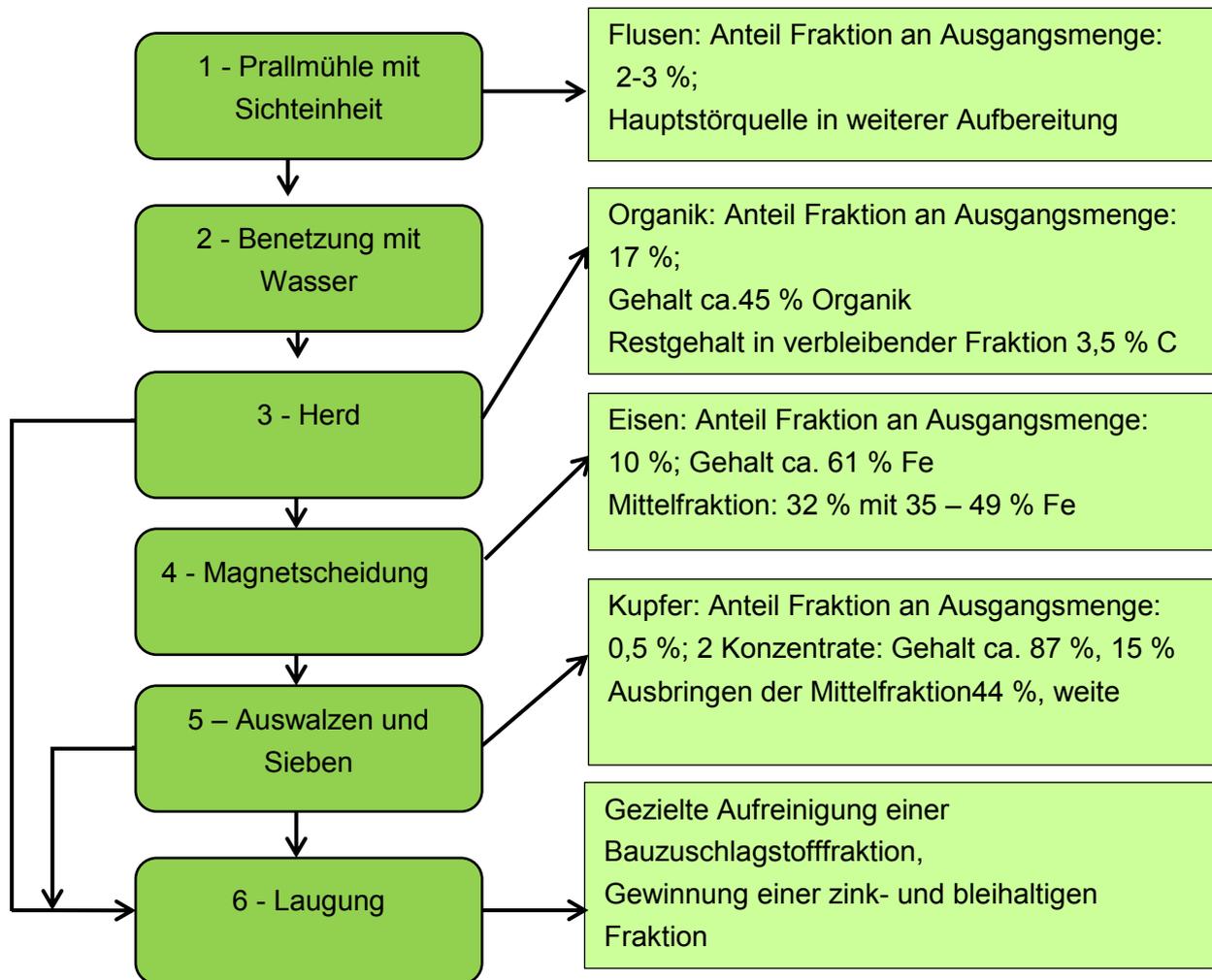


Abbildung 14: Verfahrensschema zur Rückgewinnung von feinkörnigen NE-Metallen aus Shredder-Sanden [10]

Bei diesem Projekt wurde zunächst eine vorgeschaltete trockene Abtrennung der Flusenanteile geprüft, da festgestellt wurde, dass diese Materialien in den nachgeschalteten nassen Prozessstufen einen erheblichen Störfaktor darstellen: So wurde unter anderem festgestellt, dass durch Verknäueln der Textilflusen die die Arbeitsfläche des Herdes als erstes Aggregat der nassen Dichtentrennung sowie die Zu- und Ableitung blockiert werden. [ 14, S.500].

Zunächst wurde eine trockenmechanische Abtrennung der textilen Partikel entwickelt, die basierend auf einer Prallmühle auflockert und im Volumen vergrößert. Durch eine sich direkt anschließende Umlenk – Sichtereinheit wird im Auslass der Prallmühle eine Leichtfraktion abgetrennt. Mittels Siebung auf einer Kreisschwing-Siebmaschine (Taumelsieb) kann der abgesaugte Textilanteil von einer ebenfalls im Leichtgut vorhandenen Feinkornfraktion abgetrennt werden. [ 14, S.501].

Durch Verwendung eines Rührgefäßes und hierzu passender mechanischer Rührwerke konnte eine vollständige Benetzung aller Shredder- Sand-Partikel ohne Zusatz von Benetzungshilfsmitteln unter vertretbarem Zeitaufwand und Energieeintrag erreicht werden. Die vollständige Benetzung aller Partikel ist erforderlich, um Überlagerung von Effekten scheinbarer Dichte gegenüber dem realen spezifischen Gewicht zu verhindern und die Förderfähigkeit des Materials in einer Suspension zu gewährleisten. [14, S.501]

Die Suspension wurde auf einen Herd aufgegeben. Hier werden noch vorhandene Störstoffe, wie Holz, Kunststoff und Lackpartikel weitestgehend abgetrennt. Bei einem Herd handelt sich um ein nass-mechanisch arbeitendes Aggregat zur Dichtentrennung feiner und feinsten Anteile in der Dünnschichtströmung. Über eine bewegte, geneigte Platte wird die Trübe gegeben. Die jeweilige auf das Korn wirkende Relativgeschwindigkeit in Längsrichtung und die durch die Trägheitskräfte beeinflusste Geschwindigkeit in Querrichtung bestimmt die resultierende Bewegungsrichtung auf der Herdfläche. Sowohl Korngröße als auch Korndichte sind von Einfluss. Große leichte Körner werden durch die Dominanz der relativen Geschwindigkeitskomponente in Längsrichtung über die Breitenkante des Herdes ausgetragen, während kleine schwere Körner über die der Aufgabestelle gegenüberliegende Längskante ausgetragen werden (Schwergut). Kleine leichte und große schwere Körner zeigen dieselbe Bewegungsrichtung und bilden das Mittelgut. Der Aufbau- und die Funktionsweise des Herdes sind in Abbildung dargestellt. [ 14, S.502].

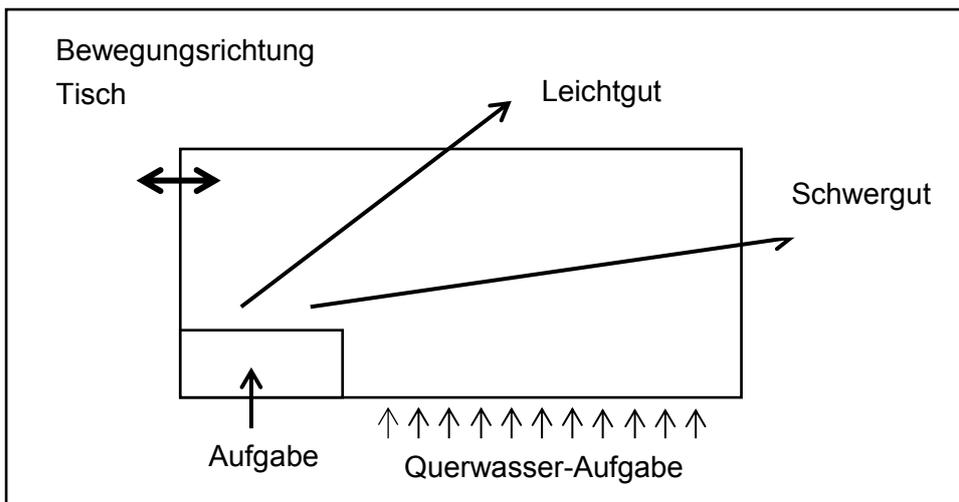


Abbildung 15: Schematische Skizze der Funktionsweise eines Herdes (Draufsicht), [ 14, S.502]

Nach der Dichtentrennung stellt sich das weiter zu behandelnde Material als Mischung aus Glas, Mineralik, Eisen, und NE-Metallen dar. Um die Anteile an Eisen auszutragen und so für den weiteren Einsatz nutzbar machen zu können, läuft das Material durch mehrere Magnetscheiderstufen.

Die Fe- angereicherte Fraktion dient als Ausgangsmaterial zur Erzeugung eines NE-Metall-Konzentrates und eines Bauzuschlagstoffes.

So können in einem nächsten Schritt mittels Stabmühlen-Mahlung und Siebung NE-Metalle, insbesondere Kupfer abgetrennt werden. Der duktile Charakter des Metalls ermöglicht das Auswalzen des hauptsächlich in Drahtform vorliegenden Kupfers. Die auf diesem Wege gewinnbaren Kupferkonzentrate ermöglichen den Einsatz in der Sekundär-Kupfermetallurgie.

Aufgrund der Korngröße des Materials und den geforderten niedrigen Restgehalten scheidet eine weitere nassmechanische Trennstufe hierfür aus. Im nächsten Schritt werden daher die Metallgehalte mittels Laugung nass-chemisch gesenkt.

### 3 Rohgut - Charakterisierung

#### 3.1 Probenbeschreibung und Vorbereitung

Die als Shredder- Sandfraktion bezeichnete Probe liegt im Korngrößenbereich  $< 4$  mm. Die erste Beobachtung zeigt eine hohe Heterogenität der Probe. Mit freiem Auge ist ersichtlich, dass es sich bei dieser Schredder-Sandfraktion um ein Gemenge aus Kunststoffkomponenten, Textilfasern, Metallteilen, mineralischen Granulate, Glasstücken und Holzspänen handelt.



Abbildung 16: Teilprobe- und Probeteilung durch Viertelungsmethode der Shredder-Sandfraktion

Es ist auch Agglomerate zu erkennen, die zu einem großen Teil aus Flusen (Textilfasern, Kunststofffasern und Schaumstoffe) bestehen.

- **Probenteilung durch Viertelungsmethode**

Aus der Eingangprobe (etwa 16 kg) wurde ein Kegel gebildet. Sodann wurde der Kegel abgeplattet und mit Hilfe eines Teilungskreuzes in 4 gleich große Teile aufgeteilt. Zwei gegenüberliegenden Teile wurden erneut vermischt, die restlichen verworfen. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen der gewünschten Probenmenge wiederholt (etwa 2 kg).

- **Trocknung**

Um eine unveränderliche Bezugsbasis für die analytische Bestimmung zu schaffen, wird das Material zunächst getrocknet. Im Regelfall geschieht dies bei  $105$  °C. Da jedoch bei dieser Temperatur schon teilweise Zersetzungen z.B. von Kunststoff eintreten können, und flüchtige Substanzen wie Kraftstoffe in die Gasphase übergehen, muss hier schonender vorgegangen werden. Deshalb soll die Trocknung der Feinfraktion bei  $40$  °C durchgeführt werden.

Die Shredder-Sandfraktion wurde im Trockenschrank (bei  $40$  °C) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. **Die Feuchte wurde zu 0,6 % ermittelt.**

---

### 3.1.1 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung wurde an einer Analyseprobe (50 Gramm) durch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt und ist in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Röntgen-Fluor-Analyse (RFA)

<b>RFA für Eingangsprobe</b>	
<b>Glühverlust, %</b>	39.3
<b>Elemente</b>	%
Aluminium-Al	2.52
Calcium-Ca	7.36
Chlor-Cl	0.61
Kupfer- Cu	0.41
Eisen-Fe	12.80
Magnesium-Mg	1.33
Natrium-Na	1.36
<b>Elemente</b>	ppm
Antimon, Sb	199
Silber, Ag	n.n.
Gold, Au	n.n.
Barium, Ba	5030
Blei-Pb	3710
Brom, Br	292
Cadmium-Cd	n.n.
Calcium-Ca	7.36
Chrom-Cr	1070
Cobalt-Co	n.n.
Mangan, Mn	1560
Molybdän, Mo	130

Die Ergebnisse der chemischen Analyse zeigen die Anwesenheit der Metalle Fe, Cu, Pb und Cr in dem Aufgabegut. Edelmetalle Ag und Au wurden nicht nachgewiesen.

- **Bestimmung der löslichen Bestandteile**

Eine Mischprobe (EW: 50 g) wurde mit einem Rührwerk bei Raumtemperatur 24 Stunden gerührt und dann mit einem Glastrichter und einer Nutsche filtriert und entwässert. Der Filterkuchen wurde im Trockenschrank (bei 40°C) getrocknet. Das Filtrat wurde aufbewahrt und weiter zur chemischen Analyse geschickt.

Die Auswertung ergab einen Anteil löslicher Bestandteile von 0,16 %. Die im Filtrat gelösten Bestandteile wurden durch chemische Analyse ermittelt.

Tabelle 6: Chemische Analyse des SLF-Filtrates -Prüfer: Agrolab Austria GmbH, Akkreditierte Prüf- und Inspektionsstelle

<b>Physikalische- chemische Parameter</b>	Einheit	Ergebnis	Bestimmungsgrenze	Methode
Chlorid(Cl)	mg/l	118	1	EN/ISO 10304-1
<b>Summarische Parameter</b>				
Kohlenwasserstoffe	mg/l	0,23	0,1	ÖN M6608
<b>Schwermetalle und sonstige Metalle</b>				
Chrom (Cr)	mg/l	0,016	0,01	EN ISO 11885
Eisen (Fe)	mg/l	2	0,01	EN ISO 11885
Kupfer (Cu)	mg/l	1,30	0,01	EN ISO 11885
Zink (Zn)	mg/l	1,02	0,01	EN ISO 11885
Arsen (As)	mg/l	< 0,01	0,01	EN ISO 11885
Blei (Pb)	mg/l	0,11	0,01	EN ISO 11885
Cadmium (Cd)	mg/l	< 0,0050	0,005	EN ISO 11885
Quecksilber (Hg)	mg/l	< 0,0005	0,0005	EN ISO 12846
Zinn (Sn)	mg/l	< 0,010	0,01	EN ISO 11885

**Aufgrund dieser chemischen Analyse kann man sehen, dass keine Grenzwerte für Schadstoffe überschritten wurden und damit nass arbeitende Aufbereitungstechnik möglich ist**

## 3.2 Merkmalsklasseanalyse der Eingangsprobe

### 3.2.1 Siebanalyse

Durch die Siebanalyse erfolgt die Auftrennung des Aufgabegutes in Korngrößenklassen, deren Gewicht bestimmt wird. Durch gezielte Untersuchung der Fraktionen mit unterschiedlicher Korngröße lässt sich die korngößenabhängige Verteilung von verschiedenen Stoffen in der Shredder-Leichtfraktion ermitteln.

Bei der Trockenesiebung ergaben sich Schwierigkeiten insbesondere durch die Flusenfraktion (Textilfasern und Kunststoffolie), welche die Sieböffnungen verlegten bzw. feinere Komponenten in den Lückenräumen der Agglomerate zurückhalten. Daher wurde eine Kombination aus Nass- und Trockenesiebung gewählt.

Zunächst wurde die gesamte Probe bei 0,5 mm nass abgesiebt. Der bei 40°C getrocknete Siebrückstand wurde nachfolgend in die Kornklassen 4/2 mm, 2/1 mm und 1/ 0,5 mm eingeteilt. Die Teilprobe, kleiner als 0,5 mm wurde bei den Maschenweiten 0,315; 0,1 und 0,04 mm gesiebt.

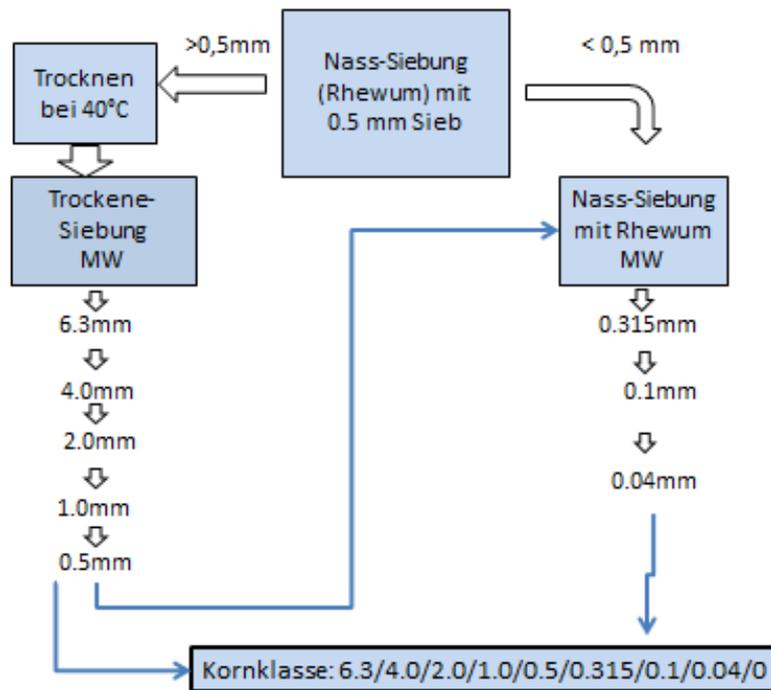


Abbildung 17: Ablaufschema der Siebanalyse

Tabelle 7: Siebanalyse der Eingangsprobe - Tabellarische Darstellung

Größe [mm]		Masse [%]	Summenverteilung	
Kornklasse	Untere Grenze		Rückstand [%]	Durchgang [%]
> 6,3	6.3			
6,3 - 4,0	4	0.03	0.03	99.97
4,0 - 2,0	2	5.56	5.59	94.41
2,0 - 1,0	1	23.33	28.92	71.08
1,0 - 0,5	0.5	31.56	60.48	39.52
0,5 - 0,315	0.315	11.84	72.32	27.68
0,315 - 0,1	0.1	17.43	89.75	10.25
0,1 - 0,04	0.04	5.50	95.25	4.75
0,04- 0		4.75	100.00	0.00
Summe		100.00		

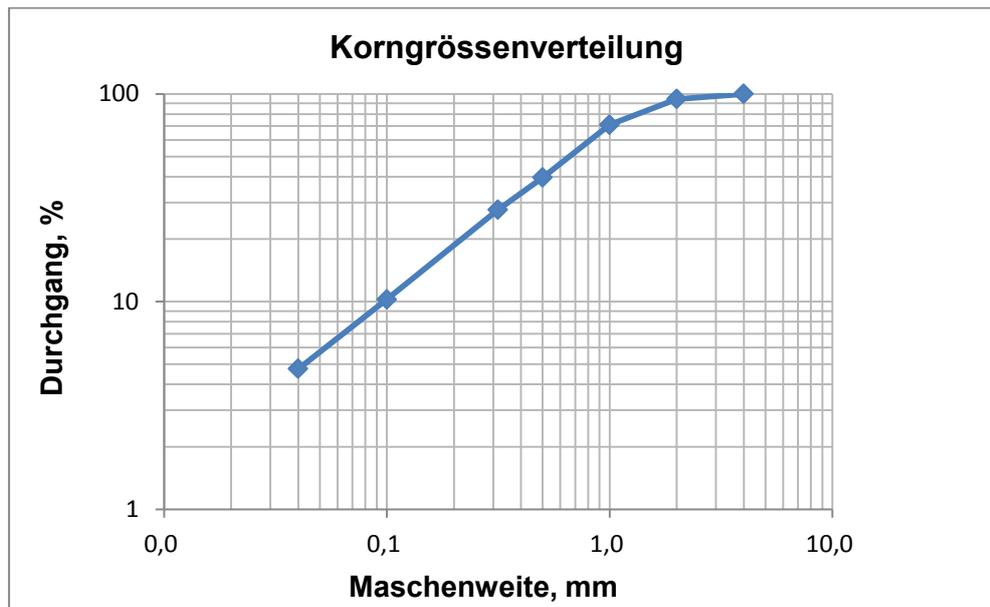


Abbildung 18: Korngrößenverteilung

Aufgrund der oben dargestellten Korngrößenverteilung sieht man ein klassisches Bild für die Durchlaufzerkleinerung. Auffällig ist die Linearisierung kleiner 1 mm

### 3.2.2 Dichte Bestimmung mit dem Helium-Pyknometer

Die Stoffdichten der einzelnen Korngrößenklassen wurden mit dem Helium-Pyknometer bestimmt. Aus jeder Kornklasse wurden 2 Teilproben gemessen und der Mittelwert berechnet. Bis auf die grösste Kornklasse weisen die Ergebnisse keine größeren Unterschiede auf.

