

**UNTERSUCHUNG DER AUFBEREITBARKEIT VON
SPATEISENSTEIN DES STEIRISCHEN ERZBERGES MITTELS
SCHWERTRÜBEZYKLONIERUNG UNTER BESONDERER
BERÜCKSICHTIGUNG DER METHODEN
DER STATISTISCHEN VERSUCHSPLANUNG**

Masterarbeit von
Christoph Luckeneder, BSc



Masterstudium Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben

Betreut durch:

Ass-Prof. DI. Dr.mont. Andreas Böhm, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung
DI. Dr.mont. Alfred Stadtschnitzer, VA Erzberg GmbH

Leoben, 2012

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig 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.

Datum, Unterschrift

DANKSAGUNG

Bedanken möchte ich mich bei Ass-Prof. DI. Dr.mont. Andreas Böhm für die Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung meiner Masterarbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei DI. Dr.mont. Alfred Stadtschnitzer und den Mitarbeitern der VA Erzberg GmbH für die Möglichkeit der Erstellung dieser Arbeit und die Unterstützung bedanken.

KURZFASSUNG

Die Herstellung von verkaufsfähigen Produktqualitäten für die Hüttenindustrie aus steirischem Spateisenstein mittels Schwertrübezyklonierung wird untersucht. Ziel ist es, das Inhaltsausbringen an Eisen und das Masseausbringen im Konzentrat zu optimieren. Eine Versuchsanlage steht am Lehrstuhl zur Verfügung.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die Auswirkungen der einzelnen Einstellparameter eines Schwertrübezyklons auf die Dichtespreizung zwischen den Produktströmen und auf die Volumenströme ermittelt. Die Untersuchungen werden unter Zuhilfenahme der Methoden der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Es kann festgestellt werden, dass die Aufgabetrübedichte den größten Einfluss auf den Dichteunterschied zwischen Apex- und Vortexaustrag hat. Am wichtigsten für das Verhältnis der Volumenströme sind Apexdurchmesser und Konusform. Außerdem kann festgestellt werden, dass feine, verdünte Ferrosiliziumtypen wesentlich bessere Ergebnisse liefern als gröbere Ferrosiliziumtypen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die Erkenntnisse über die Parametereinflüsse auf das Aufbereitungsergebnis dazu verwendet, um ein verkaufsfähiges Konzentrat mit einem Eisengehalt von 33,6 [%] und möglichst hohem Masseausbringen herzustellen. Als Aufgabe dient ein Zwischenkonzentrat der Korngrößenklasse 8/1 [mm]. Die erreichten Eisengehalte im Konzentrat, aber auch die Masseausbringenswerte bewegen sich im Bereich der Grobkornschwertrübescheidung.

Im dritten Teil der Arbeit werden ein Flow Sheet und die Auslegungsparameter für eine Anlage zur Schwertrübezyklonierung am steirischen Erzberg für eine Erzaufgabe von 100 [t/h] erarbeitet.

ABSTRACT

This thesis looks into the feasibility of producing marketable product-qualities from spateisenstein ore (spateisenstein is a siderite variety at the Steirische Erzberg) for the iron and steel industry using dense media cyclones. It is the main target to optimize the yield and the iron recovery at a given lower limit of iron grade in the concentrate. A test facility is available at the Institute of Mineral Processing.

The first part of the thesis deals with the effects of the single setting parameters of the high dense media cyclone on the density spread between the product streams and the volume split of the streams. The tests are conducted by using methods of statistical design of experiments. It can be seen that the density of the feed influences the density spread between apex- and vortex-discharge most. The apex diameter and the shape of the cone are crucial for the ratio of the volume split. Furthermore fine, atomized ferrosilicon-types display better results than coarse ferrosilicon-types.

This knowledge about parameter-impacts on the separation result is used for treating a feed material of a size fraction of $-8+1$ [mm]. A concentrate of the same quality than the already operating dense media separation in the coarse size range could be produced in terms of yield and iron grade.

For the third part of this thesis a flow sheet and the design parameters for a high dense media cyclone operation at the Styrian Erzberg are designed for a feed rate of 100 [t/h].

INHALTSVERZEICHNIS

1.) Aufgabenstellung	Seite 1
2.) Zusammenfassung	Seite 2
3.) Design of Experiments	Seite 4
3.1) Einführung in die statistische Versuchsplanung	Seite 4
3.1.1) Geschichtliche Einführung	Seite 4
3.1.2) Abgrenzung zu klassischen Methoden	Seite 5
3.2) Grundbegriffe	Seite 8
3.3) Grundprinzipien	Seite 9
3.4) Screening-Versuchspläne	Seite 12
3.4.1) Funktionsweise von Screening-Versuchsplänen	Seite 13
3.4.2) Versuchsplan dieser Diplomarbeit	Seite 16
3.4.3) Bezeichnung der Screening-Versuchspläne	Seite 18
3.5) Versuchspläne für nicht-lineare Beschreibungsmodelle	Seite 19
3.6) Auswertung	Seite 20
3.6.1) Effekt	Seite 20
3.6.2) Effektdiagramme	Seite 21
4.) Parameterstudie	Seite 22
4.1) Funktionsweise Versuchsstand	Seite 22
4.2) Adaptionen der Versuchsanlage	Seite 24
4.2.1) Zyklongeometrie	Seite 24
4.2.2) Apex- und Vortexdurchmesser	Seite 24
4.2.3) Pumpenantrieb	Seite 24
4.2.4) Druckluftanschlüsse	Seite 24
4.2.5) By-Pass	Seite 25
4.2.6) Austragssiebe	Seite 25
4.2.7) Austragsschläuche	Seite 25
4.3) Trübe	Seite 26
4.3.1) Zusammensetzung	Seite 26
4.3.2) AMC 70	Seite 27

4.3.3) hafsil	Seite	28
4.4) Wichtige Einflussparameter	Seite	29
4.5) Probenahme und Datenaufnahme	Seite	32
4.6) Versuchsreihe 1	Seite	34
4.6.1) Versuchsplan Versuchsreihe 1	Seite	34
4.6.2) Durchführung Versuchsreihe 1	Seite	36
4.6.3) Auswertung Versuchsreihe 1	Seite	39
4.6.4) Ergebnisse Versuchsreihe 1	Seite	44
4.7) Versuchsreihe 2	Seite	46
4.7.1) Versuchsplan Versuchsreihe 2	Seite	46
4.7.2) Durchführung Versuchsreihe 2	Seite	47
4.7.3) Auswertung Versuchsreihe 2	Seite	48
4.7.4) Ergebnisse Versuchsreihe 2	Seite	52
5.) Praktische Erzversuche – Versuchsreihe 3	Seite	54
5.1) Versuchsplan Versuchsreihe 3	Seite	54
5.1.1) Vorbereiteter Versuchsplan	Seite	54
5.1.2) Tatsächlicher Versuchsplan	Seite	55
5.1.3) Probenahme	Seite	56
5.2) Vorbereitung Versuchsreihe 3	Seite	58
5.3) Auswertung Versuchsreihe 3	Seite	60
5.3.1) Übersicht Proben	Seite	60
5.3.2) Vorbereitung der Schwimm-Sink-Analyse	Seite	61
5.3.3) Schwimm-Sink-Analyse	Seite	63
5.3.4) Trennschnitte mit Natriumpolywolframat	Seite	65
5.3.5) Trennschnitte mit Wolframkarbid	Seite	67
5.4) Ergebnisse Versuchsreihe 3	Seite	70
5.4.1) Masseausbringen	Seite	70
5.4.2) Korngrößenverteilungen	Seite	71
5.4.3) Bilanzen	Seite	74
5.4.4) Detailbilanzen Versuch 3.1	Seite	77
5.4.5) Henry-Reinhardt Versuch 3.1	Seite	79
5.4.6) Teilungskurven	Seite	81

5.4.7) Dichtekurven	Seite 85
6.) Anlagenkonzept Zyklonanlage	Seite 87
6.1) Massenabschätzung	Seite 87
6.2) Flowsheet	Seite 89
6.2.1) Erz	Seite 90
6.2.2) Schwerstoff	Seite 90
6.3) Aufgabesieb	Seite 91
6.4) Pumpensumpf	Seite 93
6.4.1) Endfallgeschwindigkeit	Seite 93
6.4.2) Rührerleistung	Seite 95
6.5) Trübepumpe für Zyklonaufgabe	Seite 96
6.5.1) Zusammenstellung	Seite 96
6.5.2) Auslegung der Pumpe	Seite 96
6.5.3) Pumpenantrieb	Seite 99
6.6) Zyklon	Seite 101
6.7) Abtropf- und Waschsiebe	Seite 102
7.) Anhang	Seite 104
7.1) Korngrößenverteilung FeSi	Seite 104
7.2) Korngrößenverteilung Produkte	Seite 105
7.3) Bilanzen Versuchsreihe 3	Seite 107
7.4) Detailbilanzen Versuchs 3.1	Seite 110
7.5) Teilungszahlen Eisen Versuchsreihe 3	Seite 116
7.6) Sicherheitsunterweisung & Betriebsanleitung	Seite 120
7.6.1) Sicherheitsunterweisung	Seite 120
7.6.2) Betriebsanleitung	Seite 122
8.) Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	Seite 125
8.1) Abbildungsverzeichnis	Seite 125
8.2) Tabellenverzeichnis	Seite 127
9.) Quellenverzeichnis	Seite 128

1.) AUFGABENSTELLUNG

Zur Erhöhung des Konzentratausbringens und einer verbesserten Steuerbarkeit der Konzentratqualität soll die Aufbereitbarkeit von steirischem Spateisenstein mittels Schwertrübezyklonierung untersucht werden.

Dazu soll der von Christoph Blasch in seiner Diplomarbeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung zusammen mit der VA Erzberg aufgebaute Versuchsstand adaptiert und für Pilotversuche genutzt werden.

Das Verhalten des Zyklonstandes bei unterschiedlichen Trübezusammensetzungen und Einstellungen der Einflussparameter soll untersucht werden. Auf Basis einer Literaturstudie und Erfahrungswissen ist ein Versuchsplan aufzustellen und abzuwickeln. Die aufzunehmenden Messwerte zur Beurteilung des Zyklonstandverhaltens sind darzulegen.

Nach der Bewertung der Versuche ist aufbauend auf die Ergebnisse ein technischer Vorschlag zum Aufbau einer Zyklonanlage am steirischen Erzberg zu erarbeiten.

2.) ZUSAMMENFASSUNG

Mehrere Adaptierungen werden am Versuchsstand vorgenommen. Am Boden des Pumpensumpfes werden Druckluftanschlüsse zum leichteren Hochfahren der Anlage installiert. Verschiedene Austragsdüsen mit unterschiedlichen Durchmessern für Apex und Vortex sowie ein zweiter Konus für den Zyklon werden angeschafft.

Aus der Gesamtheit der Einstellungsparameter werden fünf Faktoren erarbeitet, welche im Zuge der Parameterstudie auf ihren Einfluss auf die Versuchsanlage hin untersucht werden. Zum Anmischen der Aufgabetrübe werden zwei verschiedene Ferrosiliziumtypen verwendet. Eine Ferrosiliziumtype ist eine Mischung aus gemahlenem und verdüstem Ferrosilizium, die andere besteht nur aus verdüstem Ferrosilizium. Der Aufgabedruck wird zwischen 0,8 und 1,2 [bar] variiert, die Aufgabetrübedichte wird zwischen 2,8 und 3,2 [g/cm³] variiert. Für die Versuche stehen zwei verschiedene Konen für den Zyklon zur Verfügung. Ein Konuselement hat einen Innenwinkel von 12 [°], der andere Konus hat einen Innenwinkel von 20 [°]. Der Durchmesser der Austragsdüse des Apex kann verändert werden. Es werden Austragsdüsen mit einem Durchmesser von 2,25 und 2,50 [in] verwendet.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wird auf die Methoden der statistischen Versuchsplanung zurückgegriffen. Es wird ein Screening-Versuchsplan mit fünf Faktoren mit je zwei Einstellungsstufen aufgestellt. Der verwendete Teilfaktorplan mit der Kurzbezeichnung „2⁵⁻¹“ erlaubt die überschneidungsfreie Analyse aller Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen mit insgesamt 16 Versuchen. Der Einfluss aller fünf Faktoren auf die Dichtespreizung und das Verhältnis zwischen den Volumenströmen wird so analysiert.

Es kann eindeutig festgestellt werden, dass die Trübe bestehend aus verdüstem Ferrosilizium, im Zyklon eine höhere Stabilität aufweist und somit im Zyklon zu besseren Trennergebnissen führt. Für die Steuerung des Verhältnisses der Volumenströme ist der Durchmesser der Apexdüse ein sehr wichtiger Faktor. Je größer der Durchmesser der Apexdüse ist, desto größer ist der Volumenaustrag im Unterlauf.

Aufgrund der gewonnenen Daten werden die Einstellungen für Versuche mit Erz in der Aufgabe festgelegt. Im Zuge der Auswertung der Versuche werden die Korngrößenverteilungen der Produkte erstellt. Es kann festgestellt werden, dass es bei den getesteten Einstellungen keinen relevanten Klassiereffekt gibt. Mittels einer Schwimm-Sink-Analyse werden zur Beurteilung des Trennerfolgs Teilungskurven erstellt. Bei der Veränderung einzelner Faktoren kommt es zu wesentlichen Veränderungen der Trennschnittlage nach Tromp. Die Teilungskurven sind in Kapitel 5.4.6 zu finden.

Das beste Ergebnis kann bei einer Aufgabetrübedichte von 3,00 [g/cm³], einem Konus mit einem Innenwinkel von 20 [°], einer Apexdüse mit einem Durchmesser von 2,50 [in], einem Aufgabedruck von 1,0 [bar] und dem vollständig verdüsten Ferrosilizium als Schwerstoff erreicht werden. Mit diesen Einstellungen kann im Konzentrat ein Eisengehalt von 32,80 [%] mit einem Masseausbringen erreicht werden. Die Trennschnittlage nach Tromp beträgt 3,25 [g/cm³], der Ecart Probable beträgt 0,135 [g/cm³].

In folgender Tabelle sind alle Einstellwerte für die Versuche der Versuchsreihe 3 dargestellt. Zusätzlich sind noch die Trennschnittlage nach Tromp und der Ecart Probable angeführt:

VersuchsNr		3.1	3.2	3.3	3.4
Druck	[bar]	1,0	0,8	1,0	1,0
Apex	[in]	2,50	2,50	2,25	2,50
Dichte	[g/cm ³]	3,00	3,00	3,00	2,80
Konus		steil	steil	steil	steil
FeSi-Typ		hafsil	hafsil	hafsil	hafsil
Trennschnittlage nach Tromp	[g/cm ³]	3,25	3,15	3,45	3,00
Ecart Probable	[g/cm ³]	0,135	0,150	0,100	0,200

Tabelle 0: Einstellungen der Versuchsreihe 3 mit Trennschnittlage nach Tromp und Ecart Probable

Auf Basis der Daten des Versuchs 3.1 wird ein Vorschlag für eine Anlage zur Schwertrübezyklonierung für die VA Erzberg erstellt. Die Anlage wird für eine Erzaufgabe von 100 [t/h] der Korngrößenklasse 8/1 [mm] ausgelegt. Für die Festlegung der Größe des Zyklons wird auf die Grundregel für Sortierzyklone zurückgegriffen, dass ein Trennergebnis, welches mit einem Zyklon erreicht werden kann, mit einem baugleichen aber größeren Zyklon zumindest genauso gut realisiert werden kann. Für eine Erzaufgabe von 100 [t/h] wird ein Zyklon mit einem Innendurchmesser von 20 [in] vorgeschlagen. Für die Innenausführung des Zyklons wird aufgrund der höheren Lebensdauer und Zuverlässigkeit eine Keramikauskleidung empfohlen.

Aufgrund der Tatsache, dass das Ferrosilizium einer der größten Kostentreiber in einer Schwertrübeanlage darstellt, ist die Rückgewinnung des Ferrosiliziums einer der wesentlichen Bestandteile der Anlage. Pro Stunde müssen mindestens 160 [m³] Trübe aufbereitet werden. Für die Trennung der Produkte vom Ferrosilizium werden direkt nach dem Zyklon Bogensiebe verwendet. Mit bebrauten Sieben wird der Rest des Ferrosiliziums abgewaschen. Das Ferrosilizium wird mit Nassmagnetscheidern vom entstandenen Abrieb befreit und mit einem Schraubenklassierer eingedickt. Alle Details zum vorgeschlagenen Anlagenkonzept finden sich in Kapitel 6.

3.) DESIGN OF EXPERIMENTS

3.1) EINFÜHRUNG IN STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG

3.1.1) GESCHICHTLICHE EINFÜHRUNG

Allgemein kann die Entwicklung der statistischen Versuchsplanung in vier Epochen unterteilt werden. Die erste Epoche wird auch landwirtschaftliche Epoche genannt und ist geprägt von der Pionierarbeit von Ronald Aylmer Fisher in den 1920ern und den frühen 1930ern. Er beschäftigte sich ausführlich mit der statistischen Auswertung von landwirtschaftlichen Experimenten. Seine Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und Forschern aus verschiedensten Bereichen führte zu den drei Grundprinzipien der statistischen Versuchsauswertung: Randomisierung, Wiederholung, Blockbildung. Er führte striktes statistisches Denken in die Auslegung von experimentellen Versuchen ein. Die erste Epoche kann als die bedeutendste angesehen werden, da alle bis heute gültigen Grundsätze der statistischen Versuchsplanung in dieser Phase entwickelt wurden [1].

Obwohl die statistische Versuchsauswertung schon in den 1930ern von der Landwirtschaft in die Industrie übertragen wurde, gelang der Durchbruch in der Industrie erst in 1950ern durch die response-surface-methodology (RSM) durch George E. P. Box und K. B. Wilson. Sie nutzen die Tatsache, dass bei Industrieexperimenten (im Vergleich zu Agrikulturexperimenten) sofort nach dem Versuch Ergebnisse zur Verfügung stehen und der Forscher schon nach wenigen Experimenten Wesentliches lernen kann und so schnell weitere Experimente planen kann [1].

Die Arbeit von Gen'ichi Taguchi leitete die dritte Epoche in der statistischen Versuchsplanung ein. Das in den 1970ern aufkommende Interesse der Industrie an einfacher Qualitätsverbesserung sorgte für eine schnelle Verbreitung der Ideen von Taguchi. Er schlug hochfraktionierte faktorielle Designs und neue statistische Ansätze zur Lösung der Probleme vor. Sein robustes Parameterdesign stieß aber auf viel Kritik und hatte mit ungelösten statistischen Problemen zu kämpfen [1].

Der Diskurs über die Methoden von Gen'ichi Taguchi initiierte die vierte Epoche in der statistischen Versuchsplanung. Erstens half der Diskurs bei der Verbreitung der statistischen Versuchsplanung in alle Industriezweige. Zweitens mündeten die Diskurse in einer intensivierten Ausbildung in Statistik für viele Ingenieursstudienzweige und einer Weiterentwicklung der Methoden und einer starken Anpassung vieler Methoden an praktische Anwendungen [1].

3.1.2) ABGRENZUNG ZU KLASSISCHEN METHODEN

In allen Bereichen der Forschung werden Experimente zur Wissensvermehrung eingesetzt. Ein Experiment kann als Test oder als Serie von Tests gesehen werden, während deren Durchführung man gezielt Einflussparameter verändert, um deren Auswirkungen auf das Ergebnis zu untersuchen [2].

Klassische Versuchsmethodik

Die statistische Versuchsplanung ist eine Weiterentwicklung von traditionellen oder klassischen Versuchsmethoden der Schulphysik. Bei klassischen Versuchsmethodiken sucht man eine Grundeinstellung aller Einflussgrößen (Faktoren), verändert dann immer einen dieser Faktoren, hält die anderen Faktoren konstant bzw. stellt sie immer wieder zurück auf den Wert der Grundeinstellung und beobachtet die Auswirkungen. So versucht man Effekte eindeutig zu Einflussgrößen zuzuordnen. Tabelle 1 stellt einen Versuchsplan nach der klassischen Methode dar. Diese Methode kann aber zu Fehlinterpretationen führen, da dieser Versuchsaufbau einen grundsätzlichen Fehler enthält. Man geht nur von einem Punkt im Faktorraum aus und alle Veränderungen von Einflussgrößen sind damit auf diesen Punkt bezogen. Man beachtet nicht, dass die Wahl des Ausgangspunktes im Faktorraum schon Einfluss auf die Ergebnisse hat und die Wahl eines anderen Ausgangspunktes vielleicht zu völlig anderen Effekten geführt hätte. Der zweite wesentliche Fehler ist, dass man davon ausgeht, dass ein von einer veränderten Einflussgröße erzielter Effekt unabhängig von den anderen Einflussgrößen ist [2, 3].

A	B	C	
-	-	-	y 1
+	-	-	y 2
-	+	-	y 3
-	-	+	y 4

Tabelle 1: Aufbau eines klassischen Versuchsplans [2, 3]

Abbildung 1 zeigt einen Faktorraum mit drei Faktoren und jeweils zwei Stufen pro Faktor. Diesen Faktorraum kann man mithilfe eines Koordinatensystems als Würfel darstellen. Die Achsen stellen die Faktoren dar. Der Würfel wird durch die zu untersuchenden Stufen der Faktoren gebildet. Bei der „ein Faktor nach dem anderen Methode“ wird man im Nullpunkt beginnen. Alle Faktoren werden in eine Ausgangsstufe gebracht. Diese Ausgangsstufe wird mit „-“ bezeichnet. Dann wird der erste Faktor verstellt (von „-“ auf „+“) und das Ergebnis beziehungsweise der Effekt wird beobachtet. Dann wird der erste Faktor wieder auf die Ausgangsstufe zurückgestellt, ein weiterer Faktor wird verstellt und wieder wird der Effekt

beobachtet. Man bewegt sich also während der gesamten Versuchsserie entlang der Achsen und ignoriert die anderen vier möglichen Faktorkombinationen [2, 4].

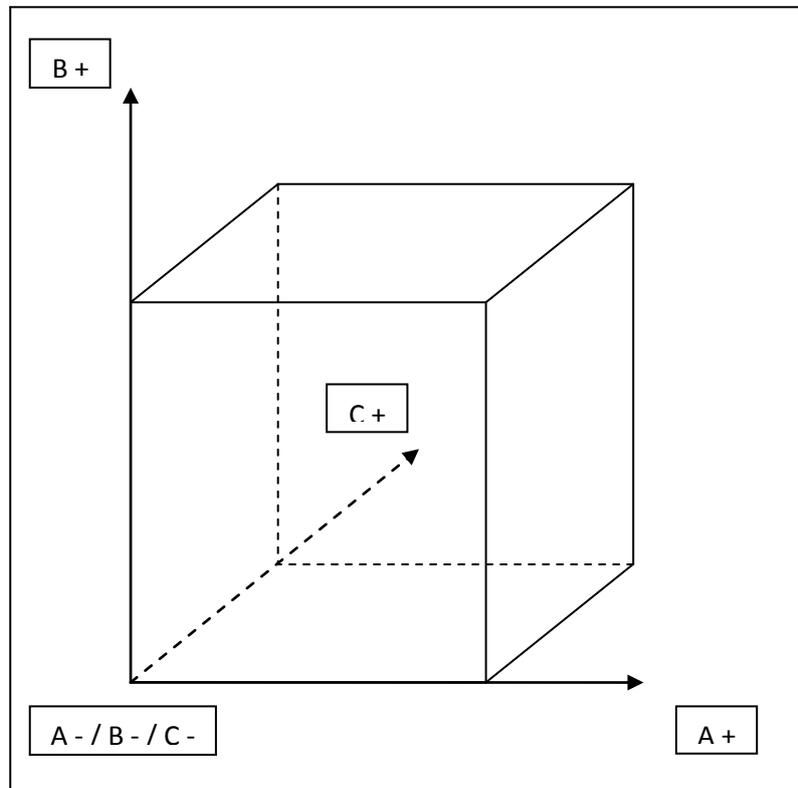


Abbildung 1: Faktorraum für drei Faktoren mit je zwei Stufen pro Faktor [2, 4]

Ansatz der statistischen Versuchsplanung

Die wesentliche Stärke der statistischen Versuchsplanung beziehungsweise der grundlegende Unterschied zwischen der statistischen Versuchsplanung und der klassischen Versuchsmethodik liegt in der Struktur und dem Aufbau der Versuchspläne und der Auswertung der gewonnenen Daten. Ein Versuchsplan, der nach statistischen Grundsätzen aufgebaut ist, tastet den Faktorraum gleichmäßig und vollständig ab. Jeder Faktor wird mehreren Umstellvorgängen unterworfen. Die Randbedingungen haben noch eingeschränkte Bedeutung als Ausgangspunkt der Versuchseinstellungen [2].

Um die statistische Auswertbarkeit der Ergebnisse der Versuche zu gewährleisten, muss ein Versuchsplan „orthogonal“ und „ausgewogen“ sein. Ein Versuchsplan ist orthogonal, wenn die Einstellungsmuster aller Faktoren voneinander unabhängig sind. Ausgewogen ist ein Versuchsplan, wenn für die Stufen jeden Faktors die Stufen der anderen Faktoren gleich verteilt sind [2].

Tabelle 2 stellt einen ausgewogenen, orthogonalen Versuchsplan dar. Die Versuchsserie hat drei Faktoren (A, B, C), welche jeweils mit zwei unterschiedlichen Stufen („+“, „-“) getestet werden. Die Regeln der statistischen Versuchsplanung befolgend resultiert das in acht Versuchen. Es handelt sich hier um einen Vollfaktorplan, da alle möglichen Einstellungskombinationen verwendet werden sollen. Ein solcher Plan wird abgekürzt mit dem Ausdruck „ 2^3 “ bezeichnet. Dieser Ausdruck soll zeigen, wie viele Parameter ein Plan berücksichtigt und über wie viele Einstellungsstufen ein Parameter verfügt (siehe Kapitel 2.3.1). Die Ausgewogenheit dieses Plans ist klar ersichtlich. Die vier „A +“-Einstellungen sind kombiniert mit je zwei „+“ und je zwei „-“ Einstellungen der beiden anderen Faktoren. Das gleiche gilt für die „A -“ Einstellungen, sowie für alle Einstellungen von „B“ und „C“. Dieser Versuchsplan stellt alle möglichen Kombinationen dar. So kann die Auswirkung jedes Faktors berechnet werden, unter Berücksichtigung der Einflüsse aller anderen Faktoren. Bei der Berechnung werden die Mittelwerte für die einzelnen Stufen jeden Faktors ermittelt [2, 4].

A	B	C	
-	-	-	y 1
+	-	-	y 2
-	+	-	y 3
+	+	-	y 4
-	-	+	y 5
+	-	+	y 6
-	+	+	y 7
+	+	+	y 8

Tabelle 2: ausgewogener und orthogonaler Versuchsplan (Vollfaktorplan) [2, 4, 5]

Vergleicht man den klassischen Versuchsplan (Tabelle 1) und den statistisch ausgewogenen, orthogonalen Versuchsplan (Tabelle 2) miteinander, so kann ein wichtiger Unterschied festgestellt werden. Der klassische Versuchsplan kommt mit vier Versuchen aus, der statistische Versuchsplan verlangt nach acht Versuchen. Beim klassischen Versuchsplan ist jede Faktorveränderung immer auf die Grundeinstellung des Versuchsaufbaus bezogen, der statistische Versuchsplan ist von diesem Problem nicht betroffen. Im vorliegenden Beispiel kann davon ausgegangen werden, dass der statistische Versuchsplan zu erhöhtem Versuchs- und Auswertungsaufwand führt. Es kann aber auch davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse nicht von den Versuchsgrundeinstellungen beeinflusst werden, was den erhöhten Aufwand rechtfertigt [2, 6].

3.2) GRUNDBEGRIFFE

Parameter:

Die Parameter sind die Summe aller Einflussgrößen. Auch wenn nicht alle Parameter untersucht werden, ist es doch sinnvoll, alle Parameter zusammenzustellen, um die Übersicht bewahren zu können [2].

Faktor:

Alle Parameter, die im Versuchsplan berücksichtigt werden, nennt man Faktoren. Faktoren sind immer eine Teilmenge der Parameter [2].

Stufe:

Eine Stufe ist eine Einstellung eines Faktors. Faktoren verfügen über mindestens zwei Stufen. Eine Stufe kann auch als Level bezeichnet werden. Stufen sind festgelegte Zustände oder Sachverhalte [2].

Haupteffekt:

Der Effekt eines Parameters ist die Änderung des Ergebnisses verursacht durch die Änderung des Parameterlevels. Ein Effekt wird auch als Haupteffekt bezeichnet, solange er sich auf einen der Einstellungsparameter des Versuchs bezieht [7, 8].

Wechselwirkung:

Bei manchen Versuchen kann festgestellt werden, dass der Effekt, den ein Parameter in einer bestimmten Einstellung verursacht, von der Einstellung eines anderen Parameters abhängt. In diesem Fall spricht man von einer Wechselwirkung [7, 8].

Vollfaktorplan:

Alle Einstellungskombinationen, die möglich sind, werden im Versuchsplan berücksichtigt. Die Anzahl der Einstellungskombinationen (n_r) ergibt sich aus der Anzahl der Stufen pro Faktor ($n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{lx}$) und der Anzahl der Faktoren ($n_{f1}, n_{f2}, \dots, n_{fx}$) mit folgender Formel [7]:

$$n_r = (n_{l1})^{n_{f1}} * (n_{l2})^{n_{f2}} * \dots * (n_{lx})^{n_{fx}}$$

3.3) GRUNDPRINZIPIEN

Die statistische Versuchsplanung basiert auf drei Grundprinzipien. Diese Grundprinzipien sind bei jedem Versuch zu beachten und sind im Folgenden kurz erläutert [9]:

- 1) Randomisierung
- 2) Wiederholung
- 3) Blockbildung

Ad 1) Randomisierung

Die Versuchsreihenfolge wird von jeder Systematik gelöst und soll in eine „ausgewürfelte“ Reihenfolge überführt werden [10]. Das bedeutet auch, dass die Versuchsreihenfolge nicht vom Versuchsdurchführenden bestimmt werden kann, sondern dass die Reihenfolge schon in der Planungsphase mit einem Zufallsgenerator festgelegt wird [9].

Statistische Methoden verlangen, dass nicht nur die Versuche in zufälliger Reihenfolge durchgeführt werden, sondern dass auch verschiedene Materialien, die während des Versuchsprogramms verwendet werden den Ablauf nicht beeinflussen. Dies kann aber zu stark erhöhten Kosten und steigendem Aufwand führen [9, 10].

Für Experimente mit der Zyklonanlage dürfte daher die Versuchsreihenfolge nicht auf den FeSi-Typ im Pumpensumpf ausgerichtet werden. Wenn man aber die gesamte Aufgabe nach ein oder zwei Versuchen verwerfen muss und den Pumpensumpf mit einer anderen FeSi-Type befüllt, sind die Versuche aufgrund der Kosten nicht mehr durchführbar. Im Zuge der Versuche dieser Diplomarbeit muss der Kompromiss eingegangen werden, dass erst alle Versuche mit einer FeSi-Type durchgeführt werden und dann erst mit einer anderen Type weitergearbeitet wird.

Die Loslösung von jeder Systematik soll Schutz vor Störgrößen bieten, vor allem von zeitabhängigen Einflüssen. Ein Beispiel für eine solche Störgröße (bezogen auf diese Masterarbeit) stellt die steigende Temperatur der Trübe im Pumpensumpf im Verlauf eines Versuchstags dar. Die Veränderung der Korngrößenverteilung der Erzkörner im Verlauf der dritten Versuchsserie durch Abrieb, verursacht durch die Trübepumpe, ist ein weiteres Beispiel für eine solche Störgröße [9, 10].

Um diesen Sachverhalt besser darzustellen, möchte ich folgendes Zitat wiedergeben:

„Fishers Entwicklung des statistischen Designs von Versuchen... war ein wesentlicher Schritt zum menschlichen Fortschritt, da die Wissenschaft aus dem Labor in die reale Welt geholt wurde. Die von ihm entwickelte Theorie des experimentellen Designs löste das Problem, wie man valide Experimente in einer natürlicherweise nicht stationären und homogenen Welt ausführen sollte – einer Welt, in der unbekannte, im ‚Hinterhalt‘ liegende, Variablen in unbekannter Weise mit den studierten Variablen zusammenspielen und damit Fehlinformationen und Verwirrung einladen...“

George Box, R.A. Fisher Memorial Lecture 1988 [10]

Ad 2) Wiederholung

Ein Versuch wird als Teil einer Versuchsreihe durchgeführt. Messdaten (in welcher Form auch immer) werden gesammelt und durch eine Auswertung derselben zur Grundlage des Versuchsergebnisses. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Messungen werden aber durch viele Umstände negativ beeinflusst und streuen daher um einen wahren Wert. Es ist allgemein üblich, denselben Messwert mehrmals zu bestimmen, den Messvorgang zu wiederholen. Durch steigende Anzahl der Einzelmessungen kann man sich dem wahren Wert mit steigender Genauigkeit annähern. Die daraus errechenbare Streuung gibt Aufschluss über die Zuverlässigkeit der Messung [9, 10].

Allerdings muss beachtet werden, dass es nicht ausreicht, nur die Messung zu wiederholen. Es ist notwendig den gesamten Versuch zu wiederholen. Werden nur die Messungen wiederholt, überprüft man damit die Streuung des Messsystems [9]. Um die tatsächliche Streuung der Versuchsergebnisse zu überprüfen, muss der gesamte Versuch wiederholt werden, was bedeutet, dass im Laufe eines Versuchsprogramms ein Versuch mehrmals durchgeführt wird und damit auch jedes Mal die Parameter neu eingestellt werden müssen [9, 10].

Während der Durchführung der Versuche für diese Arbeit muss die Dichte der Trübe regelmäßig gemessen werden. Dafür wird mit einem Litergefäß eine Probe gezogen und abgewogen. Es reicht nicht, dass eine gezogene Probe drei Mal abgewogen wird. Das wäre eine reine Überprüfung des Messsystems. Es müssen drei verschiedene Proben aus demselben Strom gezogen werden und jede Probe muss separat gewogen werden. Auf diesem Weg kann ein zuverlässiger Wert für die Dichte gefunden werden.

Soll in einem weiteren Schritt die Stabilität und Zuverlässigkeit der Versuchsanlage überprüft werden, müssen im Versuchsplan Versuchswiederholungen berücksichtigt werden. Ein oder mehrere Versuche werden wiederholt und die Messwerte für die Dichte miteinander verglichen. Idealerweise ergeben sich für gleiche Einstellungen auch gleiche Ergebnisse. Ist dies nicht der Fall, so muss der Versuchsaufbau überarbeitet werden [9].

Ad 3) Blockbildung

Die Blockbildung soll den Einfluss von Störfaktoren minimieren, die man zwar kennt, aber nicht reduzieren kann [9].

Ein Beispiel aus Agrikulturexperimenten: Man will auf einem Versuchsfeld zwei Weizensorten mit zwei verschiedenen Düngern testen. Das Feld wird in vier verschiedene Abschnitte geteilt und die vier möglichen Kombinationen können so getrennt voneinander getestet werden. Wenn aber ein Teil des Versuchsfeldes zeitweise im Schatten liegt, da es an einen Wald grenzt, dann ist es logisch, dass die Ergebnisse in diesem Bereich verfälscht werden. Diesem Effekt kann man begegnen, indem man erst das Feld den äußeren Gegebenheiten nach in Abschnitte unterteilt und dann in jedem Abschnitt alle vier Kombinationen getrennt voneinander untersucht. So kann man den Versuch unabhängig vom Schatteneinfluss durchführen und erhält sogar die Zusatzinformation bezüglich schattigen und sonnigen Abschnitten. Natürlich steigt aber so der Aufwand bei Aussaat und Auswertung [10].

3.4) SCREENING-VERSUCHSPLÄNE

Die Erstellung von Versuchsplänen ist ein wichtiger und eigenständiger Bestandteil der statistischen Versuchsplanung. Heute stehen benutzerfreundliche und leistungsfähige Programme zur Erstellung von maßgeschneiderten Versuchsplänen zur Verfügung. Trotzdem ist es wichtig die Hintergründe und Möglichkeiten zu kennen und zu verstehen. Nur so kann man die Programme richtig verwenden und die von Programmen erstellten Pläne richtig beurteilen [11].

Mit Screening-Versuchsplänen kann man mit vertretbarem Aufwand eine große Zahl von Faktoren gleichzeitig untersuchen, sie bieten sehr effiziente Untersuchungen in Bezug auf Umfang der untersuchten Parameter, die statistische Sicherheit der Ergebnisse und die Anzahl der durchzuführenden Versuche [5, 11].

Screening-Versuchspläne stoßen aber bei der Analyse von nicht linearen Zusammenhängen an ihre Grenzen. Sie können zwar nicht-lineare Zusammenhänge erkennen, aber nur unzureichend beschreiben beziehungsweise wird der Versuchsaufwand, einen nicht-linearen Zusammenhang ausreichend zu beschreiben, sehr groß. Um quadratische, logarithmische oder andere nicht-lineare Zusammenhänge zu analysieren und zu beschreiben, werden andere Verfahren verwendet [11].

3.4.1) FUNKTIONSWEISE VON SCREENING-VERSUCHSPLÄNEN

Aufbau eines Vollfaktorplans

Bei einer hohen Anzahl von zu untersuchenden Faktoren steigt auch bei nur zwei Stufen pro Faktor die Anzahl der benötigten Versuche so schnell an, dass Vollfaktorpläne nicht mehr wirtschaftlich durchführbar sind. Bei fünf Faktoren werden 32 Versuche benötigt ($2^5 = 32$), bei sechs Faktoren schon 64 Versuche ($2^6 = 64$) [5]. Screening Versuchspläne haben die Aufgabe die Anzahl der benötigten Versuche zu reduzieren, aber auch den Informationsverlust gering zu halten. Ein Mittelweg muss gefunden werden. Das ist möglich durch den speziellen Aufbau der Versuchspläne. Eine Reduktion der Anzahl der benötigten Versuche ist möglich, wenn ein Informationsverlust akzeptiert werden kann. Ein Versuchsplan nach den Grundsätzen der statistischen Versuchsplanung für drei Faktoren mit je zwei Einstellungsstufen hat idealerweise einen Aufbau, wie in Tabelle 3 [5, 11]:

A	B	C	
-	-	-	y 1
+	-	-	y 2
-	+	-	y 3
+	+	-	y 4
-	-	+	y 5
+	-	+	y 6
-	+	+	y 7
+	+	+	y 8

Tabelle 3: Vollfaktorplan für drei Faktoren [5, 11]

Hier sind alle möglichen Kombinationen, die sich aus drei Faktoren und zwei Stufen ergeben, aufgelistet. Der Versuchsplan kann mit dem Term „ 2^3 “ beschrieben werden. Acht verschiedene Einstellungskombinationen sind möglich. So ein Versuchsplan wird als Vollfaktorplan bezeichnet, da alle Kombinationen berücksichtigt werden [5].

Ein Vollfaktorplan erlaubt es, dass aus den Ergebnissen der einzelnen Versuche alle Haupteffekte und alle Wechselwirkungen berechnet werden. Für jede Einstellungsstufe jeden Faktors werden die Mittelwerte aus den Ergebnissen berechnet. So kann der Effekt des Faktors abgeschätzt werden [8, 11].

Will man aus den Ergebnissen der Versuche die Wechselwirkungen ableiten, so muss der Versuchsplan um vier weitere Spalten erweitert werden [11]. Die Erweiterung ist in Tabelle 4 dargestellt:

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
-	-	-	+	+	+	-	y 1
+	-	-	-	-	+	+	y 2
-	+	-	-	+	-	+	y 3
+	+	-	+	-	-	-	y 4
-	-	+	+	-	-	+	y 5
+	-	+	-	+	-	-	y 6
-	+	+	-	-	+	-	y 7
+	+	+	+	+	+	+	y 8

Tabelle 4: Vollfaktorplan für drei Faktoren mit Spalten für Wechselwirkungen [5, 11]

Die ersten drei Spalten sind die Einstellungsvorschriften der drei Faktoren. Die nächsten drei Spalten stellen die Zweifachwechselwirkungen dar. Die siebte Spalte stellt die Dreifachwechselwirkung dar. Die zusätzlichen Spalten stellen keine zusätzlichen Versuchseinstellungen und keinen zusätzlichen Aufwand dar, sondern sollen nur die Berechnung der Wechselwirkungen unterstützen [11].

Diese Spalten können durch Multiplikation der entsprechenden Faktorspalten gefunden werden. Auf die Spalte „AB“ kommt man zum Beispiel dadurch, dass man die Faktorspalten „A“ und „B“ miteinander multipliziert (Minus mal Minus ergibt Plus, Minus mal Plus ergibt Minus usw). Die Zwei- und Dreifachwechselwirkungen werden auf die gleiche Weise berechnet, wie die Haupteffekte. Man berechnet die Differenz der Stufenmittelwerte [11].

Entwicklung eines Teilfaktorplans aus einem Vollfaktorplan

Die Dreifachwechselwirkung kann theoretisch berechnet werden, in realen Systemen existieren normalerweise aber keine so komplexen Zusammenhänge. Verzichtet man auf die Berechnung der Dreifachwechselwirkung, so kann die durch Multiplikation der drei Hauptspalten erstellte siebte Spalte auch als Einstellungsvorschrift für einen vierten Faktor verwendet werden [11, 12].

Ein Nebeneffekt der Erstellung der zusätzlichen Spalten durch Multiplikation der bereits existenten Spalten hat einen wichtigen Nebeneffekt: jene Spalten, die durch Multiplikation von anderen Spalten entstehen, übernehmen die Eigenschaften der Ausgangsspalten bezüglich Orthogonalität und Ausgewogenheit. Das bedeutet, dass die Spalte der Dreifachwechselwirkung als Einstellungsvorschrift für einen weiteren Faktor verwendet werden kann, ohne dass die statistischen Gesetze der Versuchspläne verletzt werden [11].

Ein Versuchsplan, bei dem aus der Dreifachwechselwirkungsspalte eine Einstellungsvorschrift für einen weiteren Faktor verwendet wird, hat folgenden Aufbau [11]:

A	B	C	AB	AC	BC	ABC = D	AD	BD	CD	ABD	ACD	BCD	
-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	y 1
+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	y 2
-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	y 3
+	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	y 4
-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	y 5
+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	y 6
-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	y 7
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	y 8

Tabelle 5: Teilfaktorplan für vier Faktoren mit allen Wechselwirkungen [11]

Die Dreifachwechselwirkung ABC wird zur Einstellungsvorschrift für Faktor D. Mit diesem Versuchsplan können vier Faktoren mit acht Versuchen analysiert werden. Um die neu entstandenen Wechselwirkungen durch den zusätzlichen Faktor berechnen zu können, werden mit Multiplikation die Wechselwirkungsspalten erstellt [11, 12].

Nach Berechnung der Wechselwirkungsspalten kann erkannt werden, dass die Spalten sich teilweise gleichen, also den gleichen Aufbau haben. Man kann den Versuchsplan auch folgendermaßen darstellen [11]:

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
BCD	ACD	ABD	CD	BD	AD	D	
-	-	-	+	+	+	-	y 1
+	-	-	-	-	+	+	y 2
-	+	-	-	+	-	+	y 3
+	+	-	+	-	-	-	y 4
-	-	+	+	-	-	+	y 5
+	-	+	-	+	-	-	y 6
-	+	+	-	-	+	-	y 7
+	+	+	+	+	+	+	y 8

Tabelle 6: Teilfaktorplan für vier Faktoren mit allen Wechselwirkungen [11]

Dieser Versuchsplan kann mit dem Term „ 2^{4-1} “ beschrieben werden. Es sind immer zwei Effekte miteinander vermengt. Die Haupteffekte sind immer mit einer Dreifachwechselwirkung vermengt, die Zweifachwechselwirkungen sind untereinander kombiniert. Wenn Spalten den gleichen Aufbau haben, ergeben sie auch das gleiche Ergebnis bei der Berechnung der Mittelwerte, es gibt aber keine Möglichkeit, die beiden Effekte zu trennen bzw. einen Effekt genau einem Verursacher zuzuweisen [11, 12].

In realen Systemen gibt es praktisch keine so komplexen Zusammenhänge wie Dreifachwechselwirkungen, sie haben also kaum Einfluss auf die Haupteffekte, mit denen sie vermengt sind. Die Haupteffekte können also zuverlässig bestimmt werden. Die Zweifachwechselwirkungen können nicht abgeschätzt werden und gehen somit als Information verloren [11].

Dieser Versuchsplan bietet die Möglichkeit mit acht Versuchen, vier Faktoren mit je zwei Stufen zu testen. Die große Stärke dieses Versuchsplans ist die Tatsache, dass jeder Faktor vier Mal in jeder Stufe getestet wird und damit bei der Berechnung der Haupteffekte die Versuchsstreuung eliminiert wird. Der Verlust der Informationen über Zweifachwechselwirkungen kann durch die effiziente Haupteffektanalyse in Kauf genommen werden [11].

3.4.2) VERSUCHSPLAN DIESER DIPLOMARBEIT

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden während des ersten Versuchsdurchlaufs insgesamt fünf Faktoren getestet. Der zugehörige Versuchsplan wird mit dem gleichen Konzept erstellt, wie der vorhergehende Versuchsplan. Der einzige Unterschied ist, dass von vier Faktoren (anstatt von drei) ausgegangen wird und die Vierfachwechselwirkung als Einstellungsvorschrift für einen fünften Faktor verwendet wird (anstatt der Dreifachwechselwirkung). Der Versuchsplan hat folgenden Aufbau [11, 12]:

A	B	C	D	ABCD = E	
-	-	-	-	+	y 1
+	-	-	-	-	y 2
-	+	-	-	-	y 3
+	+	-	-	+	y 4
-	-	+	-	-	y 5
+	-	+	-	+	y 6
-	+	+	-	+	y 7
+	+	+	-	-	y 8
-	-	-	+	-	y 9
+	-	-	+	+	y 10
-	+	-	+	+	y 11
+	+	-	+	-	y 12
-	-	+	+	+	y 13
+	-	+	+	-	y 14
-	+	+	+	-	y 15
+	+	+	+	+	y 16

Tabelle 7: Teilfaktorplan für fünf Faktoren [11, 12]

Dieser Versuchsplan kann mit dem Term „ 2^{5-1} “ beschrieben werden. Der Versuchsplan testet 50 [%] der möglichen Einstellungskombinationen. Die Vermengungsstruktur der Effekte ist aber grundsätzlich anders, als bei einem Teilfaktorplan mit vier Faktoren, der ebenfalls 50 [%] der Einstellungskombinationen testet [11, 12].

Beim vorhergehenden Plan konnten die Haupteffekte zuverlässig bestimmt werden, die Zweifachwechselwirkungen konnten aber nicht mehr analysiert werden. In diesem Versuchsplan haben die Vermengungen eine gänzlich andere Struktur [11]:

A	B	C	D	E	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE	
BCDE	ACDE	ABDE	ABCE	ABCD	CDE	BDE	BCE	BCD	ADE	ACE	ACD	ABE	ABD	ABC	
-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	y 1
+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	y 2
-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	y 3
+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	y 4
-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	y 5
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	y 6
-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	y 7
+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	y 8
-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	y 9
+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	y 10
-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	y 11
+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	y 12
-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	y 13
+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	y 14
-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	y 15
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	y 16

Tabelle 8: Teilfaktorplan für fünf Faktoren mit Vermengungsstruktur [11]

Die Haupteffekte sind mit Vierfachwechselwirkungen vermengt. Die Zweifachwechselwirkungen sind vollständig voneinander getrennt und nur mit den Dreifachwechselwirkungen kombiniert. Es ist also möglich alle Haupteffekte und alle Zweifachwechselwirkungen zuverlässig zu bestimmen. Mit 16 Versuchen werden 15 Effekte bestimmt, was eine große Steigerung der Effizienz zum vorhergehenden Versuchsplan darstellt. 50 [%] der Versuche werden eingespart, aber trotzdem wird jede Stufe jeden Faktors acht Mal getestet.

Wiederholungsversuche um die Streuung zu berücksichtigen sind also nicht nötig. Für reale Systeme ist die Untersuchung von fünf Faktoren meist ausreichend, nichtsdestotrotz bleibt der Aufwand mit 16 benötigten Versuchen in einem vertretbaren Rahmen. Der 2^{5-1} -Versuchsplan gilt als der praxisorientierteste und effizienteste der Screening-Versuchspläne [11, 12].

3.4.3) BEZEICHNUNG DER SCREENING-VERSUCHSPLÄNE

Die Bezeichnung der Screening Versuchspläne ist nicht genormt, folgendes System ist aber weit verbreitet:

X^{Y-Z}	X	Anzahl der Stufen pro Faktor
	Y	Anzahl der Faktoren
	Z	Reduktionsstufe

Die Reduktionsstufe zeigt an, wie viele Faktoren keine separate Einstellungsvorschrift besitzen, sondern deren Einstellungsvorschrift aus anderen Einstellungsvorschriften entwickelt wird (wie im Kapitel davor beschrieben). „ 2^{5-1} “ ist der Term für den Versuchsplan der ersten Versuchsreihe dieser Diplomarbeit. Diese bedeutet, dass fünf Faktoren auf zwei Stufen getestet werden und eine Einstellungsvorschrift aus den anderen entwickelt wurde. Der Term zeigt zugleich an, dass 16 Versuche benötigt werden [11].

3.5) VERSUCHSPÄNE FÜR NICHT-LINEARE BESCHREIBUNGSMODELLE

Die zweistufigen Versuchspläne besitzen keine mittlere Einstellung für die Parameter und können somit auch keine quadratischen Zusammenhänge erkennen. Mit der Zahl der Einstellungsstufen steigt die Anzahl der Kombinationen sehr schnell. Gibt es bei fünf Parametern mit zwei Stufen nur 32 Kombinationen, werden es bei drei Stufen schon 243 mögliche Kombinationen. Umso wichtiger ist jetzt die Auswahl des Verfahrens zur Versuchsreduktion [13].

Zur Beschreibung komplexerer Systeme mit ausgeprägten nicht-linearen Zusammenhängen stehen vielfältige Verfahren zur Verfügung [13, 14]:

Central-Composite-Design
Box-Behnken-Design
Monte-Carlo-Verfahren

Dies sind nur drei Beispiele. Die Beschreibung dieser Verfahren führt in diesem Rahmen zu weit. Entsprechende Beschreibungen können der im Anhang erwähnten Literatur entnommen werden [13, 14].

3.6) AUSWERTUNG

2.6.1) EFFEKT

Die Auswertung der Versuchsergebnisse aus Screening-Versuchsplänen verläuft immer gleich. Die Auswirkung eines Faktors auf das untersuchte System wird durch den Effekt gekennzeichnet. Ein Effekt ist der Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden Einstellungsstufen der Ergebnisse. Der Effekt soll also die Auswirkung des Faktors bei der Veränderung von „-“ auf „+“ darstellen [7].

Die Beurteilung der Unterschiede der Mittelwerte der beiden Einstellungsstufen eines Faktors wird mit Methoden der Statistik durchgeführt. Bewährt für Screening-Versuchspläne hat sich dabei die Verwendung des Zweistichproben-t-Tests. Mit diesem Test kann überprüft werden, ob sich die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten gleichen oder signifikant unterscheiden [7]:

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_P * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

$\bar{y}_1; \bar{y}_2$ Mittelwerte der beiden Faktorstufen

$n_1; n_2$ Anzahl der Proben pro Stufe

S_P gewichtete Varianz

Die gewichtete Varianz wird mit folgender Formel berechnet [7]:

$$S_P = \frac{(n_1 - 1) * S_1^2 + (n_2 - 1) * S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$S_1^2; S_2^2$ Varianz der Ergebnisse der einzelnen Faktorstufen

Um zu beurteilen, ob sich die Mittelwertdifferenzen signifikant unterscheiden, wird t_0 mit der t-Verteilung mit n_1+n_2-2 Freiheitsgraden und einem Signifikanzniveau α verglichen [7]:

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-2}$$

$t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-2}$ kann aus entsprechenden Tabellen abgelesen werden. Als Signifikanzniveau wird normalerweise $\alpha = 5$ [%] angenommen. Ist dieser Zusammenhang erfüllt, kann angenommen werden, dass sich die Mittelwerte signifikant unterscheiden [7].

3.6.2) EFFEKTDIAGRAMME

Effekt-Diagramme sind eine gebräuchliche graphische Darstellungsform für die Effekte. Auf der x-Achse werden nach der Reihe alle Parameter mit den untersuchten Stufen aufgeführt. Die y-Achse stellt das untersuchte Qualitätsmerkmal in der jeweiligen Einheit dar. Werden mehrere Qualitätsmerkmale untersucht, werden auch mehrere Effekt-Diagramme erstellt [2].

4.) PARAMETERSTUDIE

4.1) FUNKTIONSWEISE VERSUCHSSTAND

Für die Durchführung der Versuche dieser Diplomarbeit wird ein Versuchsstand verwendet, der im Rahmen einer vergangenen Diplomarbeit am Lehrstuhl für Aufbereitung [15] entworfen und gebaut wurde und im Rahmen einer Projektstudie am Lehrstuhl für Aufbereitung [16] weiterentwickelt wurde. Die genaue Beschreibung des Aufbaus der Versuchsanlage und die Beschreibung der Berechnung der Auslegungsparameter der einzelnen Bauteile finden sich in dieser Masterarbeit.

Im Rahmen der Diplomarbeit werden geringfügige Anpassungen des Versuchsstandes bezüglich Zyklongeometrie, Apex-/Vortexdurchmesser, Trübepumpe, By-Pass, Austragssiebe, Austragsschläuche und Druckluftanschlüsse realisiert, welche unter den folgenden Punkten kurz beschrieben werden.

In Abbildung 2 ist die Funktionsweise des Versuchsstandes dargestellt:

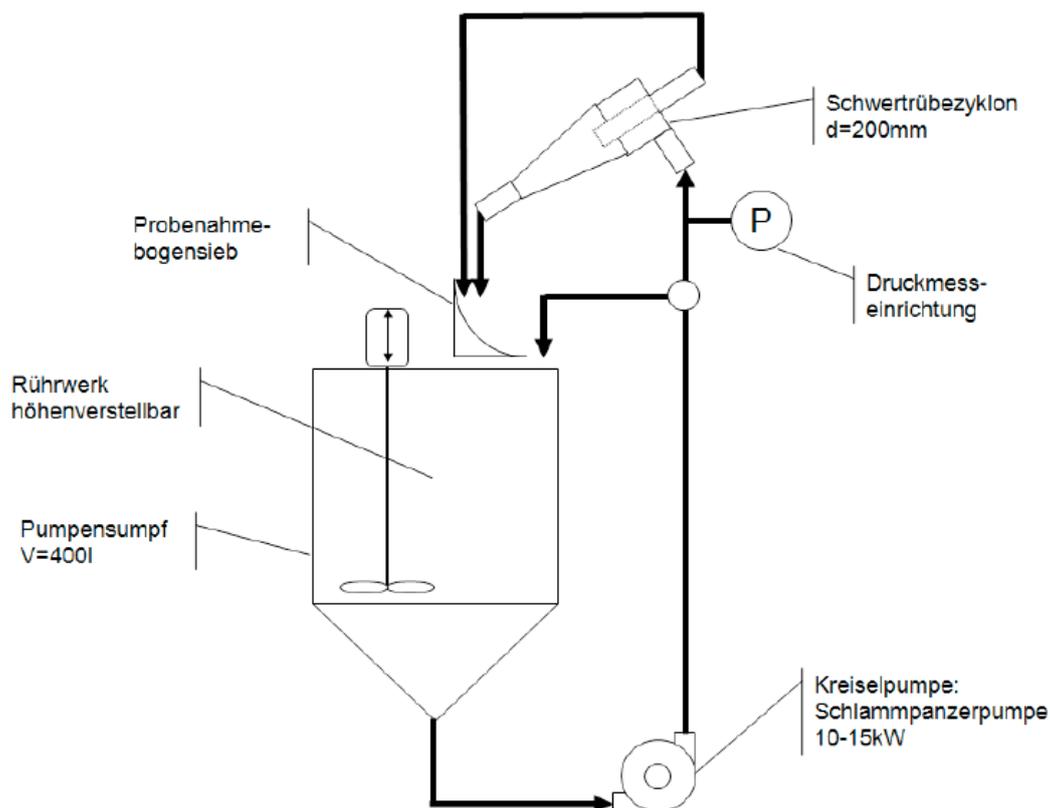


Abbildung 2: Schema der Versuchsanlage zur Schwertrübezyklonierung [15]

Wie aus der Graphik ersichtlich ist, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung, das Material im Kreis zu pumpen. Das Material wird am Boden des Pumpensumpfes von einer Trübepumpe abgesaugt. Der Pumpensumpf kann circa 400 [l] fassen.

Hier kann die gesamte Trübe entweder direkt in den Pumpensumpf zurückgeleitet werden oder die Trübe wird über den Zyklon geleitet. Der Über- und der Unterlaufproduktstrom können entweder direkt zurück in den Pumpensumpf geleitet werden oder die Produkte werden über die Probenahmesiebe aus der Anlage herausgeleitet.

Der Schwertrübezyklon der Firma FLSmidth Krebs Europe GmbH hat die firmeninterne Modellbezeichnung „D6B-12°-839“.

Im Pumpensumpf ist ein Rührwerk installiert, das die Trübe in Bewegung hält und verhindert, dass sich die Trübe abzusetzen beginnt [15].

4.2) ADAPTIONEN DER VERSUCHSANLAGE

4.2.1) ZYKLONGEOMETRIE

Der Zyklon war von Anfang an so ausgelegt, dass er von Hand umgebaut werden kann. Das ursprünglich verbaute Konuselement hat einen Innenwinkel von 12 [°].

Um den Einfluss von verschiedenen Konusformen testen zu können, wird ein Konuselement mit einem Innenwinkel von 20 [°] angeschafft. Dieser Konus ist wesentlich kürzer und verfügt über ein zylindrisches Element, das an der Vortexseite eingebaut werden kann, um zu gewährleisten, dass der gesamte Zyklon durch den Umbau nicht kürzer wird.

4.2.2) APEX- UND VORTEXDURCHMESSER

Die Austragsdüsen des Apex und des Vortex wurden während der ersten Versuchsreihen immer konstant gehalten. Damit der Einfluss dieser Durchmesser auf das Ergebnis untersucht werden kann, werden verschiedene Austragsdüsen aus Kunststoff angeschafft. Es sind nun Austragsdüsen mit den Durchmessern 50,80; 57,15; 63,50; 69,85 und 76,20 [mm] zur Verfügung. Die Düsen können von Hand getauscht werden.

4.2.3) TRÜBEPUMPE

Der Versuchsstand wurde ursprünglich mit einem Motor mit 7,5 [kW] Leistung ausgestattet. Es hat sich herausgestellt, dass dieser Motor bei hohen Pumpraten überhitzt und sich deshalb automatisch abschaltet. Ein kontinuierlicher Betrieb von mehreren Stunden ist so nicht möglich.

Vor dem Start der ersten Versuchsreihe wird der vorhandene Pumpenantrieb durch einen neuen Motor mit einer Leistung von 15 [kW] ersetzt. Zusätzlich erhält der Motor eine digitale Steuerung.

Ein Testlauf vor der ersten Versuchsreihe hat bewiesen, dass der Motor jetzt den Anforderungen gewachsen ist.

4.2.4) DRUCKLUFTANSCHLÜSSE

Als größtes Problem beim Hochfahren der Versuchsanlage mit abgesetztem Ferrosilizium (kurz: „FeSi“) im Pumpensumpf hat sich das erneute Dispergieren des FeSi erwiesen [16]. Um den Dispergierungsvorgang zu erleichtern und zu beschleunigen, werden am Boden des Pumpensumpfes und an der Pumpensumpfaustragsöffnung Druckluftanschlüsse angebracht. Die Druckluftanschlüsse sind jeweils mit einem eigenen Ventil direkt unter dem Pumpensumpf ausgestattet und können separat geöffnet und verschlossen werden.

4.2.5) BY-PASS

Der ursprüngliche Entwurf der Versuchsanlage beinhaltet eine By-Passleitung. Diese By-Passleitung sollte das Hochfahren der Versuchsanlage mit abgesetztem FeSi im Pumpensumpf erleichtern, da so das Wasser im oberen Bereich des Pumpensumpfes im Kreis gepumpt werden kann.

In der Praxis hat sich herausgestellt, dass sich die By-Passleitung sehr schnell mit FeSi zulegt und so ihre Funktionsfähigkeit verliert. Es hat sich herausgestellt, dass das Ausfallen des By-Passes keinen Einfluss auf die Funktionsweise des Versuchstandes hat.

4.2.6) AUSTRAGSSIEBE

Der ursprüngliche Entwurf der Versuchsanlage beinhaltet Austragssiebe. Diese Siebe sind als Bogensiebe ausgeführt. Sie werden zum Zwecke der Probenahme unter die Austragsöffnungen des Über- und des Unterlaufs eingeschwenkt. Die Erzkörner werden vom FeSi getrennt. Das FeSi fließt zurück in den Pumpensumpf, die Erzkörner können am Ende des Siebes aufgefangen werden.

Im Zuge der Versuche dieser Masterarbeit werden die Austragssiebe entfernt. Da durch die Abtrennung der Erzkörner vom FeSi während Probenahme die Volumenkonzentration verändert wird und so die Versuche untereinander weniger vergleichbar sind, wird auf die Siebe verzichtet.

4.2.7) AUSTRAGSSCHLÄUCHE

An den Austragsdüsen des Zyklons werden Kunststoffschläuche installiert, um dafür zu sorgen, dass die Produktströme ohne Verluste in den Pumpensumpf zurückgeleitet werden können. Die Enden der Schläuche werden am Rand des Pumpensumpfes befestigt, was gewährleisten soll, dass die Trübe nicht direkt über der Pumpensumpfaustragsöffnung auf die Trübeoberfläche aufkommt (siehe Kapitel 3.5.2).

4.3) TRÜBE

Im Zuge der Parameterstudie werden keine Versuche mit Erzkörnern in der Aufgabe durchgeführt. Das Verhalten der Versuchsanlage wird ausschließlich mit einer Trübe aus FeSi und Wasser in der Aufgabe bewertet.

4.3.1) ZUSAMMENSETZUNG

Die Trübe wird aus Wasser und Ferrosilizium hergestellt. Es werden keine weiteren Zusatzstoffe verwendet.

Während der Versuche werden Trüben mit unterschiedlichen Dichten verwendet. Die zu untersuchenden Dichtestufen sind 2,80; 3,00 und 3,20 [g/cm³]. Dieser Dichtebereich wird aufgrund von Erfahrungswerten ausgewählt [11]. Auf die Angabe von Massekonzentration oder Volumenkonzentration wird hier verzichtet, da diese nicht zur Einstellung der Trübe verwendet werden. Die Trübe wird eingestellt, indem erst eine ausreichende Menge an Wasser in den Pumpensumpf geleitet wird, im Kreislauf ohne Zyklon gepumpt wird und dann so lange Ferrosilizium hinzugefügt wird, bis die erforderliche Trübedichte erreicht ist. Zur Messung der Trübedichte werden mit einem Litergefäß direkt an der Eintragsöffnung in den Pumpensumpf Proben entnommen. Die Masse des Inhalts wird mittels einer auf die Gefäßmasse tarieren Waage aufgenommen. Anschließend wird die Probe wieder in den Pumpensumpf verkippt.

Insgesamt werden zwei FeSi-Typen mit den Bezeichnungen AMC 70 und hafsil auf ihr Verhalten im Zyklon hin untersucht, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

4.3.2) AMC 70

Die korrekte Firmenbezeichnung lautet „FeSi15-AMC-70“. Es handelt sich hierbei um eine Mischung aus verdüstem und gemahlenem FeSi, die Körner haben eine nur zum Teil eine sphärische Form. Diese FeSi-Type der Firma KOVOHUTY DOLNÝ KUBÍN, s.r.o in Slowakei hat abgesehen vom Eisen folgende Zusammensetzung [17]:

Element		Gehalt [M-%]
Si		14 - 16
C	max.	0,7
S	max.	0,05
P	max.	0,03
Mn	max.	0,7
Cr	max.	0,4

Tabelle 9: chemische Zusammensetzung AMC 70 [17]

Die Korngrößenverteilung des AMC 70 wird mittels Handsiebung ermittelt:

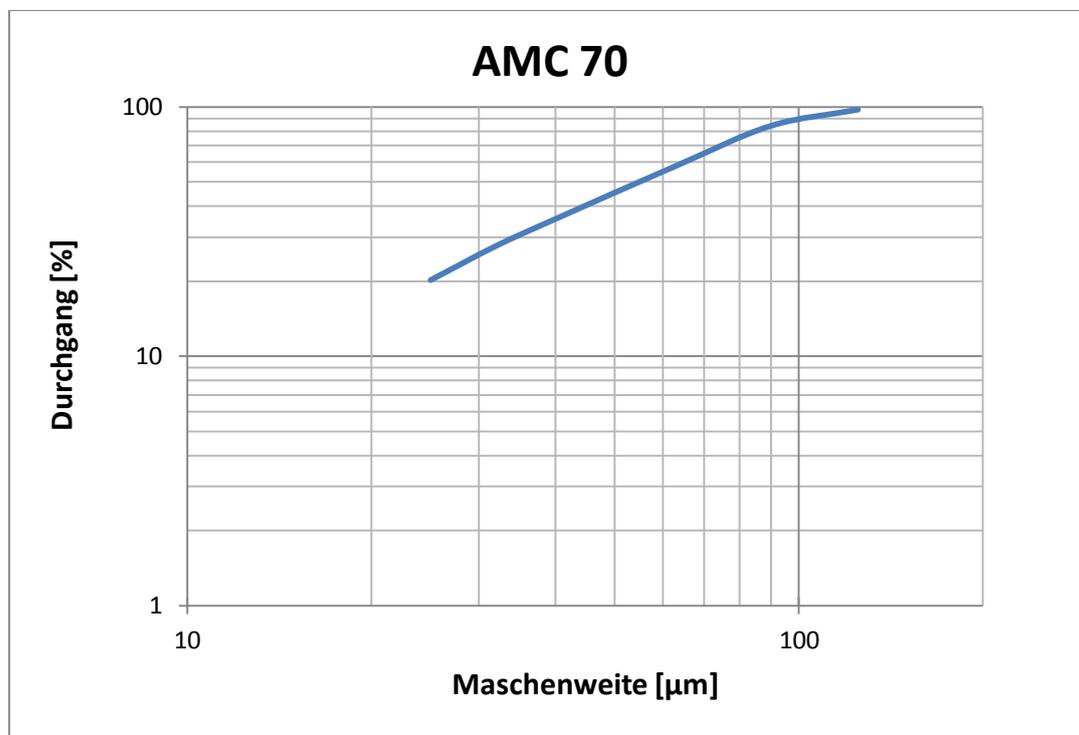


Abbildung 3: Korngrößenverteilung AMC 70

4.3.3) HAFSIL

Die korrekte Firmenbezeichnung lautet „Water Atomised FerroSilicon 15 % Fine“. Es handelt sich hierbei um verdüstes FeSi, die Körner haben eine sphärische Form. Diese FeSi-Type der Firma HAFSIL, AS in Norwegen hat folgende Zusammensetzung [18]:

Element		Gehalt [M-%]
Si		14 - 16
C	max.	0,80
Fe	min.	82
Al	max.	0,05
S	max.	0,05
P	max.	0,10
Mn	max.	0,80
Cu	max.	0,50
Cr	max.	0,80

Tabelle 10: chemische Zusammensetzung hafsil [18]

Die Korngrößenverteilung des hafsil wird mittels Handsiebung ermittelt:

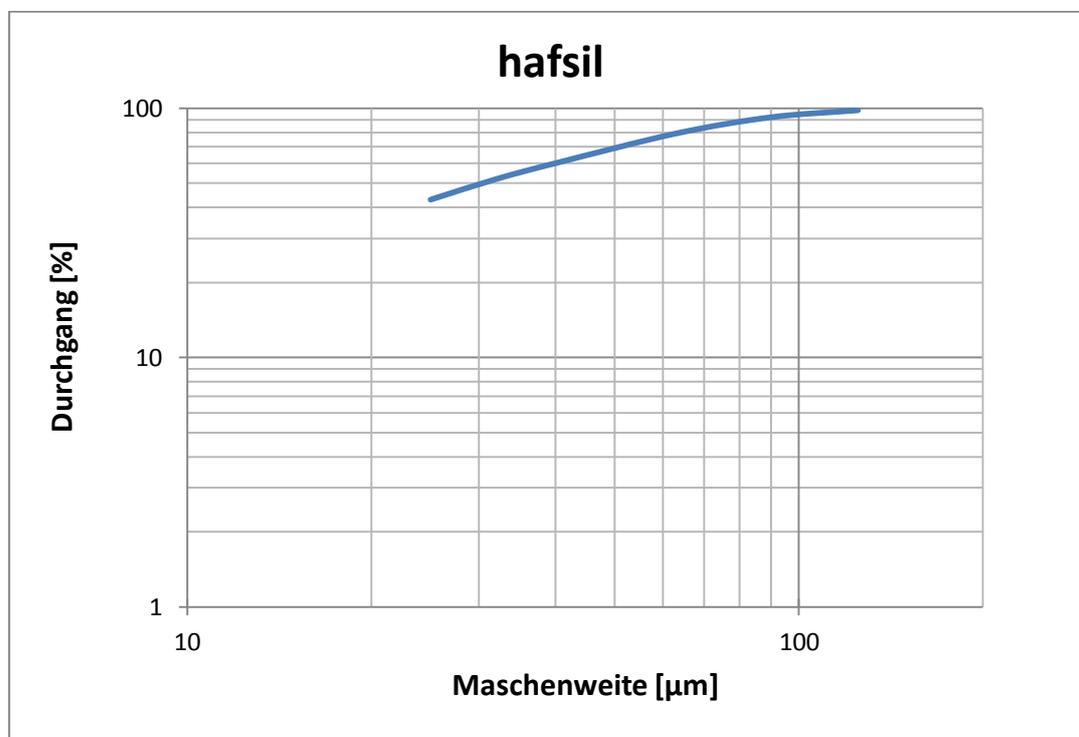


Abbildung 4: Korngrößenverteilung hafsil

4.4) WICHTIGE EINFLUSSPARAMETER

Bei genauer Betrachtung eines Sortierzyklons können viele Parameter gefunden werden, welche Einfluss auf das Trennergebnis des Zyklons haben. Einige sind leicht zu verstellen, andere sind nur mit umfangreichen Umbauarbeiten beeinflussbar. Teilweise ist der Einfluss auf das Trennergebnis enorm, teilweise können kaum Veränderungen festgestellt werden. Folgende Aufstellung soll die wichtigsten Parameter umfassen:

1. Aufgabedruck
2. Apex/Vortexdurchmesser-Verhältnis
3. Konusform
4. Aufgabetrübedichte
5. Ferrosilizium-Type
6. Trübetemperatur
7. Aufstellwinkel Zyklon
8. Tauchrohrabmessungen
9. Zyklondurchmesser
10. Ausbildungsform Aufgabedüse
11. Ausbildungsform Austragsdüse

Alle Parameter können nicht untersucht werden. Vor allem für eine Untersuchung der Parameter sieben bis neun sind mehrere unterschiedliche Zyklone notwendig bzw. müsste die Versuchsanlage umgebaut werden. Aus dieser Parameterliste werden fünf Parameter ausgewählt, die in den Versuchsplan einfließen werden und somit zu Faktoren für die Versuche erhoben werden.

Aus der Literatur und den Erfahrungen aus früheren Studienarbeiten, welche mit dieser Pilotanlage durchgeführt worden sind, werden jene Parameter ermittelt, welche großen Einfluss auf das Trennergebnis haben [19]. Sie werden ab jetzt als Faktoren bezeichnet. Im Folgenden sind die Faktoren kurz beschrieben:

1. Aufgabedruck
2. Apex/Vortexdurchmesser-Verhältnis
3. Konusform
4. Aufgabetrübedichte
5. Ferrosilizium-Type

Ad 1) Aufgabedruck

Die Bemessung des Aufgabedrucks muss so gestaltet sein, dass eine konstante Wirbelströmung im Zykloninneren gewährleistet ist. Schwankungen des Aufgabedrucks sind aus Gründen der Trennschärfe zu vermeiden. Laut Literatur ist der Einfluss des Aufgabedrucks eher gering [20].

Der Aufgabedruck soll zwischen 0,4 und 1,2 [bar] variiert werden, um einen möglichst großen Bereich zu testen [19].

Ad 2) Apex/Vortexdurchmesser-Verhältnis

Einer der wichtigsten Faktoren für das Trennergebnis ist das Verhältnis der Durchmesser der Austragsdüsen von Apex und Vortex. Dieses Verhältnis beeinflusst die Strömungsverhältnisse im Zyklon und somit die Aufsplittung der Volumenströme. Durch seinen Einfluss auf die Austragskapazitäten ist das Verhältnis sehr entscheidend für die Trennschnittlage. Eine Verringerung des Apexdurchmessers bewirkt eine Erhöhung der Trennschnittlage und umgekehrt [20].

Aus praktischen Gründen wird während der Versuche dieser Diplomarbeit nur der Apexdurchmesser verändert, da das Verändern des Vortexdurchmessers sehr aufwendig ist und in diesem Fall keine zusätzliche Information bietet.