Tabelle 8: Dichtebestimmung mit Gas-Pyknometer

Kornklasse (mm)	err. Mittelwert Dichte (g/cm <sup>3</sup> )		
	Messung 1 (g/cm <sup>3</sup> )	Messung 2 (g/cm <sup>3</sup> )	Mittelwert (g/cm <sup>3</sup> )
2.0 - 4.0 mm	1.8996	1.8195	<b>1.860</b>
1.0 - 2.0 mm	2.3298	2.3115	<b>2.321</b>
0.5 - 1.0 mm	2.3907	2.41589	<b>2.403</b>
0.315 - 0.5 mm	2.4875	2.479	<b>2.483</b>
0.1 -0.315 mm	2.5415	2.5407	<b>2.541</b>
0.04 - 0.1 mm	2.4939	2.4815	<b>2.488</b>
< 0.04 mm	2.4595	2.4433	<b>2.451</b>

### 3.3 Handklauben

Beim Handklauben wird durch subjektive optische Beurteilung vor allem Farbe, Glanz, und Form der Einzelkörner bewertet und danach von Hand abgetrennt.

Handklauben wurde an der Kornklasse 4/2 mm mittels eine Lupe und Pinzetten durchgeführt. Die Fraktionen < 2,0 mm konnten aufgrund ihrer Zusammensetzung nicht mehr nach optischen Kriterien händisch sortiert werden.



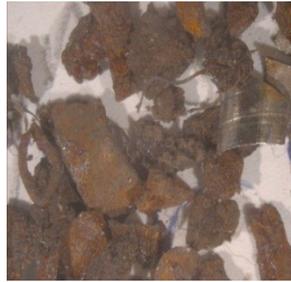
Abbildung 19: Handklauben

Die nachfolgenden Hauptkomponenten der Shredder-Leichtfraktion (Kornklasse: 4/2 mm) sind durch Handklauben abgetrennt worden:

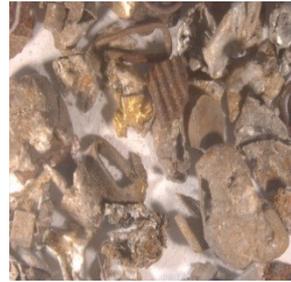
- Kunststoff-Komponenten (harte Granulate, Folie)
  - Mineralische Granulate
  - Flusen (Textilfasern, Kunststofffolie, Schaumstoffe)
  - Glasstücke
  - Metallteile (magnetisch)
  - Nichteisenfraktionen (Kupfer, Aluminium)
  - Holzspäne
  - Lacksplitter
  - Sonstiges (Bodenmaterial, Straßenschmutz, Agglomerate mehrere Komponenten)
-



Kunststoff Granulate



Metall-magnetisch



NE-Metalle



Mineralische Granulate



Flusen



Glasstücke



Lacksplitter



Sonstiges

Abbildung 20: Stereomikroskop Leica MZ 16 - Fotos der geklaubten Fraktionen

- **Prozentueller Massenanteil alle Stoffe in der Shredder-Sandfraktion (2,0 – 4,0 mm)**

Die Ergebnisse der Handklaubung sind als Masseanteile für die ausgewählten Stoffe in der Shredder-Sandfraktion in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Shreddersand (4/2 mm) - Prozentueller Massenanteil alle Stoffe

### 3.4 Glühverlust- und Aschegehaltbestimmung

Der Glühverlust bei 550°C im Muffelofen stellt ein Maß für den Anteil an organischen Verbindungen dar. Der Glühverlust ist auch ein wichtiges Kriterium für die Einstufung von Abfällen in unterschiedliche Deponieklassen.

Zur Bestimmung des Glühverlustes werden die Proben in einem Muffelofen bei einer Temperatur von 550°C (nach EN 12879) bis zur Gewichtskonstanz gegläht werden.

Hat die Probe einen hohen Gehalt an organischen Stoffen, so wird sie eine Stunde bis zum Glühen erhitzt, weil sonst Verluste durch Entflammen eintreten könnten.

#### 3.4.1 Durchführung des Glühverlustes

Zunächst wurden die Probeschalen im Muffelofen erhitzt und nach dem Erkalten im Exsikkator eingewogen. Anschließend wurden für jede Kornklasse (4,0/2,0/1,0/0,5/0,315/0,1/0,04 mm) drei Probeschalen mit der trockenen Proben eingewogen und bei 550°C gegläht. Der Glühverlust wurde auf die Trockenmasse bezogen und wurde in % angegeben.

$$\text{Glühverlust [\%]} = \frac{b-c}{b-a} * 100 \quad \text{Glg. 1}$$

a - Gewicht der Schale

b – Gewicht der Schale mit der zu untersuchenden Probe

c – Gewicht der Schale mit getrockneter Probe

Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle 9 dargestellt:

Tabelle 9: Glühverlust für Kornklassen

Kornklasse (mm)	GV (%)
4.0 - 2.0	37.77
2.0 – 1.0	31.57
1.0 – 0.5	28.65
0.5 – 0.315	21.87
0.315 – 0.1	20.67
0.1- 0.04	21.47
0.04 – 0.1	23.84

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass der organische Anteil in den Kornklassen > 0,5 mm deutlich steigt, wobei die Kunststoffbestandteile überwiegend sind.

Abbildung 22 zeigt die Korrelation zwischen Dichte und Glührückstände.

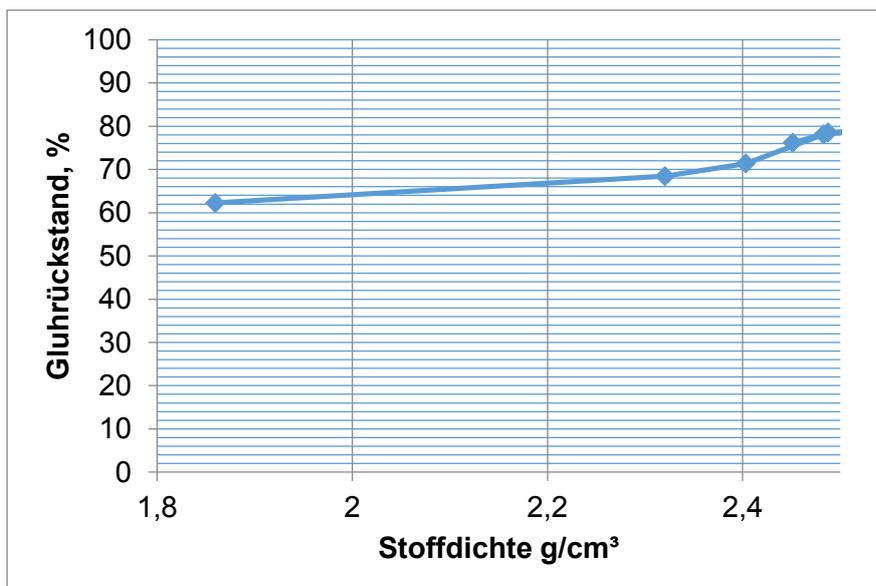


Tabelle 10: Glührückstand- und Dichteverhältnis in die Kornklassen

### 3.5 Schwimm-Sink Analyse

Für jede Kornklasse wurden Schwimm-Sink Analysen (SSA) bei der Trenndichte  $1,7\text{g/cm}^3$  und  $2,7\text{g/cm}^3$  mit  $\text{Na}(\text{WO}_4)_x$  Lösung durchgeführt. Die SSA wurde für die Rohproben aber auch für geglühte Proben gemacht.



Abbildung 22: Schwimm-Sink Analyse mit  $\text{Na}(\text{WO}_4)_x$  Lösung

#### 3.5.1 Auswertungen und Ergebnisse für die Schwimm-Sink-Analyse

Die Auswertungen der Schwimm-Sink Analysen sind in Tabellen dargestellt.

Tabelle 11: Auswertung der Schwimm-Sink-Analyse in den Kornklassen für Eingangsprobe

Kornklasse	Masseanteil	Gehalt, %			Ausbringen, %		
		< 1,7	1,7-2,7	>2,7	< 1,7	1,7 - 2,7	> 2,7
KKI	m,%	g/cm <sup>3</sup>			g/cm <sup>3</sup>		
4,0 - 2,0	5.6	45.82	34.34	19.84	8.5	4.2	4.5
2,0 - 1,0	23.3	33.27	37	29.73	26.0	18.9	28.4
1,0 - 0,5	31.6	30.7	43.3	26.1	32.4	29.9	33.7
0,5 - 0,315	11.8	27.17	50.78	22.05	10.8	13.2	10.7
0,315 - 0,1	17.4	25.96	55.54	18.5	15.1	21.2	13.2
0,1 - 0,04	5.5	23.81	52.19	24	4.4	6.3	5.4
< 0,04	4.7	18.09	61.16	20.75	2.9	6.4	4.0
Summe	100.0	29.90	45.67	24.42	100.0	100.0	100.0

Tabelle 12: Massenverteilung nach der Glühen und Schwimm-Sink-Analyse

Kornklasse mm	Masseanteil m, %	Glührückstand a, %	Inhalt %*%	Masse nach Glühen %	Gehalt, %			Ausbringen, %		
					< 1,7 g/cm <sup>3</sup>	1,7-2,7 g/cm <sup>3</sup>	>2,7 g/cm <sup>3</sup>	< 1,7 g/cm <sup>3</sup>	1,7 - 2,7 g/cm <sup>3</sup>	> 2,7 g/cm <sup>3</sup>
4,0 - 2,0	5.6	62.23	345.8	2.9	4.62	43.25	60.51	1.75	7.5	3.7
2,0 - 1,0	23.3	68.43	1596.5	15.0	7.5	32.85	59.65	14.46	28.9	18.3
1,0 - 0,5	31.6	71.35	2252.0	22.0	15.26	16.74	68	43.28	21.7	30.7
0,5 - 0,315	11.8	78.13	925.2	9.9	12.94	25.69	61.37	16.51	15.0	12.5
0,315 - 0,1	17.4	79.33	1383.0	15.0	7.4	24.03	68.57	14.33	21.2	21.1
0,1 - 0,04	5.5	78.53	431.9	4.6	7.38	15.01	77.61	4.42	4.1	7.4
< 0,04	4.7	76.16	361.6	3.8	10.72	7.17	82.11	5.21	1.6	6.4
Summe	100.0	72.98	7295.9	100.0	7.76	17.01	48.80	100.00	100.0	100.0

Durch die Veraschung sollte geprüft werden, ob eine energetische Verwertung der Flusen mit anschließender Aufbereitung der Asche sich vorteilhaft auf die Verfahrensauswahl auswirkt. Der hohe Feinkornanfall und der Festigkeitsverlust in einigen Bestandteilen der Ascheprodukte stehen dieser Verfahrensvarianten entgegen. Veränderte Löslichkeiten wurden nicht mehr geprüft. Hohe Aschgehalte veranlassten vorab die günstigere Verfahrensvariante zu prüfen, weil weder die Qualität der Aufbereitungsprodukte wesentlich verbessert noch der Verfahrensgang vereinfacht werden kann. (Die Untersuchungen wurden nur mit der nicht-vorbehandelten Eingangsprobe weitergeführt).

Anschließend wurde in den Dichteklassen der Kornklasse 2/1;1/0,5 und 0,5/0,315 mm der Aschegehalt bestimmt. Wegen den geringen Massenanteilen der kleinsten drei Kornklassen, wurde auf die Bestimmung des Glührückstandes dieser Kornklassen verzichtet.

Die ermittelten Ergebnisse für Masseanteil und Aschegehalt sind in der folgenden Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Massenanteil und Aschegehalt für Dichteklasse <1,4; 1,4/1,7; 1,7/2,7 und >2,7 cm<sup>3</sup>

<b>0.315/0.5 mm</b>		
Dichte, g/cm <sup>3</sup>	m (%)	a (%)
< 1.4	6.81	18.45
1.4 -1.7	11.81	41.91
1.7-2.7	62.41	88.4
> 2.7	18.97	93.15
	100	
<b>0.5/1.0 mm</b>		
Dichte, g/cm <sup>3</sup>	m (%)	a (%)
< 1.4	11.09	15.92
1.4 -1.7	13.14	37.86
1.7-2.7	50.86	88.57
> 2.7	24.91	95.27
	100	
<b>1.0/2.0 mm</b>		
Dichte, g/cm <sup>3</sup>	m (%)	a (%)
< 1.4	15.3	14.04
1.4 -1.7	10.62	44.02
1.7-2.7	45.28	89.22
> 2.7	28.8	97.19
	100	

Die Auswertung der Daten erfolgt über das Henry Reinhart Schaubild.

### 3.6 Henry-Reinhardt Schaubild

Sinn des HR-Schaubildes ist durch die spezielle Auswertung der Ergebnisse einer Merkmalsklassenanalyse (Schwimm-Sink-Analyse, Korngrößenanalyse) und der Bestimmung eines charakteristischen Gehaltes in den Merkmalsklassen (z.B. Aschegehalt) die Verwachsungscharakteristik eines Rohgutes in unterschiedlichen Korngrößen darzustellen und das bestmögliche Trennergebnis bei einem bestimmten Trennmerkmalswert abzuleiten. [5]

Auf Basis der ermittelten Ergebnisse für den Massenanteil und den Aschegehalt in den Dichteklassen 1,4; 1,7; 2,7 g/cm<sup>3</sup> und Kornklassen 2/1; 1/0,5 und 0,5/0,315 mm lässt sich die Tabelle für das Henry Reinhardt Schaubild aufbauen.

Die Dichtegrenzwerte wurden aufgrund PVC armer und PVC reicher Kunststoffe (< 1,4 g/cm<sup>3</sup>, 1,4 – 1,7 g/cm<sup>3</sup>) und der Leichtmetalle (Al: 2,7 g/cm<sup>3</sup>). Der Mineralikanteil und die Fe und NE Metalle besitzen eine Dichte > 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Der Aschegehalt dient als leicht zugänglicher Indikator für die (nicht) brennbaren Bestandteile. Die unterschiedlichen Kornklassen sollen die Veränderung des Aufschlusses anzeigen.

Die HR-Tabelle umfasst die Berechnung der Grundverwachsungskurve und der Summenkurven.

Die Ergebnisse sind in folgenden Tabellen und Diagrammen dargestellt.

- **Berechnung und Diagrammdarstellung für Kornklasse 2/1 mm**

Tabelle 14: Eingangsprobe, Kornklasse 2/1 mm, Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (

Grunderwachsungskurve				Summenkurven					
2.0 /1.0 mm				Schwimmgut			Sinkgut		
Dichteklasse	Massseanteil	Aschegehalt	Inhalt	masse	mit. Gehalt	Inhalt	masse	mit.Gehalt	Inhalt
g/cm <sup>3</sup>	m <sub>j</sub> ,(%)	a <sub>j</sub> ,(%)	l, <sub>j</sub> %%	Σm <sub>j</sub>	a, %	Σl <sub>j</sub>	Σm, <sub>j</sub> %	%	%%
			m <sub>j</sub> *a <sub>j</sub>				100	75.01	7501.26
< 1.4	15.3	14.04	214.81	15.3	14.04	214.81	84.7	86.03	7286.44
1.4 - 1.7	10.62	44.02	467.49	25.92	26.32	682.30	74.08	92.05	6818.95
1.7 - 2.7	45.28	89.22	4040	71.2	66.32	4722.19	28.8	96.50	2779.1
> 2.7	28.8	97.19	2799	100	75.21	7521.26			
	100	75.21258	7521						
	a	b	c=a*b	1	3=2/1	2	4	6=5/4	5

Die Berechnung einen mittleren Aschegehalt von 75,2 %. In Dichteklasse < 1,7 g/cm<sup>3</sup> beträgt der Schwimmgutanteil 26 %.

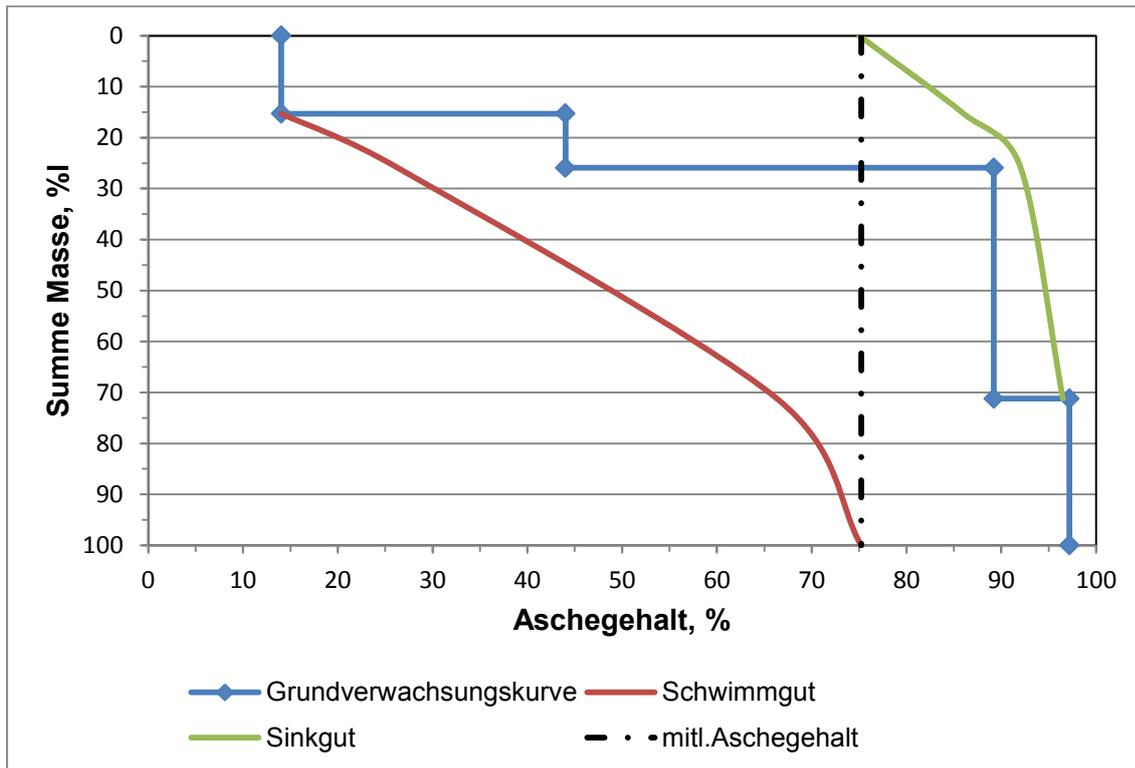


Abbildung 23: Diagramm zum HR-Schaubild für KKI.2,0-1,0mm

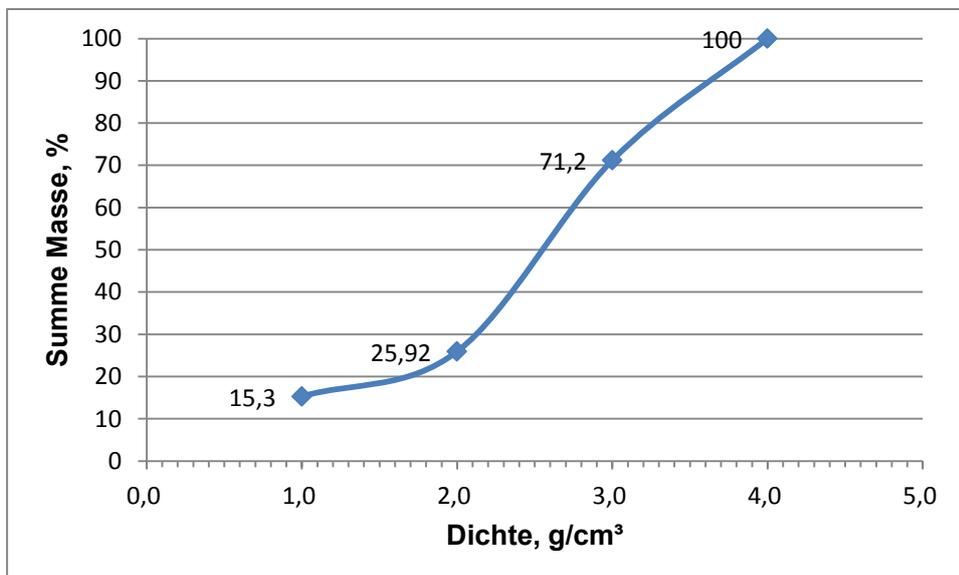


Abbildung 24: Dichtekurve für Kornklasse 2/1 mm

• **Berechnung und Diagrammedarstellung für Kornklasse 1/0,5 mm**

Tabelle 15: Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (Korngröße: 1/0,5 mm)

Grunderwachsungskurve				Summenkurven					
Kornklasse 1/0,5 mm				Schwimmgut			Sinkgut		
Dichteklasse	Masseanteil	Aschegehalt	Inhalt	masse	mit. Gehalt	Inhalt	masse	mit.Gehalt	Inhalt
g/cm <sup>3</sup>	m <sub>j</sub> (%)	a <sub>j</sub> (%)	l,%%	Σm <sub>j</sub>	a, %	Σl <sub>ij</sub>	Σm, %	%	%%
			m <sub>j</sub> *a <sub>j</sub>				100	75.52	7551.88
< 1.4	11.09	15.92	176.55	11.09	15.92	176.55	88.91	82.95	7375.33
1.4 - 1.7	13.14	37.86	497.48	24.23	27.82	674.03	75.77	90.77	6877.85
1.7 - 2.7	50.86	88.57	4504.6702	75.09	68.97	5178.70	24.91	95.27	2373.2
> 2.7	24.91	95.27	2373.1757	100	75.52	7551.88			
	100	75.52	7551.88						
	a	b	c=a*b	1	3=2/1	2	4	6=5/4	5

Die Berechnung ermittelt den mittleren Aschegehalt von 75,5 %. In Dichteklasse < 1,7 g/cm<sup>3</sup> beträgt der mittlere Schwammgutanteil 24,2 %.

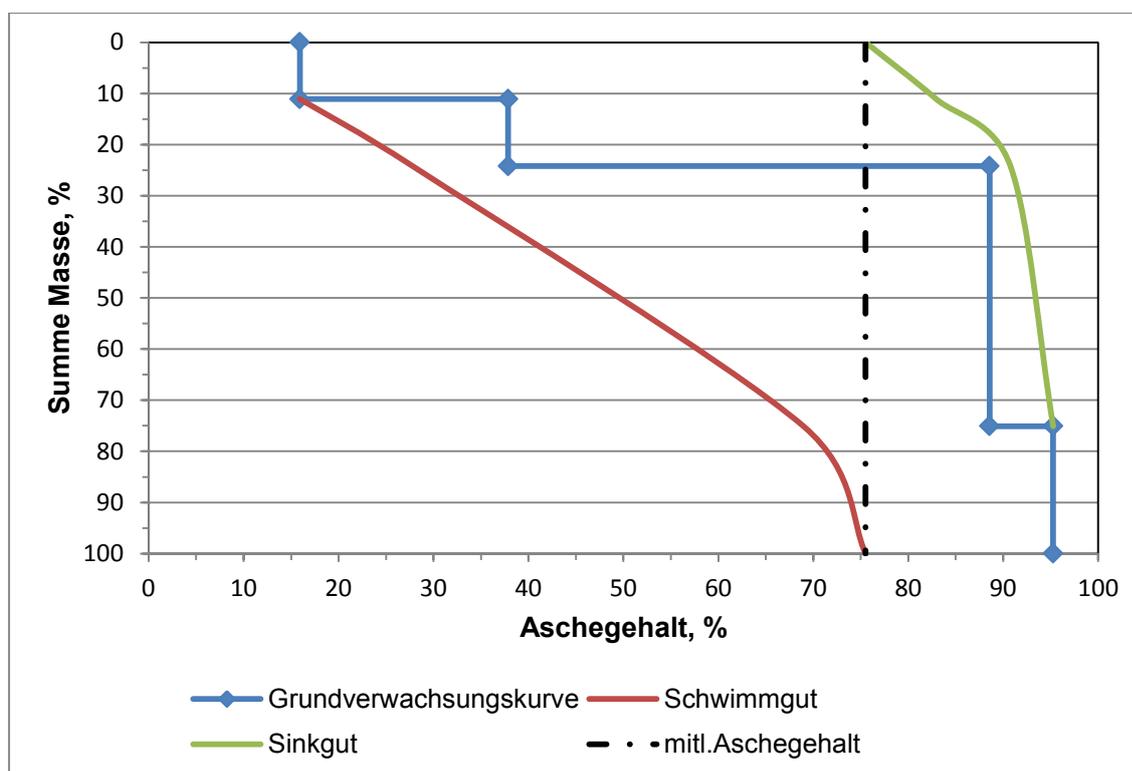


Abbildung 25: Diagramm zum HR-Schaubild für KKI. 1,0-0,5 mm

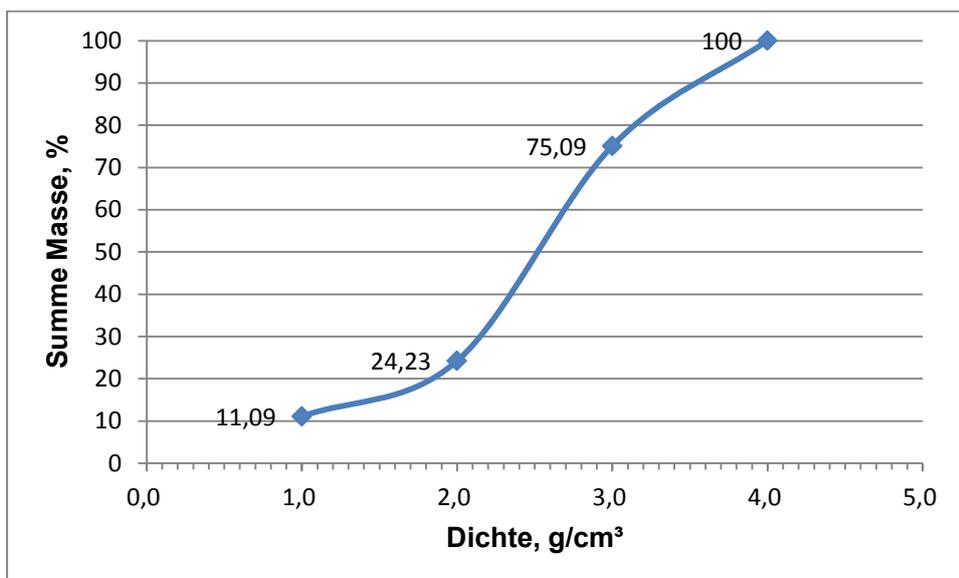


Abbildung 26: Dichtekurve für Kornklasse 1,0/0,5 mm

- **Berechnung und Diagrammdarstellung für Kornklasse 0,5/0,315 mm**

Tabelle 16: Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (Korngröße: 0,5/0,3,15 mm)

Grunderwachsungskurve				Summenkurven					
Kornklasse 0,5 / 0,315 mm				Schwimmgut			Sinkgut		
Dichteklasse	Massseanteil	Aschegehalt	Inhalt	masse	mit. Gehalt	Inhalt	masse	mit. Gehalt	Inhalt
g/cm³	m <sub>j</sub> (%)	a <sub>j</sub> (%)	l,%%	Σm <sub>j</sub>	a, %	Σl <sub>ij</sub>	Σm, %	%	%%
			m <sub>j</sub> *a <sub>j</sub>				100	79.05	7904.71
< 1.4	6.81	18.45	125.64	6.81	18.45	125.64	93.19	83.48	7779.06
1.4 - 1.7	11.81	41.91	494.96	18.62	33.33	620.60	81.38	89.51	7284.10
1.7 - 2.7	62.41	88.4	5517.04	81.03	75.75	6137.64	18.97	93.15	1767.1
> 2.7	18.97	93.15	1767.06	100	79.05	7904.70			
	100	79.05	7904.70						
	a	b	c=a*b	1	3=2/1	2	4	6=5/4	5

Die Berechnung ermittelt den mittleren Aschegehalt von 79 %. In Dichteklasse < 1,7 g/cm³ beträgt der mittlere Aschegehalt 33%.

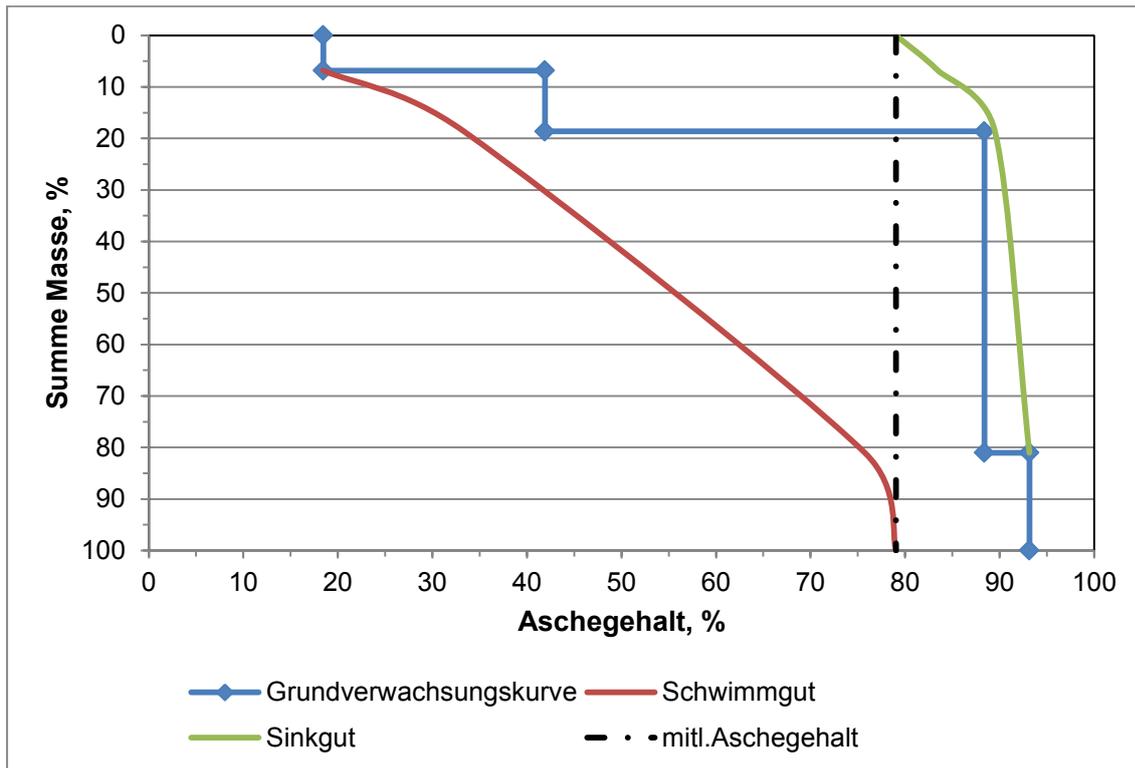


Abbildung 27: : Diagramm zum HR-Schaubild für KKI.0,5-0,315 mm

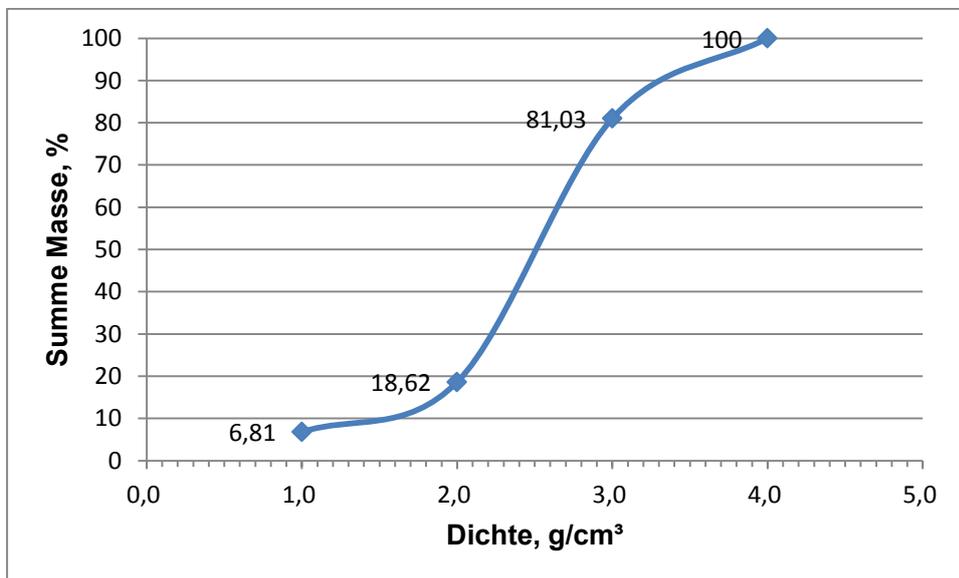


Abbildung 28: Dichtekurve für Kornklasse 0,5/0,315 mm



Aufgrund der Summenmasse, Dichte und Aschegehalts wurde ein Aufschlussverhältnis dargestellt.

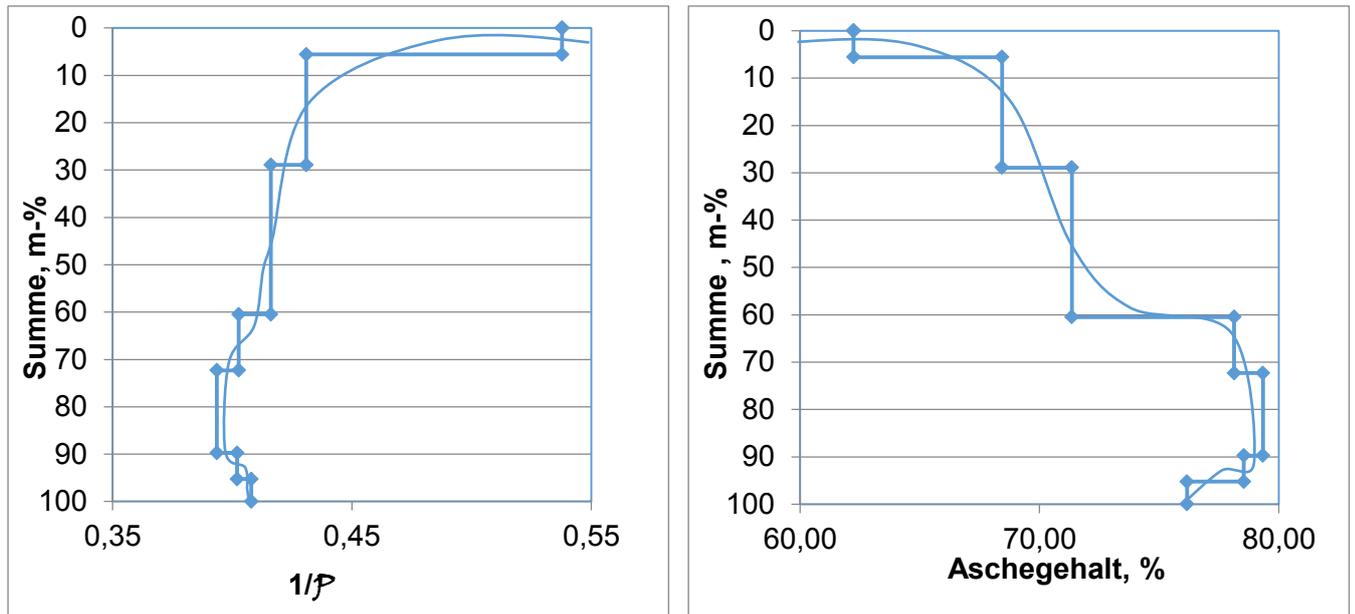


Abbildung 29: a) Verhältnis der Summenmasse mit Dichte, b) Verhältnis der Summenmasse mit Aschegehalt

Das Produkt der Summenmasse und des Reziprokwertes ergeben die Volumenverteilung (siehe Abbildung Nr.30 a):

$$V \left[ \frac{g}{cm^3} \right] = m * \frac{1}{\rho} \quad \text{Glg. 2}$$

m-Massenanteil

$1/\rho$ -Dichtereziprok

### 3.7 Ergebnisse der Rohgutanalytik

Eindeutige Korrelation zwischen Dichte und Aschegehalt. Dichte ist als Sortiermerkmal bestens geeignet. Die Form der Grundverwachsungskurven zeigt, dass die brennbaren Bestandteile frei vorliegen und vergleichsweise leicht abzutrennen sein sollten. Die Mengenanteile an Schwimmgut liegen (abgeschätzt aus der Dichteklasse  $< 1,7 \text{ g/cm}^3$ ) zwischen 6 und 26 Massenprozent. Die Anteile brennbarer Bestandteile nehmen mit der Korngröße ab. So steigt der mittlere Aschegehalt mit sinkender Korngröße und der Anteil der Bestandteile mit einer Dichte  $< 1,7 \text{ g/cm}^3$  Kunststoffe steigt. Die Verteilung großen leichten zu kleinen schweren Körnern legt eine Dichtesortierung in der Dünnschicht nahe. Die Eignung der Gesamtkörnung für diese Methode muss durch Versuche geklärt werden (siehe Kapitel 4). In der Dichtefraktion  $> 2,7 \text{ g/cm}^3$  reichern sich erwartungsgemäß die Kunststoffe an.

### 3.8 Schwimm-Sink-Analyse mit der Fliehkraftunterstützung

Durch diese Versuche soll experimentell geprüft werden, ob durch die Schwerkraftwirkung der gerührten Flüssigkeit eine Auflösung der Agglomerate durch Streckung der Flusen im Schergefälle erzielt und damit eine verbesserte Abtrennung erreicht werden kann. Als Parameter wurden die Drehzahl des Rührers und die Trenndichte variiert.

Dieser Versuch wurde im Labor mittels Rührwerkunterstützung und einem Gefäß (Messzylinder, Vol.1000ml) durchgeführt (siehe Abbildung 30). Eine Mischprobe (Eingangsprüfung) wurde mit der Na<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>x</sub> Schwerlösung (durchgemischt und mit dem Rührer eine halbe Stunde gerührt).

Die Na<sub>2</sub>(WO<sub>4</sub>)<sub>x</sub> Lösung wurde für die Trenndichten 1,7- und 2,7 g/cm<sup>3</sup> vorbereitet.

Dieses Verfahren wurde mit drei verschiedenen Drehzahleinstellungen ( 2000,1500 und 1000 U/min.) durchgeführt.

Während des Rührvorganges kam es zu keiner Entmischung von Leichtgut an der Oberfläche der Schwereflüssigkeit. Die Rührdauer betrug etwa 30 Minuten.

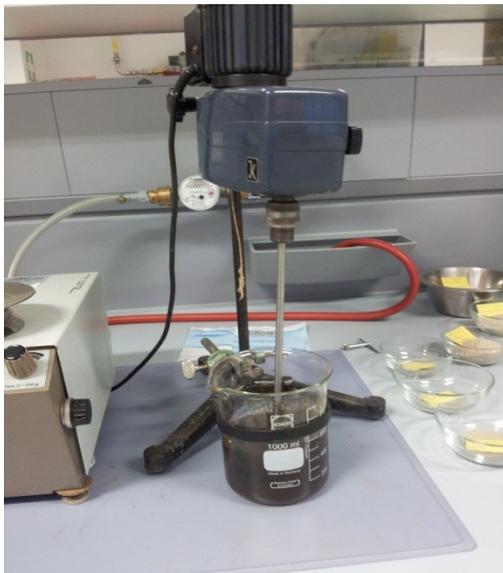


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur rührwerksunterstützten Schwimm-Sinkanalyse bei den Trenndichten 1,7g/cm<sup>3</sup> und 1,4g/cm<sup>3</sup>

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 17 dargestellt. Die Massenbilanzen beziehen sich auf die getrockneten Proben. Die Glühverluste wurden für jede Probe bestimmt.

Tabelle 17: Bilanzierung der Aschegehalte und der Glühverluste bei den Trenndichten 1,4 und 1,7 g/cm<sup>3</sup> bei variiert Drehzahl des Rührwerkes

SSA 1,7 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	1000 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		rmj (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	19.9	24.86	75.14	6.41	65.37
	SG	80.1	90.11	9.89	93.59	34.63
	Summe	100	77.13	22.87	100.00	100.00
SSA 1,7 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	1500 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		rmj (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	24.14	26.79	73.21	8.94	63.94
	SG	75.86	86.86	13.14	91.06	36.06
	Summe	100	72.36	27.64	100.00	100.00
SSA 1,7 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	2000 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		m (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	23.23	22.45	77.55	6.97	71.63
	SG	77.67	90.52	9.48	93.93	29.27
	Summe	100.9	74.85	25.15	100.90	100.90
SSA 1,4 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	1000 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		m (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	14.38	16.77	83.23	3.15	50.98
	SG	85.62	86.56	13.44	96.85	49.02
	Summe	100	76.52	23.48	100	100
SSA 1,4 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	1500 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		m (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	14.2	19.98	80.02	3.77	45.96
	SG	85.8	84.43	15.57	96.23	54.04
	Summe	100	75.28	24.72	100	100
SSA 1,4 g/cm <sup>3</sup>	Aufgabe	2000 U/min	a (%)	100-a (%)	Inhaltsausbringen	
		m (%)			r(a),%	r(1-a),%
	LG	10.84	14.22	85.78	2.04	38.33
	SG	89.16	83.22	16.78	97.96	61.67
	Summe	100	75.74	24.26	100	100

Aufgrund dieser Ergebnisse sieht man beim folgenden Diagramm (Abbildung 32) eine prozentuelle Massenverteilung für brennbare und unbrennbare Bestandteilen abgeschätzt durch den Aschegehalt in Abhängigkeit von der Drehzahl des Rührwerkes.