Ad 3) Konusform

Über den Einfluss der Konusform gibt es in der Literatur wenige eindeutige Aussagen, allerdings werden laut Literatur aus Gründen der Trennschärfe bei Erzen Konuswinkel (α) von 20° bevorzugt [20].

Für die Versuche stehen zwei verschiedene Kone zur Verfügung, ein steiler Konus mit einem Winkel von 20° und ein flacher Konus mit einem Winkel von 12° .

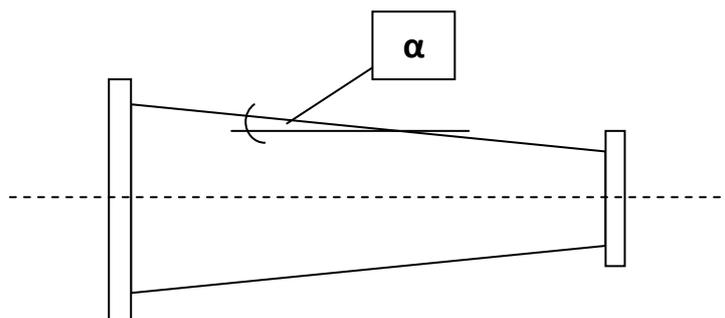


Abbildung 5: Konuswinkel des Zyklons

Der steilere Konus ist natürlich wesentlich kürzer als der flache Konus. Um die Länge des Zyklons durch einen Konustausch nicht zu verändern, steht ein zylindrischer Teil zur Verfügung, der in den Zyklon eingebaut werden kann [27].

Ad 4) Aufgabetrübedichte

Die Aufgabetrübedichte ist ein wichtiges Instrument zur Veränderung der Trenndichte. Als Trenndichte wird die Dichte jener differentiellen Fraktion gewertet, die zu gleichen Teilen in den Über- und in den Unterlauf gelangt [21].

Es muss beachtet werden, dass die Fließfähigkeit der Trübe nicht eingeschränkt wird. 35 bis 40 [Vol-%] Schwerstoff in der Trübe sollten nicht überschritten werden [23]. Je enger die beiden Dichten beisammen liegen, desto einfacher ist die Steuerung des Trennschnitts [22].

Für die Versuche werden Trübedichten von 2,8 bis 3,2 [g/cm³] festgelegt, da dieser Dichtebereich auf Grund von Erfahrungswerten am erfolgversprechendsten erscheint.

Ad 5) Ferrosilizium-Type

Für die Untersuchungen stehen zwei verschiedene Typen von Ferrosilizium zur Verfügung. Das Ferrosilizium wird im weiteren Verlauf der Arbeit mit dem Ausdruck „FeSi“ bezeichnet. Verglichen werden eine Trübe aus einer Mischung von gemahlenem und verdüstem FeSi und eine Trübe mit verdüstem FeSi. Es ist zu erwarten, dass mit dem verdüsten FeSi wesentlich größere Trübedichten erreicht werden können, als mit gemahlenen FeSi. Dies bedeutet, dass bei gleicher Trübedichte, die Trübe mit verdüstem FeSi wesentlich bessere Fließeigenschaften erreichen wird [23].

4.5) PROBENAHME UND DATENAUFNAHME

Probenahme

Während jedes Versuchs werden insgesamt zwei Proben gezogen: jeweils eine aus dem Überlauf und eine aus dem Unterlauf. Die Proben werden im Zuge der Dichtemessung der einzelnen Ströme gezogen. Um zuverlässige Ergebnisse bei der Dichtemessung zu erreichen, wird die Dichte jedes Stroms insgesamt drei Mal gemessen. Da jedes Mal exakt ein Liter Probe entnommen wird, um die Dichte zu bestimmen, ist es praktisch eine dieser Proben zur Analyse zurückzuhalten. Um zu entscheiden, welche der drei Proben aufbehalten wird, wird schon im Vorfeld jedem Versuch und jedem Strom mit Microsoft Excel eine Zufallszahl von eins bis drei zugewiesen. Diese Zahl sagt aus, welche der drei Proben, die zur Dichtemessung verwendet wurden, als Rückstellprobe aufbehalten wird.

Zur Messung der Trübedichte werden mit einem Litergefäß direkt an den Austragsöffnungen der Zyklone Proben entnommen. Die Masse des Inhalts wird mittels einer auf die Gefäßmasse tarierten Waage aufgenommen. Anschließend wird die Probe wieder in den Pumpensumpf verkippt, sofern die Probe nicht für weitere Analysen zurückgestellt wird.

Datenaufnahme

Während jeden Versuchs wird ein Versuchsprotokoll geführt, das vor den Versuchen vorbereitet wird. Folgende Daten werden dokumentiert:

1. Dichten
2. Volumenstrom
3. Motorleistung
4. Temperatur der Trübe

Ad 1) Dichten

Als erstes werden die Dichten gemessen. Jeder Strom wird drei Mal beprobt. Für die Dichtemessung wird ein Gefäß verwendet, das bei genau einem Liter Füllvolumen eine Auslassöffnung besitzt. So ist gewährleistet, dass nur genau ein Liter Trübe im Gefäß ist. Dieses Gefäß wird dann auf einer Waage, welche auf die Gefäßmasse tariert ist, gewogen. Der Wiegewert kann direkt als Dichte übernommen werden.

Um die Funktionsfähigkeit des Messsystems zu überprüfen werden vor der Bestimmung der ersten Trübedichten Messungen mit reinem Wasser im Litergefäß durchgeführt.

Ad 2) Volumenstrom

Die Volumenströme des Über- und Unterlaufs werden bei jedem Versuch gemessen. Der Volumenstrom ist aber einer direkten Messung unzugänglich. Es wird ein Eimer mit zehn Liter Nennfüllvolumen am Rand des Pumpensumpfes aufgehängt. Nun wird die Zeit gestoppt, die benötigt wird, bis der Eimer nach Einschwenken eines Austragsschlauchs voll ist. Daraus können dann die Liter pro Sekunde berechnet werden. Auch diese Messung wird drei Mal pro Strom durchgeführt.

Ad 3) Motorleistung

Aus Gründen der Vollständigkeit wird auch die Motorleistung mit aufgenommen. Diese kann direkt am Steuerungskasten der Pumpe abgelesen werden.

Ad 4) Temperatur der Trübe

Die Temperatur der Trübe wird am Anfang und am Ende des Versuchs aufgenommen. Zur Messung wird ein Infrarotmessgerät verwendet, das berührungslose Messungen erlaubt.

4.6) VERSUCHSREIHE 1

4.6.1) VERSUCHSPLAN VERSUCHSREIHE 1

In der ersten Versuchsreihe werden alle zuvor beschriebenen Faktoren untersucht. Für jeden Faktor werden zwei Extremwerte aufgrund von Erfahrungswerten [11, 25] ausgewählt. Ein Vollfaktorplan für fünf Faktoren auf jeweils zwei Stufen besteht aus 32 Versuchsdurchläufen. Wenn man auf die Informationen über Wechselwirkungseffekte höherer Ordnung (Dreier-, Vierer- oder Fünferwechselwirkungen) verzichtet, können die benötigten Daten mit 16 Versuchen gesammelt werden.

Dieser Typ von Versuchsplan gehört zu den Screening-Versuchsplänen. In diesem Versuchsplan ist es möglich, dass nicht nur die Einzeleffekte berechnet werden, sondern auch alle Wechselwirkungseffekte, bei denen zwei Faktoren beteiligt sind. Es sind also alle Haupteffekte und alle Zweifachwechselwirkungen voneinander getrennt. Alle Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen sind aber von je einer Drei-, Vier- oder Fünffachwechselwirkung hinterlegt. Es wird angenommen, dass die Wechselwirkungen höherer Ordnung keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Im Allgemeinen gilt dieser Versuchsplan als so robust, dass auf Wiederholung von Versuchen verzichtet werden kann, da jeder Parameter ohnehin jeweils acht Mal in der einen und acht Mal in der anderen Einstellung getestet wird [6].

Versuch Nr.	Druck [bar]	Apex [in]	Konus	Dichte [g/cm ³]	FeSi
1.1	0,8	2,25	flach	2,8	AMC 70
1.2	1,2	2,25	steil	2,8	AMC 70
1.3	0,8	2,50	steil	2,8	AMC 70
1.4	1,2	2,50	flach	2,8	AMC 70
1.5	0,8	2,25	steil	3,2	AMC 70
1.6	1,2	2,25	flach	3,2	AMC 70
1.7	0,8	2,50	flach	3,2	AMC 70
1.8	1,2	2,50	steil	3,2	AMC 70
1.9	0,8	2,25	steil	2,8	hafsil
1.10	1,2	2,25	flach	2,8	hafsil
1.11	0,8	2,50	flach	2,8	hafsil
1.12	1,2	2,50	steil	2,8	hafsil
1.13	0,8	2,25	flach	3,2	hafsil
1.14	1,2	2,25	steil	3,2	hafsil
1.15	0,8	2,50	steil	3,2	hafsil
1.16	1,2	2,50	flach	3,2	hafsil

Tabelle 11: Versuchsplan der Versuchsreihe 1

Der Versuchsplan wird von Hand nach den Regeln des DoE erstellt und dann mithilfe des Programms „Design Expert 8.0.7.1 Trial“ der Firma Stat-Ease Inc. verifiziert.

Ein Kompromiss bezüglich der zufällig verteilten Reihenfolge der einzelnen Versuche muss gefunden werden, da es sich als sehr aufwendig gestaltet, die Einstellungen bezüglich FeSi-Type, Apexdurchmesser und Konusform am Versuchsstand zu ändern.

Um das Versuchsprogramm in einem vertretbaren Kosten- und Aufwandsrahmen zu halten, wird erst das ganze Programm nach dem FeSi-Typ ausgerichtet. Die Umstellung des FeSi-Typs erfordert das Verkippen des gesamten Pumpensumpfinhalts in den Schwerstoffaufbereitungskreislauf der Aufbereitungsanlage. Das FeSi ist damit für die Versuche verloren. Es ist aus Kostengründen nicht vertretbar, dass so große Mengen an FeSi für die Versuchsdurchführung verbraucht werden.

Um die Aufgabetrübedichte nur einmal pro FeSi-Typ umstellen zu müssen, werden erst alle Versuche mit der geringeren Dichte abgewickelt, dann wird die Dichte mittels FeSi-Zugabe erhöht.

Das dritte Ausrichtungskriterium sollte die Konusform sein. Jede Änderung der Konusform beinhaltet bei dieser Zyklonanlage auch den Ausbau der Apexdüse, was die Ausrichtung des Versuchsplans nach der Konusform sinnvoll erscheinen lässt.

4.6.2) DURCHFÜHRUNG VERSUCHSREIHE 1

Neue Erkenntnisse bezüglich Anlage

Die Versuchsreihe 1 dient nicht nur dazu, Daten zu sammeln und ein erstes Modell des Verhaltens der Anlage zu erstellen. Sie soll auch zur weiteren Erprobung der Funktionstüchtigkeit und der Dokumentation und Ausmerzung von Schwächen dienen. Aus diesem Grund wird vor den ersten Versuchen ein Belastungstest durchgeführt und probeweises Auf- und Niederfahren der Anlage simuliert. Folgendes kann bei der Versuchsdurchführung der ersten Versuchsreihe beobachtet werden:

1. Erleichtertes Anfahren der Anlage durch Druckanschlüsse
2. Versuche müssen wiederholt werden, da Parameterkombinationen nicht funktionieren
3. Luftblasen in der Trübe verhindern genaue Steuerung

Ad 1) Erleichtertes Anfahren der Anlage durch Druckanschlüsse

Durch Installation von 10 Druckluftanschlüssen am Boden des Pumpensumpfes und eines Druckanschlusses direkt an der Abzugsöffnung wird das Anfahren der Zyklonanlage (siehe Betriebsanweisung im Anhang) wesentlich erleichtert. Mit der Druckluft kann das FeSi an gewissen Punkten bis zum Boden hinunter aufgewirbelt werden. Dadurch entstehen in Kombination mit der Rührerwirkung (Trübe dreht sich im Pumpensumpf im Kreis) Verwirbelungen, die FeSi im Nahbereich um die Druckluftanschlüsse mitreißen. Besonders der Druckluftanschluss über der Pumpensumpfauslassöffnung erleichtert die Handhabung der Zyklonanlage beim Hochfahren. Durch die aufsteigende Druckluft entsteht ein Kanal im abgesetzten FeSi. So kann die Pumpe wesentlich früher aktiviert werden, was beim Aufwirbeln des FeSi hilft. In Abbildung 6 sind einige der Druckluftanschlüsse zu sehen.



Abbildung 6: Pumpensumpf mit Druckluftanschlüssen

Ad 2) Versuche müssen wiederholt werden, da Parameterkombinationen nicht funktionieren

Ursprünglich war geplant den Druck zwischen 0,4 und 1,2 [bar] zu variieren. Während der Durchführung der Versuche stellte sich allerdings heraus, dass bei einem Apexdurchmesser von 2,5 [in], einer Aufgabetrübedichte von 3,2 [g/cm³] und dem flachen Konus bei einem Aufgabedruck von 0,4 [bar] kein Überlauf zustande kommt. Der niedrigere Druck muss auf 0,8 [bar] angehoben werden. Bei diesem Druck kann ein stabiler Überlauf erreicht werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen zu gewährleisten, werden die Versuche 1.1, 1.3 und 1.5 mit erhöhtem Druck wiederholt. Diese Versuche waren bereits mit einem Druck von 0,4 [bar] durchgeführt worden.

Die Ergebnisse der drei verworfenen Versuche fließen nicht in die Auswertung der Versuche der Diplomarbeit ein, sind aber hier der Vollständigkeit halber angeführt. In Tabelle 12 sind die Einstellungen der Faktoren zu sehen, in Tabelle 13 die Ergebnisse.

Nr.	Druck [bar]	Apex [in]	Konus	Dichte [g/cm ³]
1.1	0,4	2,25	flach	2,80
1.3	0,4	2,50	steil	2,80
1.5	0,4	2,25	steil	3,20

Tabelle 12: Faktoreinstellungen der verworfenen Versuche

Nr.	Trübedichte		Volumenstrom	
	Überlauf [g/cm ³]	Unterlauf [g/cm ³]	Überlauf [l/sec]	Unterlauf [l/sec]
1.1	1,69	3,31	1,80	2,86
1.3	1,86	3,23	1,08	4,32
1.5	3,00	3,51	2,05	3,30

Tabelle 13: Ergebnisse der verworfenen Versuche

Ad 3) Luftblasen in der Trübe verhindern genaue Steuerung

Bei den Belastungstests vor der ersten Versuchsserie trat zum ersten Mal das Problem auf, dass der Druck nicht genau abgelesen werden konnte, da die Manometernadel unkontrolliert springt. Nach längerem herumprobieren konnte folgender Grund festgestellt werden: wenn die Pumpe bei höheren Drehzahlen betrieben wird und dadurch ein entsprechender Volumensstrom durch die beiden Zyklonaustragsschläuche fließt, kann es sein, dass die Trübe so heftig in den Pumpensumpf aufschlägt, dass Luftblasen unter die Trübeoberfläche mitgerissen werden und sofort in den Trübeabzug gesaugt werden. Diese Luftblasen machen

genaue Drucksteuerung und somit zuverlässige Trennung unmöglich, da die Gasblasen im Zyklon komprimiert werden können. Konkret konnte beobachtet werden, dass der Überlauf in unregelmäßigen Abständen zusammenbricht und sich wieder aufrichtet.

Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, werden die beiden Zyklonaustragsschläuche mit Draht am Rand des Pumpensumpfes befestigt. Diese Maßnahme war bereits ausreichend, dass die Luftblasen nicht mehr in die Pumpensumpfaustragsöffnung gesaugt werden.

4.6.3) AUSWERTUNG VERSUCHSREIHE 1

Die Versuche werden hauptsächlich auf zwei Gesichtspunkte hin untersucht. Während jedes Versuchs wird die Dichte jeweils im Über- und Unterlauf gemessen. Daraus kann die sogenannte Spreizung, der Dichteunterschied zwischen den beiden Strömen, errechnet werden. Die Spreizung ist ein wesentlicher Faktor für die Prozesssteuerung. Je enger die beiden Dichtewerte beieinander liegen, desto leichter kann der Prozess gesteuert werden. Die absolute Dichte der jeweiligen Ströme ist wichtig für die Lage der Trennschnitte. Je höher die Unterlaufdichte ist, desto mehr Körner werden in den Überlauf gedrückt. Eine geringe Unterlaufdichte erlaubt es mehr Körnern in den Unterlaufstrom einzudringen.

Als zweiter wesentlicher Faktor werden die Volumenströme gemessen. Aus dem Volumenstrom kann man Rückschlüsse auf das mögliche Masseausbringen ziehen.

In Tabelle 14 sind die gemessenen Dichten im Überlauf (1) und im Unterlauf (2) angegeben. In den beiden nächsten Spalten sind die gerechneten Dichten des Überlaufs (3) und des Unterlaufs (4) dargestellt. Für die Berechnung der Trübedichte werden die FeSi-Massen aus den einzelnen Proben und die Tatsache, dass jede Probe ein Volumen von einem Liter hat, verwendet. In den beiden letzten Spalten sind der Volumenstrom des Überlaufs (5) und des Unterlaufs (6) abzulesen:

	(1) [g/cm ³]	(2) [g/cm ³]	(3) [g/cm ³]	(4) [g/cm ³]	(5) [l/sec]	(6) [l/sec]
1.1	1,87	3,84	1,80	3,61	3,45	4,01
1.2	2,50	3,73	2,26	3,67	1,42	4,29
1.3	1,97	3,52	1,96	3,32	2,95	4,77
1.4	1,86	3,65	1,97	3,68	3,83	5,32
1.5	2,52	3,52	2,54	3,51	3,02	3,35
1.6	2,70	3,81	2,76	3,76	3,68	3,73
1.7	2,52	3,70	2,51	3,65	1,91	4,97
1.8	2,92	3,73	2,94	3,70	3,85	5,20
1.9	2,16	3,32	2,19	3,37	3,48	3,39
1.10	1,97	3,59	1,99	3,52	4,40	4,20
1.11	1,90	3,51	1,92	3,45	2,75	4,13
1.12	1,97	3,49	1,99	3,44	3,72	4,53
1.13	2,74	3,51	2,71	3,46	2,65	3,58
1.14	2,88	3,57	2,86	3,51	4,19	3,97
1.15	2,85	3,35	2,68	3,28	2,23	4,01
1.16	2,58	3,60	2,60	3,50	3,02	4,21

Tabelle 14: Ergebnisse Versuchsreihe 1

Es ist leicht zu erkennen, dass die gemessenen Dichten und die errechneten Dichten Unterschiede aufweisen. Für alle Rechnungen werden die gemessenen Dichten verwendet. Die errechneten Dichten werden nur zur Überprüfung der gemessenen Dichten verwendet.

Test der Unterschiede auf Signifikanz

Die beiden Methoden der Dichtefeststellung werden überprüft. Unterschiede sind zu erkennen. Ob die Unterschiede signifikant sind, wird mit einem Zweistichproben-t-Test überprüft (siehe Kapitel 3.6.1).

Verglichen werden jeweils die gemessenen und die gerechneten Dichten. Das Signifikanzniveau wird mit 5 [%] angenommen, es wird mit 28 Freiheitsgraden gerechnet. In Tabellen für die Student t-Verteilung kann für $t_{\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-2}$ unter diesen Voraussetzungen ein Wert von $t=2,048$ abgelesen werden.

Die Berechnung für die Überlaufdichten ergibt einen Wert für t_0 von 1,68. Nachdem der Zusammenhang $t_0 > t$ nicht erfüllt ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede für die Überlaufdichten nicht signifikant sind.

Die Berechnung für die Unterlaufdichten ergibt einen Wert für t_0 von 403,27. Nachdem der Zusammenhang $t_0 > t$ erfüllt ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede für die Überlaufdichten signifikant sind.

Interpretation der Unterschiede

Die statistische Überprüfung hat ergeben, dass zumindest die Unterschiede zwischen den gemessenen und den gerechneten Unterlaufdichten signifikant sind. Die gemessenen Dichten sind im Durchschnitt höher als die gerechneten Dichten.

Die niedrigeren Dichten bei der Berechnung aus den Rückstellproben können dadurch erklärt werden, dass es bei Transport und bei der Weiterverarbeitung der Proben zu Verlusten an FeSi gekommen ist. Die Berechnung der Dichten hat diese weiterverarbeiteten Proben als Grundlage. Dadurch kann es zu geringeren Dichten als Ergebnis gekommen sein. Für alle Rechnungen werden die gemessenen Dichten verwendet.

Spreizung:

Die Spreizung zwischen Über- und Unterlauf wird berechnet, indem man die Überlaufdicke von der Unterlaufdicke abzieht. Aus den errechneten Daten ergibt sich folgendes Effektdiagramm für die Spreizung der Dichten:

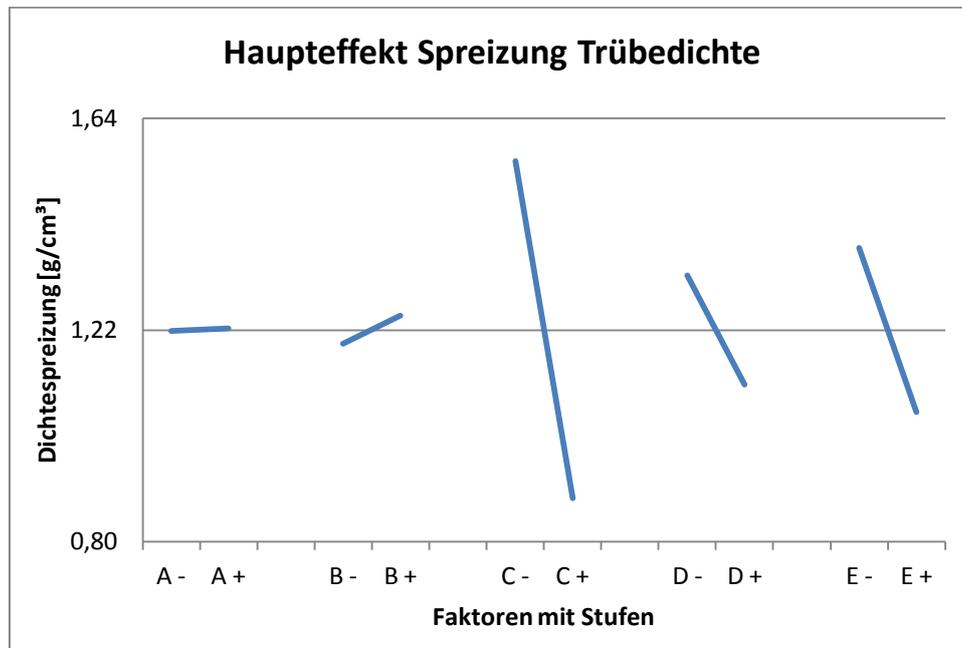


Abbildung 7: Haupteffekte Spreizung der Versuchsreihe 1

Im vorliegenden Effektdiagramm sind folgende Einflüsse dargestellt:

- (A) Aufgabedruck
- (B) Apexdurchmesser
- (C) Aufgabetrübedichte
- (D) Konusform
- (E) FeSi-Typ

(A) & (B) Aus diesem Diagramm kann erkannt werden, dass die Einflüsse von Aufgabedruck und Apexdurchmesser auf die Spreizung der Dichte sehr gering sind.

(C) Der stärkste Einfluss auf die Spreizung der Dichte ist die Aufgabetrübedichte selbst. Dieser Effekt kann durch den steigenden Volumenanteil von FeSi in der Trübe bei steigender Trübedichte erklärt werden. Auf die FeSi-Körner wirken im Zyklon starke Zentrifugalkräfte. Bei steigendem Volumenanteil behindern sich die Körner stärker während ihrer Bewegung nach außen, was zu einer höheren Trübestabilität führt und die Spreizung sinken lässt.

(D) Die Konusform nimmt ebenfalls Einfluss auf die Spreizung. Der flache Konus begünstigt eine große Spreizung, der steile Konus eine kleine Spreizung.

(E) Die getesteten FeSi-Typen wirken sich merklich auf die Spreizung aus. Der FeSi-Typ der „D -“-Einstellung ist ein gemahltes Material, bei der „D +“-Einstellung wird ein wesentlich feineres, verdüstertes FeSi verwendet. Es kann angenommen werden, dass die Spreizung mit feinerem FeSi abnimmt. Trüben mit feinen Schwerstoffen erweisen sich als stabiler als Trüben mit groben Schwerstoffen, was die abnehmende Trübespreizung erklärt.

Volumenstrom:

Der Volumenstrom ist für das Ergebnis wichtig, da er entscheidend für das Masseausbringen im Über- bzw. Unterlauf ist. Das Verhältnis der beiden Volumenströme wird berechnet, indem man den Überlaufvolumenstrom durch den Unterlaufvolumenstrom dividiert. Ein geringer Wert, d.h. ein großer Unterschied zwischen dem Über- und dem Unterlauf ist wünschenswert. Aus den gemessenen Volumenströmen kann folgendes Effektdiagramm berechnet werden:

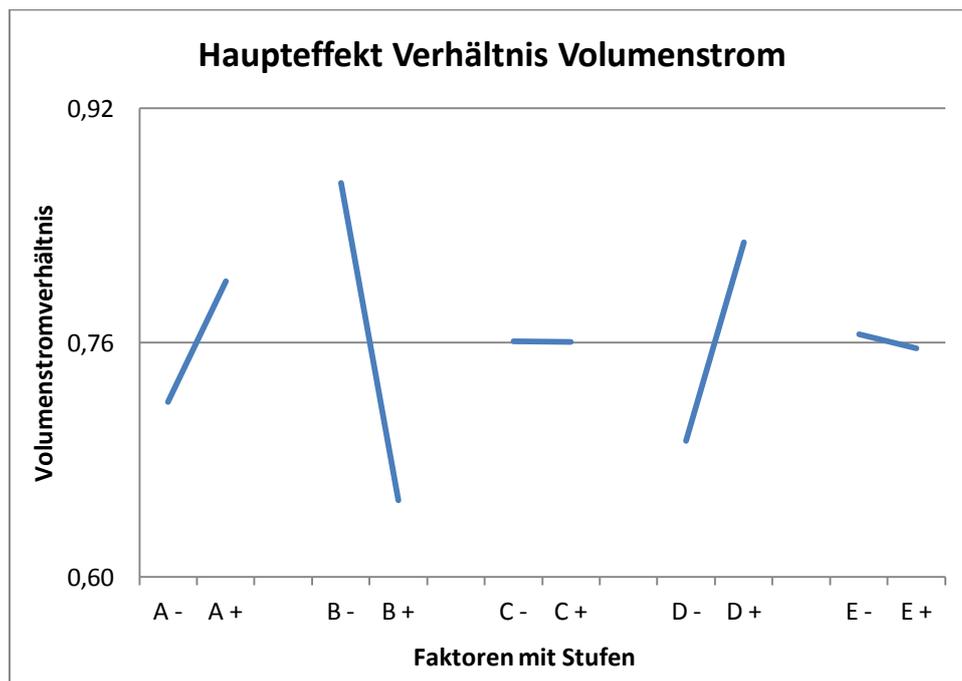


Abbildung 8: Haupteffekt Volumenstrom der Versuchsreihe 1

Im vorliegenden Effektdiagramm sind folgende Einflüsse dargestellt:

- (A) Aufgabedruck
- (B) Apexdurchmesser
- (C) Aufgabetrübedichte
- (D) Konusform
- (E) FeSi-Typ

(A) Der Aufgabedruck wirkt sich deutlich auf das Ergebnis aus. Ein erhöhter Aufgabedruck resultiert in einer Verschiebung des Volumenausbringens in Richtung Überlauf.

(B) Am größten ist der Einfluss der Apexöffnung. Eine Vergrößerung des Apexdurchmessers verursacht auch eine Verlagerung des Volumenstroms hin zum Unterlauf.

(C) & (E) Aufgabetrübedichte und FeSi-Typ haben praktisch keinen Einfluss auf das Verhältnis der beiden Ströme.

(D) Die Konusform wirkt sich stark auf den Volumenstrom aus. Ein flacher Konus (D-) bewirkt ein höheres Verhältnis zwischen den Volumenströmen.

4.6.4) ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 1

Folgende Erkenntnisse konnten aus der ersten Versuchsreihe gewonnen werden:

1. FeSi-Typ hafsil geeigneter als AMC 70
2. Einfluss Aufgabedruck gering; Wechselwirkung mit FeSi-Type vorhanden
3. Aufgabedichte für Spreizung essenziell
4. Konusform sehr wichtig für Ergebnis
5. Apexdurchmesser beeinflusst Volumenspreizung stark

Ad 1) FeSi-Typ hafsil geeigneter als AMC 70

Der FeSi-Typ hafsil erweist sich als wesentlich geeigneter als der FeSi-Typ AMC 70. Hafsil ist ein verdüstes FeSi wodurch höhere Trübedichten erreicht werden können, als mit gemahlenem FeSi. Bei gleichen Trübedichten sind die Eigenschaften bezüglich der Verarbeitbarkeit besser, da es sich nicht so schnell absetzt wie AMC 70.

Der Korngrößenunterschied der beiden FeSi-Typen wirkt sich stark auf das Verhalten im Zyklon aus. Die Versuche haben gezeigt, dass die durchschnittliche Spreizung der Austragsdichten bei Versuchen mit hafsil geringer sind als bei Versuchen mit AMC 70.

Ad 2) Einfluss Aufgabedruck gering; Wechselwirkung mit FeSi-Type vorhanden

Der Einfluss des Aufgabedrucks auf Spreizung der Dichten und der Volumenströme kann als gering eingestuft werden. Auf die Spreizung hat er kaum Einfluss, die Auswirkungen auf die Volumenströme sind durchschnittlich. Der geringe Einfluss des Aufgabedrucks kann aber auch darauf zurückgeführt werden, dass nur ein geringer Bereich (0,8 – 1,2 [bar]) untersucht werden konnte.

Bei der Detailauswertung der Wechselwirkungseffekte kann eine Wechselwirkung zwischen Aufgabedruck und FeSi-Type festgestellt werden:

Druck	FeSi-Type	WW	Dichtespreizung
A -	D -	AD +	1,43
A -	D +	AD -	1,01
A +	D -	AD -	1,23
A +	D +	AD +	1,21

Tabelle 15: Wechselwirkung Aufgabedruck / FeSi-Type

Aus Tabelle 15 kann festgestellt werden, dass die durchschnittliche Dichtespreizung bei geringem wie bei hohem Druck etwa gleich ist. Es kann aber auch festgestellt werden, dass die durch den Druck verursachte Dichtespreizung stark von der FeSi-Type abhängt und umgekehrt.

Ad 3) Aufgabedichte für Spreizung essenziell

Der Einfluss der Aufgabedichte auf die Dichtespreizung der Produktströme ist sehr groß. Erklärbar ist dies dadurch, dass sich die Körner auf ihrem Weg an den Rand des Zyklons bei steigender Dichte stärker behindern. Im Allgemeinen gilt eine geringe Dichtespreizung als wünschenswert, da dies für die Steuerung des Prozesses günstig ist. Um den Eisengehalt im Unterlauf auf 33,6 [%] zu senken, muss dafür gesorgt werden, dass nicht nur im speziellen Fall dieser Arbeit die geringere Unterlaufdichte gewünscht, da dadurch mehr Ankerit/Spateisenstein-Verwachsungen in den Unterlauf gelangen und gewährleistet ist, dass der Eisengehalt den gewünschten 33,6 [%] angenähert wird. In anderen Studienarbeiten wurde bereits belegt, dass ein Eisengehalt von 40 [%] möglich ist, aber das Inhaltsausbringen darunter stark leidet.

Ad 4) Konusform sehr wichtig für Ergebnis

Die Konusform wirkt sich auf Dichtespreizung und auf das Verhältnis der Volumenströme einigermaßen stark aus. Der steilere Konus bewirkt eindeutig eine geringere Dichtespreizung als der flache Konus. Der steilere Konus verfügt über einen geringeren Unterschied zwischen den Volumenströmen. Die geringere Dichtespreizung ist wünschenswert, da sie sich positiv auf die Prozesssteuerung auswirkt. Die Verringerung des Verhältnisses der beiden Volumenströme ist eine negative Auswirkung, da hier der Unterlauf im Vergleich zum Überlauf weniger wird und eines der Ziele ist ein möglichst hohes Masseausbringen im Unterlauf.

Ad 5) Apexdurchmesser beeinflusst Volumenspreizung stark

Der Einfluss des Apexdurchmessers auf die Aufteilung der Volumenströme ist sehr groß. Ein vergrößerter Apexdurchmesser erhöht das Volumenausbringen im Unterlauf. Dieser Effekt ist wünschenswert, da ein möglichst großes Ausbringen im Unterlauf erreicht werden soll.

4.7) VERSUCHSREIHE 2

4.7.1) VERSUCHSPLAN VERSUCHSREIHE 2

Die wesentlichste Aussage aus der Versuchsreihe 1 ist, dass der FeSi-Typ „hafsil“ die besseren Ergebnisse bezüglich der Spreizung der Überlauf und der Unterlaufdichte liefert. Alle Versuche der zweiten Versuchsserie werden mit dieser FeSi-Type durchgeführt.

Weiters soll überprüft werden, ob der Einfluss der Aufgabetrübedichte wirklich als linear angenommen werden kann. Aus diesem Grund werden einige Versuche mit einer Aufgabetrübedichte von 3,0 [g/cm³] eingeplant.

Als Konsequenz dieser Überlegungen werden nun drei der Parameter – Aufgabedruck, Konusform, Apexdurchmesser – mit zwei Einstellungsstufen untersucht, ein Parameter – Aufgabetrübedichte – wird in drei Stufen überprüft und ein Parameter – FeSi-Type – wird nicht mehr variiert. Diese Parameterstruktur kann mathematisch mit dem Term $2^3 \cdot 3^1$ beschrieben werden. Im Maximum bedeutet dies, dass 24 Versuche durchgeführt werden müssen, um alle möglichen Kombinationen zu erfassen.

„Design Expert“ verlangt nach mindestens 15 durchgeführten Versuchen, warnt aber gleichzeitig vor statistischen Unsicherheiten. Erleichternd kommt hinzu, dass acht Datensätze aus der ersten Versuchsreihe übernommen werden können. Es fließen also alle Ergebnisse aus hafsil-Versuchen der ersten Versuchsreihe in die Auswertung der zweiten Versuchsreihe ein.

Es werden insgesamt zwölf neue Versuche durchgeführt. Vier mit der Aufgabetrübedichte 2,8 [g/cm³] und acht mit der Aufgabetrübedichte 3,0 [g/cm³]. Danach stehen 20 Datensätze zur Verfügung, was auch laut „Design Expert“ ausreicht, um statistisch auf der sicheren Seite zu sein. Das endgültige Versuchsprogramm sieht wie folgt aus:

Versuch Nr.	Druck [bar]	Apex [in]	Konus	Dichte [g/cm ³]	FeSi
2.1	0,8	2,25	steil	3,0	hafsil
2.2	1,2	2,25	steil	3,0	hafsil
2.3	0,8	2,50	steil	3,0	hafsil
2.4	1,2	2,50	steil	3,0	hafsil
2.5	0,8	2,25	flach	3,0	hafsil
2.6	1,2	2,25	flach	3,0	hafsil
2.7	0,8	2,50	flach	3,0	hafsil
2.8	1,2	2,50	flach	3,0	hafsil
2.9	0,8	2,25	flach	2,8	hafsil
2.10	1,2	2,25	steil	2,8	hafsil
2.11	0,8	2,50	steil	2,8	hafsil
2.12	1,2	2,50	flach	2,8	hafsil

Tabelle 16: Versuchsplan der Versuchsreihe 2

4.7.2) DURCHFÜHRUNG VERSUCHSREIHE 2

Neue Erkenntnisse bezüglich der Anlage

1. Motor ist Dauerbelastung gewachsen
2. Rührwerk muss hochoberig laufen
3. Austragsschläuche und Eimer können von Rührwerk erfasst werden

Ad 1) Motor ist Dauerbelastung gewachsen

In der Vergangenheit hat es während der Abwicklung von Versuchsprogrammen Probleme mit dem Antrieb für die Trübepumpe gegeben. Schon nach kurzem Betrieb mit einer hohen Drehzahl schaltete sich der Motor wegen Überhitzung ab. Durch die Erhöhung der maximalen Motorleistung von 7,5 [kW] auf 15,0 [kW] kann verhindert werden, dass der Motor heiß läuft und in regelmäßigen Abständen abgeschaltet werden muss. Ein Motor mit mehr als zehn [kW] ist laut Erstausslegung in der Diplomarbeit von Christoph Blasch am Lehrstuhl für Aufbereitung schon einmal empfohlen worden [15].