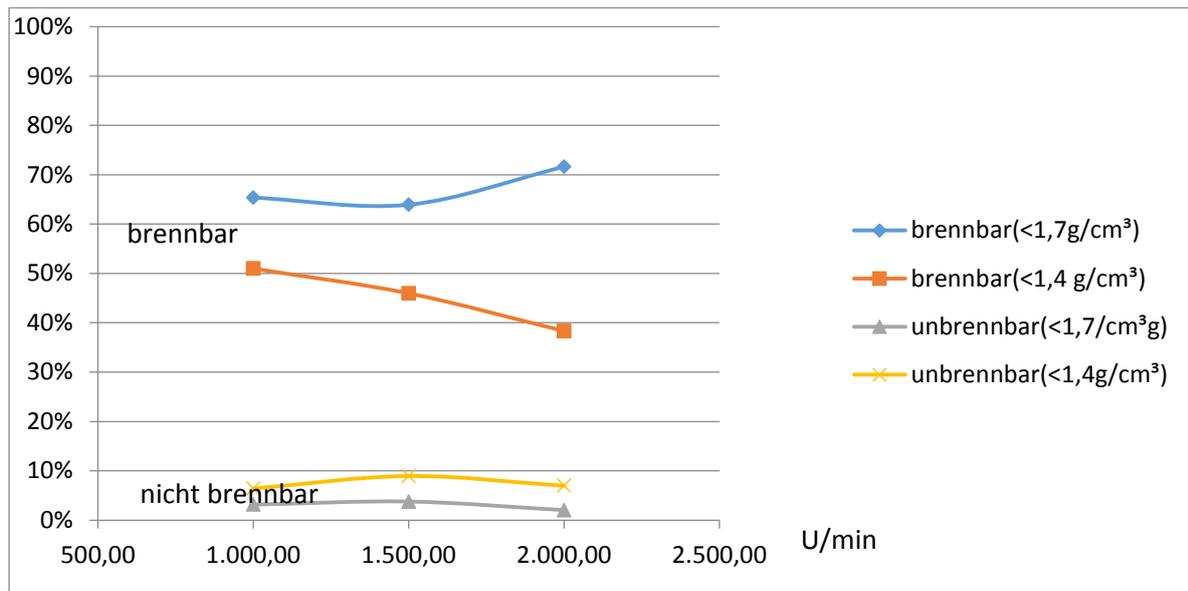


Abbildung 31: Rührwerksunterstützte Schwimm Sink- Analyse. Inhaltsausbringen für brennbare und unbrennbare Bestandteile bei den Trenndichten  $1,7\text{g/cm}^3$  und  $1,4\text{ g/cm}^3$ . Die brennbaren und unbrennbaren Bestandteile werden über den Aschgehalt abgeschätzt.

Das Inhaltsausbringen wird gewählt, um Aussagen unabhängig vom mittleren Aschegehalt in der Aufgabe zu machen. Die Versuche

Der Aschegehalt wird zur Abschätzung der unbrennbaren Bestandteile herangezogen. Die exakte Bestimmung brennbaren Bestandteile wurde nicht durchgeführt.

Aufgrund der obigen Abbildung ist ersichtlich, dass die Drehzahl des Rührwerkes keinen großen Einfluss auf das Inhaltsausbringen der unbrennbaren Bestandteile bei beiden Trenndichten hat. Erwartungsgemäß erreicht das Inhaltsausbringen an unbrennbaren Bestandteilen bei der höheren Trenndichte den höheren Wert.

Steigende Drehzahl führt bei geringerer Trenndichte zu einer Abnahme des Ausbringens an brennbaren Bestandteilen, während das Ausbringen der brennbaren Bestandteile bei höherer Trenndichte steigt. Bei geringerer Trenndichte sinkt entsprechend der Aschegehalt im Schwergut, was als Verbesserung der Trennwirkung bei erhöhter Drehzahl gedeutet wird.

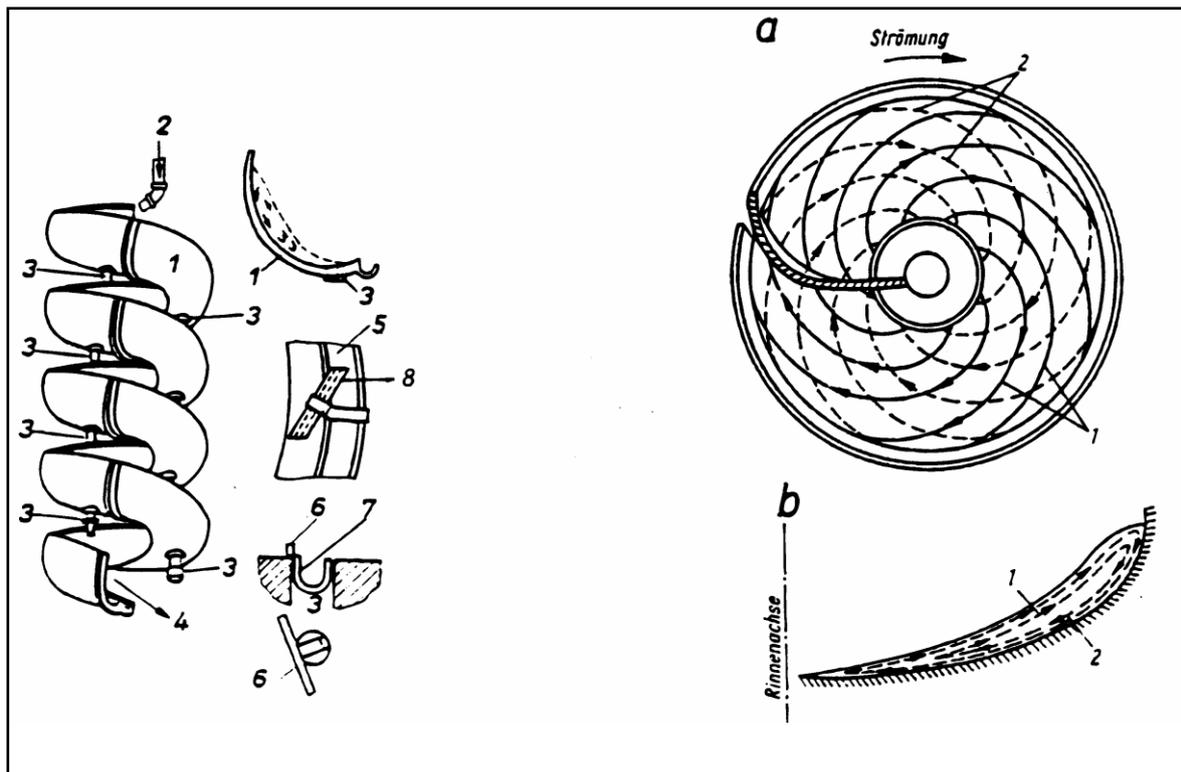
Bei der rührwerkunterstützten SSA im Vergleich mit stationärer SSA sieht man deutlich bessere Trennbarkeit, da der Fliehkrafteinfluss bewirkt bessere Trennung. Dadurch konnten die anhaftende Bestandteile abgetrennt werden. Aus rückgerechneten Werten der beiden SSA ( $1,7\text{ g/cm}^3$ ) ergab der mittlere Anteil des Schwimmgutes bei stationärer SSA 29 % und bei rührwerksunterstützter SSA 22 %.

## 4 Vorbereitung und Durchführung der Trennversuche von Flusen von Shredder – Sandfraktion (< 4 mm)

Aufgrund der Ergebnisse der Rohgutcharakterisierung der Shredder-Sandprobe in Korn- und Dichteklassen und dem Wissen über die Trennwirkung in Apparaten der Dichtesortierung in der Dünnschichtströmung, wird der Wendelscheider für weitere Trennversuche ausgewählt.

### 4.1 Stoffliche Trennversuche mit dem Wendelscheider

Der Wendelscheider stellt eine Spezialform der Hydrorinnen dar. Bei der Trennung nach der Dichte, werden zusätzlich Zentrifugalkräfte für die stoffliche Trennung ausgenutzt. Die Trübe fließt in den Schraubenwindungen abwärts. In der Rinne kann man dabei drei Strömungen abgrenzen: die Hauptströmung längs der Wendel sowie eine an der Trübeoberfläche nach außen und am Rinnenboden nach innen gerichtete Querströmung. Im Inneren hat die Trübeströmung eine relativ geringe Dicke, die aber nach außen wesentlich ansteigt. [6, S. 89-90]



- 1- Rinnenkörper
- 2- Aufgabe
- 3- Schwer-bzw. Zwischengutasträge
- 4- Leichtgutaustrag

Strömung in einer Wendelrinne  
 a- Draufsicht  
 b- Querschnitt  
 1 und 2 – Strömlinienverlauf im oberen bzw. unteren Teil der Rinnenströmung

Abbildung 32: Wendelrinne, Humphreys-Bauart [16, S.89]

Für den Trennerfolg sind Form, Höhe und Abstände dieser Einbauten ausschlaggebend. Die Kräfte, die auf ein Korn im Wendelscheider wirken sind in der Abbildung 24 dargestellt. Körner, die sich in der Trübeströmung mit größerem Bodenabstand einordnen, daher vor allem spezifisch leichtere Körner, bewegen sich unter der Einwirkung von Schleppkraft, dynamischem Auftrieb, scheinbarem Gewicht, Zentrifugalkraft. Ihre Längsgeschwindigkeit entspricht etwa der des Fluiden, so dass sie relativ großen Zentrifugalkräften ausgesetzt sind. Hinzu kommt, dass die Schleppkraftkomponente aufgrund der Querströmung ebenfalls nach außen wirkt. [6, S. 91]

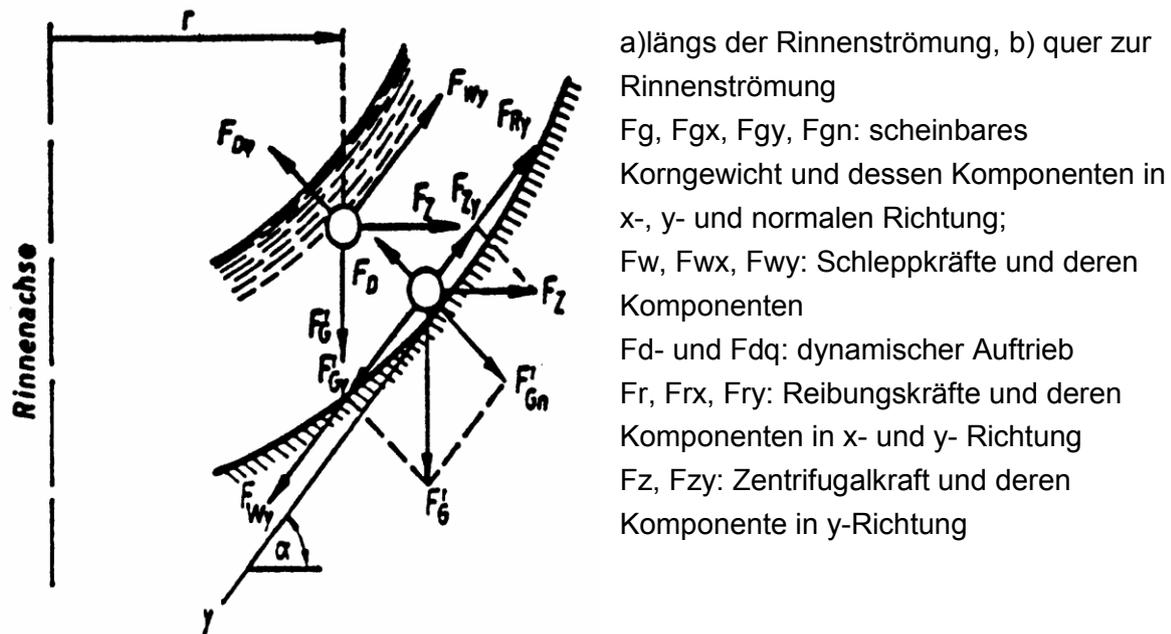


Abbildung 33: Kräfte auf einen Körper im Wendelscheider [6, 90]

Die spezifisch leichteren Körner ordnen sich infolgedessen im äußeren Bereich der Rinnenströmung ein. Die spezifisch schwereren Körner befinden sich in den unteren Trübeschichten in Bodenkontakt. Auf letztere wirkt deshalb in besonderem Maß die Reibungskraft. Sie bewegen sich in Längsrichtung wesentlich langsamer als die mittlere Trübeströmung und werden quer zur Rinne aufgrund der Fliehkraftwirkung nicht so weit transportiert wie die spezifisch leichteren Körner. Daher ordnen sich die kleinen spezifisch schwereren Körner vorzugweise im inneren Teil der Rinnenströmung ein. [6, 91]

Im Fall des Bodenkontaktes gilt außerhalb der Walzenbewegung, dass die kleinen schweren im innersten Bereich der Rinne zu liegen kommen, während die großen schweren und die kleinen leichten aufgrund etwa gleicher resultierender Kräfte aus nach außen gerichteter Schleppkraft und entgegengesetzter Reibungskraft weiter in der Mitte der Rinne anzutreffen sind. Die großen leichten befinden sich auf einem noch weiter außenliegenden Radius. Solche Körner die den Bodenkontakt verlieren (plattige Körner, ganz kleine leichte Körner) werden mit der Wasserströmung mitgerissen.

Hierbei sollte die obere Korngröße des Schwergutes 1 mm möglichst nicht überschreiten, während Leichtgütkörner bis etwa 3 mm Korngröße noch kaum stören.

Weitere wichtige Parameter, die die Sortierung mittels Wendelscheider beeinflussen und optimieren können, sind das Rinnenprofil, der Rinnendurchmesser, die Ganghöhe, Windungszahl sowie die Anordnung und Anzahl der Produktausträge. Die Ganghöhe der Standard – Rinnen betrug 342 mm. [6, S.91]

Die Ganghöhen der Wendeln sind bei wenigen Bauarten auch verstellbar. Größere Ganghöhen, d.h. größere Rinnenneigungswinkel, ermöglichen höhere Durchsätze und Anreicherung, bewirken aber auch ein geringeres Wertstoffausbringen. Sie sind deshalb bei genügend hohen Dichtedifferenzen und geringem Wertstoffgehalt vorzuziehen. Demgegenüber eignen sich kleiner Ganghöhen bei geringen Dichtedifferenz und größerer Feinheit des Aufgabegutes. [6, 92-93]

Der günstigste Feststoffvolumenanteil in der Aufgabetrübe hängt vor allem von den Guteigenschaften (Korngrößen- und Korndichtverteilung), dem Rinnenprofil und der Ganghöhe ab und liegt etwa im Bereich zwischen 10 und 29 Vol.-%. [6, 95]

Ziel eines Trennprozesses ist das Zerlegen eines Stoffgemisches in drei Produkte: Leichtgut, Mittelgut und Schwergut. [16, S.4]

## 4.2 Versuchsdurchführungen und Ergebnisse

Alle Versuche wurden im Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung durchgeführt.

- **Verwendete Geräten:**

- Wendelscheider (Humphreys Bauart)
- Wendelscheider (FLS Smidth Bauart, Typ M, 5 Windungen, „Erzspirale“)
- Sala - Kreiselpumpe (Raumvolumen von 25 l)
- Frequenz-Umrichter zur Einstellung der Wasserleistung

- **Zielsetzung**

Das Ziel der Wendelscheider Versuche ist die stoffliche Trennung der Shredder-Sandfraktion mittels der Zentrifugalkräfte der Wendelrinne und der Reibungskräfte und die Abscheidung der Sandfraktion durch die Wendelrinne in drei Fraktionen:

- Leichtgut (Flusen-Mischung aus leichten, porösen faserigen Werkstoffen)
  - Mittelgut (Kunststoffgranulate, Mineralische Granulate, Glass)
  - Schwergut (Metallbestandteile)
-

### 4.2.1 Versuche mit dem Wendelscheider (Humphreys Bauart)

Die Versuche mit der Shredder-Sandprobe (< 4 mm) wurde im Versuchs-Technikum bei verschiedenen Anlagenzusammenstellungen zwischen Wendelscheider(Humphrey-Spirale) und Sala-Kreiselpumpe durchgeführt.

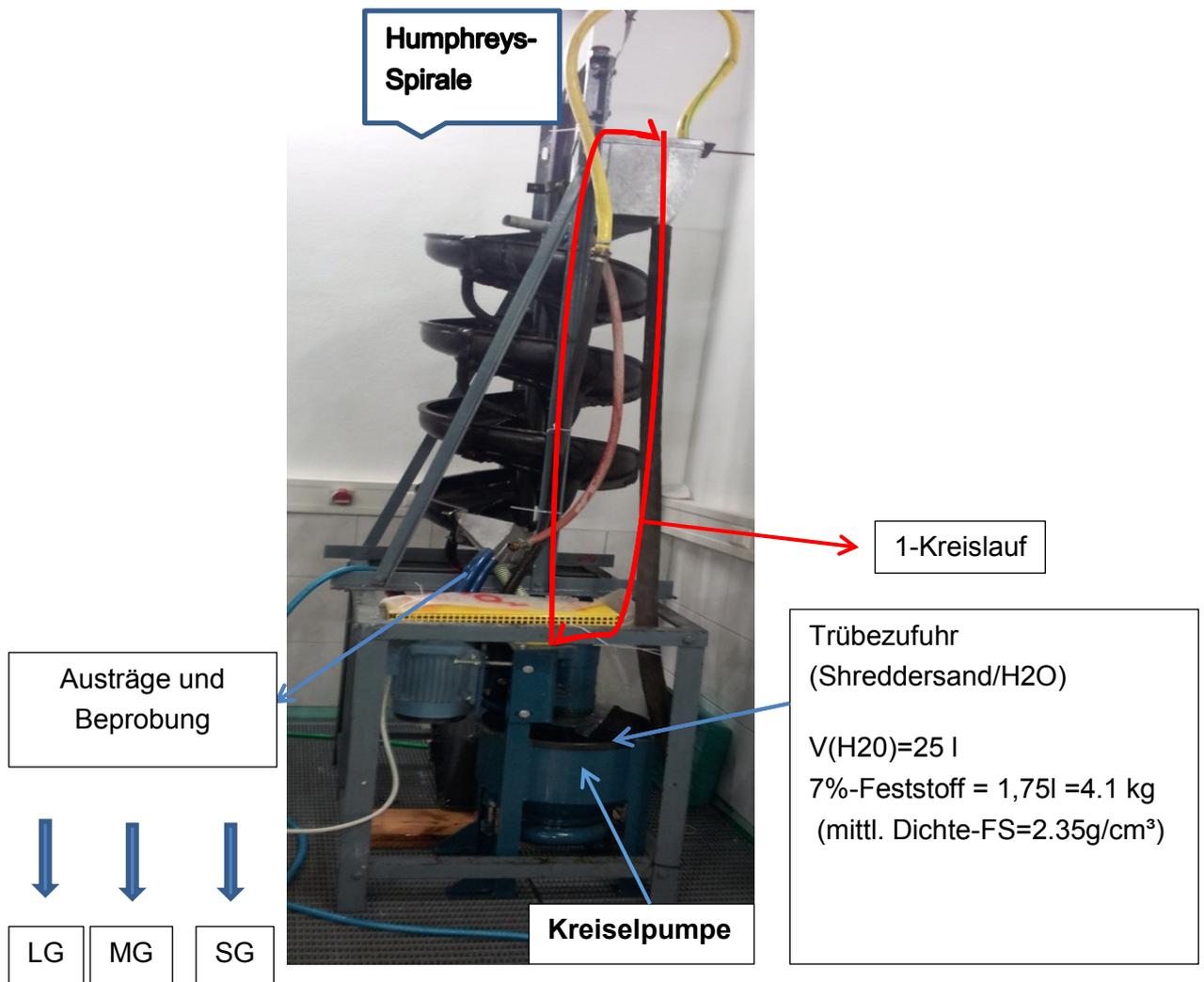


Abbildung 34: Pilotanlage im -Technikum

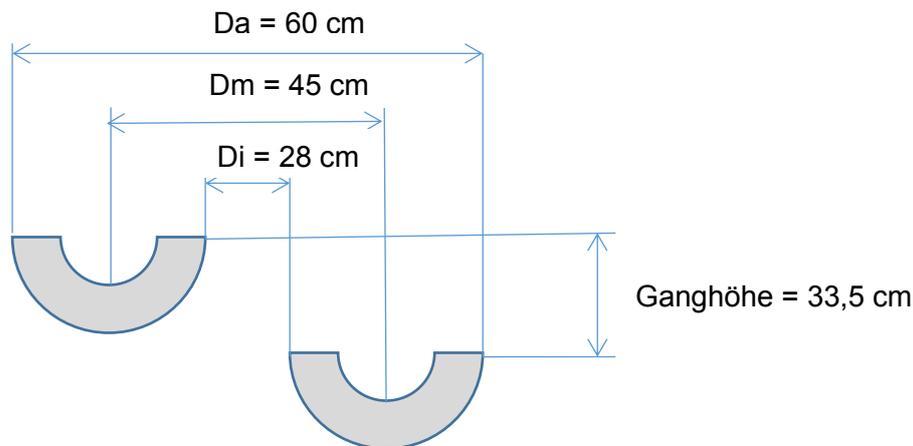


Abbildung 35: Geometrie der Wendelrinnen – Humphreys Bauart

Die geometrischen Daten und technischen Kennwerte sind:

- der Wendelscheider ist mit 4 Wendelrinnen ausgestattet und die Ganghöhe der Wendelrinne ist 33,5 cm
- Rinnendurchmesser: D - außen 60 cm, D - mittlere 45 cm, D-innen 28 cm,
- Gesamthöhe des Wendelscheiders ist 190 cm,
- Die Auslassstutzen der Pumpe bis Aufgabepumpe beträgt 300 cm,
- Volumen der Kreiselpumpe ist 30 l,
- Der Feststoffvolumenanteil ist für 7 Vol.-% berechnet. Dies entspricht 14 m-% bei einer Stoffdichte von 2,2 g/cm<sup>3</sup>.