Ad 2) Rührwerk muss hochoberig laufen

Das Rührwerk muss mit der höchsten Drehzahl laufen, bei der man noch sinnvoll arbeiten kann. Das verhindert Absetzeffekte beim FeSi.

Ad 3) Austragsschläuche und Eimer können von Rührwerk erfasst werden

Eine während der Durchführung der Versuche häufige Problemquelle und ein ständiges Sicherheitsproblem stellt das Rührwerk dar. Einerseits kann ein Austragsschlauch erfasst werden, andererseits kann ein Probenahmegefäß erfasst werden. Beides ist während der Durchführung der Versuche geschehen und hat beide Male zum Stillstand der Anlage für den restlichen Tag geführt, bzw. musste der Pumpensumpf entleert werden. Sieht man von den Sicherheitsmängeln, die vom Rührwerk ausgehen ab, so ist doch die jedes Mal notwendige Entleerung des Pumpensumpfes ein Kostentreiber, der nicht unterschätzt werden darf.

4.7.3) AUSWERTUNG VERSUCHSREIHE 2

Die Versuche werden hauptsächlich auf zwei Gesichtspunkte untersucht. Während jedes Versuchs wird die Dichte jeweils im Über- und Unterlauf gemessen. Daraus kann der Dichteunterschied zwischen den beiden Strömen errechnet werden. Je enger die beiden Dichtewerte beieinander liegen, desto leichter kann der Prozess gesteuert werden. Die absolute Dichte der jeweiligen Ströme ist wichtig für die Trennschnittlage.

Als zweiter wesentlicher Faktor werden die Volumenströme gemessen. Aus dem Volumenstrom kann man Rückschlüsse auf das Masseausbringen ziehen.

In folgender Tabelle sind die gemessenen Dichten im Überlauf (1) und im Unterlauf (2) angegeben. In den beiden nächsten Spalten sind die aus den getrockneten FeSi-Proben errechneten Dichten des Überlaufs (3) und des Unterlaufs (4) dargestellt. In den beiden letzten Spalten sind der Volumenstrom des Überlaufs (5) und des Unterlaufs (6) abzulesen:

Versuch Nr.	(1) [g/cm ³]	(2) [g/cm ³]	(3) [g/cm ³]	(4) [g/cm ³]	(5) [l/sec]	(6) [l/sec]
1.9	2,16	3,32	2,19	3,37	3,48	3,39
1.10	1,97	3,59	1,99	3,52	4,40	4,20
1.11	1,90	3,51	1,92	3,45	2,75	4,13
1.12	1,97	3,49	1,99	3,44	3,72	4,53
1.13	2,74	3,51	2,71	3,46	2,65	3,58
1.14	2,88	3,57	2,86	3,51	4,19	3,97
1.15	2,85	3,35	2,68	3,28	2,23	4,01
1.16	2,58	3,60	2,60	3,50	3,02	4,21
2.1	2,54	3,40	2,56	3,25	2,40	2,56
2.2	2,49	3,54	2,54	3,56	2,79	2,66
2.3	2,50	3,25	2,51	3,15	4,31	2,52
2.4	2,32	3,58	2,35	3,58	2,48	2,29
2.5	2,33	3,53	2,38	3,52	3,40	2,86
2.6	2,37	3,67	2,42	3,67	2,42	3,36
2.7	2,17	3,55	2,24	3,54	3,86	2,44
2.8	2,15	3,68	2,20	3,55	2,92	2,26
2.9	1,98	3,59	2,00	3,48	3,35	2,93
2.10	2,16	3,73	2,15	3,54	2,06	2,29
2.11	2,02	3,36	2,07	3,22	3,41	2,56
2.12	1,79	3,62	1,85	3,53	2,70	2,26

Tabelle 17: Ergebnisse der Versuchsreihe 2

Es ist leicht zu erkennen, dass die gemessenen Dichten und die errechneten Dichten keine großen Unterschiede aufweisen. Für alle Rechnungen werden die gemessenen Dichten verwendet. Hier sind zusätzlich die Daten der acht Versuche aus Reihe 1 aufgelistet, die mit hafsil durchgeführt wurden, da sie bei der Auswertung der Reihe 2 mit berücksichtigt werden und als Teil des Versuchsplans der Reihe 2 betrachtet werden können.

Spreizung

Die Spreizung zwischen Über- und Unterlauf wird berechnet, indem man die Überlaufdicke von der Unterlaufdicke abzieht. Aus den errechneten Daten ergibt sich folgendes Effektdiagramm für die Spreizung der Dichten:

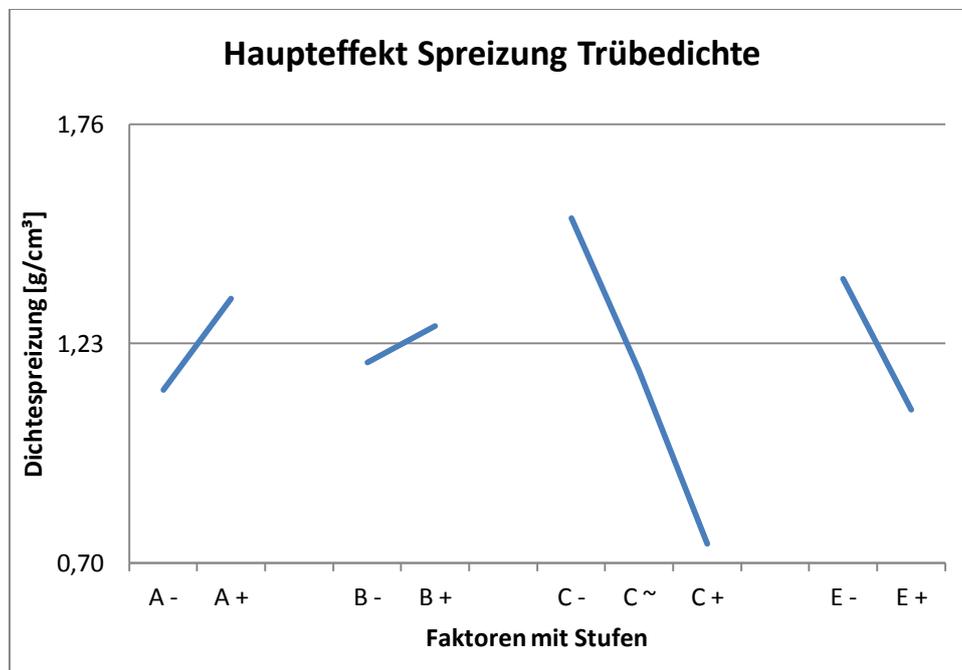


Abbildung 9: Haupteffekt Spreizung der Versuchsreihe 2

Im vorliegenden Effektdiagramm sind folgende Einflüsse dargestellt:

- (A) Aufgabedruck
- (B) Apexdurchmesser
- (C) Aufgabetrübedichte
- (E) Konusform

(A) Der Aufgabedruck hat einen mittelmäßigen Einfluss auf die Spreizung. Bei steigendem Aufgabedruck steigt auch die Spreizung zwischen Überlauf und Unterlauf. Dieser

Effekt kann bei Versuchsreihe 1 nicht festgestellt werden, da es in Versuchsreihe 1 einen Wechselwirkungseffekt zwischen FeSi-Type und Aufgabedruck gibt.

(B) Der Apexdurchmesser hat einen sehr geringen Einfluss auf den Unterschied zwischen Überlauftrübedichte und Unterlauftrübedichte.

(C) Der Einfluss der Aufgabetrübedichte auf die Dichtespreizung kann für diesen Dichtebereich als annähernd linear und als sehr groß bezeichnet werden. Bei steigender Aufgabetrübedichte sinkt die Spreizung.

(E) Der Einfluss der Konusform auf die Spreizung kann als mittelmäßig betrachtet werden. Mit steigendem Konuswinkel fällt die Spreizung.

Volumenstrom

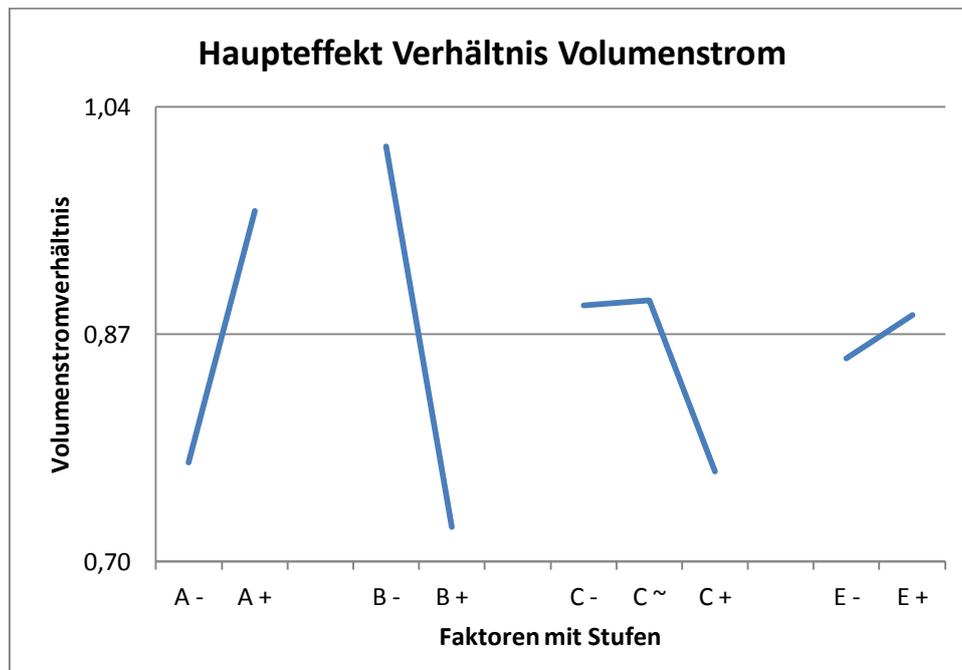


Abbildung 10: Haupteffekt Volumenstrom Versuchsreihe 2

Im vorliegenden Effektdiagramm sind folgende Einflüsse dargestellt:

- (A) Aufgabedruck
- (B) Apexdurchmesser
- (C) Aufgabetrübedichte
- (E) Konusform

- (A) Der Einfluss des Aufgabedruckes ist groß. Bei steigendem Aufgabedruck wird das Verhältnis der beiden Volumenströme kleiner, d.h. der Unterschied zwischen den beiden geringer. Dieser Effekt konnte in Versuchsreihe 1 nicht festgestellt werden.
- (B) Der Einfluss des Apexdurchmessers ist sehr groß. Bei steigendem Apexdurchmesser steigt erwartungsgemäß das Verhältnis der Volumenströme, der Unterschied zwischen den beiden Volumenströmen wird zu Gunsten des Unterlaufvolumenstroms größer. Der in Versuchsreihe 1 festgestellte Effekt kann in Versuchsreihe 2 bestätigt werden.
- (C) Die Aufgabetrübedichte hat einen mittelmäßigen Einfluss auf das Durchflussverhältnis zwischen Über- und Unterlauf. Bis zur Aufgabetrübedichte von ca. 3,00 [g/cm³] bleibt es konstant, dann wird der Unterschied schnell größer.
- (D) Der Einfluss der Konusform auf das Durchflussverhältnis ist kaum existent. In Versuchsreihe 1 konnte dies bereits festgestellt werden und in Versuchsreihe 2 bestätigt werden.

4.7.4) ERGEBNISSE VERSUCHSREIHE 2

Folgende Erkenntnisse können aus der zweiten Versuchsreihe gewonnen werden:

1. Starker Einfluss der Aufgabetrübedichte auf Dichtespreizung bestätigt
2. Konusform beeinflusst Dichtespreizung stark aber die Volumenströme wenig
3. Apexdurchmesser beeinflusst Volumenstrom wesentlich stärker als Spreizung
4. Einfluss des Drucks auf Volumenströme

Ad 1) Starker Einfluss der Aufgabetrübedichte auf Dichtespreizung bestätigt

Der große Einfluss der Aufgabetrübedichte auf die Spreizung kann bestätigt werden. Die Tatsache, dass sich der Einfluss auf die Spreizung im untersuchten Dichtebereich linear verhält, ist eine neue Erkenntnis aus der zweiten Versuchsreihe.

Zusätzlich kann aus den Daten in Kapitel 3.4.3 abgelesen werden, dass sich mit der Höhe der Aufgabetrübedichte nicht nur die Spreizung, sondern auch die absoluten Höhen der Dichten in den Austrägen beeinflusst werden können.

Ad 2) Konusform beeinflusst Dichtespreizung stark aber die Volumenströme wenig

Der Einfluss der Konusform auf die Spreizung kann in der zweiten Versuchsreihe bestätigt werden. Eine steilere Konusform senkt die Spreizung, ein flacher Konus erhöht die Spreizung. Gleichzeitig ist der Einfluss der Konusform auf das Verhältnis zwischen den Volumenströmen sehr gering.

Die Konusform bietet somit die erste Möglichkeit den Prozess zu steuern. Über die Konusform kann die Spreizung beeinflusst werden, ohne gleichzeitig den Volumenstrom merkbar zu verändern.

Ad 3) Apexdurchmesser beeinflusst Volumenstrom wesentlich stärker als Spreizung

Der Apexdurchmesser nimmt starken Einfluss auf das Verhältnis der Volumenströme. Eine Verkleinerung des Durchmessers des Apex, verringert auch das Volumen pro Zeit, das durch den Apex ausgetragen wird. Gleichzeitig hat sich herausgestellt, dass die Spreizung nicht in dem Ausmaß wie der Volumenstrom beeinflusst wird.

Natürlich bewirkt eine Verringerung des Apexdurchmessers eine Erhöhung der Spreizung. Bei einem verringertem Durchmesser und einem verringertem Durchfluss wird die Grenze zwischen den Schichten, welche im Apex ausgetragen werden, und den Schichten, die im Vortex ausgetragen werden, nach außen verschoben. Es hat sich aber gezeigt, dass die Dichteverhältnisse mit anderen Maßnahmen stärker beeinflusst werden können.

Hier bietet sich die zweite Möglichkeit den Prozess aktiv zu gestalten. Der Durchfluss kann verändert werden, die damit einhergehenden Veränderungen der Dichteverhältnisse können mit anderen Maßnahmen ausgeglichen werden.

Ad4) Einfluss des Drucks auf Volumenströme

Der Druckeinfluss auf die Volumenströme kann in Versuchsreihe 1 nicht festgestellt werden. Bei Versuchsreihe 1 ist dieser Effekt durch eine Wechselwirkung mit der FeSi-Type überlagert. In Versuchsreihe 2 kann ein eindeutiger Einfluss des Aufgabedruckes auf die Aufteilung der Volumenströme festgestellt werden.

5.) PRAKTISCHE ERZVERSUCHE – VERSUCHSREIHE 3

5.1) VERSUCHSPLAN VERSUCHSREIHE 3

5.1.1) VORBEREITETER VERSUCHSPLAN

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Parameterstudie wird folgender Versuchsplan für die dritte Versuchsreihe erstellt:

Versuchsnr.	Druck [bar]	Apex [in]	Dichte [g/cm ³]	Konus	FeSi-Typ
3.1	0,8	2,50	3,00	steil	hafsil
3.2	0,8	2,25	3,00	steil	hafsil
3.3	0,4 - 0,6	2,50	3,00	steil	hafsil
3.4	0,8	2,50	2,80	steil	hafsil

Tabelle 18: geplanter Versuchsplan Versuchsreihe 3

Bei jedem Versuch sollen FeSi-Typ und die Konusform des Zyklons gleich bleiben. Der erste Versuch stellt den Idealfall dar, der mit den Daten der Parameterstudie erarbeitet wurde.

Mit dem zweiten Versuch soll untermauert werden, dass ein zu enger Unterlaufaustrag zu einem Fehlaustrag an Wertmineralen im Überlauf führt.

Durch die Veränderung des Aufgabedrucks beim dritten Versuch soll gezeigt werden, dass bei zu geringem Druck die Trennung im Zyklon nicht im gewünschten Ausmaß funktioniert.

Der vierte Versuch wird bei geringerer Aufgabedichte durchgeführt. Es soll gezeigt werden, dass sich die Trennschnittlage durch Veränderung der Aufgabedichte sehr leicht verschieben lässt.

5.1.2) TATSÄCHLICHER VERSUCHSPLAN

Kurz vor Durchführung des ersten Versuchs wird der Versuchsplan aus verschiedenen Gründen kurzfristig geändert:

1. Einstellungen nicht möglich
2. Materialknappheit

Ad 1) Einstellungen nicht möglich

Nach Vorbereitung der Pilotanlage für die dritte Versuchsreihe (in diesem Fall Einstellungen für Versuch 3.1) wird festgestellt, dass unter den gewählten Einstellungen kein Überlauf zustande kommt.

Die gleichen Einstellungen haben während der Parameterstudie keine Probleme verursacht bzw. zu sinnvollen Ergebnissen bezüglich der Dichtespreizung geführt. Es liegt der Schluss nahe, dass die Zugabe von Erz in den Pumpensumpf einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf das Verhalten des Überlaufs und des Unterlaufs hat.

Mit einer Steigerung des Aufgabedruckes von 0,8 [bar] auf 1,0 [bar] kann beim ersten Versuch ein Überlauf erreicht werden. Es wird entschieden, dass der Druck bei allen Versuchen angehoben wird, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Ad 2) Materialknappheit

Durch eine Fehleinschätzung der noch vorhandenen Vorräte an FeSi der Type „hafsil“ wird am Versuchstag festgestellt, dass der Pumpensumpf nicht vollständig mit einer Trübe der Dichte 3,00 [g/cm³] gefüllt werden kann. Die vollständige Füllung des Pumpensumpfes ist aber ein essenzieller Bestandteil des Versuchsdesigns. Je mehr Material in den Pumpensumpf aufgegeben wird, desto weniger Einfluss auf die Grundgesamtheit der Aufgabe im Pumpensumpf haben einzelne Proben, die entnommen werden. Um gewährleisten zu können, dass der dritte Versuch durchgeführt werden kann, wird der dritte Versuch vorgezogen und als zweiter durchgeführt. In Tabelle 19 ist eine Aufstellung der tatsächlich durchgeführten Versuche zu sehen:

VersuchsNr.	Druck [bar]	Apex [in]	Dichte [g/cm ³]	Konus	FeSi-Typ
3.1	1,0	2,50	3,00	steil	hafsil
3.2	0,8	2,50	3,00	steil	hafsil
3.3	1,0	2,25	3,00	steil	hafsil
3.4	1,0	2,50	2,80	steil	hafsil

Tabelle 19: tatsächlicher Versuchsplan Versuchsreihe 3

5.1.3) PROBENAHRME

Während der Durchführung der Versuche werden folgende Proben gezogen:

1. Aufgabeprobe Anfang ohne Zwischenkonzentrat
2. Aufgabeprobe Anfang mit Zwischenkonzentrat
3. Über- bzw. Unterlaufprobe während jedem Versuch
4. Aufgabeprobe Ende

Ad 1) Aufgabeprobe Anfang ohne Zwischenkonzentrat

Die Pumpe ist im Kreislauf mit dem Pumpensumpf (ohne Zyklon) geschaltet. Direkt aus dem Aufgabestrom wird eine Probe von 1 [l] entnommen. Die Probe wird allerdings nur zu Dokumentationszwecken aufbewahrt und nicht ausgewertet.

Ad 2) Aufgabeprobe Anfang mit Zwischenkonzentrat

Nach Verkippen des Zwischenkonzentrates in den Pumpensumpf wird die Kreislaufschaltung noch eine Zeit lang unverändert laufen gelassen, um eine ausreichende Homogenisierung zu erreichen. Direkt aus dem Aufgabestrom wird eine Probe von 1 [l] entnommen. Es war geplant, eine Probe von 10 [l] zu entnehmen. Um nicht zu viel Material aus dem Pumpensumpf zu entnehmen und nicht den weiteren Versuchsverlauf zu gefährden, wird eine kleinere Probe als ausreichend angesehen. Die Probe wird allerdings nur zu Dokumentationszwecken aufbewahrt und nicht ausgewertet.

Ad 3) Über- bez. Unterlaufprobe während jedem Versuch

Während jeden Versuchs wird aus dem Über- und aus dem Unterlauf jeweils eine Probe entnommen. Die Proben werden nach Durchführung des letzten Versuchs in verschließbare Eimer umgefüllt und auf den Lehrstuhl transportiert.

Um die Vergleichbarkeit der beiden Proben zu gewährleisten, werden die beiden Ströme immer zeitgleich und zeitkontrolliert beprobt. Sobald sich ein konstanter Über- und ein Unterlaufstrom eingestellt haben, werden Eimer am Rand des Pumpensumpfes vorbereitet. Auf Kommando werden beide Ströme in die Eimer umgeleitet, der gesamte Querschnitt wird dabei erfasst. Sobald ein Eimer voll ist, werden beide Ströme wieder in den Pumpensumpf zurückgeleitet. Es werden Eimer mit einem Fassungsvermögen von 10 [l] verwendet.

Die zeitgleiche und zeitkontrollierte Beprobung ist wichtig für die Versuchsabwicklung mit der Pilotanlage. Die Produkte laufen in den Pumpensumpf zurück und werden dort wieder mit der Aufgabe vermischt. Solange beide Produktströme (Über- und Unterlauf) wieder in den Pumpensumpf zurücklaufen, wird die Zusammensetzung der Aufgabe nicht verändert. Sobald nur ein Produktstrom beprobt wird, verändert man aber die Zusammensetzung der Aufgabe.

Wenn zum Beispiel eine Probe aus dem Unterlaufstrom gezogen wird, entfernt man mehr Körner hoher Dichte aus dem System als Körner mit niedriger Dichte. Die Aufgabe beinhaltet im Vergleich zu vorher im Verhältnis mehr Körner geringer Dichte. Dadurch ist die Zusammensetzung der Aufgabe und in weiterer Folge das Trennverhalten des Zyklons verändert. Die Vergleichbarkeit der Versuche zueinander sinkt dadurch und es wird schwieriger Veränderungen des Trennergebnisses mit Veränderungen der Faktoreinstellungen in Zusammenhang zu bringen.

Die zeitgleiche und zeitkontrollierte Beprobung stellt sicher, dass aus den gezogenen Proben direkt die Masse- und Volumenausbringen gerechnet werden können und die Proben vergleichbar sind. Durch die zeitgleiche und zeitkontrollierte Beprobung ist es möglich, dass nach der Siebung und der Schwimm-Sink-Analyse auf eine Aufgabe zurückgerechnet werden kann, ohne dass die für die Eimerbefüllung benötigte Zeit berücksichtigt wird.

Einzigste Ausnahme bilden die Proben des Versuchs Nr. 3.2. Aufgrund von Materialknappheit und um die weiteren Versuche zu gewährleisten, werden kleinere Proben entnommen. Die Ströme werden so lange in die Eimer geleitet, bis der erste Eimer halb gefüllt ist.

Ad 4) Aufgabeprobe Ende

Am Ende der Versuchsreihe wird noch einmal eine Aufgabeprobe entnommen. Aufgrund der Tatsache, dass noch immer genug Material im Pumpensumpf vorhanden ist, werden 10 [l] Probe entnommen.

5.2) VORBEREITUNG VERSUCHSREIHE 3

Die direkte Vorbereitung der Versuche gestaltete sich wie folgt:

1. Hochfahren des Zyklonstands
2. Einstellen der Trübedichte für den ersten Versuch
3. Bereitstellen und Aufgeben des Erzes
4. Erneute Messung der Trübedichte
5. Bereitstellung der Probengefäße

Ad 1) Hochfahren des Zyklonstands

Das Hochfahren des Zyklonstands wird wie bereits mehrfach beschrieben durchgeführt (siehe Anhang).

Ad 2) Einstellen der Trübedichte für den ersten Versuch

Das restliche FeSi wird in den Pumpensumpf verkippt, danach wird die Trübedichte im Pumpensumpf ermittelt. Mit der Zugabe von Wasser wird die Dichte auf die geplanten $3,00 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ eingestellt.

Es kann außerdem festgestellt werden, dass ca. 330 [l] Trübe im Pumpensumpf vorhanden sind, was eine ausreichende Menge für die Durchführung der Versuche darstellt.

Ad 3) Bereitstellen und Aufgeben des Erzes

Als Aufgabe für die Versuche der Serie 3 wird ein Zwischenprodukt aus dem Aufbereitungsprozess am steirischen Erzberg entnommen. Das Zwischenprodukt wird direkt vor den Magnetscheidern aus den Materialströmen, welche die Aufgabebunker der Magnetscheider beschicken, mit Eimern aufgefangen.

Es sind vier Aufgabebunker vorhanden. Die Masseströme in die Bunker unterscheiden sich voneinander. Erst wird die Masse pro Zeit, welche in den Bunker strömt, gemessen. Anschließend werden die Proben aus den vier Strömen im entsprechenden Verhältnis zusammengemischt und in den Pumpensumpf verkippt. Das Einbringen in den Pumpensumpf wird langsam durchgeführt, da vermieden werden soll, dass sich durch zu plötzliches Einbringen die Abzugsöffnung am Boden des Pumpensumpfes verstopft.

In den Pumpensumpf mit 330 [l] Trübe werden ca. 200 [kg] Erz aufgegeben, was einer Volumenkonzentration von ca. 15 [%] entspricht (das Erz wird mit einer durchschnittlichen Dichte von $3,3 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ angenommen).

Ad 4) Erneute Messung der Trübedichte

Die Dichte des Pumpensumpfinhalts wird während des Hochfahrens der Anlage und des Einstellvorgangs mehrmals gemessen. Für die Versuche wird eine Trübedichte von $3,00 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ eingestellt. Durch die anschließende Zugabe von Erz wird die durchschnittliche Dichte der Aufgabe im Pumpensumpf verändert.

Laut Versuchsplan wird im Zuge der Vorbereitung des vierten Versuchs die Trübedichte auf $2,80 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ gesenkt. Die Trübedichte ist nach der Erzzugabe aber keiner direkten Messung mehr zugänglich. Um die Aufgabetrübedichte um $0,20 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ absenken zu können, wird die Dichte der Gesamtaufgabe (Trübe mit Dichte $3,00 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ und Erz) gemessen. Nach der Erzzugabe steigt die Dichte der Aufgabe im Pumpensumpf von $3,00$ auf $3,15 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Für den vierten Versuch wird die Gesamtdichte im Pumpensumpf von $3,15$ auf $2,95 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ gesenkt.

Ad 5) Bereitstellung der Probengefäße

Um die Versuche möglichst reibungslos und flott abwickeln zu können, werden die Eimer für die aufgefangenen Proben schon vor den Versuchen vorbereitet. Die Beschriftung der Proben erfolgt mit im Vorfeld vorbereiteten, folierten Karten, welche nur noch an den Tragegriffen der Eimer mittels Kabelbindern befestigt werden müssen.

5.3) AUSWERTUNG VERSUCHSREIHE 3

5.3.1) ÜBERSICHT PROBEN

Folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über alle gezogenen Proben (1), deren Gesamtmasse (2), sowie die Produktmasse (3) und an Ferrosilizium (4) in Gramm. In weiteren Spalten sind die daraus errechneten Massen an Wasser (5) in Gramm, die errechnete durchschnittliche Dichte der Probe (6) in Gramm pro Kubikzentimeter, sowie das errechnete Volumen jeder Probe (7) in Litern und die Durchflussrate des jeweiligen Stroms (8) in Litern pro Sekunde dargestellt:

(1)	(2) [g]	(3) [g]	(4) [g]	(5) [g]	(6) [g/cm ³]	(7) [l]	(8) [l/s]
3.1 ÜL	21030	4604	11410	5016	2,63	7,99	3,21
3.1 UL	37180	6890	25568	4722	3,57	10,41	4,06
3.2 ÜL	10840	1912	5562	3366	2,30	4,72	2,68
3.2 UL	19230	3782	12428	3020	3,25	5,91	3,15
3.3 ÜL	21780	4560	11538	5682	2,51	8,66	4,94
3.3 UL	19310	2874	13688	2748	3,47	5,56	3,59
3.4 ÜL	20200	2816	10394	6990	2,17	9,31	3,63
3.4 UL	38230	10509	23980	3741	3,73	10,24	4,40
Aufg. E.	27190	6546	16238	4406	3,15	8,64	-

Tabelle 20: Probenübersicht Versuchsreihe 3

5.3.2) VORBEREITUNG FÜR SCHWIMM-SINK-ANALYSE

Nach Abwicklung des Versuchsplans der dritten Reihe liegen die Proben in verschließbaren Eimern vor. Die Eimer und deren Deckel werden mit wasserfester Farbe eindeutig beschriftet. Die Proben werden vom Labor der VA Erzberg ins Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Rohstoffveredlung an der Montanuniversität gebracht. Im Technikum wird wie folgt vorgegangen:

1. Wiegen der Gesamtmassen
2. Abtrennen der Produkte vom FeSi
3. Getrenntes Trocknen und Wiegen von FeSi und Produkten
4. Herstellen von Teilproben für RFA
5. Absieben der Proben und Wiegen der Korngrößenklassen
6. Herstellen von Teilproben für die Schwimm-Sink-Analyse

Ad 1) Wiegen der Gesamtmassen

Die Gesamtmassen der Proben werden mit einer Laborwaage aufgenommen. Die Gesamtmasse setzt sich zusammen aus den Anteilen Wasser, FeSi und Produkt. Aus Gründen der Praktikabilität werden die Proben mitsamt dem Eimer und dem Deckel gewogen. Das Eimergewicht wird für die Berechnungen später abgezogen.

Ad 2) Abtrennen der Produkte vom FeSi

Für die weiteren Auswertungen muss das FeSi vom Produkt getrennt werden. Das bei den Versuchen aufzugebene Produkt hat die Korngrößenklasse 8/1 [mm]. Mittels eines Laborsiebes mit der Maschenweite 0,5 [mm] werden die Gesamtproben gesiebt. Um die Abtrennung des Produktes vom FeSi zu erleichtern wird das Sieb während des Siebens in Wasser eingetaucht. Diese Verfahrensweise vergrößert jedoch die vorhandene Wassermenge und die Trockenzeit. Unter dem Gesichtspunkt, dass in erster Linie mit dem Produkt weitergearbeitet wird und der Lehrstuhl über ausreichende Kapazitäten an Trockenschränken verfügt, ist dieser Verfahrensgang zu bevorzugen.

Ad 3) Getrenntes Trocknen und Wiegen von FeSi und Produkten

Nach Erreichen der Massekonstanz werden die Produktproben und die FeSi-Proben gewogen.

Ad 4) Herstellen von Teilproben für RFA

Aus jeder Produktprobe wird eine Teilprobe von mindestens 200 [g] für eine Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA entnommen. Die Teilprobenmasse von

mindestens 200 [g] wurde von Labormitarbeitern der VA Erzberg festgelegt. Dieser Probenumfang ist notwendig um die automatisierte Probenvorbereitung für RFA-Messungen im Aufbereitungslabor der VA Erzberg mit ausreichend Material beschicken zu können.

Um statistische Sicherheit zu gewährleisten, werden die Teilproben mit einem Riffelteiler hergestellt. Jede Probe wird auf den Riffelteiler aufgegeben, nach jedem Teilungsschritt wird die Masse der Teilproben bestimmt und wenn nötig ein weiterer Teilungsschritt durchgeführt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Teilprobenmasse erreicht ist. Abhängig von der Probengröße sind zwischen einem und vier Teilungsschritten notwendig.

Ad 5) Absieben der Proben und Wiegen der Korngrößenklassen

Die Produktproben werden mittels Handsiebung in Korngrößenklassen unterteilt:

> 10,0	[mm]
10,0 / 8,0	[mm]
8,0 / 6,3	[mm]
6,3 / 4,0	[mm]
4,0 / 2,0	[mm]
2,0 / 1,0	[mm]
1,0 / 0,5	[mm]

Tabelle 21: Korngrößenklassen Versuchsserie 3

Nach abgeschlossener Siebung werden die einzelnen Korngrößenklassen gewogen und die Korngrößenverteilungen werden gezeichnet. Die Masse der Fraktion < 0,5 [mm] kann nicht bestimmt werden, da diese Fraktion im Zuge der Trennung von FeSi und Erzkörnern im FeSi verblieb.

Ad 6) Herstellen von Teilproben für die Schwimm-Sink-Analyse

Die Schwimm-Sink-Analyse wird vorerst nur in den Korngrößenklassen 6,3/4 und 4/2 [mm] durchgeführt. Diese beiden Korngrößenklassen repräsentieren etwa 75 [%] der Aufgabe. Aus allen neun Proben werden aus den beiden Korngrößenklassen jeweils 500 [g] entnommen. Teilung mit Riffelteiler ist hier nicht zielführend. Mit einem Laborlöffel werden zehn Mal ca. 50 [g] aus der Probe entnommen. Zwischen den Entnahmen wird die Probe mit dem Laborlöffel durchmischt.

Einzige Ausnahme stellt die Überlaufprobe des Versuchs 3.2 dar. In der Korngrößenklasse 6,3/4 sind insgesamt nur 460 [g] vorhanden. In diesem Fall werden die gesamten 460 [g] in der Schwimm-Sink-Analyse verarbeitet.

5.3.3) SCHWIMM-SINK-ANALYSE

Zur Beurteilung des Trennerfolgs des Zyklons werden die Teilungskurven gezeichnet. Um die Teilungskurven zu zeichnen werden die Proben mittels Schwimm-Sink-Analyse in Dichteklassen eingeteilt. Jede Probe wird in folgende Dichteklassen eingeteilt:

$\rho < 2,80$	[g/cm ³]
$2,80 < \rho < 3,00$	[g/cm ³]
$3,00 < \rho < 3,20$	[g/cm ³]
$3,20 < \rho < 3,40$	[g/cm ³]
$3,40 < \rho < 3,60$	[g/cm ³]
$3,60 < \rho < 3,80$	[g/cm ³]
$3,80 < \rho$	[g/cm ³]

Tabelle 22: Dichteklassen Versuchsreihe 3

Für die Durchführung einer Schwimm-Sink-Analyse stehen im Aufbereitungslabor verschiedene Schwerflüssigkeiten zur Verfügung. Herstellen von Trennschnitten mit bis zu 3,80 [g/cm³] ist nur mit Clerici-Lösung oder Natriumpolywolframatlösung mit aufgemahlenem Wolframkarbid möglich. Laborarbeit mit Clerici-Lösung ist in Österreich aufgrund von Sicherheitsbestimmungen untersagt.

Für die Trennschnitte 2,80 [g/cm³] und 3,00 [g/cm³] wird eine Lösung aus Natriumpolywolframat und destilliertem Wasser verwendet. Die fehlenden Trennschnitte werden mit einer Kombination aus Natriumpolywolframatlösung und sehr fein aufgemahlenem Wolframkarbid abgeschwommen.

Die Reihenfolge der Trennschnitte wurde folgendermaßen gestaltet: zuerst wurden die Proben bei einer Dichte von 3,00 [g/cm³] abgeschwommen, dann bei 2,80 [g/cm³]. In einem zweiten Schritt wurde erst ein Trennschnitt bei 3,40 [g/cm³] realisiert, dann bei 3,20 [g/cm³]. Zuletzt werden die Trennschnitte bei 3,60 und 3,80 [g/cm³] eingezogen.

Die Dichte der Lösung wird vor und nach jedem Trennschnitt einer Probe mit einem Areometer überprüft.

Die Trennschnitte mit reiner Natriumpolywolframatlösung werden als erstes durchgeführt, da die Handhabung der Lösung ohne Wolframkarbid bedeutend einfacher ist, als die Handhabung der Lösung mit Wolframkarbid. Somit wird die mit Wolframkarbid abzuschwimmende Masse bedeutend geringer. Um den Ablauf weiter zu vereinfachen, wird bei den Trennschnitten mit Wolframkarbid der Trennschnitt 3,40 [g/cm³] als erstes durchgeführt, um die abzuschwimmende Masse bei den restlichen Trennschnitten noch einmal zu senken.

Diese Maßnahmen beschleunigen nicht nur den Arbeitsablauf, sondern tragen auch dazu bei, die Verwendung des Wolframkarbidpulvers auf ein Minimum zu reduzieren. Dadurch wird weniger Wolframkarbid durch die Reinigungsvorgänge des Erzes verloren, das Wolframkarbidpulver wird auch weniger durch Abrieb der Erzkörner verunreinigt. Wolframkarbid hat eine theoretische Dichte von 15,60 [g/cm³]. Eine Dichteüberprüfung des Wolframkarbids mit einem Heliumpyknometer am Ende der Schwimm-Sink-Analyse hat eine Dichte von 13,50 [g/cm³] ergeben, was darauf hindeutet, dass das Wolframkarbidpulver bereits stark verunreinigt ist. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass dieser Umstand die Schwimm-Sink-Analyse nicht negativ beeinflusst hat.

5.3.4) TRENNSCHNITTE MIT NATRIUMPOLYWOLFRAMAT

Mit Natriumpolywolframat sind maximale Trenndichten von 3,10 [g/cm³] möglich. Ab einer Dichte von 3,00 [g/cm³] nimmt aber die Verarbeitbarkeit während des Versuchs aufgrund der steigenden Viskosität stark ab. Das hat zur Folge, dass die in die Schwerflüssigkeit zwecks der Dichtebestimmung aufgegebenen Körner sehr lange brauchen um abzusinken. Der Arbeitsablauf mit Natriumpolywolframatlösung gestaltet sich wie folgt:

1. Vorbereitung der Natriumpolywolframatlösung
2. Einstellen der Dichte
3. Zugabe des Erzes
4. Abschöpfen des Schwimmgutes
5. Trennung von Sinkgut und Lösung
6. Reinigung der Produkte von der Lösung
7. Regeneration der Lösung

Ad 1) Vorbereitung der Natriumpolywolframatlösung

Das Natriumpolywolframat (chem. $3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) liegt in pulvriger Form vor. Mit destilliertem Wasser wird eine Lösung mit einer Dichte von ca. 3,00 [g/cm³] angemischt. Es ist wichtig bei der Arbeit mit Natriumpolywolframat immer destilliertes Wasser zu verwenden, da die Mineralstoffe im Leitungswasser die Lösung verunreinigen und sie undurchsichtig werden lassen.

Ad 2) Einstellen der Dichte

Die Messung der Dichte ist mit einem Areometer oder der Einhängemethode möglich. Im Zuge der Schwimm-Sink-Analyse wird die Dichteüberprüfung mittels Areometer realisiert, da sich so die Dichte schnell und direkt im Mischgefäß überprüfen lässt. Vor der Aufgabe von Körnern in die Lösung, wird immer die Dichte der Lösung überprüft.

Ad 3) Zugabe des Erzes

Es dürfen nicht mehr als 200 [g] auf einmal aufgegeben werden, da sich sonst die Körner gegenseitig in der Schwimm- bzw. Sinkbewegung behindern. Die Schwerflüssigkeit bleibt über die Zeit im Wesentlichen stabil. Den Körnern kann genug Zeit gegeben werden, um sich zu trennen. Für die Trennung werden Bechergläser mit einem Fassungsvermögen von einem Liter verwendet.

Ad 4) Abschöpfen des Schwimmgutes

Das Schwimmgut kann mit einem Sieblöffel abgeschöpft werden. Das abgeschöpfte Erz wird auf ein Sieb aufgegeben, um zu ermöglichen, dass die Lösung noch weiter von den Erzkörnern abtropfen kann. Die so abgetropfte Lösung wird aufgefangen und kann sofort wieder verwendet zu werden. Bevor allerdings eine weitere Charge Produkt in die Lösung aufgegeben wird, ist es unbedingt notwendig die Dichte mit dem Areometer zu überprüfen und gegebenenfalls neu einzustellen.

Ad 5) Trennung von Sinkgut und Lösung

Sobald das Schwimmgut abgeschöpft ist, kann die restliche Lösung mit dem Sinkgut über einem anderen Sieb verkippt werden. Auch hier braucht das Produkt Zeit zum Abtropfen.

Ad 6) Reinigung der Produkte von der Lösung

Nachdem die Lösung soweit als möglich vom Erz abgetropft ist, werden die Siebe (Schwimm- und Sinkgut) auf jeweils zwei andere Trichter umgebettet. Nun wird mit destilliertem Wasser das Erz gewaschen. Das verunreinigte Wasser wird aufgefangen und später einem Regenerationsvorgang unterzogen. Das Erz wird so lange gewaschen, bis es vollständig von der Lösung befreit ist.

Bevor das Produkt in die Trocknung kommt wird es noch mit kaltem Leitungswasser gewaschen. Dieses Wasser wird nicht aufgefangen. Es dient nur dazu, um sicherzugehen, dass die Produktmasse nicht durch Natriumpolywolframatreste beeinflusst wird.

Ad 7) Regeneration der Lösung

Zur Regeneration ist es ausreichend, die verdünnte Lösung bei 60 [°C] einzudampfen. In regelmäßigen Abständen wird die gesamte Lösung gefiltert, um den entstandenen Abrieb abzutrennen.

5.3.5) TRENNSCHNITTE MIT NATRIUMPOLYWOLFRAMAT UND WOLFRAMKARBID

Um die Trennschnitte mit den Dichten von 3,2 bis 3,8 [g/cm³] im Labor realisieren zu können, steht laut oberer Tabelle nur eine Schwerflüssigkeit zur Verfügung. Clerici-Lösung (Thalliumformiat- und Thalliummalonatlösung) ist aber aufgrund seiner Toxizität und Korrosivität in Österreich für den Laborbetrieb nicht zugelassen.

Die fehlenden Trennschnitte werden mit einer Kombination aus Natriumpolywolframatlösung und sehr fein aufgemahlenem Wolframkarbid abgeschwommen. Diese Methode hat den Nachteil, dass während des Abschwimmens der Körner Zeiteffekte auftreten, da sich das Wolframkarbid, wie bei jeder anderen Schwertrübe, abzusetzen beginnt. Durch die hohe Viskosität der Natriumpolywolframatlösung bei einer Dichte von 3,00 [g/cm³] wird das Wolframkarbid aber wesentlich am Entmischen gehindert. Der Arbeitsablauf mit Natriumpolywolframatlösung und Wolframkarbid gestaltet sich wie folgt:

1. Vorbereitung der Natriumpolywolframatlösung
2. Zugabe von Wolframkarbid
3. Einstellen der Dichte
4. Zugabe des Erzes und Durchmischen
5. Abschöpfen des Schwimmgutes
6. Trennung von Sinkgut und Trübe
7. Reinigung der Erzes von der Trübe
8. Regeneration des Wolframcarbids

Ab 1) Vorbereitung der Natriumpolywolframatlösung

Das Natriumpolywolframat (chem. $3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) liegt in pulvriger Form vor. Mit destilliertem Wasser wird eine Lösung mit einer Dichte von ca. 3,00 [g/cm³] angemischt. Es ist wichtig bei der Arbeit mit Natriumpolywolframat immer destilliertes Wasser zu verwenden, da die Mineralstoffe im Leitungswasser die Lösung verunreinigen und sie undurchsichtig werden lassen.

Ad 2) Zugabe von Wolframkarbid

Wolframkarbid (chem. WC) hat eine Reindichte von ca. 15,60 [g/cm³] [25]. Das Pulver wird nun unter intensivem Rühren in die Lösung so lange eingebracht, bis die gewünschte Trübedichte erreicht ist.

Ad 3) Einstellen der Dichte

Zur Messung der Dichte ist ein Areometer am besten geeignet, da sich so die Dichte schnell und direkt im Mischgefäß überprüfen lässt.

Um die Dichte zu erhöhen wird Wolframcarbid in Pulverform beigelegt. Um die Dichte zu senken (häufigerer Fall) kann destilliertes Wasser oder Natriumpolywolframatlösung beigegeben werden. Es hat sich gezeigt, dass es besser ist Natriumpolywolframatlösung zur Verdünnung zuzugeben, als Wasser, da bei Zunahme des Wasseranteils und Abnahme des Lösungsanteils die Trübestabilität leidet.

Ad 4) Zugabe des Erzes und Durchmischen

Sobald die Trübe fertig eingestellt ist, wird ein Teil der Produktprobe in die Trübe aufgegeben. Es dürfen aber nicht mehr als 100 [g] gleichzeitig in die Trübe aufgegeben werden. Die Aufgabe wird hier auf 100 [g] gesenkt, da aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Wolframcarbid anstatt in einem Becherglas mit einem Volumen von einem Liter nur in einem Reagenzglas mit einem halben Liter Volumen gearbeitet wird.

Mit einem Löffel wird die Trübe mit dem Erz noch einmal ordentlich durchmischt, damit gewährleistet ist, dass alle Körner vollständig benetzt werden und zumindest etwas untergetaucht werden.

Ad 5) Abschöpfen des Schwimmgutes

Nachdem die Trübe im Glas zur Ruhe gekommen ist, kann damit begonnen werden das Schwimmgut abzuschöpfen. Am besten geeignet ist ein Schöpflöffel, dessen Boden wie ein Sieb aufgebaut ist. Das abgeschöpfte Erz wird auf ein Sieb aufgegeben, um zu ermöglichen, dass die Trübe noch weiter abtropfen kann. Die so abgetropfte Trübe wird aufgefangen und kann sofort wieder verwendet zu werden.

Ad 6) Trennung von Sinkgut und Trübe

Sobald das Schwimmgut abgeschöpft ist und es offensichtlich wird, dass kein Korn mehr aufsteigen wird, kann das Sinkgut von der Trübe getrennt werden. In diesem Fall wird die Trübe noch einmal mit einem Löffel durchmischt, um das bereits abgesetzte Erz wieder in Suspension zu bringen. Danach wird der gesamte Inhalt des Becherglases über einem Trichter mit einem Sieb verkippt. Die mit einem Becherglas aufgefangene Trübe kann nach einer erneuten Einstellung der Dichte sofort wieder verwendet werden.

Ad 7) Reinigung der Erzes von der Trübe

Nachdem die Trübe soweit als möglich vom Erz abgetropft ist, werden die Siebe (Schwimm- und Sinkgut) auf jeweils zwei andere Trichter umgebettet. Nun wird mit destilliertem Wasser das Produkt gewaschen. Das verunreinigte Wasser wird aufgefangen und später einer

Regeneration unterzogen. Das Produkt wird so lange gewaschen, bis es vollständig von der Trübe befreit ist.

Bevor das Produkt in die Trocknung kommt wird es noch mit Leitungswasser gewaschen. Dieses Wasser wird nicht aufgefangen. Es dient nur dazu, um sicherzugehen, dass die Produktmasse nicht durch Natriumpolywolframat oder Wolframkarbidreste beeinflusst wird.

Ad 8) Regeneration des Wolframcarbids

Wolframkarbid in einer für Schwimm-Sink-Analyse angemessenen Feinheit ist eine relativ teure Substanz im Aufbereitungslabor. Sorgfältiger Umgang und gewissenhafte Regeneration zahlen sich aus.

Das Wolframkarbid wird gemeinsam mit der Natriumpolywolframatlösung mit destilliertem Wasser vom Probematerial abgewaschen. Diese dabei entstehende stark verdünnte Lösung wird anschließend unter Zuhilfenahme einer Nutsche (Filterpapier 2 [μm]) vom Wolframkarbid befreit. Nach der Trocknung im Trockenschrank kann das Material sofort wieder zum Anmischen einer Trübe verwendet werden.

Die Lösung in der Filernutsche kann in einem Trockenschrank (max. 60 [$^{\circ}\text{C}$]) eingedampft werden. Es muss allerdings beachtet werden, dass trotz sehr feinen Filterpapiers ein gewisser Anteil des Wolframcarbids in der Lösung verbleibt und somit das Natriumpolywolframat nicht vollständig regeneriert werden kann.

Unter Umständen ist es sinnvoll, dass nach dem Trocknen die Dichte des Wolframcarbids überprüft wird. Eine Dichtemessung kann Hinweise auf Verunreinigen des Schwerstoffs geben. Für die Dichtemessung sollte ein Heliumpyknometer verwendet werden. Bevor das Material aus dem Trockenschrank in die Messzelle aufgegeben wird, muss es mit einem Mörser sorgfältig zerstoßen werden, um Agglomerate zu zerreiben.

5.4) ERGEBNISSE VERSUCHSSERIE 3

5.4.1) MASSE AUSBRINGEN

Das Masseausbringen wird für jeden Versuch aus den Massen an getrocknetem und von FeSi getrenntem Erz gerechnet. Einerseits wird das Masseausbringen des Über- und des Unterlaufs für den gesamten Versuch berechnet, andererseits wird das Masseausbringen für die Korngrößenklassen gerechnet. Zusätzlich wird auf Basis der chemischen Analyse der einzelnen Produkte mittels eines Gauß-Ausgleichs das Masseausbringen gerechnet:

		gesamt	6,3 / 4	4 / 2	Gauß
3.1	Überlauf	40,06	39,65	40,15	37,92
	Unterlauf	59,94	60,35	59,85	62,08
3.2	Überlauf	33,58	31,85	33,54	28,45
	Unterlauf	66,42	68,15	66,46	71,55
3.3	Überlauf	61,34	60,03	61,91	57,82
	Unterlauf	38,66	39,97	38,09	42,18
3.4	Überlauf	21,13	21,53	20,16	27,69
	Unterlauf	78,87	78,47	79,84	72,31

Tabelle 23: Masseausbringen der Korngrößenklassen für die Auswertung

Das Gesamtmasseausbringen bezieht sich auf das Verhältnis der Gesamterzmassen in den Produkten. Die Ausbringen der Korngrößenklassen werden aus den Ergebnissen der Siebanalysen gerechnet. Die Ergebnisse der Siebanalysen befinden sich im Anhang.

Es kann abgelesen werden, dass bis auf Versuch 3.3 das Masseausbringen immer zu Gunsten des Unterlaufs ausfällt. Dieser Umstand ist durchaus wünschenswert, da es sich beim Unterlauf um das Konzentrat handelt.

Außerdem kann aus dieser Tabelle abgelesen werden, dass sich das Masseausbringen innerhalb eines Versuchs kaum ändert, d.h. dass das Gesamtmasseausbringen den Masseausbringen der betrachteten Korngrößenklassen sehr ähnlich ist. Dieser Umstand unterstreicht die Tatsache, dass Korngrößeneffekte im vorliegenden Versuchsaufbau kaum eine Rolle spielen.

5.4.2) KORNGRÖßENVERTEILUNGEN

Nach Abtrennung des Erzes vom FeSi und trocknen des Erzes im Trockenschrank wird das Erz mittels Handsiebung in folgende Korngrößenklassen eingeteilt:

> 10,0	[mm]
10,0 / 8,0	[mm]
8,0 / 6,3	[mm]
6,3 / 4,0	[mm]
4,0 / 2,0	[mm]
2,0 / 1,0	[mm]
1,0 / 0,5	[mm]

Tabelle 24: Korngrößenklassen für Auswertung der Erzproben

Diese Korngrößenklassen werden einerseits zur Vorbereitung der Schwimm-Sink-Analyse hergestellt. Andererseits kann damit auch ein Eindruck des Verhaltens der Zyklonanlage gewonnen werden. Es soll untersucht werden, ob dieses Erz im Zyklon einem Klassiereffekt unterworfen ist. Andererseits soll auch untersucht werden, ob sich die Aufgabe aus dem Pumpensumpf über die Zeit verändert.

Die Korngrößenverteilungen der Aufgaben werden aus den Korngrößenverteilungen der Über- und der Unterlaufproben gerechnet. In Abbildung 11 sind die Korngrößenverteilungen der Aufgaben dargestellt:

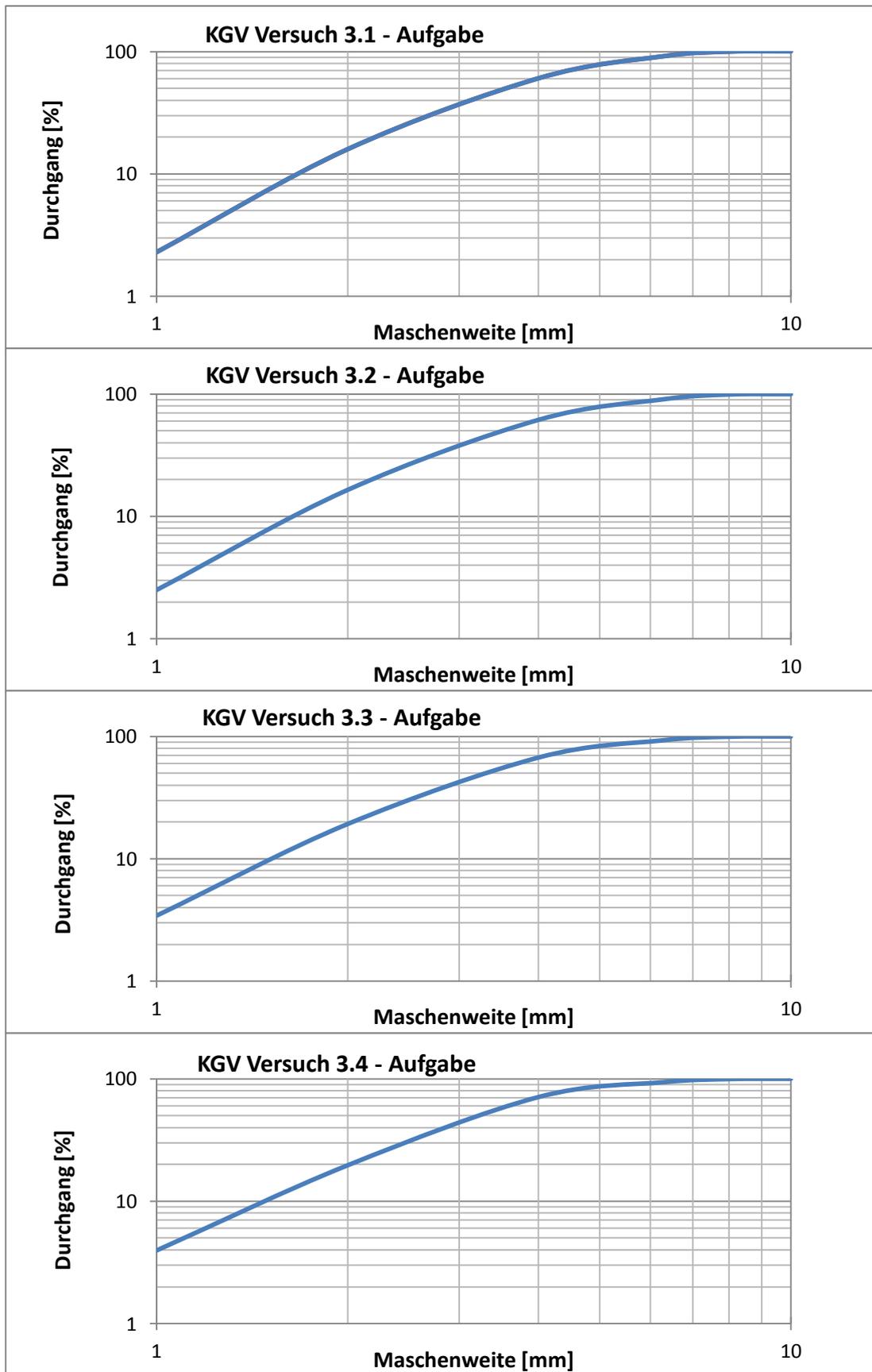


Abbildung 11: Die Aufgabekorngrößenverteilungen der Versuche 3.1-3.4

Mehrere Sachverhalte können aus diesen Korngrößenverteilungen (KGV) abgelesen werden:

1. KGV verändert sich kaum über die Zeit
2. Abrieb wirkt sich nicht aus

Ad 1) KGV verändert sich kaum über die Zeit

Während der Abwicklung des Versuchsprogramms werden nicht unbedeutende Mengen an Proben aus dem System in Form von Zyklonproduktproben abgezogen. An den Kurven kann eindeutig abgelesen werden, dass sich die Korngrößenverteilungen der Produkte vom ersten bis zum letzten Versuch kaum verändert haben. Das bedeutet, dass die Entmischung der Aufgabe im Pumpensumpf bezogen auf die Korngrößenklassen vernachlässigbar klein ist.

Ad 2) Abrieb wirkt sich nicht aus

Während der Durchführung der Siebungen und der Schwimm-Sink-Analysen ist aufgefallen, dass sich die Körner in ihrem Erscheinungsbild zwischen erstem und letztem Versuch deutlich unterscheiden. Wirken die einzelnen Erz- und Bergkörner aus den Proben des ersten Versuchs noch relativ scharfkantig, haben die Körner aus den Proben des letzten Versuchs wesentlich rundere Kanten. Dieser Umstand kann durch die Tatsache erklärt werden, dass sich die Körner während der Versuche durch das Passieren der Trübepumpe und des Rohrleitungssystems der Versuchsanlage abschleifen. Die Korngröße verändert sich dadurch nicht merklich, aber die abgeriebenen Anteile des aufgegebenen Erzes können auf Dauer Einfluss auf das Verhalten der Trübe nehmen.

Zur Beurteilung des Abriebs werden die FeSi-Proben untersucht, welche im Zuge der Versuchsreihe 3 als Proben gezogen werden. Diese Versuche werden mit Erz in der Aufgabe durchgeführt. Durch die Tatsache, dass die Versuche auf einer Versuchsanlage durchgeführt werden, wird die Aufgabe ständig im Kreis geführt und die Erzkörner passieren somit in regelmäßigen Abständen die Trübepumpe. Dadurch kommt es zu Abrieb an den Erzkörnern. Durch die Tatsache, dass im Zuge der Versuchsauswertung das Erz vom FeSi mittels eines Siebes mit einer Maschenweite von 0,5 [mm] getrennt wird, bleibt der feinere Abrieb im FeSi zurück.

Die Trennung des Abriebs vom FeSi mittels Siebung ist nicht möglich. Zur Trennung werden die magnetischen Eigenschaften ausgenutzt. Ferrosilizium ist ferromagnetisch, das Erz ist paramagnetisch. Mit einer Davis-Tube können beide voneinander getrennt werden.

Die Messungen mit der Davis-Tube ergeben, dass circa 2,5 [%] der FeSi-Masse aus Abrieb bestehen. Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass ein gewisser Feinanteil als Unterkorn der Erzaufgabe in das FeSi gelangt ist und dass das Erz zum Zeitpunkt der Probenahme circa 50 Mal über die Pumpe gelaufen ist, ist der gemessene Feinanteil vertretbar. In einer industriell eingesetzten Anlage läuft das Erz nur ein einziges Mal über die Pumpe.

5.4.3) BILANZEN

Nachdem das Erz getrocknet ist und bevor die einzelnen Proben abgesiebt werden, wird von jeder der zehn Proben eine Teilprobe für die chemische Analyse mittels RFA hergestellt. Die Teilprobe wird mit einem Riffelteiler erstellt. Je nach Größe der Probe waren zwischen ein und vier Teilschritte notwendig, um eine Teilprobe von mindestens 200 [g] zu erhalten. Analysiert werden die Gehalte von neun Bestandteilen: Fe, CaO, SiO₂, MgO, Mn, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, S-Alk;

Aus den so gewonnenen Daten werden Bilanzen erstellt. Im Zuge der Bilanz wird für jeden Versuch aus der Überlauf- und der Unterlaufprobe eine Aufgabe berechnet. Die Aufgabe wird gerechnet um die Veränderung der Aufgabe über die Zeit darzustellen. Die Aufgabeprobe Anfang und die Aufgabeprobe Ende werden gemessen und müssen nicht gerechnet werden.

Fe	r, m [%]	g [%]	I [%%]	r, I [%]
Aufg. A.	100,00	29,70	2970,00	100,00
3.1 ÜL	40,06	12,92	517,58	20,84
3.1 UL	59,94	32,80	1966,03	79,16
ger. Aufg.	100,00	24,84	2483,61	100,00
3.2 ÜL	33,58	11,96	401,62	16,45
3.2 UL	66,42	30,70	2039,09	83,55
ger. Aufg.	100,00	24,41	2440,71	100,00
3.3 ÜL	61,34	17,89	1097,37	44,31
3.3 UL	38,66	35,67	1379,00	55,69
ger. Aufg.	100,00	24,76	2476,37	100,00
3.4 ÜL	21,13	13,02	275,11	10,39
3.4 UL	78,87	30,09	2373,20	89,61
ger. Aufg.	100,00	26,48	2648,31	100,00
Aufg. E.	100,00	25,41	2541,00	100,00

Tabelle 25: Eisenbilanz Versuche 3.1-3.4 mit rückgerechneten Aufgaben und Anfangs- und Endaufgabeproben

Hier wird aus Übersichtlichkeitsgründen nur die Bilanz für Eisen (Fe) dargestellt. Alle anderen Bilanzen befinden sich im Anhang.

Folgende Sachverhalte können aus dieser Bilanz abgelesen werden:

1. Aufgabe hat sich über die Zeit kaum verändert
2. Senken des Drucks senkt den Fe-Gehalt im Konzentrat
3. Verringern des Apex-Durchmessers hebt den Fe-Gehalt und das Inhaltsausbringen im Konzentrat
4. Senken der Aufgabetrübedichte senkt den Fe-Gehalt und Inhaltsausbringen im Konzentrat

Ad 1) Aufgabe hat sich über die Zeit kaum verändert

Es kann festgestellt werden, dass die Aufgabe sich vom Gesichtspunkt der chemischen Zusammensetzung her wenig bis gar nicht verändert hat. Der hohe Gehalt der Aufgabeprobe am Anfang kann durch einen Probenahmefehler erklärt werden, da hier nur ein Liter Probe gezogen wurde. Alle anderen Proben wurden in einem wesentlich höheren Umfang genommen.

Die Tatsache, dass sich die Aufgabe kaum verändert hat, ist ein Hinweis darauf, dass sich die Entmischungseffekte im Pumpensumpf während der Versuchsdurchführung in Grenzen halten.

Ad 2) Senken des Drucks senkt den Fe-Gehalt im Konzentrat

Das Verringern des Aufgabedruckes von 1,0 auf 0,8 [bar] erhöht das Masseausbringen und senkt den Eisengehalt im Konzentrat. Insgesamt steigt aber das Inhaltsausbringen im Konzentrat.

Bei geringerem Aufgabedruck hat das aufgegebene Erz auch eine längere Verweilzeit im Zyklon und somit mehr Zeit nach außen zu wandern und im Unterlauf ausgetragen zu werden.

Ad 3) Verringern des Apex-Durchmessers hebt den Fe-Gehalt und das Inhaltsausbringen im Konzentrat

Beim dritten Versuch wird im Vergleich zum ersten Versuch der Apexdurchmesser von 2,5 auf 2,25 [in] gesenkt. Erwartungsgemäß sinkt dadurch das Masseausbringen im Unterlauf und der Eisengehalt steigt. Das Inhaltsausbringen sinkt auf 55,69 [%].

Dieser Effekt war zu erwarten und ist durch den geringeren Apexdurchmesser einfach zu erklären. Dadurch, dass weniger Material durch die Apexöffnung passt, wird automatisch mehr im Überlauf ausgetragen. So gelangen nur noch die relativ gut aufgeschlossenen Erzkörner in den Unterlauf, was den stark erhöhten Eisengehalt bewirkt.

Ad 4) Senken der Aufgabetrübedichte senkt den Fe-Gehalt und Inhaltsausbringen im Konzentrat

Beim vierten Versuch wird die Aufgabetrübedichte im Vergleich zum ersten Versuch von 3,00 auf 2,80 [g/cm³] gesenkt. Der Eisengehalt im Konzentrat wird auf 30,09 [%] gesenkt, das Masseausbringen im Konzentrat steigt auf 78,87 [%]. Das Inhaltsausbringen steigt auf annähernd 90 [%].

Durch die verringerte Trübedichte kann davon ausgegangen werden, dass die Trübedichte in den Schichten über den Randbereich des Zykloninneren sinkt, wodurch sich mehr Körner geringer Dichte im Randbereich des Zyklons aufhalten können und im Apex ausgetragen werden.

5.4.4) DETAILBILANZEN VERSUCH 3.1

Nach Beendigung der Schwimm-Sink-Analyse und der Auswertung derselben werden die Korngrößenklassen (6,3/4,0; 4,0/2,0; 2,0/1,0; 1,0/0,5 [mm]) und die Dichteklassen (alle) des Versuchs 3.1 mittels RFA am steirischen Erzberg analysiert. Aus den gewonnenen Daten werden Bilanzen bezogen auf die Korngrößenklassen und auf die Dichteklassen in einzelnen Korngrößenklassen erstellt.

Für eine zuverlässige RFA-Messung werden ca. 200 [g] Material benötigt. Bis 50 [g] ist eine Messung theoretisch möglich. Da bei einigen Dichtefraktionen zu wenig Masse für eine zuverlässige Messung vorhanden sind, werden für diese Dichteklassen die Durchschnittswerte der gleichen Dichteklassen von anderen Proben verwendet. Es kann davon ausgegangen werden, dass in den jeweiligen Dichteklassen unterschiedlicher Fraktionen oder Proben die gleichen Minerale vorhanden sind, da die Proben der gleichen Grundgesamtheit entstammen.

Tabelle 25 stellt die detaillierte Bilanz des Versuchs 3.1 bezogen auf den Gehalt an Eisen dar. Die Bilanzen für alle anderen analysierten Bestandteile sind im Anhang.

3.1 Fe		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ -K [g/cm ³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65 r, I = 28,23	4,39	2,59	0,84	r, m = 60,35 r, I = 71,77	0,05	3,01	0,00	r, m = 100,00 r, I = 100,00	1,77	1,87	0,12
	2,8 / 3,0		37,19	7,92	21,69		2,98	8,63	0,75		16,55	6,14	3,55
	3,0 / 3,2		40,58	15,26	45,59		6,26	15,28	2,77		19,87	12,25	8,51
	3,2 / 3,4		14,62	23,08	24,84		7,86	24,16	5,50		10,54	21,97	8,09
	3,4 / 3,6		3,17	29,64	6,92		33,94	33,61	33,03		21,74	38,88	29,53
	3,6 / 3,8		0,05	39,26	0,13		44,53	40,66	52,44		26,89	48,34	45,43
	> 3,8		0,00	43,66	0,00		4,37	43,44	5,50		2,64	51,66	4,77
Σ		100,00	13,58	100,00	100,00	34,53	100,00	100,00	28,62	100,00			
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15 r, I = 29,54	6,79	2,52	1,22	r, m = 59,85 r, I = 70,46	0,43	3,91	0,05	r, m = 100,00 r, I = 100,00	2,98	2,09	0,23
	2,8 / 3,0		34,91	7,49	18,69		4,98	9,00	1,34		17,00	6,40	3,94
	3,0 / 3,2		39,15	15,25	42,68		8,77	15,67	4,12		20,97	13,03	9,88
	3,2 / 3,4		11,20	23,44	18,76		8,35	24,14	6,04		9,49	23,13	7,94
	3,4 / 3,6		6,63	32,00	15,17		25,70	32,74	25,21		18,04	36,33	23,71
	3,6 / 3,8		1,21	36,66	3,16		47,13	40,45	57,13		28,69	47,27	49,06
	> 3,8		0,10	43,66	0,32		4,64	43,88	6,10		2,82	51,37	5,24
Σ		100,00	13,99	100,00	100,00	33,37	100,00	100,00	27,65	100,00			
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 29,39	33,65 48,81 15,03 2,50	13,58 13,99 14,24 16,50	32,76 48,94 15,34 2,96	r, m = 60,00 r, I = 70,61	34,13 48,49 14,83 2,55	34,53 33,37 31,91 31,91	35,17 48,28 14,12 2,43	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94 48,62 14,91 2,53	28,48 27,63 26,63 27,49	34,81 48,38 14,30 2,50
Σ			100,00	13,95	29,40		100,00	33,51	70,60		100,00	27,76	100,00

Tabelle 26: Fe-bezogene Detailbilanz des Versuchs 3.1

Auffällig sind folgende Punkte:

1. Der Eisengehalt ist über die KGK im Wesentlichen stabil
2. Der Eisengehalt innerhalb der Dichteklassen gleich

Ad 1)

Betrachtet man den Eisengehalt der Korngrößenklassen ohne Dichteklasseneinteilung, so fällt auf, dass sich der Eisengehalt im Wesentlichen stabil verhält. Das lässt darauf schließen, dass es im Zyklon keinen Klassiereffekt gibt. Die Trennung funktioniert nur über die Dichte. Körner mit gleicher Dichte verhalten sich unabhängig von der Korngröße gleich.

Ad 2)

In den beiden detailliert untersuchten Korngrößenklassen sind die Eisengehalte in der gleichen Dichteklasse, egal ob Konzentrat oder Berge, sehr ähnlich. Das deutet darauf hin, dass in den gleichen Dichteklassen auch die gleichen Minerale zu liegen kommen.

Nach der Schwimm-Sink-Analyse wurde von jeder Dichteklasse (alle Fraktionen, alle Proben) mittels Heliumpyknometer die durchschnittliche Dichte bestimmt. Die gleichen Dichteklassen haben immer auch annähernd dieselbe durchschnittliche Dichte.

5.4.5) HENRY-REINHARDT VERSUCH 3.1

Nachdem das Material des Versuchs 3.1 in Korngrößenklassen und Dichteklassen eingeteilt war und die Proben chemisch analysiert worden waren, wird mit den vorhandenen Daten ein Henry-Reinhardt-Schaubilder zur Charakterisierung des Aufgaberezes gezeichnet. Dargestellt werden soll die Verteilung des Eisengehalts in den Dichteklassen.

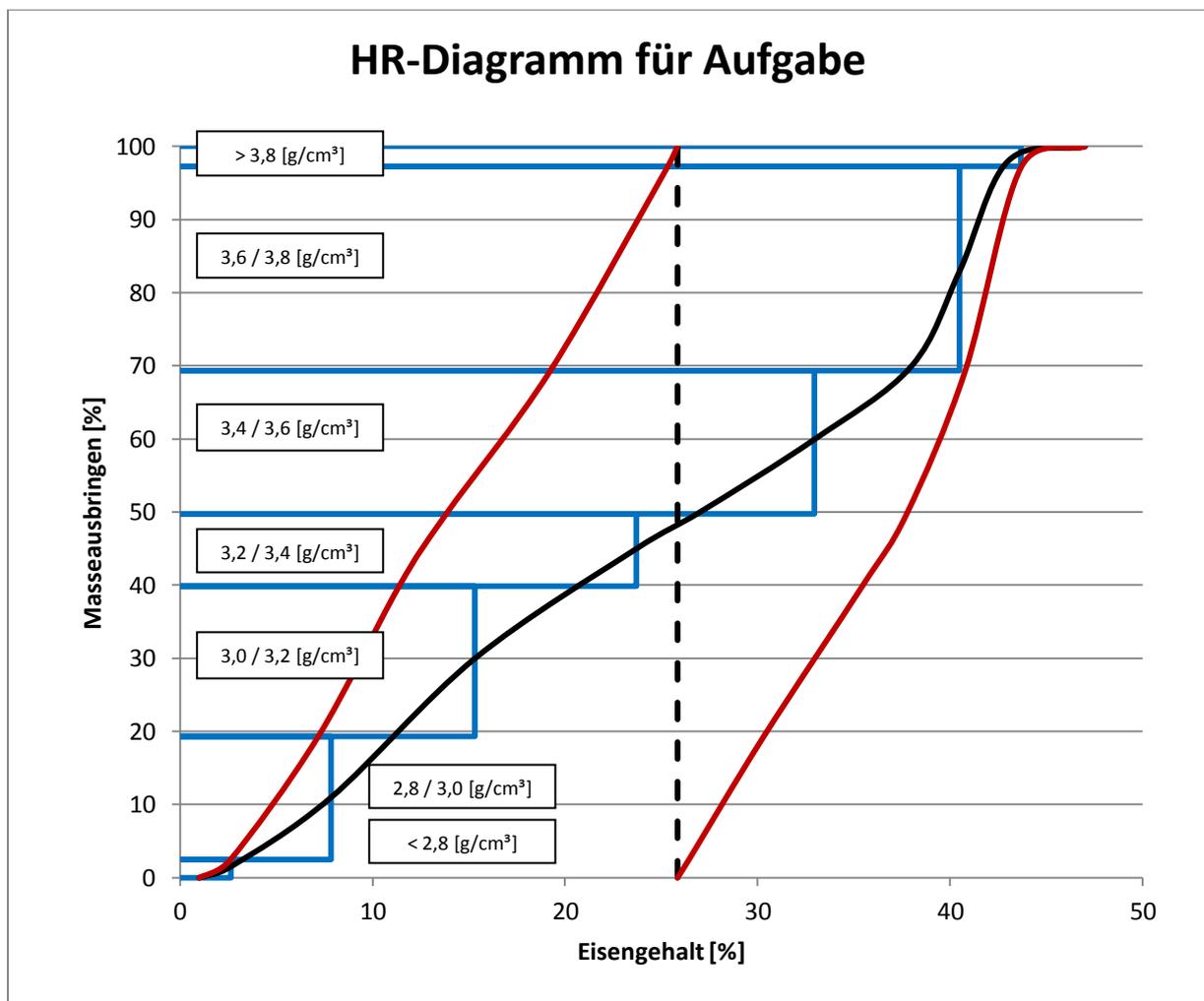


Tabelle 27: Henry-Reinhardt-Diagramm für die Aufgabe von Versuch 3.1

Das Produkt, das mittels Schwertrübezyklonierung hergestellt wird, soll einen Eisengehalt von 33,6 [%] haben. Das Masseausbringen im Konzentrat soll möglichst hoch sein. Aus dem Henry-Reinhardt-Diagramm kann abgeleitet werden, dass bei einem Trennschnitt von etwa 3,1 [g/cm³] ein Konzentrat mit einem Eisengehalt von 33,6 [%] und einem theoretischen Masseausbringen von ca. 70 [%] hergestellt werden kann. Dabei entsteht ein Bergeprodukt mit einem Eisengehalt von circa 8 [%].