Auf Basis der geometrischen Daten kann man den Weg für eine Umdrehung und die mittlere Steigung der Wendelrinne berechnen. Der Weg für eine Umdrehung beträgt 141 cm

Aufgrund der Ganghöhe und des Weges für eine Umdrehung beträgt die mittlere Steigung der Wendelrinne 15°.

Die Trübeaufgabe und Homogenisierung erfolgte über die Kreiselpumpe, die mit der Humphreys-Spirale im Kreis verbunden ist und mit einer Bypass-Schaltung zur gleichmäßigen Aufgabe auf die Spirale ausgestattet ist. Die Trübeleistung wurde mit Frequenzumrichter bei etwa 48 Hz (2,5 m<sup>3</sup>/h) geregelt.

Das suspendierte Aufgabegut in der Sala-Kreiselpumpe wurde mittels Schlauch zum Aufgabepunkt transportiert und in der Rinne des Wendelscheiders abwärts durch den Einfluss von Schwerkraft und Zentrifugalkraft bzw. weiteren oben beschriebenen Wirkungsmechanismen in eine Leicht, eine Mittel und eine Schwerfraktion getrennt. Diese werden durch die entsprechenden Austräge gelenkt und wieder durch die Kreiselpumpe in den Kreislauf geführt.

Die zeitkontrollierte Beprobung erfolgte direkt bei den Austrägen der Wendelscheider. Fünf Einzelproben wurden zu einer Sammelprobe vereinigt.

Die Durchführung und Beprobung erfolgte nach nachfolgendem Fließbild.

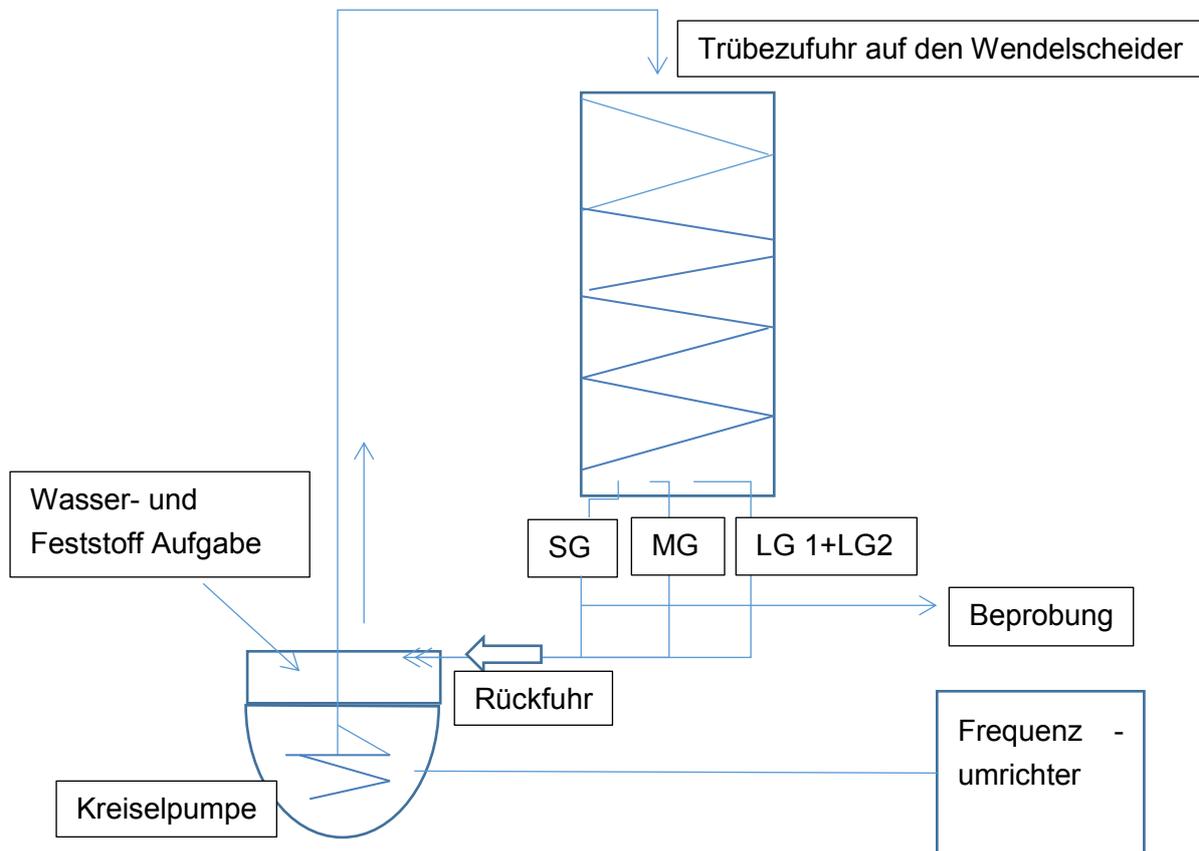


Abbildung 36: Fließbild des Wendelscheiderversuchs (Humphreys Bauart)

Bei den durchgeführten Versuchen wurden mehrere Probleme festgestellt:

- Schwergutbestandteile sedimentieren auf dem Boden der Sala-Kreiselpumpe und blockieren den Auslassstutzen
- Grobe Körner verstopfen das T-Stück (Bypass- Schaltung) und machen einen kontinuierlichen Materialfluss und gleichmäßige Parametereinstellung unmöglich

Die Trübedurchsätze und Beprobungsergebnisse sind in der nächsten Tabelle gezeigt.

Tabelle 18: Durchsätzen an den Austrägen des Wendelscheiders und Massenbilanz der Produkte

Produkte	Beprobte Trübe		trockene FS-Proben		
	Trübestrom	Durchsatz	Summe, m FS	Masse FS	Masse FS
	g/sek.	%	g	g/sek.	%/sek.
LG1	121	16.0	70	3.1	6.5
LG2	550	72.9	236	17.5	36.8
MG	53	7.0	118	8.7	18.3
SG	30	4.0	250	18.2	38.4
Aufgabe	754	100		47.5	100

- **Dichtebestimmung mit dem Gas-Pyknometer**

Für die Wendelscheiderprodukte wurde nach der Trocknung (bei 60°C) mit dem Helium-Pyknometer die Dichtebestimmung durchgeführt.

Tabelle 19: Dichtebestimmung mit Akku Pyk 1330 für Wendelscheiderprodukte

<b>Dichte Bestimmung mit Gas-Pyknometer</b>				
<b>Probebezeichnung</b>	<b>err. Mittelwert Dichte (g/cm<sup>3</sup>)</b>			
	<b>Messung 1</b>	<b>Messung 2</b>	<b>Messung 3</b>	<b>Mittelwert</b>
<b>LG1</b>	1.988	1.976	1.979	<b>1.981</b>
<b>LG2</b>	1.87	1.927	1.949	<b>1.915</b>
<b>MG</b>	2.276	2.18	2.219	<b>2.225</b>
<b>SG</b>	3.089	3.101	3.091	<b>3.094</b>
<b>Aufgabeprobe</b>	2.18	2.235	2.182	<b>2.199</b>

Die obige Tabelle zeigt einen deutlichen Dichteunterschied zwischen Leichtgut und Schwergut.



Leichtgut



Mittelgut



Schwergut

Abbildung 37: Mikroskopische Fotos der Wendelscheiderprodukte

Aufgrund der Fotos der Produkte am Stereomikroskop ist ersichtlich, dass beim Leichtgut große Menge der Flusen vertreten sind, beim Mittelgut überwiegend Kunststoffgranulate und mineralische Körner und beim Schwergut metallische Bestandteile.

Die chemische Zusammensetzung wurde an den trockenen Produkten mittels RFA-Methode bestimmt.

Tabelle 20: Chemische Zusammensetzung für die Wendelscheiderprodukte-Humphreys Bauart

RFA für Humphreys - Spirale Produkte					
	Aufgabe	LG1	LG2	MG	SG
<b>Glühverlust, %</b>	26.4	40.9	46.4	24.1	4.9
<b>Elemente</b>	%				
Aluminium-Al	2.52	2.62	2.22	2.7	2.14
Calcium-Ca	7.36	5.79	5.36	9.03	7.5
Chlor-Cl	0.61	0.31	0.61	1.04	0.12
Kupfer- Cu	0.41	0.26	0.21	0.5	0.95
Eisen-Fe	12.8	11.6	9.43	7.63	20.3
Magnesium-Mg	1.33	1.21	1.22	1.48	1.48
Natrium-Na	1.36	0.63	0.62	1.88	2.57
<b>Elemente</b>	ppm				
Sb	199	83	193	317	n.n
Silber, Ag	n.n	n.n	n.n	n.n	n.n
Gold, Au	n.n	n.n	n.n	n.n	n.n
Ba	5030	3930	3940	6030	3780
Blei-Pb	3710	5280	4530	2620	3980
Br	292	178	341	546	n.n
Cadmium-Cd	n.n	65	75	n.n	n.n
Chrom-Cr	1070	638	697	1366	2040
Cobalt-Co	n.n	97	86	19	95
Mangan, Mn	150	1590	130	1200	2530
Molybdän, Mo	130	75	87	78	131
Kalium, K	4060	2980	2630	4270	4940

*n.n – nicht nachweisbar*

Die Ergebnisse der chemischen Analysen zeigen den Verbleib der Metalle Fe, Al, Cu, Pb, Cr in der Leichtgutfraktion, jedoch auch eine Anreicherung der Metalle Fe, Cu, Pb und Cr in der Schwergutfraktion. Dasselbe sollte auch für Edelmetalle gelten. Diese konnten aber nicht nachgewiesen werden.

Basierend auf dem Massengehalt der chemischen Elemente (siehe Tabelle 21) wurde das mittlere Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente ausgewertet.

Tabelle 21: Inhaltsausbringen für ausgewählte chemische Elemente

Produkte	Masseanteil	Gehalt, %				Ausbringen, %			
	%	Al	Cu	Fe	CL	Al	Cu	Fe	Cl
LG1	6.5	2.62	0.3	11.6	0.31	7.4	3.5	5.6	4.2
LG2	36.8	2.22	0.21	9.43	0.61	35.5	14.0	25.9	46.7
MG	18.3	2.7	0.5	7.63	1.04	21.5	16.5	10.4	39.6
SG	38.4	2.14	0.95	20.3	0.12	35.7	66.0	58.1	9.6
<b>Aufgabe</b>	100	2.3	0.6	13.4	0.5	100.0	100.0	100.0	100.0

Produkte	Masse, %	Gehalt,ppm				Ausbringen,ppm			
	%	Sb	Pb	Cd	Cr	Sb	Pb	Cd	Cr
LG1	6.5	83	5280	65	638	4.0	8.5	13.3	3.1
LG2	36.8	193	4530	75	697	52.8	41.5	86.7	19.3
MG	18.3	317	2620	0	1366	43.2	11.9	0.0	18.8
SG	38.4	0	3980	0	2040	0.0	38.0	0.0	58.8
<b>Aufgabe</b>	100	134.4	4018.0	31.8	1331.3	100.0	100.0	100.0	100.0

Produkte	Masse, %	Gehalt,ppm				Ausbringen,ppm			
	%	Mo	Co	K	Mn	Mo	Co	K	Mn
LG	6.5	75	97	2980	1590	4.8	8.1	5.0	7.7
LG2	36.8	87	86	2630	130	31.6	40.6	25.2	3.6
MG	18.3	78	19	4270	1200	14.1	4.5	20.3	16.4
SG	38.4	131	95	4940	2530	49.6	46.8	49.4	72.4
<b>Aufgabe</b>	100	101.5	77.9	3839.9	1342.3	100.0	100.0	100.0	100.0

### • Ergebnisse

Die rückgerechnete Aufgabedichte liegt bei  $3,3 \text{ g/cm}^3$ . Daher passen die direkt bestimmte Aufgabedichte und die zurückgerechnete Aufgabedichte nicht zusammen.

Die Bilanzierung der rückgerechnete Analysewerte und gemessenen Werte passen teilweise gut (weil Abweichung  $< 10 \%$ ) für Fe, Ca, Al, K, aber nicht gut für Kupfer und Chlor. Mehr Kupfer in der Aufgabe und weniger Chlor deutet wieder auf Entmischung im Pumpensumpf hin.

Ein Versuch der Berechnung der Massen über Gauss-Ausgleich führt zu keiner Übereinstimmung mit den Messwerten. Dies deutet ebenfalls auf instationären Betrieb. Die Aufgabezusammensetzung ändert sich über die Versuchsführung.

Gründe für nicht repräsentative Ergebnisse sind:

- Schwergutbestandteile sedimentieren auf den Boden der Sala-Kreiselpumpe, und dies verursacht Materialentmischung im Pumpensumpf,

- Grobe Bestandteile bleiben auf der Rinne liegen und daher kommt es zu körnungsmäßiger Entmischung auf der Rinne.

Diese Beobachtung ergibt, dass die Aufgabe von 4 mm Material zu grob ist und daher trotz der teilweise geringen Dichte für den Wendelscheider nicht geeignet ist.

#### 4.2.2 Versuche mit dem Wendelscheider (FLS-Smidth - Bauart)

Aufgrund der auftretenden Probleme bei der Versuchsserie mit Humphreys-Spirale wurden die nächsten Versuche mit der Erzspirale- FLS-Smidth durchgeführt.

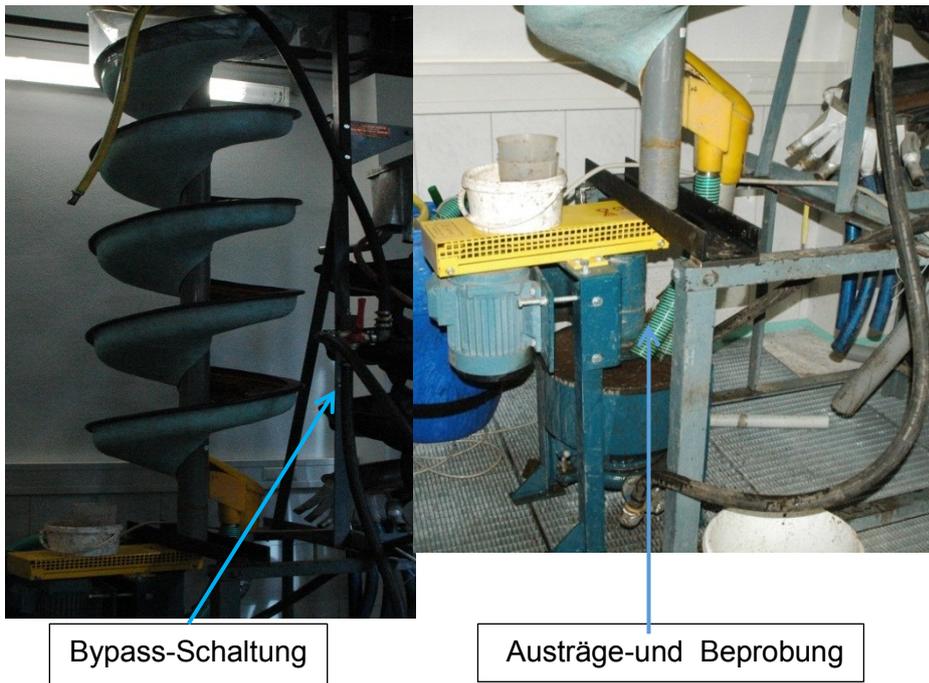


Abbildung 38: Wendelscheider-Versuchsaufbau (FLS Smidth Bauart „Erzspirale“)

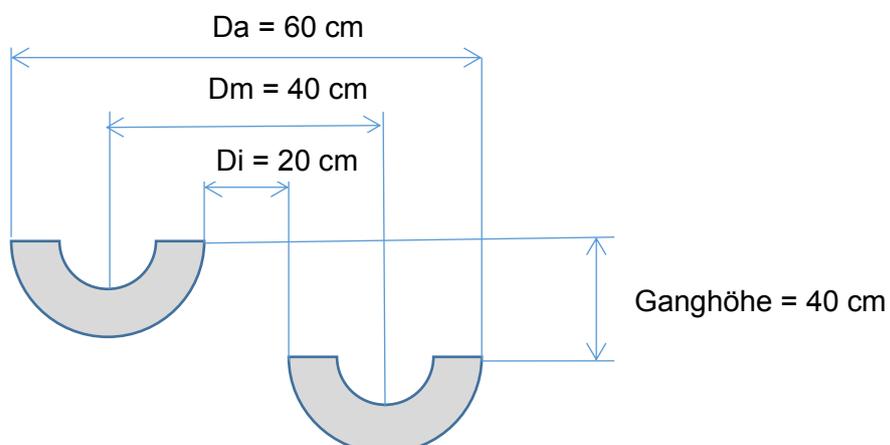


Abbildung 39: Geometrie der FLS-Smidth Spirale

Die geometrischen Daten und technischen Kennwerte sind:

- der Wendelscheider besitzt 5 Windungen und die Ganghöhe je Windung ist 40 cm
- Rinnendurchmesser: D - außen 60 cm, D - mittlere 40 cm,
- Gesamthöhe des Wendelscheiders ist 250 cm,
- Die Länge des Auslassstutzen der Pumpe bis Aufgabepumpe beträgt 360 cm,
- Volumen der Kreiselpumpe ist 30 l,
- Der Feststoffvolumenanteil ist für 7 Vol.-% berechnet. Dies entspricht 21 % Masse bei einer Stoffdichte von 2,2 g/cm<sup>3</sup>.

Auf Basis der geometrischen Daten kann man den Weg für eine Umdrehung und die mittlere Steigung der Wendelrinne berechnen.

Der Weg für eine Umdrehung über die Wendelrinne beträgt 125,6 cm

Aufgrund der Ganghöhe und dem Weg für eine Umdrehung beträgt die mittlere Steigung der Wendelrinne 21°, daher ist die FLS Smidth-Spirale steiler als die Humphreys Spirale.

### • Versuchsdurchführung

Die Aufgabe von Feststoff und Wasser sowie die Homogenisierung erfolgten über die Kreiselpumpe, die in Kreislaufschaltung und Bypass-Schaltung mit der FLS Smidth Spirale verbunden ist. Die Trübeleistung wurde mit Frequenzumrichter geregelt.

Bei diesem Versuch ergaben sich Schwierigkeiten durch Verstopfungen:

- Verstopfung im Bypass-Regler,
- Schwere Teilchen der Trübe sedimentieren auf den Boden der Kreiselpumpe und blockieren den Auslassstutzen

Nach der Reinigung wurde der Versuch weiter ohne Schwierigkeiten durchgeführt.

Die Beprobung wurde bei den Austrägen des Wendelscheiders durchgeführt (siehe Abbildung 38).

Die Trübedurchsätze und Beprobungsergebnisse sind in den nächsten Tabellen gezeigt

Tabelle 22: Durchsätze bei den Austrägen des Wendelscheiders und Massenbilanz der Produkte

Produkte	beprobte Trübe		trockene FS-Proben		
	Trübestrom	Durchsatz	Summe FS	Masse FS	Masse FS
	g/sek.	%	g	g/sek.	%/sek.
LG1	352	83.6	280	33.1	6.5
MG	35	8.3	258	14.2	18.3
SG	34	8.1	122	9.8	38.4
Aufgabe	421	100.0		57.1	100

Die chemische Zusammensetzung wurde an den Wendelscheiderprodukten durch RFA bestimmt und ist nachstehend tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 23: Chemische Zusammensetzung für die Wendelscheiderprodukte (FLS- Smidth-Bauart)

<b>RFA für Wendelscheiderprodukte (FLS-Smidth-Bauart)</b>			
	LG	MG	SG
<b>Glühverlust, %</b>	39.3	22.3	6.3
<b>Elemente</b>	%		
Aluminium-Al	3.07	2.83	1.8
Calcium-Ca	9.03	10.22	6.85
Chlor-Cl	1.05	0.19	0.17
Kupfer- Cu	0.40	0.81	1.30
Eisen-Fe	8.27	18.86	32.31
Magnesium-Mg	1.78	1.69	1.37
Natrium-Na	1.7	2.63	1.56
<b>Elemente</b>	ppm		
Sb	429	213	n.n.
Ag	n.n.	n.n.	n.n.
Au	n.n.	n.n.	n.n.
Ba	6731	7512	3801
Blei-Pb	3606	4683	6117
Br	705	55	28
Cadmium-Cd	n.n.	n.n.	n.n.
Calcium-Ca	9.03	10.22	6.85
Chrom-Cr	1054	1719	2410
Cobalt-Co	60	67	162
Mn	1327	2264	3493
Mo	98	160	187
Vanadium-V	n.n.	n.n.	n.n.
Nickl-Ni	634	1488	1905
Sn	550	387	460

Basierend auf dem Massengehalt der chemischen Elemente (siehe Tabelle 23) wurde das mittlere Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente ausgewertet.