Die Versuche haben allerdings gezeigt, dass im realen Prozess die Trennung nicht perfekt funktioniert. Bei der Herstellung eines Konzentrats mit einem Eisengehalt von 32,8 [%], konnte nur ein Masseausbringen von 60 [%] erreicht werden. Laut Henry-Reinhardt sollte bei diesem Eisengehalt ein Masseausbringen von deutlich mehr als 70 [%] gegeben sein.

Für die Auslegung des Prozesses können die Daten aus dem Henry-Reinhardt-Diagramm als Anhaltspunkt für die Abschätzung von Extremwerten bzw. zur Abschätzung von idealen Ergebnissen herangezogen werden.

5.4.6) TEILUNGSKURVEN

Die Schwimm-Sink-Analyse wird mit den Korngrößenklassen 6,3 / 4,0 und 4,0 / 2,0 [mm] durchgeführt. Zur Abschätzung der Trennschärfe des Verfahrens und der Darstellung des Trennerfolgs werden aus den gewonnenen Daten die Teilungszahlen errechnet und die Teilungskurven graphisch dargestellt. Die Aufstellung der Teilungszahlen für die einzelnen Versuche ist im Anhang zu finden. Tabelle 28 zeigt Die Trennschnittlage nach Tromp und den Ecart probable für die einzelnen Versuche:

VersuchsNr		3.1	3.2	3.3	3.4
Druck	[bar]	1,0	0,8	1,0	1,0
Apex	[in]	2,50	2,50	2,25	2,50
Dichte	[g/cm ³]	3,00	3,00	3,00	2,80
Konus		steil	steil	steil	steil
FeSi-Typ		hafsil	hafsil	hafsil	hafsil
Trennschnittlage nach Tromp	[g/cm ³]	3,25	3,15	3,45	3,00
Ecart Probable	[g/cm ³]	0,135	0,150	0,100	0,200

Tabelle 28: Trennschnittlage nach Tromp und Ecart Probable der Versuche 3.1-3.4

Im Folgenden sind die Teilungskurven dargestellt. Die acht Teilungskurven sind in zwei Diagrammen zusammengefasst, sortiert nach der Korngrößenklasse. Zur besseren Vergleichbarkeit sind immer die vier verschiedenen Versuche in einem Diagramm dargestellt. So kann abgelesen werden, wie die Veränderung eines Einstellungsparameters sich auf die Trennschärfe und die Trennschnittlage auswirkt.

Folgendes kann an diesen Kurven abgelesen werden:

1. Kurven sind im Grobkornbereich trennschärfer
2. Senken des Drucks verschiebt die Trennschnittlage nach unten
3. Verringerung des Apexdurchmessers verschiebt die Trennschnittlage nach oben
4. Senken der Aufgabetrübedichte verschiebt die Trennschnittlage nach unten

Ad 1) Kurven sind im Grobkornbereich trennschärfer

Es kann eindeutig abgelesen werden, dass die Trennung im größeren Kornbereich etwas besser funktioniert, als im feineren Kornbereich. In den Dichteklassen unter 2,80 und über 3,60 [g/cm³] sind die Unterschiede deutlich zu sehen. Trotzdem wirkt sich dieser Umstand auf das Ergebnis weniger stark aus als angenommen, da die betroffenen Dichteklassen einen geringen Anteil an der Gesamtmasse haben. So kann auch der geringe Unterschied zwischen den Eisgehalten im Gesamtergebnis erklärt werden (siehe Punkt 4.5.3)

Ad 2) Senken des Drucks verschiebt die Trennschnittlage nach unten

Wird der Aufgabedruck von 1,0 auf 0,8 [bar] reduziert, so verschiebt sich die Trennschnittlage von dem ursprünglichen Wert von $T_{50} = 3,25$ [g/cm³] auf eine neue Trennschnittlage von $T_{50} = 3,15$ [g/cm³].

Dieser Effekt ist folgendermaßen erklärbar: durch den verringerten Aufgabedruck dreht sich der Strudel im Zyklon langsamer. Somit wirken weniger starke Zentrifugalkräfte auf die einzelnen Körner, mehr leichte Körner verbleiben im Außenbereich des Zyklons und werden so im Unterlauf ausgetragen.

Ad 3) Verringerung des Apexdurchmessers verschiebt die Trennschnittlage nach oben

Die Verkleinerung des Durchmessers der Apexdüse von 2,50 auf 2,25 [in], bei unverändertem Vortexdurchmesser, verschiebt sich die Trennschnittlage nach oben. Statt einem $T_{50} = 3,25$ [g/cm³] kann jetzt eine Trennschnittlage von $T_{50} = 3,45$ [g/cm³] erreicht werden. Die Konsequenz ist einerseits ein erhöhter Eisengehalt im Unterlauf, andererseits leiden das Masseausbringen und damit das Inhaltsausbringen im Unterlauf stark.

Der Effekt der Trennschnittlagenschiebung kann leicht erklärt werden. Wird der Apexdüse eingengt, kann weniger Material hindurch. Damit wird mehr Material in den Gegenstrudel im Inneren des Zyklons gedrückt.

In diesem Fall wird im Vergleich zum ersten Versuch nur die Apexdüse verändert. Alle anderen Parameter bleiben gleich. Somit wird es für leichtere Körner nicht schwieriger in den Außenbereich des Zyklons zu kommen, sondern es gelangt lediglich eine dünnere Schicht in den Austrag.

Ad 4) Senken der Aufgabetrübedichte verschiebt die Trennschnittlage nach unten

Das Senken der Aufgabetrübedichte von 3,00 auf 2,80 [g/cm³] hat zur Folge, dass sich die Trennschnittlage deutlich nach unten verschiebt. Die Trennschnittlage fällt von 3,25 auf 3,00 [g/cm³].

Die Trennschnittlage muss sich in dieser Situation nach unten verschieben. Durch die geringere Aufgabetrübedichte verhält sich die Trübe im Zyklon instabiler. Es entsteht eine Schicht sehr hoher Dichte im Randbereich, darüber entstehen Schichten mit schnell sinkender Dichte. Leichtere Körner können eindringen bzw. werden nicht schnell genug aus dieser Schicht verdrängt und werden im Apex ausgetragen.

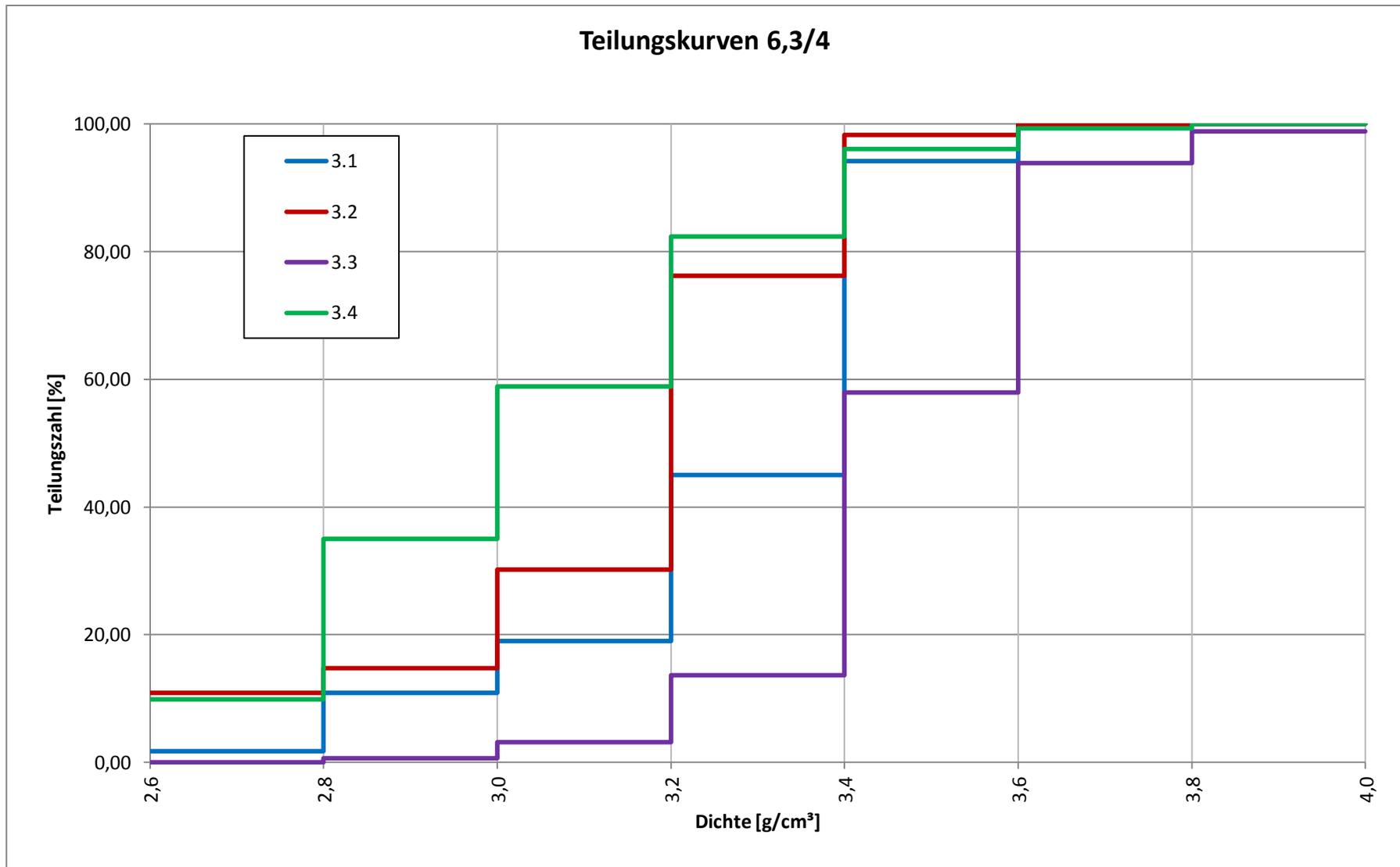


Abbildung 12: Teilungskurven der Korngrößenklasse 6,3/4 der Versuche 3.1-3.4

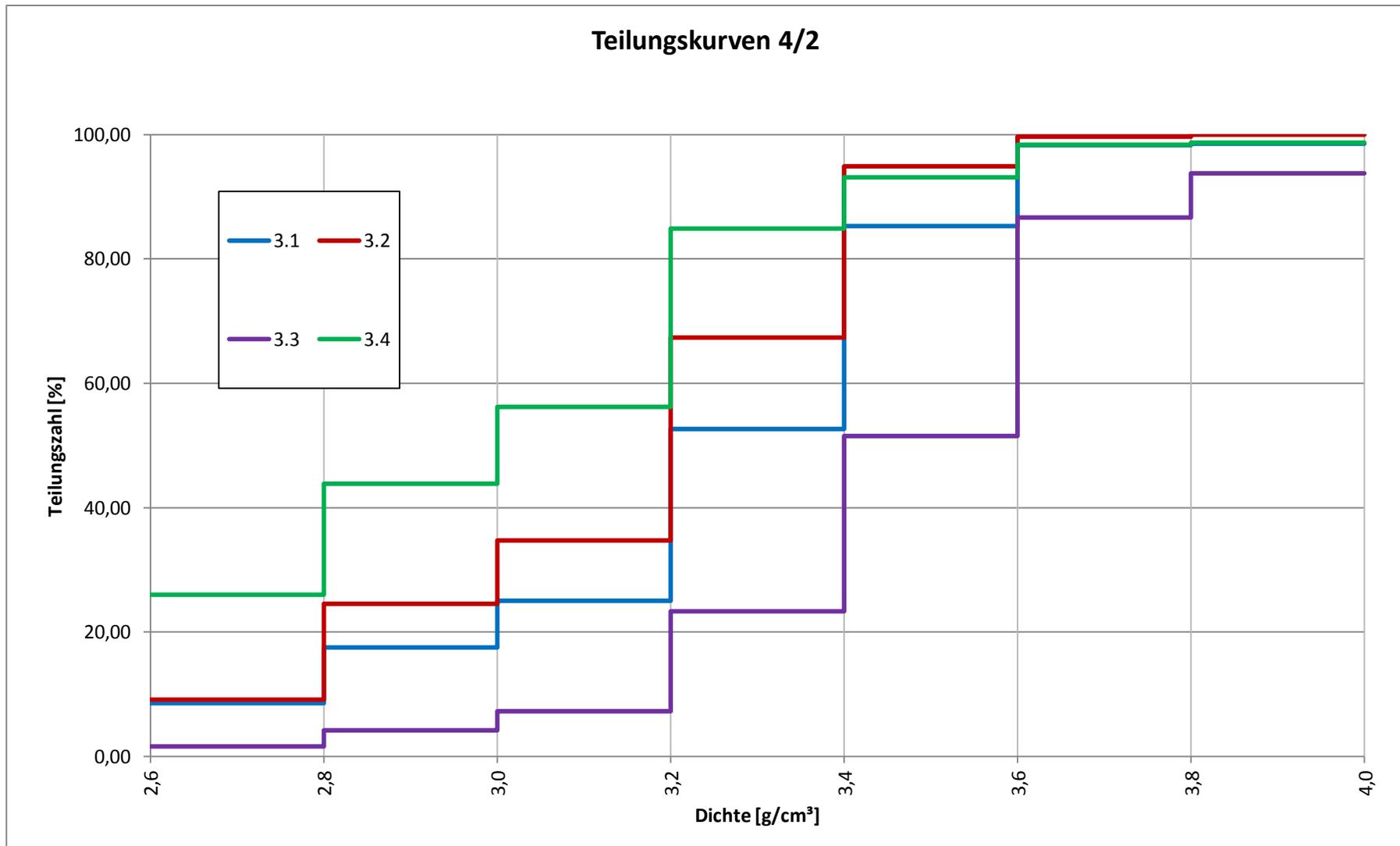


Abbildung 13: Teilungskurven der Korngrößenklasse 4/2 der Versuche 3.1-3.4

5.4.7) DICHTEKURVEN

Von jeder hergestellten Dichteklasse jeder analysierten Korngrößenklasse wird die durchschnittliche Dichte mit einem Heliumpyknometer gemessen. Einerseits dient dies dazu die hergestellten Dichteklassen noch einmal auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Andererseits werden aus diesen Dichteverteilungen Dichtekurven erstellt. Weiters werden aus den Ergebnissen der Dichteverteilung für Über- und Unterlauf eine theoretische Aufgabedichteverteilung gerechnet und mit der Dichteverteilung der Aufgabe verglichen.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind im Folgenden dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die gerechneten Aufgaben nur geringfügig von der gemessenen Aufgabe abweichen.

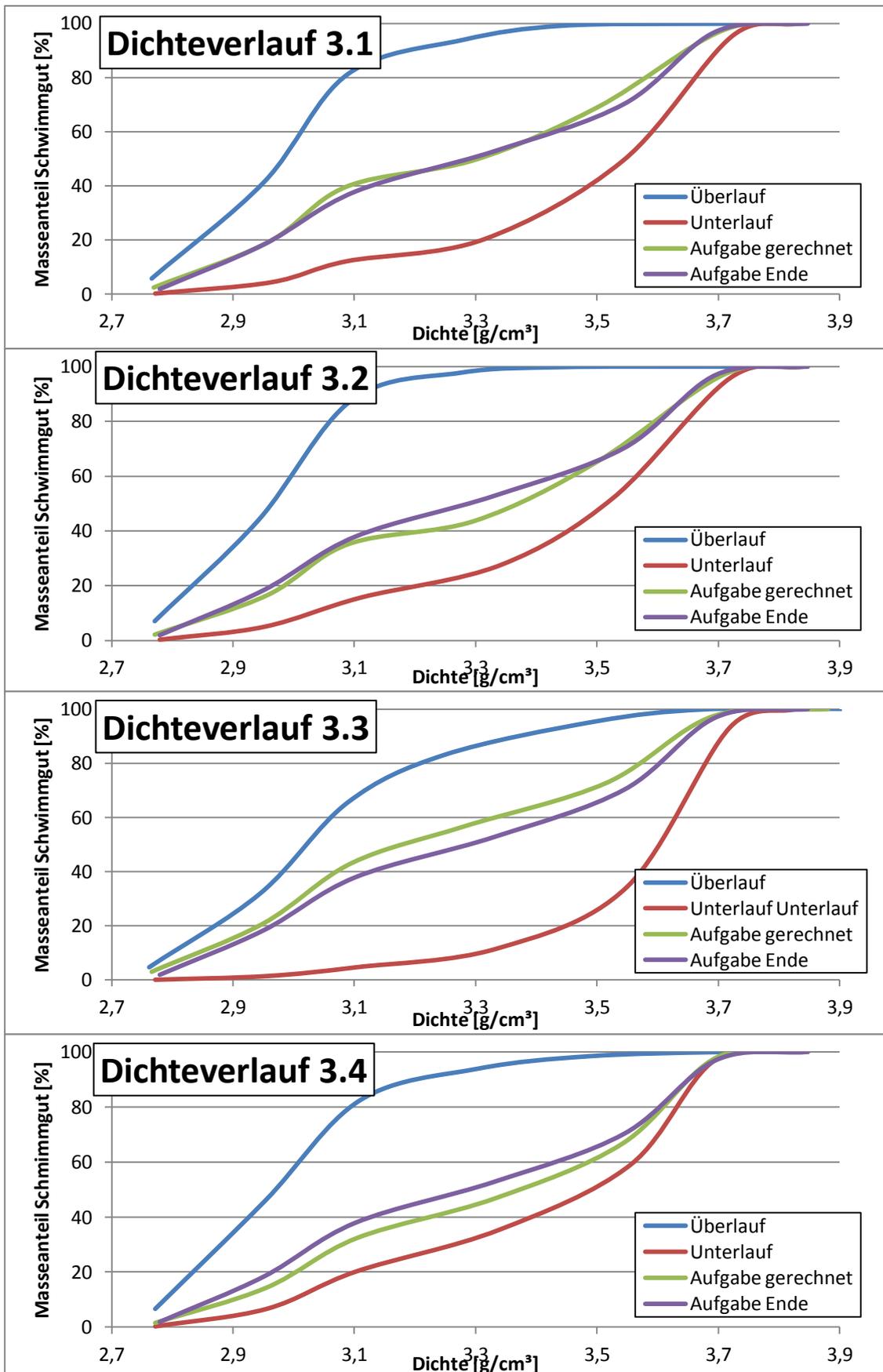


Abbildung 14: Dichteverläufe der Proben der Versuche 3.1-3.4

6.) ANLAGENKONZEPT ZYKLONANLAGE

6.1) MASSEANABSCHÄTZUNG

Aus den Daten der Versuchsauswertung der Versuchsreihe 3 werden die Auslegungsdaten für eine Anlage abgeleitet. Die Anlage wird für einen Gesamtdurchsatz an Erz von 100 [t/h] ausgelegt.

Für eine Abschätzung des Masseausbringens kann das Henry-Reinhardt-Schaubild verwendet werden. Folgendes HR-Schaubild wurde mit den Daten aus Versuch 3.1 erstellt.

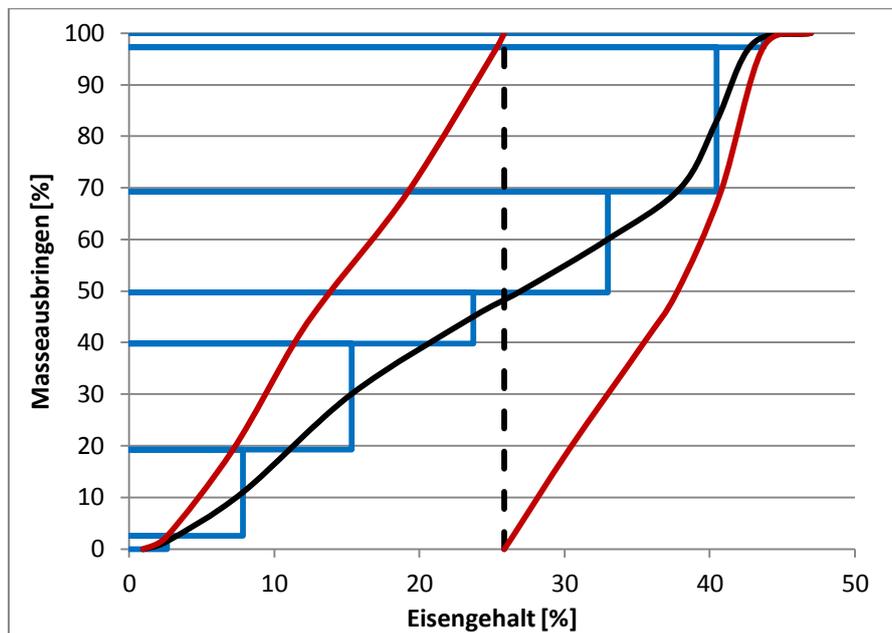


Abbildung 15: Henry-Reinhardt Diagramm Versuch 3.1 Aufgabe

Es kann abgelesen werden, dass bei einem Eisengehalt von 33,6 [%] im Konzentrat ein Masseausbringen von annähernd 70 [%] erwartet werden kann. Laut Diagramm ist dafür eine Trennschnittlage von 3,1 [g/cm³] notwendig.

Um für das Ausbringen an Konzentrat und Bergen einen weiteren Anhaltspunkt zu erhalten, werden in einem Diagramm die Konzentratausbringen gegen den Eisengehalt im Konzentrat aufgetragen. Als Grundlage für dieses Diagramm werden die Daten aus der Versuchsreihe 3 verwendet.

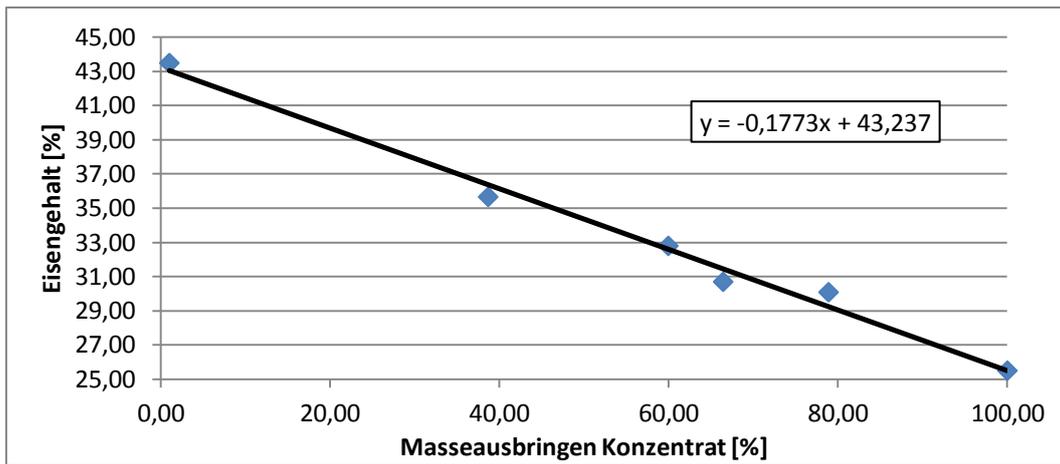


Abbildung 16: Masseausbringen und Eisengehalte der Versuche 3.1-3.4

Aus Abbildung 16 kann abgelesen werden, dass bei einem Eisengehalt von 33,6 [%] im Konzentrat, ein Masseausbringen von ca. 55 [%] im Konzentrat erwartet werden kann. Die Abweichung zwischen den Daten, die aus den beiden Diagrammen abgelesen werden können, kann dadurch erklärt werden, dass es sich bei der Abschätzung des Trennergebnisses aus dem HR-Diagramm um eine ideale Trennung handelt und es sich beim zweiten Diagramm um die Ergebnisse aus einer realen Trennung handelt.

Für die weiteren Berechnungen wird von einem Masseausbringen von 55 [%] im Konzentrat ausgegangen.

6.2) FLOWSHEET

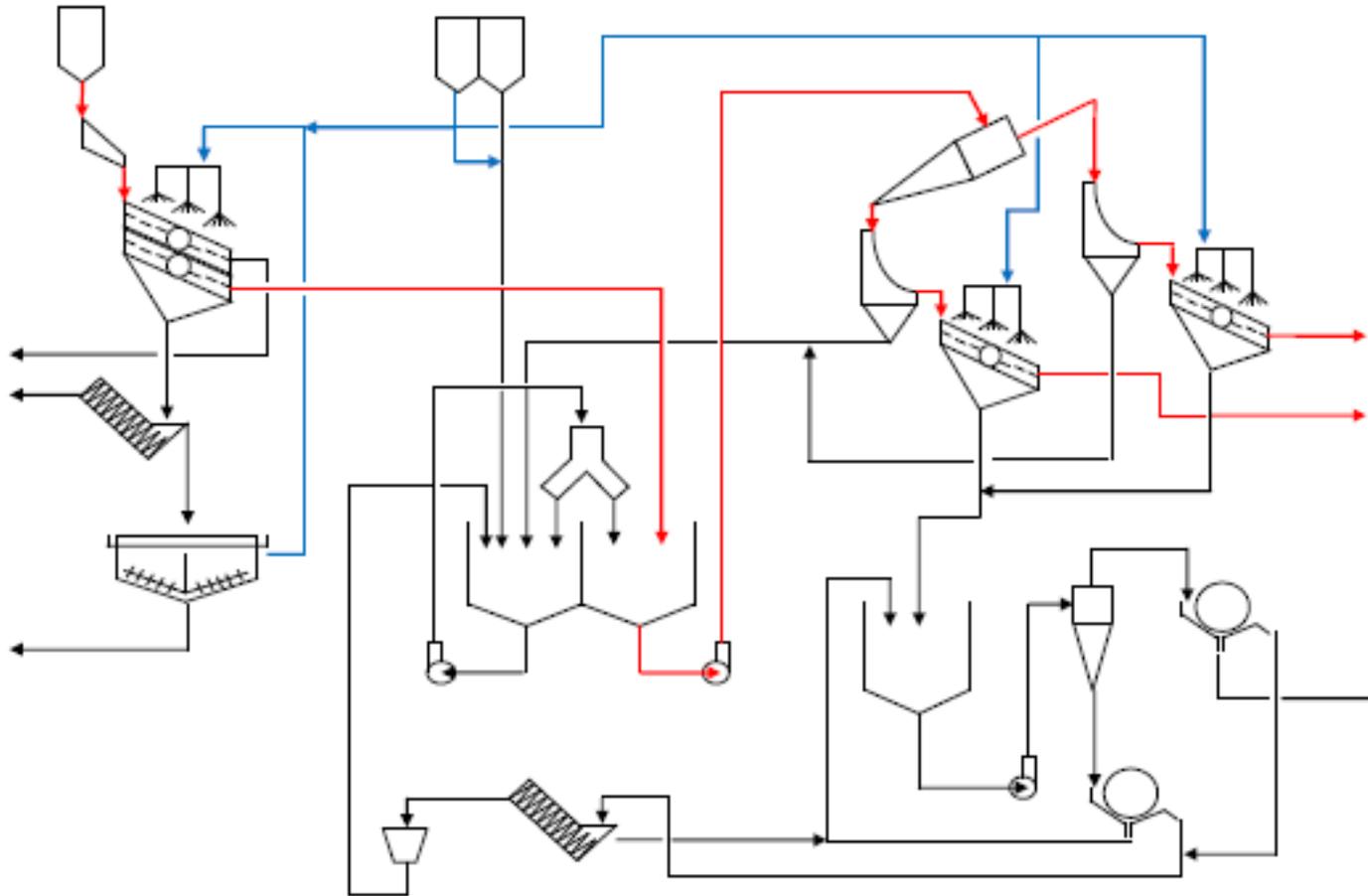


Abbildung 17: Flowsheet der Zyklonanlage mit Schwerstoffaufbereitung [26]

6.2.1) AUFGABEMATERIAL

Das Zwischenkonzentrat für die Aufgabe wird in einem Bunker gelagert. Mit einem Förderband unter dem Bunker wird das Aufgabematerial abgezogen und die Masse gemessen, um eine konstante Aufgabe von ca. 100 [t/h] gewährleisten zu können. Die Aufgabe fällt auf eine Vibratorrinne um es für die Aufgabe auf die Schutzsiebung und die Feinkornabtrennung auf den Siebquerschnitt zu verteilen [26].

Auf dem Doppeldecksieb werden zwei Aufgaben erfüllt. Das obere Siebdeck hat eine Maschenweite von 8 [mm] und dient als Schutzsieb um den Prozess vor grobem Material (Körner und Störstoffe) zu schützen. Das untere Siebdeck hat eine Maschenweite von 1 [mm]. Hier soll der Abrieb abgewaschen werden [26].

Nach der Siebung wird das Aufgabematerial direkt in den Pumpensumpf des Schwertrübezyklons aufgegeben und dort mit der Trübe vermischt. Über die Trübepumpe wird das Erz gemeinsam mit der Schwertrübe auf den Sortierzyklon aufgegeben [26].

Die Produkte des Zyklons laufen jeweils erst über ein Bogensieb. Hier soll der Großteil der Schwertrübe ohne Wasserzusatz vom Aufgabematerial abgeschieden werden. Direkt anschließend an das Bogensieb werden die Produkte jeweils auf ein Waschsieb aufgegeben. Ziel der Waschsiebe ist die vollständige Reinigung der Erzkörner vom Schwerstoff. Nach den Waschsieben wird das Erz in die Nachbereitungsanlagen für Konzentrate und Berge gefördert [26].

6.2.2) SCHWERSTOFF

Die Trübe wird in einem eigenen Trog angemischt. Die Trübe wird ständig im Kreis gepumpt und wird bei Bedarf in den Pumpensumpf für den Zyklon umgeleitet.

Die Schwertrübe aus dem Unterlauf der Bogensiebe wird ohne Zwischenschritt zurück in den Trübetrog geleitet [27]. Die stark verdünnte Trübe aus den Waschsieben wird in einem Behälter gesammelt.

Aus dem Sammelbehälter wird die stark verdünnte Schwertrübe auf einen Klassierzyklon aufgegeben. Über- und Unterlauf werden auf zwei verschiedene Nassmagnetscheider aufgegeben. Die Produkte der Nassmagnetscheider werden zum Zwecke der Entwässerung auf einen Schraubenklassierer aufgegeben, der Unterlauf desselben läuft über eine Entmagnetisierungseinrichtung und zurück in den Trübetrog. Das unmagnetische Produkt des Magnetscheiders, welcher mit dem Zyklonunterlauf beschickt wird, wird wieder in den Sammelbehälter zurückgeleitet. Das unmagnetische Produkt des Magnetscheiders, welcher mit dem Überlauf des Klassierzyklons beschickt wird, geht in die Bergenachbehandlung [26].

6.3) AUFGABESIEB

Das Aufgabesieb wird als Doppeldecksieb konzipiert und nass betrieben. Das obere Siebdeck hat eine Maschenweite von 8 [mm] und erfüllt die Aufgabe eines Schutzsiebes. Das Siebdeck ist aus quadratischen Maschen aufgebaut. Der zu erwartende Überlauf ist sehr gering und kann aus vorhergehenden Untersuchungen mit 1 [%] der Aufgabe beziffert werden.

Das zweite Siebdeck hat eine Maschenweite von 1 [mm]. Zur Vorbereitung des Erzes für die Aufgabe auf den Zyklon, wird das Unterkorn mittels Nasssiebung entfernt, da das Unterkorn den Prozess negativ beeinflusst. Der erwartete Durchgang kann mit 3 [%] der Masse der Aufgabe beziffert werden.

Für die Erstabschätzung der Siebfläche wird ein Ansatz aus der Literatur verwendet. Das Lehrbuch „Mineral Processing Plant Design“ von A. L. Mular und R. B. Bhappu bietet zwei Ansätze. Einerseits wird die benötigte Siebfläche aus einer Zahl von standardisierten Kennwerten berechnet. Andererseits wird die maximale Höhe des Siebbetts als wesentliches Kriterium herangezogen [28].

Die Formel zur Siebflächenabschätzung lautet wie folgt:

$$A = \left(\frac{STPH \text{ of underside in feed}}{C * D_B * F * E * S * D * O * W} \right) * 1,1$$

A	total screen size; [m ²]
STPH	static tons per hour of underside in feed; [t/h]
C	basic screen capacity; [t/0,092 m ²]
D _B	bulk density factor
F	finer factor
E	efficiency factor
S	slot factor
D	deck factor
O	open area factor
W	wet screen factor

Alle Tabellen und Diagramme, welche für die Auslegung notwendig sind, finden sich in „Mineral Processing Plant Design“ von Mular und Bhappu:

		8 [mm]	1 [mm]
STPH	[t/h]	110	5
Basic Capacity - C	[t/0,092 m ²]	1,2	0,3
Bulk Density Factor - DB	[-]	1,37	1,37
Fines Factor - F	[-]	1,4	1,2
Efficiency Factor - E	[-]	1	1
Slot Factor - S	[-]	1	1
Deck Factor - D	[-]	1	0,9
Open Area Factor - O	[-]	0,89	0,65
Wet screen Factor - W	[-]	2,5	2
Total Screen Size	[m ²]	2,19	0,88

Tabelle 29: Kennwerte für die Auslegung der Aufgabesiebe [28]

Für das obere Siebdeck ergibt sich eine benötigte Siebfläche vom 2,19 [m²], für das untere Siebdeck ergibt sich eine benötigte Siebfläche von 0,88 [m²].

Als zweites Kriterium wird die Höhe des Gutbettes auf dem Sieb berücksichtigt. Die Gutbetthöhe des oberen Siebes kann vernachlässigt werden, da es sich nur um ein Schutzsieb handelt. Das untere Sieb dient nur zur Abtrennung des Abriebs, 96 [%] der ursprünglichen Aufgabe werden hier im Grobgut ausgetragen [28].

Bei einem angenommenen Siebwinkel von 25 [°] ergibt sich eine Korndurchflussgeschwindigkeit von 36,58 [m/min]. Bei einer durchschnittlichen Aufgabe von 0,85 [m³/min] und der Annahme, dass die durchschnittliche Guthöhe auf dem Sieb das 1,5-fache der maximalen Korngröße für eine gute Abtrennung des Feinanteils nicht überschritten werden sollte, ergibt sich eine benötigte Mindestbreite von 1,9 [m]. Für ein brauchbares Siebergebnis wird empfohlen, dass das Länge/Breite-Verhältnis mit 2:1 angesetzt wird, was in unserem Fall einer Sieblänge von 3,80 [m] und einer Siebfläche von 7,21 [m²] entspricht [28].

Aus Sicherheitsgründen wird für die Auslegung des Siebes der höchste Wert angenommen, was bedeutet, dass das Aufgabesieb über mindestens 7,21 [m²] Siebfläche verfügen sollte. Die hohe Abweichung dieses Werts von den anderen beiden kann dadurch erklärt werden, dass die Kornverteilung nicht in die Berechnung einfließt, sondern nur der zu erwartende Durchgang. Somit wird nicht berücksichtigt, wie viel Material am Sieb tatsächlich liegt [28].

6.4) PUMPENSUMPF

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, die Aufgabe im Pumpensumpf vom Absetzen abzuhalten. Die erste Möglichkeit besteht darin, dass Material über eine Pumpe ständig im Kreis zu pumpen und den Strom zwischen Aufgabe auf den Zyklon und Rücklauf in den Pumpensumpf umstellen zu können. In diesem Fall ist es aber notwendig, dass die Aufgabe in einem zweiten Behälter angemischt wird und nur bei Bedarf in den Pumpensumpf geleitet wird, da sonst eine zufriedenstellende Homogenisierung nicht gewährleistet ist. Der Vorteil besteht darin, dass kein Rührwerk verwendet werden muss. Rührwerke verursachen zusätzlichen Abrieb an Erz und FeSi.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass die Trübe im Pumpensumpf mit dem Aufgabeerz gemischt wird. Hierfür muss aber ein Rührwerk vorgesehen werden. Außerdem muss der Pumpensumpf über ein ausreichendes Volumen zur Homogenisierung verfügen.

Es ist zu erwarten, dass zwischen 2300 und 3200 [l] Trübe und Erz pro Minute auf den Zyklon aufgegeben werden. Damit durch den Aufgabevorgang in den Pumpensumpf eingebrachte Luft entweichen kann und im Pumpensumpf Aufgabeschwankungen ausgeglichen werden können, sollten sich immer 4000 [l] im Pumpensumpf befinden, damit die Verweilzeit der Aufgabe im Zyklon mindestens eine Minute beträgt [15].

Der Pumpensumpf wird auf ein Mindestvolumen von 4 [m³] ausgelegt. Er besteht aus einem konischem und einem zylindrischem Teil. Der Durchmesser beträgt 2 [m] und die Höhe beträgt 2,5 [m]. Die Gesamthöhe teilt sich auf in 1 [m] für den konischen Teil und 1,5 [m] für den zylindrischen Teil. Das Rührwerk befindet sich in der Mitte des Sumpfes, einen Meter über der Auslassöffnung und hat einen Durchmesser von insgesamt 80 [cm]. Die Welle wird mit einem Durchmesser von 10 [cm] angenommen.

Der Zweck des Pumpensumpfes ist es den Schwertrübezyklon kontinuierlich mit Aufgabe zu versorgen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass es im Pumpensumpf nicht zu Entmischungs- und Absetztendenzen kommt, also die Trübe und das Erz in Suspension bleiben.

6.4.1) ENDFALLGESCHWINDIGKEIT

Zuerst wird die Endfallgeschwindigkeit der Körner ermittelt. Die Erz- und die Trübekörner werden getrennt betrachtet. Die Endfallgeschwindigkeit wird einerseits mit einem Diagramm abgeschätzt, andererseits wird die Endfallgeschwindigkeit mit einer Näherungsformel berechnet. Um mit der Berechnung auf der sicheren Seite zu sein, wird nicht berücksichtigt, dass die Körner in ihrer Sinkbewegung aufgrund der hohen Feststoffvolumenkonzentration stark behindert sind.

Die Endfallgeschwindigkeit der Körner kann mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$v_E = \left[\frac{4}{3} * \frac{g * d_0}{f_d} * \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \right]$$

v_E	Endfallgeschwindigkeit; [m/s]
g	Erdbeschleunigung; [m/s ²]
d_0	Korndurchmesser; [m]
f_d	Widerstandsbeiwert; 0,44 [-]
ρ_s	Stoffdichte; [g/cm ³]
ρ_f	Flüssigkeitsdichte; [g/cm ³]

Für die Berechnung der Erzkörner werden eine Korngröße von 8 [mm] und eine Stoffdichte von 3,3 [g/cm³] angenommen. Dadurch ergibt sich eine Endfallgeschwindigkeit von ca. 0,5 [m/s]. Diese Endfallgeschwindigkeit kann mit Abbildung 18 bestätigt werden.

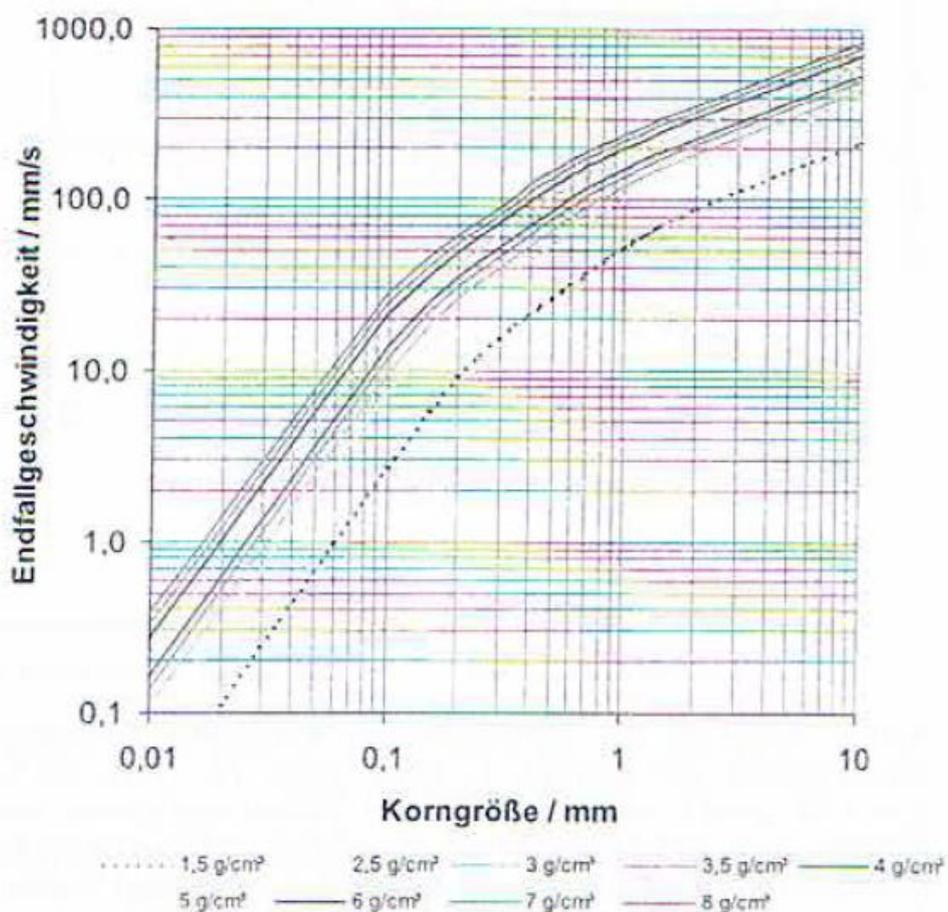


Abbildung 18: Korngrößenbezogene Endfallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung verschiedener Materialdichten [30]

Für die Abschätzung der Endfallgeschwindigkeit der FeSi-Körner werden eine Korngröße von 0,1 [mm] und eine Stoffdichte von 6,9 [g/cm³] angenommen, was einen Wert von ca. 0,02 [m/s] ergibt. Auch dieser Wert kann mit Abbildung 18 bestätigt werden.

Aus diesen Berechnungen ergibt sich, dass der Auftrieb im Bereich zwischen Rührwerk und Außenwand mindestens 0,5 [m/s] betragen sollte. Die Fläche dieses Bereichs beträgt 2,64 [m²], die Fläche im Rührerbereich beträgt 0,5 [m²]. Um die geforderten 0,5 [m/s] erreichen zu können, muss die Trübe durch das Rührwerk auf mindestens 2,64 [m/s] beschleunigt werden [29, 30].

6.4.2) RÜHRERLEISTUNG

Die benötigte Leistung für den Rührer kann mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\frac{P}{V_T} = 0,092 * g * v_E * \frac{D_T}{D_a} * \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)^{0,5} * e^{\left(\frac{5,3 * H_a}{D_T}\right)} * (\rho_s - \rho_f)$$

P	Rührerleistung; [W]
V _T	Volumen Pumpensumpf; [m ³]
D _T	Durchmesser Pumpensumpf; [m]
D _a	Durchmesser Rührwerk; [m]
ε	Feststoffvolumenkonzentration; [%]
H _a	Abstand Rührwerk vom Boden; [m]

Die Erzkörner und die Trübe werden wieder getrennt betrachtet. Für die Berechnung der Erzkörner wird eine Feststoffvolumenkonzentration von 15 [%] angenommen, was eine benötigte Rührerleistung von 4,8 [kW] ergibt. Für die FeSi-Körner wird eine Feststoffvolumenkonzentration von 30 [%] angenommen, was eine benötigte Leistung von 14,2 [kW] ergibt. Insgesamt sollte also eine Rührerleistung von mindestens 20 [kW] installiert werden [29, 30].

6.5) TRÜBEPUMPE FÜR ZYKLONAUFGABE

6.5.1) ZUSAMMENSTELLUNG

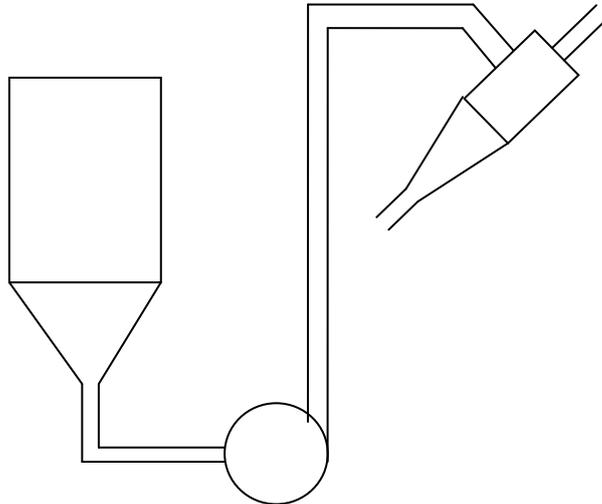


Abbildung 19: Zusammenstellung Pumpensumpf und Pumpe

Die Trübepumpe soll unterhalb des Pumpensumpfes und des Zyklons angeordnet werden. Das hat zwei Gründe. Erstens soll dadurch verhindert werden, dass bei Problemen der Pumpensumpf auslaufen kann. Zweitens sollen damit Kavitationseffekte unterbunden werden.

6.5.2) AUSLEGUNG DER PUMPE

Die Pumpe wird auf den maximal denkbaren Fall ausgelegt, da eine zu klein dimensionierte Pumpe zu großen Problemen und unnötigen Kosten führt [29].

Prinzipiell soll eine Kreiselpumpe verwendet werden. Ihr Wirkungsgrad ist zwar kleiner als jener von Verdrängungspumpen, allerdings stellen sie sich als robuster und bedienungsfreundlicher heraus [29].

Aufgrund der Tatsache, dass sich die beiden Feststoffphasen in der Trübe (FeSi und Erzkörner) stark voneinander unterscheiden, wird die Pumpe für beide Phasen separat ausgelegt. Die Endauslegung orientiert sich am extremeren Fall [29].

Die Pumpe muss auf einen Volumensstrom von 250 [m³/h] ausgelegt werden. Die Aufgabe besteht aus 30 [Vol-%] FeSi und 15 [Vol-%] Erz. Das FeSi hat eine Dichte von 6,9 [g/cm³], für das Erz wird eine durchschnittliche Dichte von 3,3 [g/cm³] angenommen [29].

Die maximale Förderhöhe beträgt 3 [m], dazu kommt ein maximaler Aufgabedruck von 2,0 [bar]. Der Aufgabedruck muss in eine äquivalente Wassersäulenhöhe umgerechnet werden.

Ein Meter Wassersäule entspricht 0,0980665 [bar]. Ein Aufgabedruck von 2,0 [bar] entspricht einer 20,4 [m] hohen Wassersäule. Insgesamt ergibt sich daraus eine äquivalente Höhe von 23,4 [m], welche überwunden werden muss. Dieser Wert gilt aber nur für Wasser [29].

FeSi

Der Schwerstoff hat eine Feststoffvolumenkonzentration (c_{FeSi}) von etwa 30 [%] und eine Dichte von 6,9 [g/cm³]. Der d_{50} -Wert des FeSi (hafsil) beträgt 30 [μm].

Mit Abbildung 20 kann über den d_{50} -Wert und die Dichte des FeSi der K_{SP} -Wert (slurry pump factor) abgeschätzt werden, der es erlaubt die zu überwindende Wasserhöhe auf eine Trübe zu beziehen [29, 30].

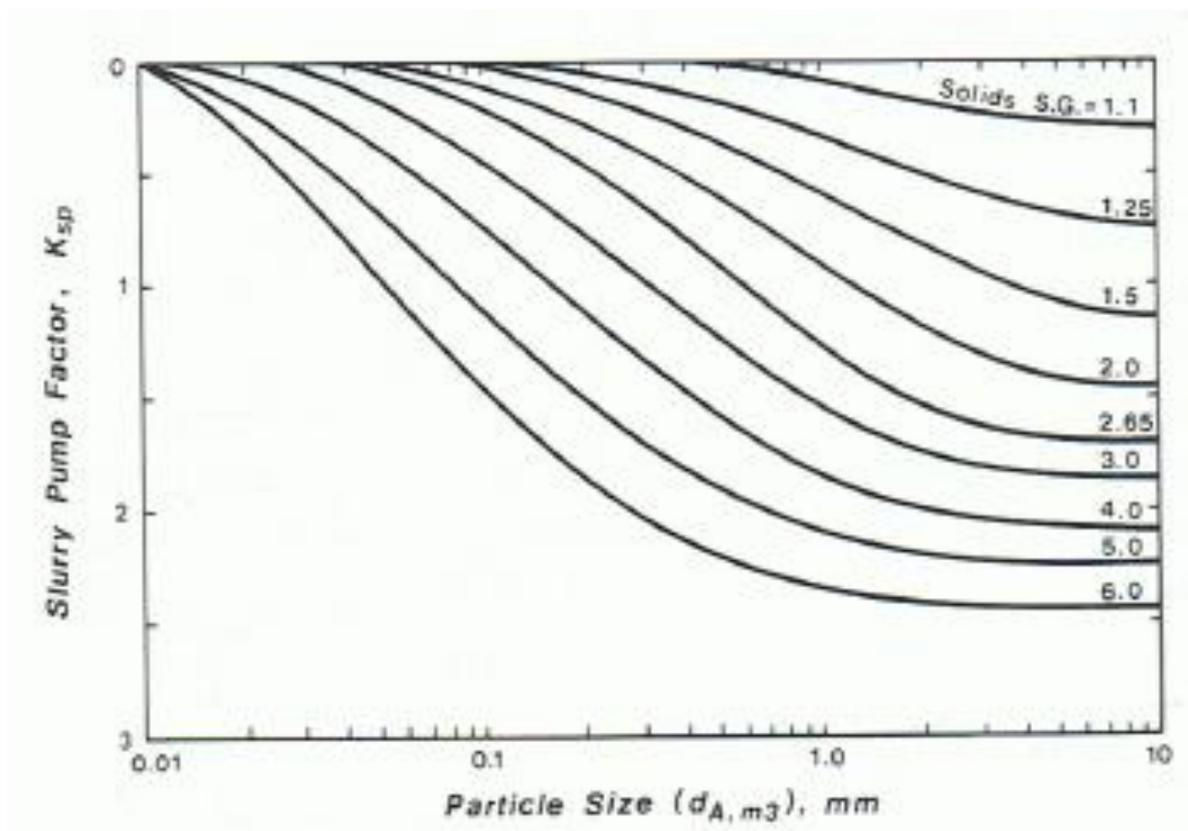


Abbildung 20: Diagramm zur Abschätzung des slurry pump factors (K_{SP}) [30]

Für einen d_{50} von 30 [μm] und eine Dichte von 6,9 [g/cm^3] ergibt sich ein K_{SP} von circa 0,75. Aus dem K_{SP} -Wert kann das Verhältnis von Höhe Trübesäule zu Höhe Wassersäule berechnet werden:

$$R_{SP} = \frac{\text{head slurry}}{\text{head water}} = 1 - K_{SP} * c_{FeSi}$$

Für R_{SP} ergibt sich ein Wert von 0,775. Die Höhe der äquivalenten Wassersäule für die Trübe kann aus dem vorhergehenden Zusammenhang mittels Umformung berechnet werden:

$$\text{head slurry} = \frac{\text{head water}}{R_{SP}}$$

Für die Höhe der äquivalenten Wassersäule für die Trübe ergibt sich daraus ein Wert von 30,2 [m], der überwunden werden muss [29].

Zwischenkonzentrataufgabe

Die Zwischenkonzentrataufgabe hat einen d_{50} -Wert von 3 [mm] und eine durchschnittliche Dichte von 3,3 [g/cm^3]. Aus Diagramm XX ergibt sich ein K_{SP} von 1,9. Aus den Formeln aus dem vorhergehenden Absatz kann ein R_{SP} von 0,715 und ein äquivalente Höhe für die Trübe von 32,7 [m] [29].

6.5.3) PUMPENANTRIEB

Mit der Förderhöhe von 32,7 [m] und einem Volumenstrom von 250 [m³] kann aus Diagramm XX der Wirkungsgrad und Drehzahl des Impellers für die vorliegende Trübe und eine Pumpe mit Impellerdurchmesser von 365 [mm] abgelesen werden.

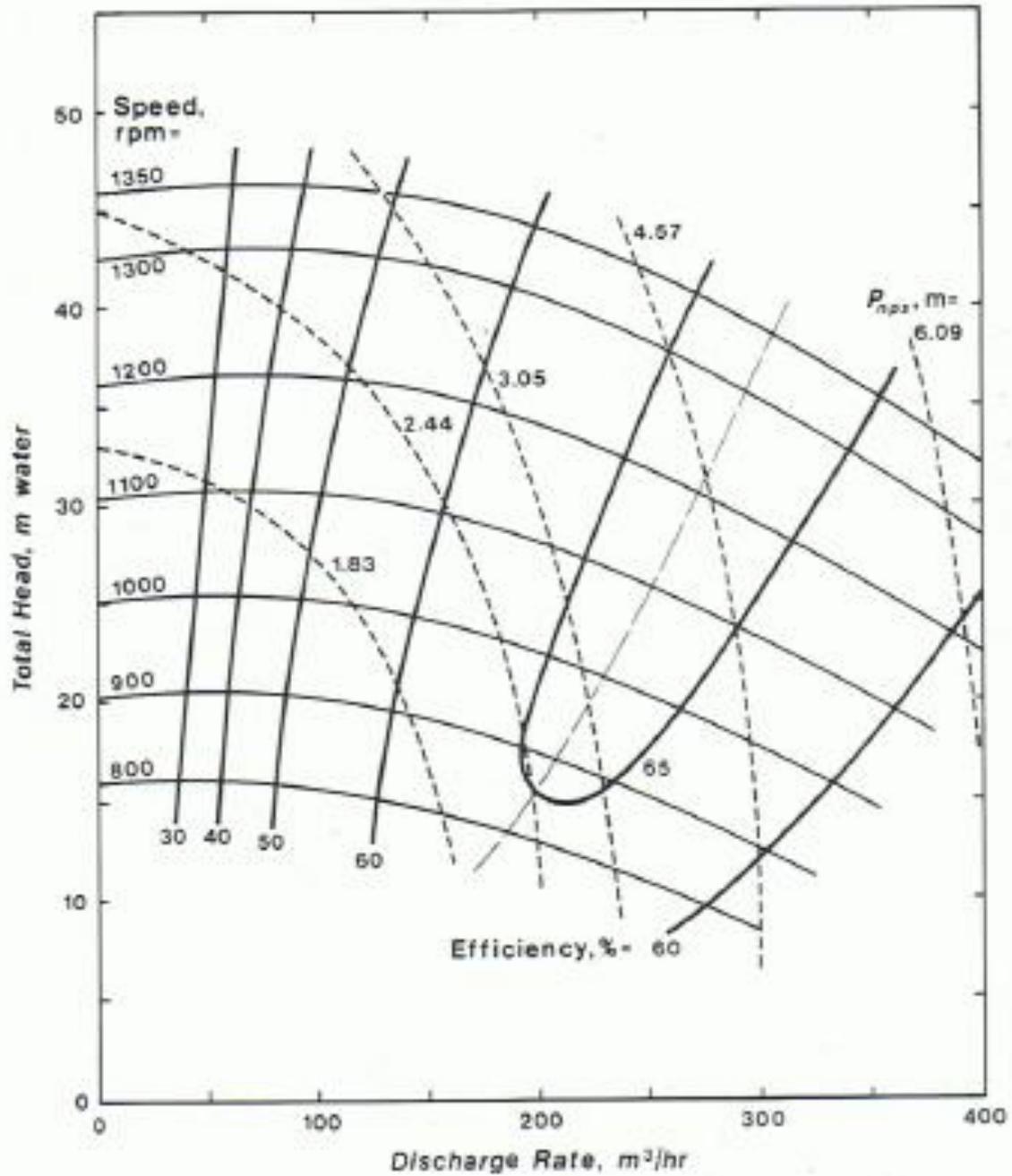


Abbildung 21: Pumpenkennlinie einer typischen Trübepumpe [29]

Für den Impeller ergibt sich eine Drehzahl von etwa 1200 [U/min]. Für den Wirkungsgrad ergibt sich ein Wert von etwa 65 [%]. Der Wirkungsgrad ist auf Wasser bezogen. Um einen auf die Aufgabe bezogenen Wirkungsgrad zu erhalten wird folgende Formel angewendet:

$$Wirkungsgrad_{Trübe} = Wirkungsgrad_{Wasser} * R_{SP}$$

Für die Trübe ergibt sich ein Wirkungsgrad von 46,8 [%]. Die benötigte Leistung der Pumpe kann mit folgenden Formeln abgeschätzt werden:

$$P_{erf} = \dot{V} * Pumphöhe * \rho_{Tr} * g$$

- P_{erf} erforderliche Leistung; [W]
- \dot{V} Volumenstrom; [m³/s]
- ρ_{Tr} Dichte des zu pumpenden Mediums; [kg/m³]
- G Erdbeschleunigung; 9,81 [m/s²]

Der Volumenstrom beträgt 0,069 [m³/h], die äquivalente zu überwindende Höhe beträgt 32,7 [m] und die Dichte des zu pumpenden Mediums kann mit 3,1 [g/cm³] angenommen werden. Daraus ergibt sich eine erforderliche Leistung von etwa 69 [kW]. Die Pumpe arbeitet beim gegebenen Betriebspunkt nur mit einem Wirkungsgrad von 46,8 [%]. Um auf die zu installierende Leistung zu kommen, wird die erforderliche Leistung durch den Wirkungsgrad dividiert:

$$P = \frac{P_{erf}}{Wirkungsgrad_{Trübe}}$$

Für die erforderliche Leistung wird 69 [kW] eingesetzt, für den Wirkungsgrad 46,8 [%]. Daraus ergibt sich eine zu installierende Leistung von mindestens 147 [kW] [29].

6.6) ZYKLON

Schwertrübezyklone für Sortieranwendungen werden mit Durchmessern zwischen 2 und 40 [in] eingesetzt.

Die Versuche dieser Diplomarbeit wurden mit einem Zyklon mit einem Durchmesser von 7,5 [in] gefahren. Durch diesen Zyklon wurden im Rahmen der Versuche 3.1 – 3.4 zwischen 11 und 20 [t/h] an Erz durchgesetzt.

Ein wesentlicher Teil der Auslegung der Zyklonanlage ist die Wahl des richtigen Zyklons. Die Sortierversuche wurden mit einem Zyklon mit geringeren Abmessungen durchgeführt, als in einer realen Anlage verwendet werden wird. Die Aufbereitbarkeit des Zwischenkonzentrats ist mit einem Zyklon mit einem Durchmesser von 7,5 [in] nachgewiesen worden. Diese Zyklon hat eine Durchsatzleistung an Aufgabe zwischen 11 und 20 [t/h]. Die Anlage am steirischen Erzberg soll über eine Durchsatzleistung von mindestens 100 [t/h] verfügen. Es macht aber keinen Sinn sechs bis acht gleiche Zyklone nebeneinander aufzustellen.

Es muss ein Zyklon gefunden werden, der über eine geeignete Durchsatzleistung und die gleiche Trenncharakteristik wie der Versuchszyklon verfügt. Für Sortierzyklone gilt folgender Grundsatz: kann mit einem Sortierzyklon aus einer Aufgabe das gewünschte Konzentrat hergestellt werden, dann funktioniert die Herstellung dieses Konzentrats aus der gleichen Aufgabe in einem baugleichen aber größeren Zyklon zumindest genauso gut! Das bedeutet, dass bei der Auslegung des Zyklons nur auf den richtigen Durchsatz geachtet werden muss. Die Sortierung wird funktionieren, solange der Zyklon gleich aufgebaut ist, wie der Versuchszyklon [33].

Laut dem SME Mineral Processing Handbook können durch einen Zyklon mit einem Durchmesser von 8 [in] und einer Erzdichte von über 3,0 [g/cm³] etwa 15 [t/h] an Erz durchgesetzt werden, was in etwa dem Zyklon der Versuchsanlage entspricht. Laut Tabelle kann für einen Zyklon gleicher Bauart für einen Erzdurchsatz von 100 [t/h] ein Zyklon mit einem Durchmesser von 20 [in] angenommen werden [31].

Grundsätzlich kann man einen Zyklon mit Kunststoff oder Keramik auskleiden. Die Kunststoffauskleidung hat den Vorteil, dass sie billig ist und schnell getauscht werden kann. Eine Keramikauskleidung ist wesentlich teurer als eine Kunststoffauskleidung, hat aber auch eine wesentlich längere Lebensdauer.

Es ist denkbar, dass in verschiedenen Abschnitten des Zyklons verschiedene Auskleidungen verwendet werden. Der Bereich um die Apexdüse ist am stärksten von Verschleiß betroffen. Hier muss auf jeden Fall eine Keramikauskleidung verwendet werden [32]. Im Hinblick auf eine lange Lebensdauer und eine hohe Anlagenzuverlässigkeit ist es zu empfehlen, dass der gesamte Zyklon mit Keramik ausgekleidet wird [33].

6.7) ABTROPFSIEB UND WASCHSIEB

Die richtige Auslegung des Abtropf- und des Waschsiebes ist für den Prozessserfolg entscheidend. Durch FeSi-Verluste aufgrund von unzureichender Waschung des Erzes können beträchtliche Kosten entstehen [33].

Bei der Auslegung der Abtropf und Waschsiebe wird so vorgegangen, wie bei der Auslegung des Aufgabesiebes. Die gewählten Werte für die einzelnen Parameter können aus folgender Tabelle abgelesen werden. Alle Tabellen und Diagramme, welche für die Auslegung notwendig sind, finden sich in „Mineral Processing Plant Design“ von Mular und Bhappu.

		Abtropfsieb	Waschsieb
STPH	[t/h]	190	25
Basic Capacity - C	[t/0,092 m ²]	0,3	0,3
Bulk Density Factor - DB	[-]	2,00	2,00
Fines Factor - F	[-]	3,75	3,75
Efficiency Factor - E	[-]	1,25	1
Slot Factor - S	[-]	1	1
Deck Factor - D	[-]	1	1
Open Area Factor - O	[-]	0,65	0,65
Wet screen Factor - W	[-]	2,5	2,5
Total Screen Size	[m ²]	4,25	0,70

Tabelle 30: Kennwerte für die Auslegung der Abtropf- und Waschsiebe [28]

Für das Abtropfsieb wird eine Siebfläche von 4,25 [m²] vorgeschlagen, was ein durchaus realistischer Wert ist.

Für die Waschsiebe wird eine Siebfläche von nur 0,7 [m²] berechnet. Dieser niedrige Wert ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Auslegungsformel weder die Korngrößenverteilung noch die grundsätzliche Problemstellung berücksichtigt.

Für die Fläche des Waschsiebes wird als zweiter Ansatz die Gutbetthöhe auf dem Sieb zur Auslegung herangezogen. Um eine möglichst saubere Trennung des Erzes und des Schwerstoffs zu erreichen, wird angenommen, dass die durchschnittliche Guthöhe die Maximalkorngröße von 8 [mm] nicht überschreiten sollte. Der größere Massestrom ist mit 55 [t/h] Erz und 25 [t/h] FeSi auf dem Konzentratwaschsieb zu erwarten. Bei einer durchschnittlichen Dichte von 3,2 [g/cm³] entspricht das einem Volumenstrom von 0,42 [m³/min]. Wenn man noch einen Fördergeschwindigkeit von 18,29 [m/min] einrechnet, erreicht man eine benötigte Siebbreite von 2,84 [m]. Daraus kann auf eine Sieblänge von ca. 5,7 [m] geschlossen werden. Es ergibt sich also eine Siebfläche von ca. 16 [m²] für das Konzentratwaschsieb, was als durchaus realistischer Wert angenommen werden kann.

Die Auslegung des Abtropf- und des Waschsiebes wird auf den Konzentratstrom bezogen, da hier der größere Massestrom zu erwarten ist. Für den Bergestrom werden exakt die gleichen Siebe verwendet, um Kosten zu reduzieren und die Austauschbarkeit von Bauteilen zu garantieren [28].

7.) ANHANG

7.1) KORNGRÖßENVERTEILUNG FeSi AUFGABE

MW [µm]	AMC 70		hafsil	
	Masse [%]	Durchgang [%]	Masse [%]	Durchgang [%]
125	2,51	97,49	1,85	98,15
90	13,61	83,88	6,19	91,95
63	25,89	57,99	12,82	79,13
40	22,48	35,51	19,06	60,08
32	7,81	27,69	8,21	51,87
25	7,51	20,18	9,01	42,86
0	20,18	0,00	42,86	0,00
Σ	100,00		100,00	

Tabelle 31: Masseausbringen und Durchgänge in den Korngrößenklassen der zwei FeSi-Typen

7.2) KORNGRÖßENVERTEILUNG PRODUKTE

	MW [mm]	Überlauf		Unterlauf		Aufgabe	
		Masse [%]	Durchgang [%]	Masse [%]	Durchgang [%]	Masse [%]	Durchgang [%]
3.1	> 10,0	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	10,0 / 8,0	0,77	99,23	0,41	99,59	0,55	99,45
	8,0 / 6,3	8,21	91,03	8,30	91,29	8,26	91,18
	6,3 / 4,0	30,63	60,39	31,16	60,13	30,95	60,24
	4,0 / 2,0	44,43	15,96	44,26	15,87	44,33	15,90
	2,0 / 1,0	13,68	2,28	13,54	2,33	13,60	2,31
	1,0 / 0,5	2,28	0,00	2,33	0,00	2,31	0,00
	Summe	100,00		100,00		100,00	
3.2	> 10,0	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	10,0 / 8,0	1,23	98,77	0,33	99,67	0,63	99,37
	8,0 / 6,3	8,46	90,31	8,53	91,15	8,50	90,87
	6,3 / 4,0	27,69	62,61	29,96	61,18	29,20	61,66
	4,0 / 2,0	45,12	17,49	45,21	15,98	45,18	16,49
	2,0 / 1,0	14,72	2,77	13,60	2,38	13,98	2,51
	1,0 / 0,5	2,77	0,00	2,38	0,00	2,51	0,00
	Summe	100,00		100,00		100,00	
3.3	> 10,0	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	10,0 / 8,0	0,51	99,49	0,56	99,44	0,53	99,47
	8,0 / 6,3	6,08	93,41	6,88	92,56	6,39	93,08
	6,3 / 4,0	25,29	68,12	26,72	65,84	25,84	67,24
	4,0 / 2,0	48,43	19,68	47,28	18,56	47,99	19,25
	2,0 / 1,0	15,85	3,83	15,76	2,80	15,81	3,43
	1,0 / 0,5	3,83	0,00	2,80	0,00	3,43	0,00
	Summe	100,00		100,00		100,00	
3.4	> 10,0	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
	10,0 / 8,0	0,82	99,18	0,55	99,45	0,61	99,39
	8,0 / 6,3	5,96	93,22	5,53	93,92	5,62	93,77
	6,3 / 4,0	23,27	69,96	22,73	71,19	22,84	70,93
	4,0 / 2,0	48,90	21,06	51,90	19,29	51,27	19,66
	2,0 / 1,0	16,00	5,06	15,61	3,68	15,69	3,97
	1,0 / 0,5	5,06	0,00	3,68	0,00	3,97	0,00
	Summe	100,00		100,00		100,00	

Tabelle 32: Masseausbringen und Durchgänge in den Korngrößenklassen der Produkte der Versuchsreihe 3

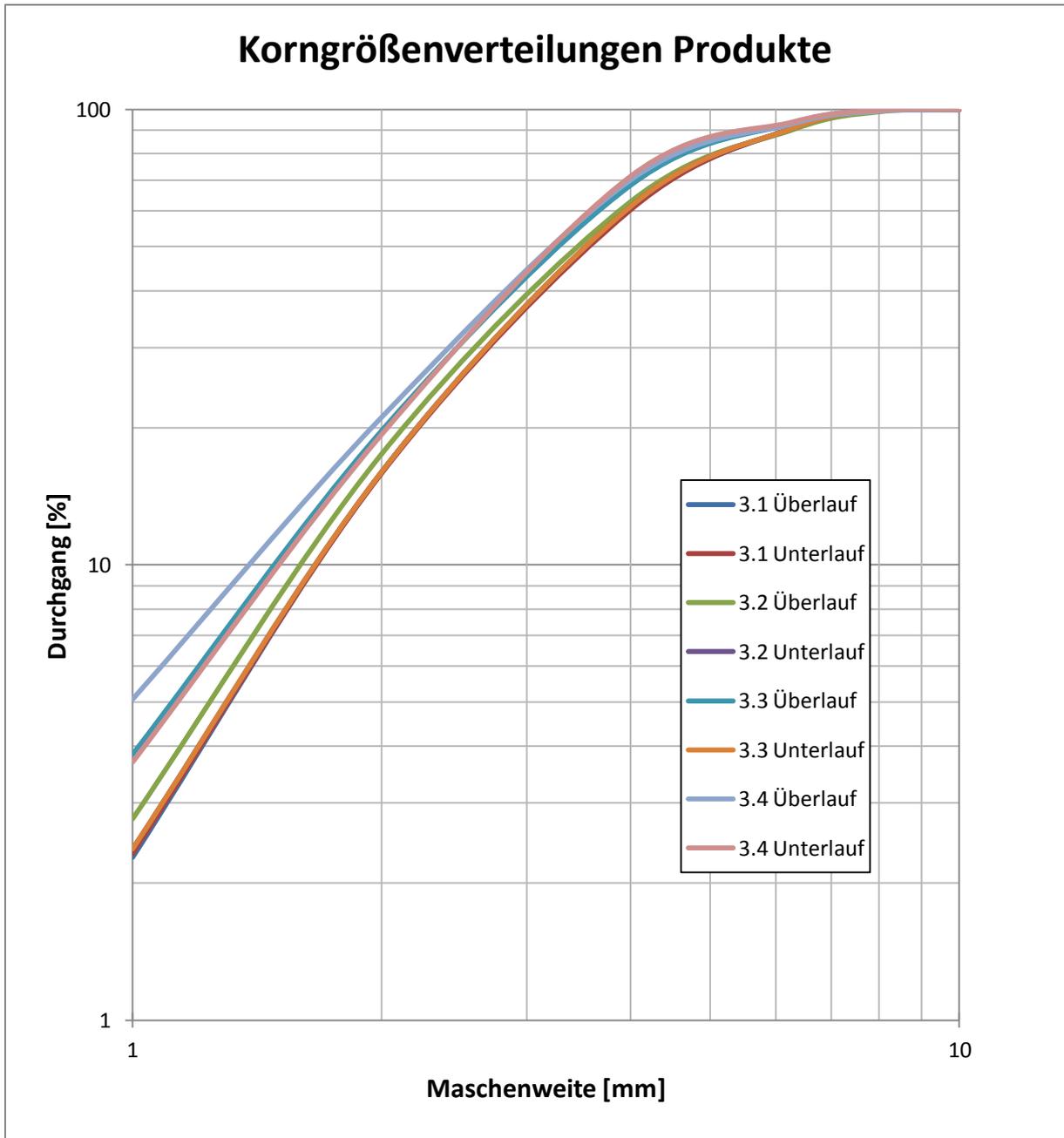


Abbildung 22: Korngrößenverteilung der Produkte der Versuchsreihe 3

7.3) BILANZEN VERSUCHSREIHE 3

	r, m [%]	g [%]	Fe I [%%]	r, I [%]	g [%]	CaO I [%%]	r, I [%]	g [%]	SiO ₂ I [%%]	r, I [%]
Aufg. A.	100,00	29,70	2970,00	100,00	10,55	1055,00	100,00	4,20	420,00	100,00
3.1 ÜL	40,06	12,92	517,58	20,84	22,98	920,58	65,75	7,45	298,45	58,65
3.1 UL	59,94	32,80	1966,03	79,16	8,00	479,52	34,25	3,51	210,39	41,35
ger. Aufg.	100,00	24,84	2483,61	100,00	14,00	1400,10	100,00	5,09	508,84	100,00
3.2 ÜL	33,58	11,96	401,62	16,45	22,94	770,33	52,99	8,43	283,08	56,06
3.2 UL	66,42	30,70	2039,09	83,55	10,29	683,46	47,01	3,34	221,84	43,94
ger. Aufg.	100,00	24,41	2440,71	100,00	14,54	1453,79	100,00	5,05	504,92	100,00
3.3 ÜL	61,34	17,89	1097,37	44,31	19,83	1216,37	83,74	5,91	362,52	77,32
3.3 UL	38,66	35,67	1379,00	55,69	6,11	236,21	16,26	2,75	106,32	22,68
ger. Aufg.	100,00	24,76	2476,37	100,00	14,53	1452,58	100,00	4,69	468,83	100,00
3.4 ÜL	21,13	13,02	275,11	10,39	20,71	437,60	34,32	9,94	210,03	41,92
3.4 UL	78,87	30,09	2373,20	89,61	10,62	837,60	65,68	3,69	291,03	58,08
ger. Aufg.	100,00	26,48	2648,31	100,00	12,75	1275,20	100,00	5,01	501,06	100,00
Aufg. E.	100,00	25,41	2541,00	100,00	14,12	1412,00	100,00	4,49	449,00	100,00