Tabelle 24: Inhaltsausbringen an ausgewählte chemische Elemente

Produkte	Masseanteil	Gehalt, %				Ausbringen, %			
	%	Al	Cu	Fe	Cl	Al	Cu	Fe	Cl
<b>LG</b>	58	3.07	0.4	8.27	1.05	63.8	35.4	31.9	88.9
<b>MG</b>	24.9	2.83	0.81	18.86	0.19	25.2	30.7	31.3	6.9
<b>SG</b>	17.1	1.80	1.3	32.31	0.17	11.0	33.9	36.8	4.2
<b>Aufgabe</b>	100	2.79	0.7	15.0	0.7	100	100	100	100

Produkte	Masseanteil	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
	%	Sb	Pb	Mo	Cr	Sb	Pb	Cd	Cr
<b>LG</b>	58	429	3606	98	1054	82.4	48.6	44.2	42.1
<b>MG</b>	24.9	213	4683	160	1719	17.6	27.1	31.0	29.5
<b>SG</b>	17.1	0	6117	187	2410	0.0	24.3	24.9	28.4
<b>Aufgabe</b>	100	301.9	4303.6	128.7	1451.5	100	100	100	100

Produkte	Masseanteil	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
	%	Ni	Ba	Sn	Mn	Ni	V	Sn	Mn
<b>LG</b>	58	634	6731	550	1327	34.6	60.8	64.6	39.9
<b>MG</b>	24.9	1488	7512	387	2264	34.8	29.1	19.5	29.2
<b>SG</b>	17.1	1905	3801	460	3493	30.6	10.1	15.9	30.9
<b>Aufgabe</b>	100	1064.0	6424.4	494.0	1930.7	100	100	100	100

### • Ergebnisse

Die rückgerechnete Aufgabedichte liegt bei  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Dieser Wert wurde durch die Messungen bestätigt.

Bei der Durchführung des Versuchs mit der Schmidt-Spirale ergaben sich ähnliche Probleme wie mit der Humphreys-Spirale. Ein Problem war die Entmischung im Pumpensumpf, ausgelöst durch das Absinken schwerer Teilchen. Ein weiteres Problem stellte die Speicherwirkung der Spirale dar: Schwere und grobe Bestandteile (z.B. Kupferdrähte, Mineralien etc.) bleiben auf der Rinne liegen.

Wie schon bei der Humphreys-Spirale, führte auch der Versuch auf der Schmidt-Spirale nicht zu besseren Ergebnissen. Es wurden keine besseren Ergebnisse als mit herkömmlichen Sichern erzielt, allerdings erwies sich das Verfahren als störungsanfälliger. Die Störungen wurden hauptsächlich durch die Kreislaufführung und grobes Material ausgelöst.

Die durch die vorhergehenden Versuche gewonnenen Erfahrungen waren der Grund auf eine Trocken-Nass-Kombination umzusteigen.

- **Optimierung der Wendelscheiderversuche**

Durch die bei der Versuchsdurchführung aufgetretenen Probleme und den erzielten Ergebnissen (siehe Oben) können folgende Optimierungen getroffen werden:

- Verfeinerung des Aufgabegutes durch Zerkleinerung oder Mahlung
- Durchlauf- statt Kreislaufführung
- Zusätzliche Wasserspülung um Speicherwirkung zu vermeiden
- Verkürzung der Rinne

### **4.3 Trocken-Nass-Kombinationen zur Trennung der Shredder-Sandprobe**

Aufgrund nicht erfolgreicher Versuche mit dem Wendelscheider wurden die nächsten Versuche mit einer Trocken-Nass-Kombination durchgeführt.

Dieser Versuch wurde im Labor am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung durchgeführt.

Die benutzten Aggregate sind:

- Luftsetzmaschine
- Aufstromklassierer
- Nassherd

Die Durchführung erfolgte nach nachfolgendem Fließbild (Abbildung 40).

---

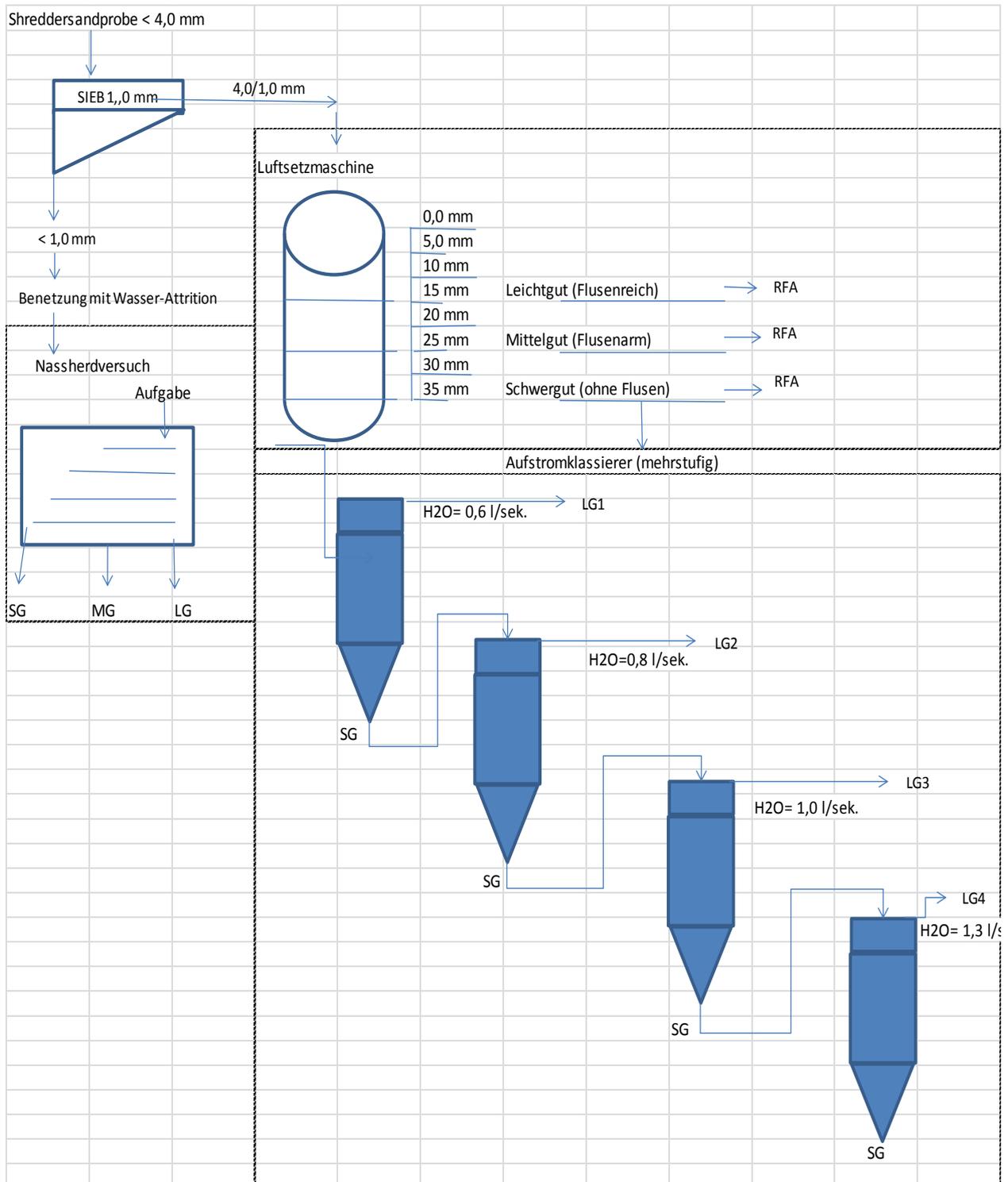


Abbildung 40: Stammbaum für Trocken-Nass Kombination der Shreddersandtrennung

### 4.3.1 Trockene Dichtentrennung mit der Luftsetzmaschine

Die Shredder-Sandprobe (< 4,0 mm) wurde zuerst bei 1,0 mm gesiebt und anschließend wurde das Material mit der Korngröße 4/1 mm für die Luftsetzmaschine verwendet.

Der Versuch ist generell aus folgenden Hauptbauteilen zusammengesetzt (siehe Abbildung 40):

- Siebboden mit Rüttler
- Glasbehälter mit Gebläseanschluss
- Absaugung
- Pulsationsvorrichtung

Das Foto des Versuchsaufbaus sowie die Fotos der einzelnen Bauteile sind in der nächste Abbildung 42 gezeigt.

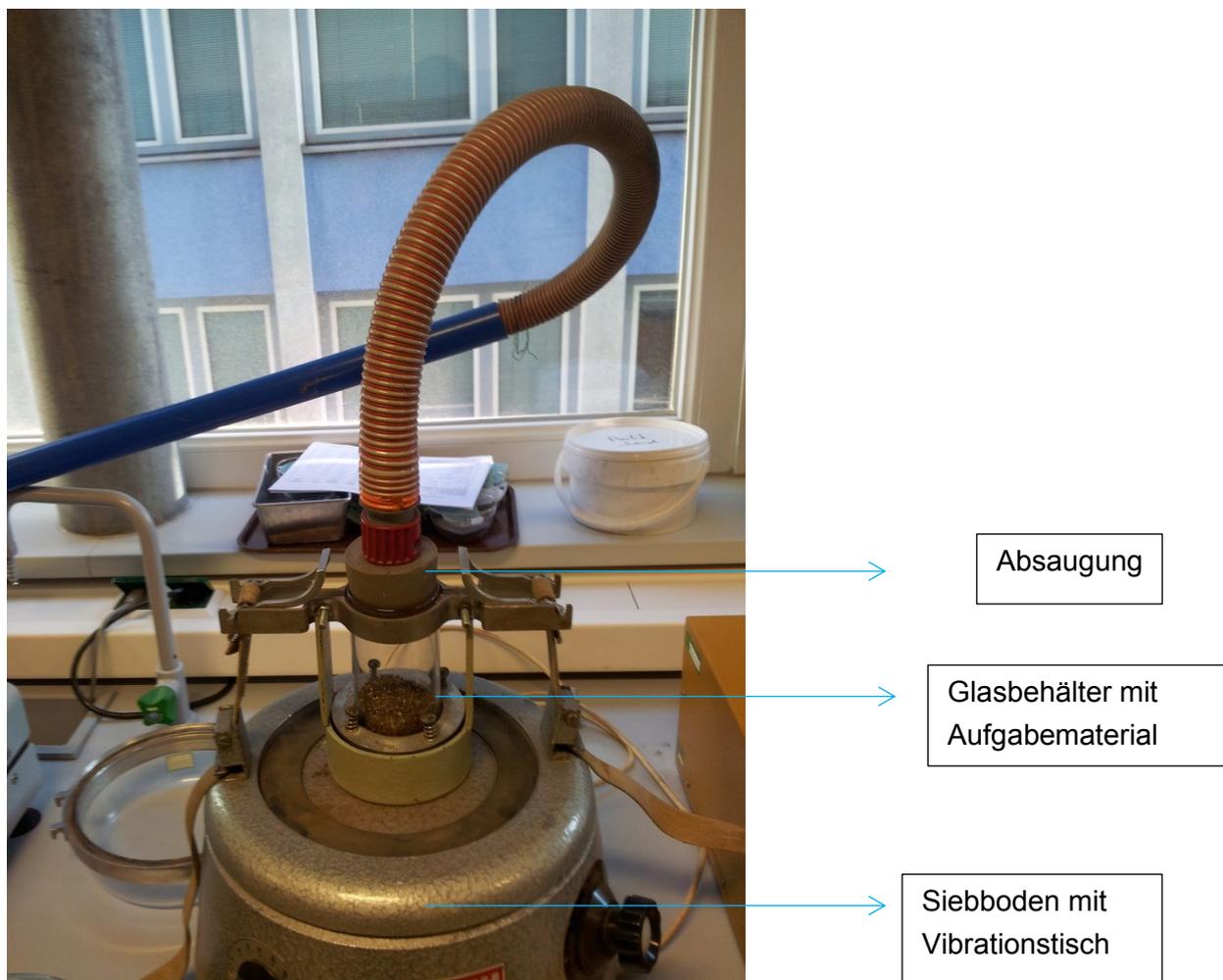


Abbildung 41: Luftsetzmaschinenaufbau zur Shreddersandtrennung



Abbildung 42: Absaugung mit Pulsationsvorrichtung

- **Durchführung des Versuches und Ergebnisse**

- Aufgabemasse: 1 kg
- Schütthöhe: etwa 35 mm
- Pulsation ist auf 125-130 U/min. eingestellt
- Laufzeit: 2,5 min.

Die Absaugung zusammen mit der Pulsationsvorrichtung erzeugt einen pulsierenden Aufstrom durch die Schüttung, der zu einer pulsierenden Auflockerung des Materialbettes führt. Die leichteren Bestandteile entmischen von den schwereren und bilden die oberen Schichten. Im Gegensatz dazu bleiben die schwereren Stoffe unten. Somit bilden sich drei Schichten im Glasbehälter:

- Leichtgut (Flusenreich)
- Mittelgut (Flusenarm)
- Schwergut (Metall und Mineralik Gemisch)

Die Auswertung erfolgte über die Trockenmasse und Schwimm-Sink-Analyse

Tabelle 25: Auswertung für Luftsetzmaschine-Produkte über trockene Masse und Schwimm-Sink-Analyse

Produkte	Masse	Gehalt, %				Ausbringen, %			
		< 1,45	1,45-2,7	1,7-2,55	> 2,5	< 1,45	1,45-2,7	1,7-2,5	> 2,5
	%	g/cm <sup>3</sup>				g/cm <sup>3</sup>			
<b>LG</b>	12.51	84.5	10.3	5.2	0	29.9	18.7	1.9	0
<b>MG</b>	35.18	58.3	5.4	18.1	18.3	58.0	27.5	18.1	28.4
<b>SG</b>	52.31	8.2	7.1	53.7	31	12.1	53.8	80.0	71.6
<b>Aufgabe</b>	100	35.4	6.9	35.1	22.7	100.0	100	100	100

Die Stoffdichten der einzelnen Produkte wurden mit dem Helium-Pyknometer bestimmt. Jede Probe wurde zweimal gemessen und ein Mittelwert wurde gebildet. Aufgrund der Ergebnisse der Stoffdichtemessung konnte eine kontinuierliche Steigerung der Stoffdichte von den Leichtgut- zum Schwergutprodukt festgestellt werden.

Tabelle 26: Luftsetzversuch: Stoffdichte der Leichtgut-, Mittelgut- und Schwergutprodukte

Dichtebestimmung mit Gaspyknometer _ 10cm <sup>3</sup>			
Produkte	Messung 1	Messung 2	Mittelwert
	g/cm <sup>3</sup>		
LG	1.72	1.64	1.68
MG	1.851	1.806	1.83
SG	2.54	2.55	2.55

Für jede Probe wurde der Glühverlust zweifach bestimmt. Zur Bestimmung des Glühverlustes wurde die Probe in einem Muffelofen bei einer Temperatur von 550°C(nach EN 12879) bis zur Gewichtskonstanz geglüht.

Tabelle 27: Glühverlust und Aschegehalt Bestimmung

Glühverlust Bestimmung bei 550 C							
Produkte	Masse, a	Masse , b	Masse, c	b-c	b-a	b-c/b-a*100	Aschegehalt
	g	g	g	g	g	%	%
LG1	14.008	15.412	14.511	0.901	1.404	64.2	35.8
LG2	14.109	15.401	14.62	0.781	1.292	60.4	39.6
MG1	6.933	8.249	7.516	0.733	1.316	55.7	44.3
MG2	8.028	9.483	8.672	0.811	1.455	55.7	44.3
SG1	7.552	10.555	9.962	0.593	3.003	19.7	80.3
SG2	7.453	10.114	9.541	0.573	2.661	21.5	78.5
	a	b	c				

*a- Gewicht der Schale*

*b- Gewicht der Schale mit zu untersuchender Probe*

*c- Gewicht der Schale mit veraschter Probe*

Die chemische Analyse der Produkte wurde mit RFA- Methode bestimmt. Die Analyse wurde mit geglühten (bei 550°C) Proben durchgeführt

Tabelle 28: RFA der Luftsetzmaschineprodukte für ausgewählte Elemente

RFA für Luftsetzmaschine Produkte			
	LG	MG	SG
<b>Glühverlust, %</b>	61.8	47.9	17.7
<b>Elemente</b>	<b>%</b>		
Aluminium-Al	2	2.4	2.3
Calcium-Ca	3.6	5.6	8.9
Chlor-Cl	0.8	1.1	0.9
Kupfer- Cu	0.3	0.7	1.61
Eisen-Fe	6.58	7.37	13.54
Magnesium-Mg	0.9	1.4	1.7
Natrium-Na	0.6	0.8	1.7
<b>Elemente</b>	<b>Ppm</b>		
Sb	119	286	239
Ag	n.n	47	n.n
Au	n.n	n.n	n.n
Ba	3380	1978	361
Blei-Pb	1978	2114	5449
Br	361	578	530
Cadmium-Cd	38	n.n	n.n
Calcium-Ca	3.6	5.6	8.9
Chrom-Cr	493	813	2132
Cobalt-Co	54	50	100
Mn	902	974	1942
Mo	57	83	151
Vanadium-V	50	63	n.n
Nickl-Ni	416	552	1300
Sn	205	263	784

Basierend auf dem Massengehalt der chemischen Elemente aus obiger Tabelle wurde das mittlere Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente ausgewertet.

Tabelle 29: Massegehalt- und Ausbringen für ausgewählte Elemente der Luftsetzmaschine-Produkte

Produkte	Masse, %	Gehalt, %				Ausbringen, %			
		Al	Cu	Fe	CL	Al	Cu	Fe	Cl
<b>LG</b>	12.51	2	0.3	6.58	0.8	10.9	3.3	7.8	10.4
<b>MG</b>	35.18	2.4	0.7	7.37	1.1	36.7	21.9	24.7	40.4
<b>SG</b>	52.31	2.3	1.61	13.54	0.9	52.4	74.8	67.5	49.2
<b>Aufgabe</b>	100	2.3	1.1	10.5	1.0	100	100	100	100
Produkte	Masse, %	Gehalt ,ppm				Ausbringen, ppm			
		Sb	Pb	Cd	Cr	Sb	Pb	Cd	Cr
<b>LG</b>	12.51	119	1978	38	493	6.2	6.4	100.0	4.2
<b>MG</b>	35.18	286	2114	0	813	41.8	19.4	0.0	19.6
<b>SG</b>	52.31	239	5449	0	2132	52.0	74.2	0.0	76.2
<b>Aufgabe</b>	100	240.5	3841.5	4.8	1462.9	100	100	100	100
Produkte	Masse, %	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
		Ni	V	Sn	Mn	Ni	V	Sn	Mn
<b>LG</b>	12.51	416	50	205	902	5.6	22.0	4.9	7.7
<b>MG</b>	35.18	552	63	263	974	21.0	78.0	17.5	23.3
<b>SG</b>	52.31	1300	0	784	1942	73.4	0.0	77.6	69.0
<b>Aufgabe</b>	100	926.3	28.4	528.3	1471.4	100	100	100	100

Durch Vergleich der chemischen Analyse der Produkte mit den Anforderungen, die in Abfallwirtschafts- und Brennstoffverordnungen an die Produkte gestellt werden, erhält man eine Vorstellung über die Einsetzbarkeit der Produkte

• **Qualitätsanforderung für Ersatzbrennstoffe**

Die Entsorgung von Abfällen als fester Ersatzbrennstoffe in Zementwerken ist durch die Richtlinie für Entsorgung von Abfällen in Zementwerken (Stand 2005) geregelt. Der zulässige Schadstoffgehalt in festen Ersatzbrennstoffen ist in der nächsten Tabelle gezeigt.

Tabelle 30: Grenzwerte für Schwermetallgehalte in Abfällen, zur Herstellung von Zement [21]

Schadstoffe	nach 2004
Elemente	mg/kg
Blei,Cr	400
Cadmium, Cd	5
Chrom, Cr	300
Kupfer, Cu	500
Nickel, Ni	200
Zink, Zn	4000
organische gebundene Halogene	< 0.5 Gewichts-%
Schwerabbaubare toxische Halogenoorganische Verbindungen (zb.PCB)	< 10 mg/kg

Tabelle 31: Grenzwerte (mg/MJ) für Abfälle bei der Verbrennung in Mitverbrennungsanlagen [24, S.3]

Parameter	Zementwerk (mg/MJ)		Kraftwerk ≤ 15 (mg/MJ)				Sonstige MVA (mg/MJ)	
	Median	80er Perzentil	Median		80er Perzentil		Median	80er Perzentil
			≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 10 %	≤ 15 %		
As	2	3	2	3	2	3	1	1,5
Pb	20	36	23	41	15	27	15	27
Cd	0,23	0,46	0,27	0,54	0,17	0,34	0,17	0,34
Cr	25	37	31	46	19	28	19	28
Co	1,5	2,7	1,4	2,5	0,9	1,6	0,9	1,6
Ni	10	18	11	19	7	12	7	12
Hg	0,175	0,15	0,075	0,15	0,075	0,15	0,075	0,15
Sb	7	10	7	10	7	10	7	10

Der Vergleich der RFA-Ergebnisse der Leichtfraktion (Flusenreich) und geforderten Grenzwerten für Schadstoffe zeigt, dass das Sand-Leichtgut keine Grenzwerte überschreitet.

Zur Gewinnung von Wertstoffen aus Schwergut wurde anschließend ein Aufstromklassierversuch durchgeführt.

### 4.3.2 Stoffliche Dichttrennung mittels Aufstromklassierer

Das Schwergutprodukt 4/1mm wurde mit einem mehrstufigen Aufstromklassierprozess in vier Fraktionen getrennt. Die unterschiedlichen Volumenströme wurde mittels Frequenz-Umrichter und Kreiselpumpe eingestellt.

Ziel der Trennung ist die möglichst vollkommene Abtrennung von Metallbestandteilen von anderen Bestandteilen (Kunststoff- und mineralische Bestandteile)



Abbildung 43: Versuchsaufbau der Aufstromklassierer-Trennung

In folgender Tabelle ist eine Massenbilanz der durchgeführten Trennung dargestellt.

Tabelle 32: Massenbilanz bei mehrstufigem Aufstromklassierer

Wasserleistung	Produkte	Masse, %
FU-25 Hz mit Stoppuhr 0,65 l/sek.	LG1	65.4
FU-30 Hz mit Stoppuhr 0,8 l/sek.	LG2	18.6
FU-40 Hz mit Stoppuhr 1,0 l/sek.	LG3	11.4
FU-50 Hz mit Stoppuhr 1,3 l/sek.	LG4	3.7
FU-50 Hz mit Stoppuhr 1,3 l/sek.	SG	0.9
Aufgabe		100

*FU: Frequenz Umrichter zur Wasserleistung-Regelung*

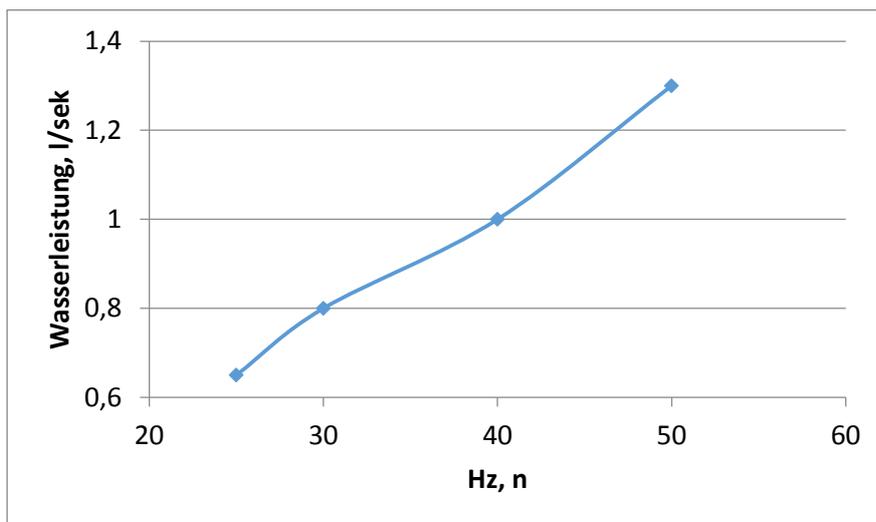


Abbildung 44: Volumenstrom Wasser in Abhängigkeit vom der eingestellten Frequenz am FU

In der folgenden Abbildung 46 sind die Aufstromklassiererprodukte gezeigt.



Abbildung 45: Produkte aus dem Aufstromklassierversuch

Der Versuch wurde durch Schwimm–Sink–Analyse der Produkte Bilanzierung der chemischen Gehalte (RFA) in den Dichteklassen ausgewertet

Tabelle 33: Bilanzierung des Aufstromklassierversuches

Produkte	Masse	Gehalt, %			Ausbringen, %		
	m,%	< 1,7	1,7-2,7	>2,7	< 1,7	1,7 - 2,7	> 2,7
		g/cm <sup>3</sup>			g/cm <sup>3</sup>		
LG1 - 0,6 l/s	65.4	19.6	6.4	74.0	100.0	17.5	76.6
LG2 - 0,8 l/s	18.6	0	76.4	23.6	0.0	59.3	6.9
LG3 - 1,0 l/s	11.4	0	45.8	54.2	0.0	21.8	9.8
LG4 - 1,3 l/s	3.7	0	9.7	90.3	0.0	1.5	5.3
SG - 1,3 l/s	0.9	0	0	100.0	0.0	0.0	1.4
<b>Aufgabe</b>	100.0	12.82	23.98	63.2	100.0	100.0	100.0

Für Aufstromklassiererprodukte wurde eine RFA durchgeführt.

Tabelle 34: Chemische Zusammensetzung für Aufstromklassiererprodukte (4/1 mm)

<b>RFA für Aufstromklassierer-Produkte</b>					
	LG1	LG2	LG3	LG4	SG
<b>Glühverlust, %</b>	20.6	4.3	0.4	-6.3	-8.1
<b>Elemente</b>	<b>%</b>				
Aluminium-Al	2.95	3.06	1.48	0.382	0.55
Calcium-Ca	11.81	12.32	8.79	1.80	0.26
Chlor-Cl	1.35	0.19	0.11	0.14	0.09
Kupfer- Cu	0.81	1.10	3.99	7.29	23.13
Eisen-Fe	12.17	15.95	34.71	53.98	37.62
hMagnesium-Mg	1.79	2.35	2.16	0.94	0.06
Natrium-Na	1.78	2.90	1.35	0.58	0.19
<b>Elemente</b>	<b>Ppm</b>				
Sb	521	n.n.	n.n.	n.n.	1362
Silber, Ag	n.n.	n.n.	n.n.	244	n.n.
Gold, Au	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Ba	9607	11484	4631	4305	n.n.
Blei-Pb	3070	4360	7481	11108	82913
Br	913	48	234	n.n.	25
Cadmium-Cd	n.n.	115	n.n.	n.n.	n.n.
Chrom-Cr	1509	2613	5856	13298	25187
Cobalt-Co	84	n.n.	178	331	226
Mangan, Mn	1437	1799	4303	7632	3805
Molybdän, Mo	140	178	400	408	5546
Kalium, K	5796	6469	3048	475	183
Sn	314	442	1544	3976	23242
Ni	1207	1560	2370	6761	10918
Vanadium, V	n.n.	n.n.	n.n.	202	168

Basierend auf dem Massengehalt der chemischen Elemente aus obiger Tabelle wurde das mittlere Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente ausgewertet.

Tabelle 35: Massegehalt- und Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente der Aufstromklassiererprodukte

Produkte	Masse	Gehalt, %				Ausbringen, %			
	%	Al	Cu	Fe	Cl	Al	Cu	Fe	Cl
LG1 (0,6 l/s.)	65.4	2.95	0.8	12.7	1.35	71.8	31.8	47.3	94.2
LG2 (0,8 l/s.)	18.6	3.06	1.1	16.0	0.19	21.2	12.3	16.9	3.8
LG3 (1,0 l/s.)	11.4	1.48	4.0	34.7	0.11	6.3	27.3	22.5	1.3
LG4 (1,3 l/s.)	3.7	0.38	7.3	54.0	0.14	0.5	16.2	11.4	0.6
SG (1,3 l/s.)	0.9	0.55	23.1	37.6	0.09	0.2	12.5	1.9	0.1
<b>Aufgabe</b>	100	2.69	1.7	17.6	0.9	100.0	100.0	100.0	100.0

Produkte	Masse	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
	%	Ni	Pb	Sn	Cr	Ni	Pb	Sn	Cr
LG1 (0,6 l/s.)	65.4	1207	3070	314	1509	46.5	41.6	25.0	34.5
LG2 (0,8 l/s.)	18.6	1560	4360	442	2613	17.1	16.8	10.0	17.0
LG3 (1,0 l/s.)	11.4	2370	7481	1544	5856	15.9	17.7	21.5	23.3
LG4 (1,3 l/s.)	3.7	6761	11108	3976	13298	14.7	8.5	17.9	17.2
SG (1,3 l/s.)	0.9	10918	82913	23242	25187	5.8	15.5	25.5	7.9
<b>Aufgabe</b>	100	1698.1	4828.8	819.9	2859.2	100.0	100.0	100.0	100.0

Aufgrund der obigen Tabelle 34 sieht man die prozentuelle Massenverteilung für die ausgewählten Elemente bei verschiedenen Einstellungen der Trennschnittlage. Für Al scheint besonders gut der Trennschnitt bei einem Volumenstrom von 1 l/s geeignet. Für Cu den Cu-Gehalt erzielt man bei einem Volumenstrom von 1,3 l/s. Das Cu-Ausbringen, bei geringer Aluminiumverschleppung wird bei 0,8 l/s maximal.

### 4.3.3 Stoffliche Dichtentrennung mittels Nassherd

Die abgesiebte Eingangsprobe (< 1,0 mm) wurde dem Nassherd im Labor-Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung aufgegeben. Ziel dieses Versuches ist es die enthaltenen Metalle abzutrennen.

#### 4.3.3.1 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Versuchsdaten:

- Aufgabe: Sandprobe (< 1 mm), 550 g
- Herdfläche: Länge-205 mm, Breite-460 mm
- Wasserleistung: Aufgabewassermenge – 160 l/h, Querstromwassermenge – 180 l/s
- Motorleistung: 360 U / min.
- Querneigung der Herdplatte – 10 mm auf 205 mm

Durch Verwendung eines Rührgefäßes und hierzu passender mechanischer Rührwerke wurde zunächst eine vollständige Benetzung aller Shredder- Sandpartikel gewährleistet.

Über eine bewegte, geneigte Platte wurde die Suspension am rechten oberen Eckpunkt aufgegeben. Durch einen Querwasserstrom wurden die spezifisch leichteren Partikel in einer Filmströmung über die Breitseite der Herdplatte abgetragen. Die spezifisch schwereren Partikel werden durch die schnelle Bewegungsumkehr der bewegten Herdplatte über die Längsseite des Herdes transportiert und werden als Schwerfraktion abgezogen.

Der Versuchsaufbau ist im folgenden Bild dargestellt.

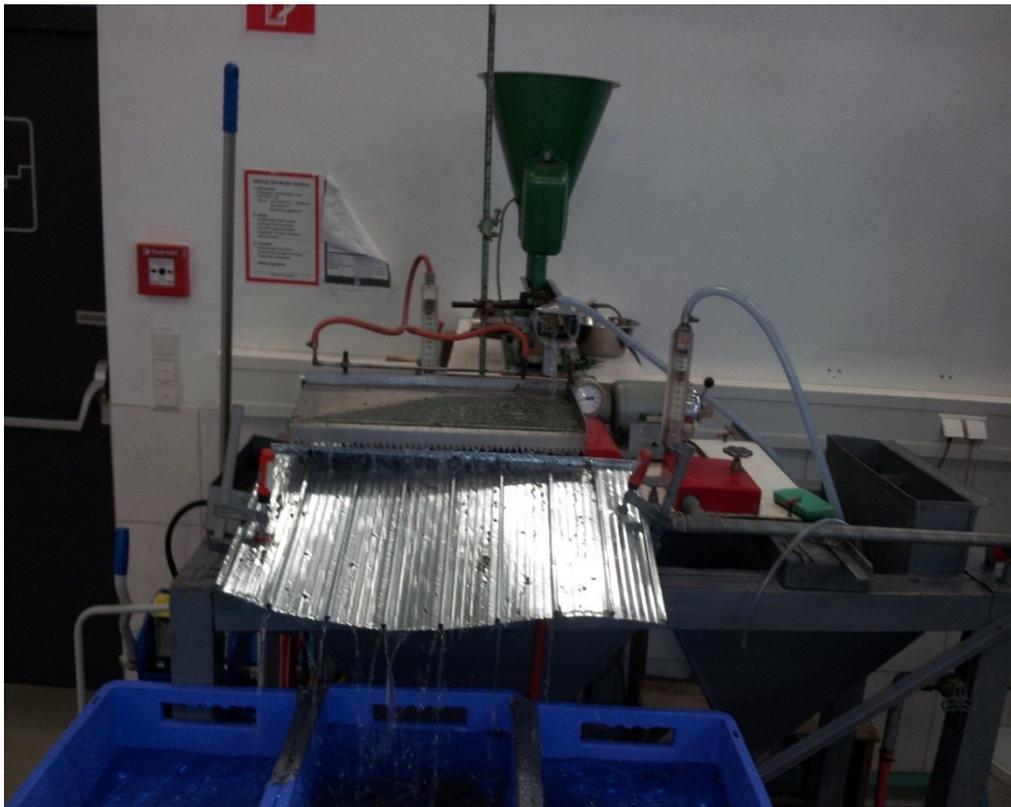


Abbildung 46: Herdversuch - Aufbau im Labors Technikum

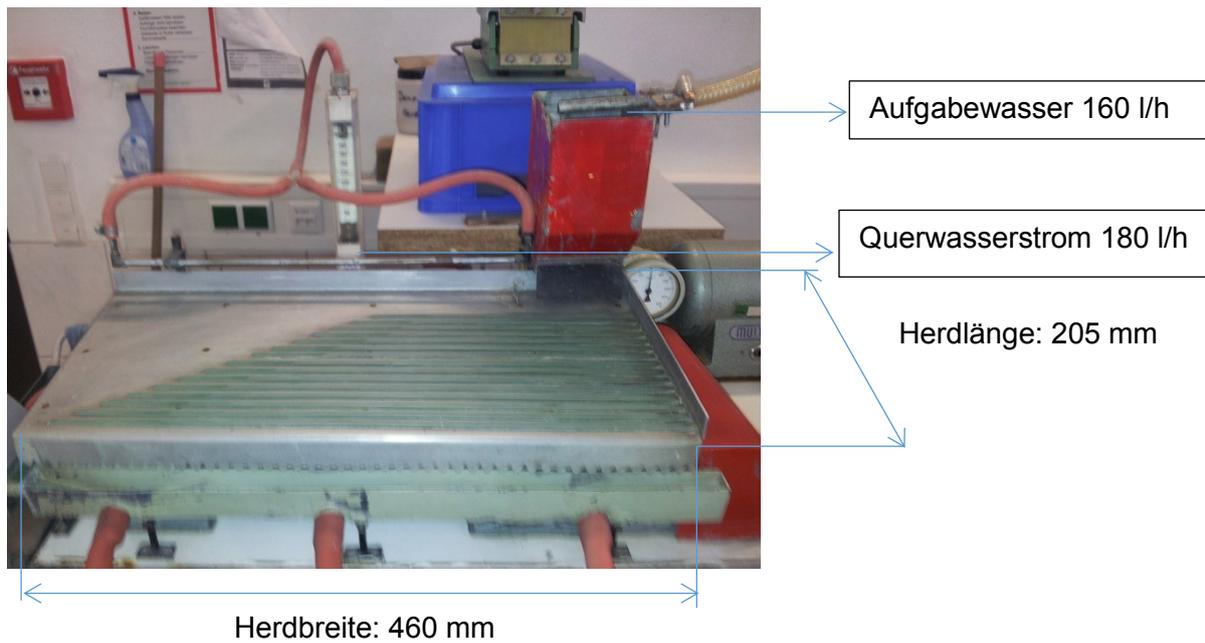


Abbildung 47: Nassherd im Labor-Technikum

Über die ausgestatteten Austragebehälter (siehe Abbildung 44) wurden drei Produkten abgezogen:

- Leichtgut
- Mittelgut
- Schwergut

Nach der Trocknung (60 °C) wurde die Massenbilanz ausgewertet.

Tabelle 36: Massenbilanz für Nassherdprodukte

Produkte	%
<b>LG</b>	13.7
<b>MG</b>	66.3
<b>SG</b>	20.0
<b>Aufgabe</b>	100

Die chemische Analyse der Produkte wurde mit RFA durchgeführt.

Tabelle 37: Chemische Zusammensetzung für Nassherdprodukte

<b>RFA für Nassherd – Produkte</b>			
	LG	MG	SG
<b>Glühverlust, %</b>	39.3	22.3	6.3
<b>Elemente</b>	%		
Aluminium-Al	3.87	3.74	1.76
Calcium-Ca	6.70	8.37	7.48
Chlor-Cl	0.55	0.38	0.14
Kupfer- Cu	0.34	0.42	1.68
Eisen-Fe	10.73	13.83	31.28
Magnesium-Mg	1.44	1.71	1.40
Natrium-Na	1.21	2.34	1.57
<b>Elemente</b>	Ppm		
Sb	152	179	n.n.
Ag	n.n.	n.n.	n.n.
Au	n.n.	n.n.	n.n.
Ba	5420	5843	3523
Blei-Pb	3474	3637	8553
Br	368	236	n.n.
Cadmium-Cd	55	n.n.	n.n.
Calcium-Ca	6.70	8.37	7.48
Chrom-Cr	838	1033	2324
Cobalt-Co	n.n.	115	85
Mn	1493	1686	4010
Mo	92	115	216
Vanadium-V	67	85	n.n.
Nickl-Ni	747	878	2052
Sn	305	296	1087

Basierend auf dem Massengehalt der chemischen Elemente wurde das mittlere Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente ausgewertet.

Tabelle 38: Massegehalt- und Ausbringen für ausgewählte Elementen der Nassherdprodukte

Produkte	Masseanteil	Gehalt, %				Ausbringen, %			
	%	Al	Cu	Fe	Cl	Al	Cu	Fe	Cl
<b>LG</b>	13.7	3.87	0.34	10.73	0.55	15.8	7.0	8.7	21.2
<b>MG</b>	66.3	3.74	0.42	13.83	0.38	73.8	42.1	54.3	70.9
<b>SG</b>	20	1.76	1.68	31.28	0.14	10.5	50.8	37.0	7.9
<b>Aufgabe</b>	100	3.36	0.7	16.9	0.4	100	100	100	100

Produkte	Masseanteil	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
	%	Sb	Pb	Cd	Cr	Sb	Pb	Cd	Cr
<b>LG</b>	13.7	152	3474	55	838	14.9	10.4	100.0	9.1
<b>MG</b>	66.3	179	3637	0	1033	85.1	52.4	0.0	54.2
<b>SG</b>	20	0	8553	0	2324	0.0	37.2	0.0	36.8
<b>Aufgabe</b>	100	139.5	4597.9	7.5	1264.5	100	100	100	100

Produkte	Masseanteil	Gehalt, ppm				Ausbringen, ppm			
	%	Ni	V	Sn	Mn	Ni	V	Sn	Mn
<b>LG</b>	13.7	747	67	305	1493	9.3	14.0	9.2	9.6
<b>MG</b>	66.3	878	85	296	1686	53.2	86.0	43.1	52.6
<b>SG</b>	20	2052	0	1087	4010	37.5	0.0	47.7	37.8
<b>Aufgabe</b>	100	1094.9	65.5	455.4	2124.4	100	100	100	100

Grundsätzlich funktionierte der erste Nassherdversuch gut. Eine weitere Optimierung des Nassherds ist nötig. Die Lattenhöhe kann dünner gemacht werden um bessere Trennung zu ermöglichen. Der Herd sollte größer ausgelegt werden.

## 5 Zusammenfassung

Richtungsweisend war die Vorgabe der Altautoverordnung. Demnach müssen 95% des gesamten Abfalls aus dem Altautorecycling verwertet werden. Um die Ziele der Verordnung erreichen zu können, sind auch aus der Shredder-Leichtfraktion wertvolle Rohstoffe herauszuholen. Es ist zu erwarten, dass ähnliche Vorgaben auch für andere Abfallströme, wie z.B. Elektroaltgeräte oder Sperrmüll, in Zukunft zu erfüllen sind. Neben den gesetzlichen Erfordernissen sollen auch die erhöhten Rohstoffpreise zur einen Optimierung der SLF-Aufbereitung von diversen Abfällen beitragen.

Die große Herausforderung ist die Verwertung der Shredder-Sandfraktion. Diese fällt als ein Produkt aus der Auftrennung der SLF an. Die Sandfraktion stellt etwa 40 % der gesamt anfallenden Menge der Shredder-Leichtfraktion dar. Bisher wurde die Sandfraktion deponiert oder als Bergversatz verwendet.

Durch vorangegangene Versuche wurde ersichtlich, dass die Auftrennung der Shredder-Sandfraktion durch die Agglomeration von Flusen erheblich erschwert wurde. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der vorangehenden Abtrennung von Flusen aus dem Shredder-Sand. Zu diesem Zweck wurde die Versuchsreihe im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt.

Basierend auf der Rohgutcharakterisierung der Shredder-Sandprobe und den durchgeführten Versuchen wird ersichtlich, dass die Shredder-Sandfraktion eine anspruchsvolle Trenntechnik erfordert. Vor allem die Neigung zu großvolumiger Agglomeration der Flusen stellt ein wesentliches Problem dar.

Um sortenreine Inputs für das spätere stoffliche Recycling zu erhalten, muss eine Kombination unterschiedlicher Trennverfahren eingesetzt werden.

Bisher gibt es keine stationären Verfahren zur Trennung dieser feinen Shredder-Sandfraktion. Einige Projekte dazu befinden sich allerdings in Arbeit.

Die physikalischen Eigenschaften dieser Fraktionen aus der Rohgutcharakterisierung legten die Nassaufbereitung mittels Wendelscheider nahe. Zum Einsatz kamen zwei Bauarten (Humphreys-Spirale und Smidth-Spirale „Erzspirale“, näheres siehe Versuchsdurchführung). Beide wurden in Kreislaufschaltung betrieben.

Die gewählte Aufgabekörnung erwies sich als zu grob, was zu Schwierigkeiten im Materialtransport über die Pumpe aber auch auf der Rinne führte. Es konnte kein stationärer Kreislaufbetrieb aufrechterhalten werden. Mögliche Verbesserungen werden in Punkt 4.2.2 diskutiert

Aufgrund des mäßigen Erfolgs des Nasstrennverfahrens wurde ein Nass-Trocken-Kombinationsversuch durchgeführt. Dieser Versuch bestand aus drei Trennaggregaten. Diesmal wurde nur die Feinfraktion (<1mm) nass aufgetrennt. Die gröberen Fraktionen, die sich zuvor im Nassversuch als problematisch erwiesen, wurden mittels Luftsetzmaschine in drei Produkte aufgetrennt. Diese Versuchsreihe wurde problemlos durchgeführt.

Im Bereich der Feinfraktion, aufgetrennt am Nassherd, wurden hauptsächlich Schwerteilchen (Metalle) aufgefunden, und wie eine Schwergutfraktion abgetrennt. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut zur Abtrennung von Wertstoffen, wie Kupfer oder Aluminium.

In der Luftsetzmaschine war es erstmals möglich, die Flusen wirksam vom restlichen Aufgabegut abzutrennen. Es vielen drei Produkte an:

- Leichtgut (Flusenreich)
- Mittelgut (Flusenarm)
- Schwergut (Metalle und Mineralik)

Der Vergleich der Ergebnisse der chemischen Analyse der Leichtfraktion mit den Grenzwerten der Verordnung zeigt die Eignung als Ersatzbrennstoff (z:B in der Zementindustrie) auf.

Das Mittelgut sollte in eine Kreislaufführung gebracht und weiter aufgetrennt werden.

Um eine vollkommene Abtrennung von Metallen aus dem Schwergut zu erreichen, wurde eine weitere Aufstromklassierung durchgeführt. Damit wurden mittelmäßige Erfolge erzielt.

Grundsätzlich kann mit dem gewählten Verfahren eine gute Abtrennung der Flusen, aber auch der Wertstoffe aus einer Shredder-Sandfraktion erzielt werden. Die wirtschaftliche Verwertbarkeit ist zu prüfen.

---

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literaturverzeichnisse

- [1] Martens, H.: Recyclingtechnik-Fachbuch für Lehre und Praxis: Verwertung und Recycling von Altfahrzeugen- und Elektroaltgeräte, Stand: 2010.
  - [2] Lebensministerium-Weißbuch: Thermische Abfallbehandlung in Österreich, Auflage 2009 im Online unter URL: <http://www.lebensministerium.at/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-thermisch/Abfallverbrennung.html>.
  - [3] Thome-Kozmiensky, Karl J.; Versteyl A.; Beckmann M.: Produktverantwortung- Altfahrzeuge, 2007.
  - [4] Flachberger, H.; Oberrauner A. Schmid, A.: Depo Tech Montanuniversität 2010 - Bericht: Aufbereitungstechnische Charakterisierung und Untersuchung von Shreddersand,[ S.263-271].
  - [5] Böhm A., Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Vorlesungsskriptum: Aufbereitung von Sekundärbrennstoffen – spezielle Aufbereitung für IU, Stand 2011
  - [6] Schubert, H. : Aufbereitung fester Stoffe-Band 2, Sortierprozesse: Kapitel 1– Dichtesortierung, Auflage:1996.
  - [7] Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011: Verwertungs- und Beseitigungsanlagen.
  - [8] Scherhauser S.; Beigl P.: Aktuelle Trends der Aufbereitung der Shredder-Leichtfraktion von Altfahrzeugen, Depo Tech 2008-MU Leoben [S. 201-206].
  - [9] Projektpräsentation: Shredder-Rückstands–Aufbereitung–Anlage, TBS-Enns, Stand:2009.
  - [10] Duwe Christian, TU Clausthal–Institut für Aufbereitung und Deponietechnik: Stand der Forschung zur Rückgewinnung von feinkörnigen NE-Metallen aus Shredder-Sanden. Online im WWW unter URL: <http://www.ifa.tu-clausthal.de/lehrstuehle/lehrstuhl-fuer-rohstoffaufbereitung-und-recycling/forschung/aktuelle-projekte/shredder-sand/>. Stand:August 2012.
  - [11] Krinke S.; Boßdorf-Zimmer B.; Goldman Daniel: Bericht, Ökobilanz Altfahrzeug-Recycling-Vergleich des VW-SiCon verfahren und der Demontage von Kunststoff-Bauteilen mit nachfolgender werkstofflicher Verwertung, Juni 2005.
  - [12] Recycling Magazin-Innovation with Integrity: Entsorgung der Shredderleichtfraktion in Deutschland Online im WWW unter URL: [http://www.teer.rwth-aachen.de/cms/upload/Meldungen/Rotheut\\_Recyclingmagazin.pdf](http://www.teer.rwth-aachen.de/cms/upload/Meldungen/Rotheut_Recyclingmagazin.pdf). Stand: Juli 2012.
-

- [13] Viavision Magazin: Perspektive für alte Teile – Das Volkswagen – SiCon – Verfahren. Stand: Mai 2009.
- [14] Thome-Kozmiensky, K. J.; Goldman Daniel: Recycling und Rohstoffe-Band 5,Stand :2012.
- [15] Recycling Broschüre: Das Scholz – Verfahren zur Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion und Shredder-Schwerfraktion. Ausgabe: 25.01.2013. Online im WWW unter URL: [www.scholz-ag.de/media/downloads/presse/.../Recycling-Broschuere.pdf](http://www.scholz-ag.de/media/downloads/presse/.../Recycling-Broschuere.pdf).
- [16] Schelker Raymond; Geisselhardt Patrik: Projekt „Kunststoff-Verwertung Schweiz“. Stand: 2010.
- [17] Reisinger, Hubert: Annex zum Materialienband-Abfallvermeidung und Verwertung in Österreich-Umweltbundesamt-Wien.Stand: 2006.
- [18] Koch, Klaus,Informationsveranstaltung 10.01.2007 für die „Agende 21 Gruppe Eberswalde“ im Online unter URL: <https://www.google.at/#q=Umweltnetzwerk+SLF+Schadstoffe>.
- [19] Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, Ausgegeben am 30 Jänner 2008: 3.Abschnitt-Deponierungsverbote Online im WWW unter URL :[https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA-2008\\_2\\_39.pdf](https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA-2008_2_39.pdf).
- [20] BMU-Umweltinnovationsprogramm-Abschlussbericht zum Vorhaben: Einsatz einer Kompaktsortieranlage zur Metallausschleusung bei Shredderleichtfraktion.Stand:September 2009.
- [21] Andreas Bartl, Michael Wistuba, Markus Spiegl; Ingo Marini; Ronald Blab –TU Wien: Verfahren zur stoffliche Verwertung von Shredderabfällen in bituminösen werkstoffen bzw. Strukturen. Online im WWW unter URL: [www.tuwien.ac.at/.../Technology\\_Offer\\_Shredderabfallverwertung.pdf](http://www.tuwien.ac.at/.../Technology_Offer_Shredderabfallverwertung.pdf).
- [22] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Richtlinie 2005-Entsorgung von Abfällen in Zementwerken, Anhang 2. Stand: Mai 2007 im Online unter URL: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00444/index.html>.
- [23] Tätigkeitsbericht 2010: Elektroaltgeräte Koordienierungsstelle Austria GmbH.
- [24] Lorber K.E.; Sarc R.; Pomberger R.: Österreichische Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe (EBS) und mögliche Anwendungsprobleme, Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik (IAE)-MU Leoben. Stand: 2010.
-

- [25] Peter, Lechner; Marion Huber-Hummer: Abfallwirtschaft und Abfallentsorgung-Verwertung und Abfällen 3, LVA-Nr.813.100, Studienjahr 2011/2012. Online im WWW unter URL: [http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H81/H813/7C\\_813\\_100\\_verwertung\\_III.pdf](http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H81/H813/7C_813_100_verwertung_III.pdf).
- [26] Daniel Goldman, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik – TU Clausthal: Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential durch intelligente Nutzung speziell aufbereiteter Abfallströme, im Online unter URL: [http://www.fakultaeten.tu-clausthal.de/fileadmin/fakultaet2/Aktuelles/Vortrag\\_Goldmann\\_2009.pdf](http://www.fakultaeten.tu-clausthal.de/fileadmin/fakultaet2/Aktuelles/Vortrag_Goldmann_2009.pdf), Stand: November 2009.
- [27] Munkhtsetseg Dashjav, TU Dresden – Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten: Stoffliche und brennstofftechnische Charakterisierung von Shredder-Leichtfraktion. Stand: 2009.

## 6.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
$\Sigma m, \%$	Massensumme in Prozente
$\Sigma I_{ij}, \%$	Inhaltssumme eines Stoffes „i“ im Produkt „j“ in Prozente
°C	Grad Celsius
a, %	Aschegehalt in Prozente
Al	Aluminium
As	Arsen
Be	Beryllium
Br	Brom
Bzw.	Beziehungsweise
Ca.	Circa
Cd	Cadmium
Cl	Chloride
Co	Cobalt

---

---

Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Da	außen Durchmesser
Di	innere Durchmesser
Dm	mittlere Durchmesser
d.h	das heißt
EU	Europäische Union
FCKW	Fluor(Chlor)-Kohlenwasserstoff
EAG	Elektro-Altgeräte
Fe	Eisen
FS	Feststoff
FU	Frequenz Umrichter
g/cm <sup>3</sup>	Gramm pro Kubikzentimeter
GV	Glühverlust
HR-Schaubild	Henry-Reinhardt-Schaubild
Hq	Quecksilber
HW	Heizwert
Hz	Herz
I	Inhalt
kg	Kilogramm
KJ/kg	Kilojoule pro Kilogramm
KKI	Kornklasse
LG	Leichtgut
l/s	Liter pro Stunde
MG	Mittelgut

---

---

mg/l	Milligramm pro Liter
Mio.	Million
Mn	Mangan
mm	Millimeter
Na(WO <sub>4</sub> )*H <sub>2</sub> O	Natrium-Polywolframat-Wasser-Lösung
NE	Nichteisen
m,%	Masseanteil in Prozente
MW	Maschenweite
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PE	Polyethylen
ppm	parts per million
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyurethan
RFA	Röntgen-Fluor-Analyse
S.	Seite
Sb	Antimon
Se	Selen
SG	Schwergut
SLF	Shredder-Leichtfraktion
Sn	Zinn
SRTL	Shredder Residue Treatment Line
SSA	Schwimm-Sink-Analyse
SSF	Shredder-Schwerfraktion

---

sog.	sogenannte
TBS	Technische Behandlungssysteme
Tl	Thallium
TS	Trockensubstanz
TOC	total organic carbon (gesamte organische Kohlenstoff)
t/Jahr	Tonne pro Jahr
U/min	Umdrehungen pro Minute
u.a.	unter anderen
usw.	und so weiter
V	Volumen
VW-Sicon	Volkswagen-Sicon
z.B	Zum Beispiel
Zn	Zink

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Shredder- und Post-Shredder-Anlagen in Österreich [7, S.106].....	8
Tabelle 2 - Brennstoffeigenschaften und Schadstoffgehalte der Shredder-Leichtfraktion [12] .....	14
Tabelle 3 - Schadstoffe in Shredder-Leichtfraktion [18] .....	15
Tabelle 4: Qualitätsanforderungen an die Shredderflusen- für Emscher Genossenschaft ....	24
Tabelle 5: Röntgen-Fluor-Analyse (RFA).....	30
Tabelle 6: Chemische Analyse des SLF-Filtrates -Prüfer: Agrolab Austria GmbH, Akkreditierte Prüf- und Inspektionsstelle.....	31
Tabelle 7: Siebanalyse der Eingangsprobe - Tabellarische Darstellung .....	32
Tabelle 8: Dichtebestimmung mit Gas-Pyknometer .....	33
Tabelle 9: Glühverlust für Kornklassen .....	37
Tabelle 10: Glührückstand- und Dichteverhältnis in die Kornklassen.....	37

---

Tabelle 11: Auswertung der Schwimm-Sink-Analyse in den Kornklassen für Eingangsprobe .....	38
Tabelle 12: Massenverteilung nach der Glühen und Schwimm-Sink-Analyse.....	39
Tabelle 13: Massenanteil und Aschegehalt für Dichteklasse <1,4; 1,4/1,7; 1,7/2,7 und >2,7 cm <sup>3</sup> .....	40
Tabelle 14: Eingangsprobe, Kornklasse 2/1 mm, Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (.....)	41
Tabelle 15: Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (Korngröße: 1/0,5 mm).....	43
Tabelle 16: Tabellarische Darstellung zum HR-Schaubild (Korngröße: 0,5/0,3,15 mm).....	44
Tabelle 17: Direkte Bestimmung des Aschegehalts aufgrund des Glühverlust-Ergebnisses und mittleren Aschegehalts für jede Kornklasse und Dichtebereich.....	46
Tabelle 18: Durchsätzen an den Austrägen des Wendelscheiders und Massenbilanz der Produkte.....	57
Tabelle 19: Dichtebestimmung mit Akku Pyk 1330 für Wendelscheiderprodukte .....	57
Tabelle 20: Chemische Zusammensetzung für die Wendelscheiderprodukte-Humphreys Bauart .....	59
Tabelle 21: Inhaltsausbringen für ausgewählte chemische Elemente .....	60
Tabelle 22: Durchsätze bei den Austrägen des Wendelscheiders und Massenbilanz der Produkte.....	62
Tabelle 23: Chemische Zusammensetzung für die Wendelscheiderprodukte (FLS- Smidth-Bauart) .....	63
Tabelle 24: Inhaltsausbringen an ausgewählte chemische Elemente .....	64
Tabelle 25: Auswertung für Luftsetzmaschine-Produkte über trockene Masse und Schwimm-Sink-Analyse .....	69
Tabelle 26: Luftsetzversuch: Stoffdichte der Leichtgut-, Mittelgut- und Schwergutprodukte ..	69
Tabelle 27: Glühverlust und Aschegehalt Bestimmung.....	70
Tabelle 28: RFA der Luftsetzmaschineprodukte für ausgewählte Elemente .....	71
Tabelle 29: Massegehalt- und Ausbringen für ausgewählte Elemente der Luftsetzmaschine-Produkte.....	72
Tabelle 30: Grenzwerte für Schwermetallgehalte in Abfällen, zur Herstellung von Zement [21] .....	73
Tabelle 31: Grenzwerte mg/MJ) für Abfälle bei der Verbrennung in Mitverbrennungsanlagen [24, S.3].....	73
Tabelle 32: Massenbilanz bei mehrstufigem Aufstromklassierer.....	75

---

Tabelle 33: Bilanzierung des Aufstromklassierversuches .....	76
Tabelle 34: Chemische Zusammensetzung für Aufstromklassiererprodukte (4/1 mm).....	77
Tabelle 35: Massegehalt- und Inhaltsausbringen für ausgewählte Elemente der Aufstromklassiererprodukte .....	78
Tabelle 36: Massenbilanz für Nassherdprodukte .....	80
Tabelle 37: Chemische Zusammensetzung für Nassherdprodukte .....	81
Tabelle 38: Massegehalt- und Ausbringen für ausgewählte Elementen der Nassherdprodukte .....	82

## 6.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1- Vorgaben der EU-Altfahrzeug-Richtlinie (2000/53/EG) [11, S.6] .....	5
Abbildung 2- Stoffströme Altfahrzeugverwertung [9].....	6
Abbildung 3- Prinzip einer Altfahrzeug-Verwertung-Shredderanlage [9] .....	9
Abbildung 4: Materialfluß einer Shredderanlage .....	10
Abbildung 5: Prozentuelle Massenanteil den Materialströme [8, S. 201].....	11
Abbildung 6: Zusammensetzung der Shredder-Leichtfraktion [27, S.8] .....	12
Abbildung 7: Entsorgung der Shredder-Leichtfraktion in Deutschland vom Jahr 2004 bis 2009 [12].....	13
Abbildung 8: Aufbereitungsprozess der Shredder-Leichtfraktion bei den Fa. Scholz Recycling Ag & Co, Deutschland [15] .....	17
Abbildung 9: Vereinfachtes Fließbild der Aufbereitung von SLF nach dem VW-SI Con- Verfahren (LG-Leichtgut, SG-Schwergut) [1, S.266].....	18
Abbildung 10: Post-Shreddertechnik, Fa. TBS, Enns [8, S.204] .....	19
Abbildung 11: Produkte des Si-Con Verfahrens (TBS, Enns) [9] .....	20
Abbildung 12: Prozentueller Massenanteil für Produkte der Post-Shredderanlage in Enns, Fa. „TBS“. [8.S.204] .....	21
Abbildung 13: Grafik Übersicht Verwertungswege für Kunststoffe [16, S.35] .....	22
Abbildung 14: Verfahrensschema zur Rückgewinnung von feinkörnigen NE-Metallen aus Shredder-Sanden [10].....	26
Abbildung 15: Schematische Skizze der Funktionsweise eines Herdes (Draufsicht), [ 14, S.502].....	28
Abbildung 16: Teilprobe-und Probeteilung durch Viertelungsmethode der Shredder- Sandfraktion .....	29

Abbildung 17: Ablaufschema der Siebanalyse.....	32
Abbildung 18: Korngrößenverteilung .....	33
Abbildung 19: Handklauben .....	34
Abbildung 20: Stereomikroskop Leica MZ 16 - Fotos der geklaubten Fraktionen .....	35
Abbildung 21: Shreddersand (4/2 mm) - Prozentueller Massenanteil alle Stoffe.....	36
Abbildung 22: Schwimm-Sink Analyse mit $\text{Na}(\text{WO}_4)_x$ Lösung.....	38
Abbildung 23: Diagramm zum HR-Schaubild für KKI.2,0-1,0mm .....	42
Abbildung 24: Dichtekurve für Kornklasse 2/1 mm .....	42
Abbildung 25: Diagramm zum HR-Schaubild für KKI. 1,0-0,5 mm .....	43
Abbildung 26: Dichtekurve für Kornklasse 1,0/0,5 mm .....	44
Abbildung 27: : Diagramm zum HR-Schaubild für KKI.0,5-0,315 mm .....	45
Abbildung 28: Dichtekurve für Kornklasse 0,5/0,315 mm.....	45
Abbildung 29: a) Verhältnis der Summenmasse mit Dichte, b) Verhältnis der Summenmasse mit Aschegehalt.....	47
Abbildung 30: Versuchsaufbau zur rührwerksunterstützten Schwimm-Sinkanalyse bei den Trenndichten $1,7\text{g}/\text{cm}^3$ und $1,4\text{g}/\text{cm}^3$ .....	48
Abbildung 31: Rührwerksunterstützte Schwimm Sink- Analyse. Inhaltsausbringen für brennbare und unbrennbare Bestandteile bei den Trenndichten $1,7\text{g}/\text{cm}^3$ und $1,4\text{g}/\text{cm}^3$ . Die brennbaren und unbrennbaren Bestandteile werden über den Aschgehalt abgeschätzt.....	50
Abbildung 32: Wendelrinne, Humphreys-Bauart [16, S.89].....	51
Abbildung 33: Kräfte auf einen Körper im Wendelscheider [6, 90] .....	52
Abbildung 34: Pilotanlage im -Technikum.....	54
Abbildung 35: Geometrie der Wendelrinnen – Humphreys Bauart.....	55
Abbildung 36: Fließbild des Wendelscheiderversuchs (Humphreys Bauart) .....	56
Abbildung 37: Mikroskopische Fotos der Wendelscheiderprodukte .....	58
Abbildung 38: Wendelscheider-Versuchsaufbau (FLS Smidth Bauart „Erzspirale“) .....	61
Abbildung 39: Geometrie der FLS-Smidth Spirale .....	61
Abbildung 40: Stammbaum für Trocken-Nass Kombination der Shreddersandtrennung.....	66
Abbildung 41: Luftsetzmaschinenaufbau zur Shreddersandtrennung .....	67
Abbildung 42: Absaugung mit Pulsationsvorrichtung .....	68
Abbildung 43: Versuchsaufbau der Aufstromklassierer-Trennung .....	74

---

---

Abbildung 44: Volumenstrom Wasser in Abhängigkeit vom der eingestellten Frequenz am FU .....	75
Abbildung 45: Produkte aus dem Aufstromklassiersuch .....	76
Abbildung 46: Herdversuch - Aufbau im Labors Technikum .....	79
Abbildung 47: Nassherd im Labor-Technikum .....	80

---