Tabelle 33: Bilanz für Fe, CaO und SiO₂ der Versuchsreihe 3

	r, m [%]	MgO			Mn			Al ₂ O ₃		
		g [%]	I [%%]	r, I [%]	g [%]	I [%%]	r, I [%]	g [%]	I [%%]	r, I [%]
Aufg. A.	100,00	5,08	508,00	100,00	1,74	174,00	100,00	1,25	125,00	100,00
3.1 ÜL	40,06	8,81	352,93	56,36	0,96	38,46	25,15	2,20	88,13	56,54
3.1 UL	59,94	4,56	273,33	43,64	1,91	114,49	74,85	1,13	67,73	43,46
ger. Aufg.	100,00	6,26	626,26	100,00	1,53	152,94	100,00	1,56	155,86	100,00
3.2 ÜL	33,58	8,81	295,84	46,86	0,93	31,23	20,90	2,45	82,27	55,33
3.2 UL	66,42	5,05	335,42	53,14	1,78	118,23	79,10	1,00	66,42	44,67
ger. Aufg.	100,00	6,31	631,26	100,00	1,49	149,46	100,00	1,49	148,69	100,00
3.3 ÜL	61,34	7,63	468,02	74,20	1,16	71,15	47,19	1,71	104,89	75,72
3.3 UL	38,66	4,21	162,76	25,80	2,06	79,64	52,81	0,87	33,63	24,28
ger. Aufg.	100,00	6,31	630,78	100,00	1,51	150,79	100,00	1,39	138,53	100,00
3.4 ÜL	21,13	7,93	167,56	28,77	0,97	20,50	12,93	2,84	60,01	38,80
3.4 UL	78,87	5,26	414,86	71,23	1,75	138,02	87,07	1,20	94,64	61,20
ger. Aufg.	100,00	5,82	582,42	100,00	1,59	158,52	100,00	1,55	154,65	100,00
Aufg. End.	100,00	5,92	592,00	100,00	1,51	151,00	100,00	1,34	134,00	100,00

Tabelle 34: Bilanz für MgO, Mn und Al₂O₃ der Versuchsreihe 3

	r, m [%]	g [%]	Na2O I [%%]	r, I [%]	g [%]	K2O I [%%]	r, I [%]	g [%]	S-Alk I [%%]	r, I [%]
Aufg. A.	100,00	0,037	3,70	100,00	0,382	38,20	100,00	0,419	41,90	100,00
3.1 ÜL	40,06	0,055	2,20	49,84	0,617	24,72	52,98	0,672	26,92	52,71
3.1 UL	59,94	0,037	2,22	50,16	0,366	21,94	47,02	0,403	24,16	47,29
ger. Aufg.	100,00	0,044	4,42	100,00	0,467	46,66	100,00	0,511	51,08	100,00
3.2 ÜL	33,58	0,058	1,95	43,56	0,705	23,67	53,16	0,763	25,62	52,29
3.2 UL	66,42	0,038	2,52	56,44	0,314	20,86	46,84	0,352	23,38	47,71
ger. Aufg.	100,00	0,045	4,47	100,00	0,445	44,53	100,00	0,490	49,00	100,00
3.3 ÜL	61,34	0,048	2,94	69,14	0,493	30,24	74,55	0,541	33,18	74,04
3.3 UL	38,66	0,034	1,31	30,86	0,267	10,32	25,45	0,301	11,64	25,96
ger. Aufg.	100,00	0,043	4,26	100,00	0,406	40,56	100,00	0,448	44,82	100,00
3.4 ÜL	21,13	0,061	1,29	29,53	0,847	17,90	38,86	0,908	19,19	38,05
3.4 UL	78,87	0,039	3,08	70,47	0,357	28,16	61,14	0,396	31,23	61,95
ger. Aufg.	100,00	0,044	4,36	100,00	0,461	46,05	100,00	0,504	50,42	100,00
Aufg. End.	100,00	0,042	4,20	100,00	0,415	41,50	100,00	0,457	45,70	100,00

Tabelle 35: Bilanz für Na₂O, K₂O und die Summe der Alkalien der Versuchsreihe 3

7.4) DETAILBILANZEN VERSUCH 3.1

3.1 Fe		Aufgabe				Unterlauf				Aufgabe			
g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	I [% %]	I [% %]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	2,59	0,84	r, m = 60,35	0,05	3,01	0,00	r, m = 100,00	1,77	1,87	0,12
	2,8 / 3,0		37,19	7,92	21,69		2,98	8,63	0,75		16,55	6,14	3,55
	3,0 / 3,2		40,58	15,26	45,59		6,26	15,28	2,77		19,87	12,25	8,51
	3,2 / 3,4	r, I = 28,23	14,62	23,08	24,84	7,86	24,16	5,50	10,54	21,97	8,09		
	3,4 / 3,6		3,17	29,64	6,92	33,94	33,61	33,03	21,74	38,88	29,53		
	3,6 / 3,8		0,05	39,26	0,13	44,53	40,66	52,44	26,89	48,34	45,43		
	> 3,8		0,00	43,66	0,00	4,37	43,44	5,50	2,64	51,66	4,77		
Σ		100,00	13,58	100,00	100,00	34,53	100,00	100,00	28,62	100,00			
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	2,52	1,22	r, m = 59,85	0,43	3,91	0,05	r, m = 100,00	2,98	2,09	0,23
	2,8 / 3,0		34,91	7,49	18,69		4,98	9,00	1,34		17,00	6,40	3,94
	3,0 / 3,2		39,15	15,25	42,68		8,77	15,67	4,12		20,97	13,03	9,88
	3,2 / 3,4	r, I = 29,54	11,20	23,44	18,76	8,35	24,14	6,04	9,49	23,13	7,94		
	3,4 / 3,6		6,63	32,00	15,17	25,70	32,74	25,21	18,04	36,33	23,71		
	3,6 / 3,8		1,21	36,66	3,16	47,13	40,45	57,13	28,69	47,27	49,06		
	> 3,8		0,10	43,66	0,32	4,64	43,88	6,10	2,82	51,37	5,24		
Σ		100,00	13,99	100,00	100,00	33,37	100,00	100,00	27,65	100,00			
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5 Σ	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 29,39	33,65 48,81 15,03 2,50 100,00	13,58 13,99 14,24 16,50 13,95	32,76 48,94 15,34 2,96 29,40	r, m = 60,00 r, I = 70,61	34,13 48,49 14,83 2,55 100,00	34,53 33,37 31,91 31,91 33,51	35,17 48,28 14,12 2,43 70,60	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94 48,62 14,91 2,53 100,00	28,48 27,63 26,63 27,49 27,76	34,81 48,38 14,30 2,50 100,00

Tabelle 36: Detailbilanz für Eisen des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

3.1 CaO		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ -K [g/cm ³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	3,10	0,57	r, m = 60,35	0,05	2,60	0,02	r, m = 100,00	1,77	5,93	0,53
	2,8 / 3,0		37,19	27,74	43,44		2,98	27,37	11,45		16,55	49,09	40,80
	3,0 / 3,2		40,58	25,34	43,30		6,26	25,68	22,56		19,87	41,67	41,58
	3,2 / 3,4		14,62	18,09	11,13		7,86	16,64	18,35		10,54	22,16	11,73
	3,4 / 3,6	r, I = 76,91	3,17	11,61	1,55	r, I = 23,09	33,94	7,61	36,22	r, I = 100,00	21,74	4,05	4,42
	3,6 / 3,8	0,05	2,63	0,01	44,53	1,76	10,99	26,89	0,68	0,91			
	> 3,8	0,00	0,53	0,00	4,37	0,67	0,41	2,64	0,26	0,03			
	Σ		100,00	23,75	100,00		100,00	7,13	100,00		100,00	19,91	100,00
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	1,86	0,57	r, m = 59,85	0,43	2,85	0,15	r, m = 100,00	2,98	3,23	0,52
	2,8 / 3,0		34,91	25,78	40,48		4,98	26,38	16,64		17,00	41,10	37,81
	3,0 / 3,2		39,15	25,50	44,91		8,77	25,06	27,84		20,97	37,88	43,00
	3,2 / 3,4		11,20	17,33	8,73		8,35	16,37	17,31		9,49	18,86	9,69
	3,4 / 3,6	r, I = 73,80	6,63	17,03	5,08	r, I = 26,20	25,70	8,19	26,66	r, I = 100,00	18,04	7,68	7,50
	3,6 / 3,8	1,21	4,25	0,23	47,13	1,87	11,17	28,69	0,94	1,45			
	> 3,8	0,10	0,53	0,00	4,64	0,38	0,22	2,82	0,18	0,03			
	Σ		100,00	22,23	100,00		100,00	7,89	100,00		100,00	18,48	100,00
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 74,03	33,65 48,81 15,03 2,50	23,75 22,23 19,67 17,66	35,93 48,79 13,29 1,99	r, m = 60,00 r, I = 25,97	34,13 48,49 14,83 2,55	7,13 7,89 8,92 8,65	31,18 49,05 16,95 2,82	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94 48,62 14,91 2,53	19,30 18,57 16,98 15,20	35,41 48,82 13,69 2,08
	Σ		100,00	22,24	100,00		100,00	7,80	100,00		100,00	18,49	100,00

Tabelle 37: Detailbilanz für Kalziumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

3.1 SiO ₂		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ-K [g/cm ³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	50,68	40,85	r, m = 60,35	0,05	51,54	0,97	r, m = 100,00	1,77	84,94	33,20
	2,8 / 3,0		37,19	3,45	23,59		2,98	4,64	5,22		16,55	5,49	20,06
	3,0 / 3,2		40,58	3,13	23,35		6,26	3,35	7,91		19,87	4,64	20,39
	3,2 / 3,4		14,62	3,78	10,16		7,86	3,41	10,11		10,54	4,36	10,15
	3,4 / 3,6	r, I = 67,23	3,17	3,48	2,03	r, I = 32,77	33,94	3,34	42,74	r, I = 100,00	21,74	2,05	9,84
	3,6 / 3,8		0,05	2,37	0,02		44,53	1,91	32,07		26,89	1,04	6,17
	> 3,8		0,00	0,51	0,00		4,37	0,59	0,97		2,64	0,32	0,19
Σ		100,00	5,44	100,00	100,00	2,65	100,00	100,00	4,53	100,00			
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	53,31	46,91	r, m = 59,85	0,43	50,64	7,34	r, m = 100,00	2,98	89,95	41,91
	2,8 / 3,0		34,91	6,53	29,53		4,98	5,41	9,17		17,00	10,15	26,96
	3,0 / 3,2		39,15	2,82	14,30		8,77	3,24	9,67		20,97	4,19	13,72
	3,2 / 3,4		11,20	3,80	5,51		8,35	4,06	11,53		9,49	4,23	6,27
	3,4 / 3,6	r, I = 72,44	6,63	3,75	3,22	r, I = 27,56	25,70	3,54	30,97	r, I = 100,00	18,04	2,39	6,73
	3,6 / 3,8		1,21	3,29	0,51		47,13	1,91	30,64		28,69	0,96	4,32
	> 3,8		0,10	0,51	0,01		4,64	0,42	0,66		2,82	0,20	0,09
Σ		100,00	7,72	100,00	100,00	2,94	100,00	100,00	6,40	100,00			
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 71,56	33,65	5,44	24,78	r, m = 60,00 r, I = 28,44	34,13	2,65	30,83	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94	4,62	25,61
Σ			48,81	7,72	51,01		48,49	2,94	48,52		48,62	6,38	50,67
			15,03	10,20	20,75		14,83	3,44	17,38		14,91	8,33	20,29
			2,50	10,20	3,46		2,55	3,76	3,26		2,53	8,30	3,43
Σ			100,00	7,39	100,00		100,00	2,94	100,00		100,00	6,12	100,00

Tabelle 38: Detailbilanz für Siliziumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

3.1 MgO		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ-K [g/cm³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	1,08	0,51	r, m = 60,35	0,05	1,25	0,01	r, m = 100,00	1,77	1,59	0,31
	2,8 / 3,0		37,19	14,03	56,37		2,98	12,87	8,97		16,55	19,47	36,80
	3,0 / 3,2		40,58	7,54	33,06		6,26	7,63	11,17		19,87	10,03	24,02
	3,2 / 3,4	r, I = 58,71	14,62	5,35	8,45	r, I = 41,29	7,86	5,26	9,67	r, I = 100,00	10,54	5,98	8,95
	3,4 / 3,6		3,17	4,66	1,60		33,94	4,01	31,82		21,74	2,98	14,07
	3,6 / 3,8		0,05	3,59	0,02		44,53	3,35	34,88		26,89	2,29	14,41
	> 3,8	0,00	3,35	0,00	4,37	3,40	3,48	2,64	2,33	1,44			
gesamt		100,00	9,26	100,00	100,00	4,28	100,00	100,00	7,20	100,00			
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	1,12	0,90	r, m = 59,85	0,43	1,55	0,15	r, m = 100,00	2,98	1,53	0,68
	2,8 / 3,0		34,91	13,01	53,47		4,98	12,34	13,80		17,00	16,58	41,94
	3,0 / 3,2		39,15	7,39	34,06		8,77	7,01	13,80		20,97	9,03	28,17
	3,2 / 3,4	r, I = 56,13	11,20	5,21	6,87	r, I = 43,87	8,35	5,07	9,50	r, I = 100,00	9,49	5,41	7,63
	3,4 / 3,6		6,63	5,23	4,08		25,70	4,08	23,54		18,04	3,63	9,74
	3,6 / 3,8		1,21	4,05	0,58		47,13	3,38	35,77		28,69	2,53	10,81
	> 3,8	0,10	3,35	0,04	4,64	3,30	3,44	2,82	2,45	1,03			
gesamt		100,00	8,49	100,00	100,00	4,45	100,00	100,00	6,72	100,00			
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5 Σ	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 56,22	33,65 48,81 15,03 2,50 100,00	9,26 8,49 7,50 6,87 8,56	36,39 48,43 13,17 2,01 65,83	r, m = 60,00 r, I = 43,78	34,13 48,49 14,83 2,55 100,00	4,28 4,45 4,74 4,76 4,44	32,85 48,60 15,82 2,73 34,17	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94 48,62 14,91 2,53 100,00	7,04 6,74 6,31 5,92 6,76	35,37 48,48 13,93 2,22 100,00

Tabelle 39: Detailbilanz für Magnesiumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

3.1 Mn		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ -K [g/cm ³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	0,30	1,38	r, m = 60,35	0,05	0,34	0,01	r, m = 100,00	1,77	0,25	0,81
	2,8 / 3,0		37,19	0,71	27,67		2,98	0,78	1,15		16,55	0,61	16,72
	3,0 / 3,2		40,58	1,05	44,65		6,26	1,05	3,25		19,87	0,91	27,56
	3,2 / 3,4	r, I = 32,07	14,62	1,35	20,68	7,86	1,41	5,48	10,54	1,31	14,40		
	3,4 / 3,6		3,17	1,66	5,51	33,94	1,90	31,90	21,74	2,09	16,41		
	3,6 / 3,8		0,05	2,29	0,11	44,53	2,39	52,65	26,89	2,69	21,80		
	> 3,8	0,00	2,55	0,00	4,37	2,57	5,56	2,64	2,89	2,30			
gesamt		100,00	0,95	100,00	100,00	2,02	100,00	100,00	1,68	100,00			
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	0,30	2,16	r, m = 59,85	0,43	0,42	0,09	r, m = 100,00	2,98	0,26	0,48
	2,8 / 3,0		34,91	0,70	25,85		4,98	0,79	2,01		17,00	0,62	6,53
	3,0 / 3,2		39,15	1,04	43,07		8,77	1,08	4,85		20,97	0,94	12,10
	3,2 / 3,4	r, I = 32,61	11,20	1,37	16,23	8,35	1,39	5,94	9,49	1,35	7,89		
	3,4 / 3,6		6,63	1,38	9,70	25,70	1,84	24,20	18,04	1,93	21,45		
	3,6 / 3,8		1,21	2,13	2,72	47,13	2,36	56,93	28,69	2,64	46,64		
	> 3,8	0,10	2,55	0,27	4,64	2,52	5,98	2,82	2,83	4,90			
gesamt		100,00	0,95	100,00	100,00	1,95	100,00	100,00	1,63	100,00			
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5	gesamt	r, m = 40,00	33,65	0,95	33,33	r, m = 60,00	34,13	2,02	35,30	r, m = 100,00	33,94	1,67	34,91
Σ		r, I = 33,02	48,81	0,95	47,88	r, I = 66,97	48,49	1,95	48,47	r, I = 100,00	48,62	1,62	48,36
			15,03	1,02	15,91		14,83	1,83	13,89		14,91	1,56	14,28
			2,50	1,11	2,88		2,55	1,8	2,35		2,53	1,58	2,45
			100,00	0,96	33,02		100,00	1,95	66,98		100,00	1,63	100,00

Tabelle 40: Detailbilanz für Mangan des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

3.1 Al ₂ O ₃		Überlauf			Unterlauf			Aufgabe					
KGK [mm]	ρ-K [g/cm ³]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]	r, m [%]	g [%]	r, I [%]			
6,3 / 4	< 2,8	r, m = 39,65	4,39	17,33	45,32	r, m = 60,35	0,05	16,11	1,12	r, m = 100,00	1,77	21,72	38,42
	2,8 / 3,0		37,19	0,97	21,51		2,98	1,30	5,38		16,55	1,15	19,00
	3,0 / 3,2		40,58	0,88	21,30		6,26	0,95	8,25		19,87	0,97	19,26
	3,2 / 3,4		14,62	1,13	9,85		7,86	0,99	10,79		10,54	0,95	10,00
	3,4 / 3,6	r, I = 69,93	3,17	1,06	2,00	r, I = 30,07	33,94	0,87	40,94	r, I = 100,00	21,74	0,37	8,08
	3,6 / 3,8	0,05	0,72	0,02	44,53	0,53	32,73	26,89	0,19	5,12			
	> 3,8	0,00	0,11	0,00	4,37	0,13	0,79	2,64	0,05	0,12			
gesamt			100,00	1,68	100,00		100,00	0,72	100,00		100,00	1,39	100,00
4 / 2	< 2,8	r, m = 40,15	6,79	17,07	45,95	r, m = 59,85	0,43	13,92	2,31	r, m = 100,00	2,98	29,40	34,74
	2,8 / 3,0		34,91	2,31	31,95		4,98	1,89	3,67		17,00	3,67	24,69
	3,0 / 3,2		39,15	0,85	13,19		8,77	0,98	3,35		20,97	1,28	10,66
	3,2 / 3,4		11,20	1,23	5,46		8,35	1,24	4,03		9,49	1,36	5,09
	3,4 / 3,6	r, I = 74,31	6,63	1,12	2,94	r, I = 25,69	25,70	0,98	9,82	r, I = 100,00	18,04	0,66	4,71
	3,6 / 3,8	1,21	1,05	0,50	47,13	0,58	10,66	28,69	0,28	3,11			
	> 3,8	0,10	0,11	0,00	4,64	0,09	0,16	2,82	0,04	0,05			
gesamt			100,00	2,52	100,00		100,00	0,87	0,00		100,00	2,10	83,05
6,3 / 4 4 / 2 2 / 1 1 / 0,5 Σ	gesamt	r, m = 40,00 r, I = 73,28	33,65 48,81 15,03 2,50	1,68 2,52 3,06 2,88	15,76 34,40 12,84 2,01	r, m = 60,00 r, I = 26,72	34,13 48,49 14,83 2,55	0,72 0,87 1,03 1,06	10,15 17,43 6,30 1,11	r, m = 100,00 r, I = 100,00	33,94 48,62 14,91 2,53	1,41 2,09 2,53 2,37	24,80 52,55 19,55 3,11
			100,00	2,33	73,28		100,00	0,85	26,72		100,00	1,93	100,00

Tabelle 41: Detailbilanz für Aluminiumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen

7.5) TEILUNGSZAHLEN EISEN 3.1 – 3.4

3.1	MW [mm]	Masse [%]	Dichteklasse [g/cm ³]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]
Überlauf	> 10,0	0,00	0,00ρ<2,80	6,3 / 4,0	4,39	98,29	4,0 / 2,0	6,79	91,45
	10,0 / 8,0	0,77	2,80ρ<3,00		37,19	89,12		34,91	82,46
	8,0 / 6,3	8,21	3,00ρ<3,20		40,58	80,98		39,15	74,96
	6,3 / 4,0	30,63	3,20ρ<3,40		14,62	54,99		11,20	47,37
	4,0 / 2,0	44,43	3,40ρ<3,60	3,17	5,78	6,63	14,75		
	2,0 / 1,0	13,68	3,60ρ<3,80	r(m):	0,05	0,07	r(m):	1,21	1,69
	1,0 / 0,5	2,28	3,80ρ<9,99	39,65	0,00	0,00	40,15	0,10	1,45
	Summe	100,00	Summe		100,00	39,65		100,00	40,15
Unterlauf	> 10,0	0,00	0,00ρ<2,80	6,3 / 4,0	0,05	1,71	4,0 / 2,0	0,43	8,55
	10,0 / 8,0	0,41	2,80ρ<3,00		2,98	10,88		4,98	17,54
	8,0 / 6,3	8,30	3,00ρ<3,20		6,26	19,02		8,77	25,04
	6,3 / 4,0	31,16	3,20ρ<3,40		7,86	45,01		8,35	52,63
	4,0 / 2,0	44,26	3,40ρ<3,60	33,94	94,22	25,70	85,25		
	2,0 / 1,0	13,54	3,60ρ<3,80	r(m):	44,53	99,93	r(m):	47,13	98,31
	1,0 / 0,5	2,33	3,80ρ<9,99	60,35	4,37	100,00	59,85	4,64	98,55
	Summe	100,00	Summe		100,00	60,35		100,00	59,85
Aufgabe	> 10,0	0,00	0,00ρ<2,80	6,3 / 4,0	1,77	100,00	4,0 / 2,0	2,98	100,00
	10,0 / 8,0	0,55	2,80ρ<3,00		16,55	100,00		17,00	100,00
	8,0 / 6,3	8,26	3,00ρ<3,20		19,87	100,00		20,97	100,00
	6,3 / 4,0	30,95	3,20ρ<3,40		10,54	100,00		9,49	100,00
	4,0 / 2,0	44,33	3,40ρ<3,60	21,74	100,00	18,05	100,00		
	2,0 / 1,0	13,60	3,60ρ<3,80	r(m):	26,89	100,00	r(m):	28,70	100,00
	1,0 / 0,5	2,31	3,80ρ<9,99	100,00	2,64	100,00	100,00	2,82	100,00
	Summe	100,00	Summe		100,00	100,00		100,00	100,00

Tabelle 42: Teilungszahlen für Versuch 3.1

3.2	MW [mm]	Masse [%]		Dichteklasse [g/cm ³]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]
Überlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	4,64	89,81	4,0 / 2,0	8,55	90,90
	10,0 / 8,0	1,23		2,80<ρ<3,00		40,81	85,26		34,37	75,46
	8,0 / 6,3	8,46		3,00<ρ<3,20		44,02	69,84		44,12	65,30
	6,3 / 4,0	27,69		3,20<ρ<3,40		9,52	23,75		10,05	32,63
	4,0 / 2,0	45,12		3,40<ρ<3,60	r(m):	0,89	1,73	2,65	5,08	
	2,0 / 1,0	14,72		3,60<ρ<3,80	31,85	0,13	0,13	r(m):	0,26	0,32
	1,0 / 0,5	2,77		3,80<ρ<9,99		0,00	0,00	33,54	0,00	0,00
	Summe	100,00		Summe		100,00	31,85		100,00	33,54
Unterlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	0,25	10,19	4,0 / 2,0	0,43	9,10
	10,0 / 8,0	0,33		2,80<ρ<3,00		3,30	14,74		5,64	24,54
	8,0 / 6,3	8,53		3,00<ρ<3,20		8,88	30,16		11,83	34,70
	6,3 / 4,0	29,96		3,20<ρ<3,40		14,28	76,25		10,47	67,37
	4,0 / 2,0	45,21		3,40<ρ<3,60	r(m):	23,72	98,27	24,97	94,92	
	2,0 / 1,0	13,60		3,60<ρ<3,80	68,15	47,37	99,87	r(m):	41,14	99,68
	1,0 / 0,5	2,38		3,80<ρ<9,99		2,21	100,00	66,46	5,52	100,00
	Summe	100,00		Summe		100,00	68,15		100,00	66,46
Aufgabe	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	1,64	100,00	4,0 / 2,0	3,15	100,00
	10,0 / 8,0	0,63		2,80<ρ<3,00		15,24	100,00		15,28	100,00
	8,0 / 6,3	8,50		3,00<ρ<3,20		20,07	100,00		22,66	100,00
	6,3 / 4,0	29,20		3,20<ρ<3,40		12,76	100,00		10,33	100,00
	4,0 / 2,0	45,18		3,40<ρ<3,60	16,45	100,00	17,48	100,00		
	2,0 / 1,0	13,98		3,60<ρ<3,80	32,33	100,00	27,43	100,00		
	1,0 / 0,5	2,51		3,80<ρ<9,99	1,50	100,00	3,67	100,00		
	Summe	100,00		Summe		100,00	100,00		100,00	100,00

Tabelle 43: Teilungszahlen für Versuch 3.2

3.3	MW [mm]	Masse [%]		Dichteklasse [g/cm ³]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]
Überlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	3,82	100,00	4,0 / 2,0	5,03	98,39
	10,0 / 8,0	0,51		2,80<ρ<3,00		26,74	99,35		27,66	95,84
	8,0 / 6,3	6,08		3,00<ρ<3,20		34,55	96,83		33,03	92,77
	6,3 / 4,0	25,29		3,20<ρ<3,40		19,88	86,34		16,24	76,71
	4,0 / 2,0	48,43		3,40<ρ<3,60		12,33	42,07		12,29	48,47
	2,0 / 1,0	15,85		3,60<ρ<3,80	r(m):	2,62	6,11	r(m):	5,49	13,32
	1,0 / 0,5	3,83		3,80<ρ<9,99	60,03	0,06	1,13	61,91	0,26	6,26
	Summe	100,00		Summe		100,00	60,03		100,00	61,91
Unterlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	0,00	0,00	4,0 / 2,0	0,13	1,61
	10,0 / 8,0	0,56		2,80<ρ<3,00		0,26	0,65		1,95	4,16
	8,0 / 6,3	6,88		3,00<ρ<3,20		1,70	3,17		4,19	7,23
	6,3 / 4,0	26,72		3,20<ρ<3,40		4,73	13,66		8,02	23,29
	4,0 / 2,0	47,28		3,40<ρ<3,60		25,50	57,93		21,23	51,53
	2,0 / 1,0	15,76		3,60<ρ<3,80	r(m):	60,45	93,89	r(m):	58,10	86,68
	1,0 / 0,5	2,80		3,80<ρ<9,99	39,97	7,36	98,87	38,09	6,38	93,74
	Summe	100,00		Summe		100,00	39,97		100,00	38,09
Aufgabe	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	2,29	100,00	4,0 / 2,0	3,16	100,00
	10,0 / 8,0	0,53		2,80<ρ<3,00		16,16	100,00		17,87	100,00
	8,0 / 6,3	6,39		3,00<ρ<3,20		21,42	100,00		22,04	100,00
	6,3 / 4,0	25,84		3,20<ρ<3,40		13,82	100,00		13,11	100,00
	4,0 / 2,0	47,99		3,40<ρ<3,60		17,60	100,00		15,70	100,00
	2,0 / 1,0	15,81		3,60<ρ<3,80		25,73	100,00		25,53	100,00
	1,0 / 0,5	3,43		3,80<ρ<9,99		2,97	100,00		2,59	100,00
	Summe	100,00		Summe			100,00		100,00	

Tabelle 44: Teilungszahlen für Versuch 3.3

3.4	MW [mm]	Masse [%]		Dichteklasse [g/cm ³]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]	Fraktion [mm]	Masse [%]	TZ [%]
Überlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	6,29	90,18	4,0 / 2,0	7,25	74,04
	10,0 / 8,0	0,82		2,80<ρ<3,00		41,40	65,03		35,00	56,12
	8,0 / 6,3	5,96		3,00<ρ<3,20		35,94	41,12		38,01	43,79
	6,3 / 4,0	23,27		3,20<ρ<3,40		11,71	17,63		10,74	15,08
	4,0 / 2,0	48,90		3,40<ρ<3,60	3,71	3,95	6,23	6,85		
	2,0 / 1,0	16,00		3,60<ρ<3,80	r(m):	0,95	0,69	r(m):	2,59	1,61
	1,0 / 0,5	5,06		3,80<ρ<9,99	21,53	0,00	0,00	20,16	0,18	1,33
	Summe	100,00		Summe		100,00	21,53		100,00	20,16
Unterlauf	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	0,19	9,82	4,0 / 2,0	0,64	25,96
	10,0 / 8,0	0,55		2,80<ρ<3,00		6,11	34,97		6,91	43,88
	8,0 / 6,3	5,53		3,00<ρ<3,20		14,12	58,88		12,32	56,21
	6,3 / 4,0	22,73		3,20<ρ<3,40		15,02	82,37		15,27	84,92
	4,0 / 2,0	51,90		3,40<ρ<3,60	24,74	96,05	21,37	93,15		
	2,0 / 1,0	15,61		3,60<ρ<3,80	r(m):	37,48	99,31	r(m):	40,12	98,39
	1,0 / 0,5	3,68		3,80<ρ<9,99	78,47	2,35	100,00	79,84	3,36	98,67
	Summe	100,00		Summe		100,00	78,47		100,00	79,84
Aufgabe	> 10,0	0,00		0,00<ρ<2,80	6,3 / 4,0	1,50	100,00	4,0 / 2,0	1,97	100,00
	10,0 / 8,0	0,61		2,80<ρ<3,00		13,71	100,00		12,57	100,00
	8,0 / 6,3	5,62		3,00<ρ<3,20		18,81	100,00		17,50	100,00
	6,3 / 4,0	22,84		3,20<ρ<3,40		14,31	100,00		14,35	100,00
	4,0 / 2,0	51,27		3,40<ρ<3,60	20,21	100,00	18,32	100,00		
	2,0 / 1,0	15,69		3,60<ρ<3,80	29,62	100,00	32,56	100,00		
	1,0 / 0,5	3,97		3,80<ρ<9,99	1,84	100,00	2,72	100,00		
	Summe	100,00		Summe		100,00	100,00		100,00	100,00

Tabelle 45: Teilungszahlen für Versuch 3.3

7.6) SICHERHEITSUNTERWEISUNG UND BETRIEBSANLEITUNG

7.6.1) SICHERHEITSUNTERWEISUNG

Grundsätzlich gelten für alle Arbeiten mit der Pilotanlage zur Schwertrübezyklonierung je nach Aufstellungsort entweder die Sicherheitsvorschriften der VA Erzberg oder des Lehrstuhls für Aufbereitung und Rohstoffveredlung an der Montanuniversität Leoben

Desweiteren sind die Sicherheitsdatenblätter aller im Zusammenhang mit der Pilotanlage verwendeten Betriebsstoffe zu beachten, insbesondere jene, welche die Handhabung mit Schwerstoffen betreffen.

Persönliche Schutzausrüstung (PSA):

Folgende persönliche Schutzausrüstung ist während der Arbeit mit der Pilotanlage in der Aufbereitungsanlage am steirischen Erzberg zusätzlich zur üblichen Arbeitskleidung immer zu tragen:

- Schutzhelm
- Gehörschutz
- Schutzbrille
- Warnweste
- Schlosserhandschuhe (Umrüstung, Wartung)
- wasserdichte Handschuhe (Probenahme, Reinigung der Anlage)
- Arbeitsschuhe mit Stahlkappen

Allgemeine Sicherheitshinweise:

Vor dem Einschalten muss überprüft werden, ob alle Schutzverkleidungen ordnungsgemäß angebracht sind. Die Entfernung von Schutzverkleidungen an der Pilotanlage ist nur nach vollständiger Deaktivierung zulässig.

Hantieren im Pumpensumpf jeder Art (z.B. Herausfischen von in den Pumpensumpf gefallen Gegenständen, Aufwirbeln von abgesetztem Schwerstoff) ist nur bei deaktiviertem Rührwerk zulässig.

Die Verschraubung der Dichtung zwischen Motor und Pumpe darf nur bei deaktiviertem Motor nachgezogen werden.

Werden Umrüst-, Reinigungs- oder Wartungsarbeiten an der Pilotanlage (mit Ausnahme des Zyklons) durchgeführt, sind die betreffenden Teile vollständig zu deaktivieren und gegen ungewolltes Anfahren zu sichern

Umrüstarbeiten am Zyklon selbst sind während des laufenden Betriebs zu vermeiden. Wenn es aufgrund des Versuchsplans unvermeidlich ist, die Zyklongeometrie bzw. das Apex/Vortex-Verhältnis während des laufenden Betriebes anzupassen, dann ist dies nur zulässig, wenn über dem Pumpensumpf eine Abdeckung angebracht wird.

Probenahme:

Grundsätzlich sind für die Probenahme die zur Verfügung gestellten Probenahmegefäße zu verwenden.

Zur Beprobung der Aufgabetrübe ist der dafür vorgesehene Auslass an der Leitung direkt nach der Pumpe zu verwenden.

Werden Trübeproben aus dem Ober- bzw. Unterlauf mit einem Volumen von mehr als einem Liter genommen, so ist das Probenahmegefäß gegen das Hineinfallen in den Pumpensumpf gesondert zu sichern.

Während der Probenahme sind wasserdichte Handschuhe unerlässlich, da der ständige Hautkontakt mit dem Schwerstoff zu vermeiden ist (gilt insbesondere für Trüben mit Ferrosilizium).

7.6.2) BETRIEBSANLEITUNG

Anfahren mit leerem Pumpensumpf

Soll die Pilotanlage aus dem komplett entleerten Zustand hochgefahren werden, dann ist folgender Arbeitsablauf einzuhalten:

1. Kontrolle, ob sich Zyklongeometrie bzw. Auslassdüsen im für den Versuch gewünschten Zustand befinden
2. Schaltung der Ventile für Kreislauf ohne Zyklon herstellen
3. Gewünschte Menge an Wasser in den Pumpensumpf füllen
4. Pumpe zuschalten und bei mindestens 500 U/min betreiben
5. Rührwerk zuschalten und bei niedriger Drehzahl betreiben
6. Schwerstoff langsam eimerweise in Pumpensumpf verkippen und regelmäßig Dichte kontrollieren
7. Sobald das Rührwerk vollständig unter der Trübeoberfläche versenkt ist, sukzessive Drehzahl des Rührwerks erhöhen

Anfahren mit Trübe im Pumpensumpf

Im Versuchsbetrieb ist es oft unerlässlich, dass die Trübe nach einem Versuchstag im Pumpensumpf verbleibt, um an einem anderen Tag mit derselben Trübe weiterarbeiten zu können. Der Schwerstoff in der Trübe setzt sich nach der Deaktivierung fast vollständig ab und blockiert die Abzugsöffnung am Boden des Pumpensumpfes. Ein sofortiges Einschalten der Pumpe und des Rührwerks ist nicht möglich. Für das erneute Anfahren sind daher folgende Punkte zu beachten:

1. Anlagenauslassventil schließen
2. Rührwerk so weit als möglich absenken, einschalten und die Drehzahl langsam erhöhen
3. Sobald genug Schwerstoff in Suspension ist, Rührwerk vollständig absenken und Drehzahl erhöhen
4. Druckluftventil über der Austragsöffnung langsam öffnen und einige Minuten Druckluft in den Sumpf einlassen
5. Druckluftventil schließen und wenn möglich gleichzeitig Auslassventil vom Pumpensumpf öffnen und Pumpe einschalten
6. Pumpe bei mindestens 500 U/min laufen lassen

Im Normalfall sollte jetzt die Pumpe beginnen die Trübe im Kreis zu pumpen. Ist die nicht der Fall, dann ist eine zu dicke Trübe in das Rohr unter dem Pumpensumpf eingedrungen und das Rohr ist verstopft. In diesem Fall ist wie folgt vorzugehen:

1. Rührwerk laufen lassen
2. Pumpe abschalten und Pumpensumpfauslassventil schließen
3. Anlagenauslassventil öffnen, elastischen Schlauch am Anlagenauslassrohr entfernen
4. Mit Wasserschlauch das Rohr vom Schwerstoff befreien
5. Wasserschlauch in die Bypassauslassöffnung stecken und Wasser aufdrehen
6. Pumpe auf niedrigem Niveau (ca. 200 U/min) anfahren lassen und sofort wieder abschalten; so oft wiederholen, bis das Wasser aus der Anlagenauslassöffnung einigermaßen sauber herauskommt
7. Schlauch wieder an Anlagenauslassrohr befestigen, Anlagenauslassventil schließen

Ist dieses Prozedere abgeschlossen, kann wieder bei Punkt 5 des vorhergehenden Absatzes begonnen werden. Es kann sein, dass ein paar Versuche benötigt werden, um die Anlage so anzufahren.

Sobald die Pumpe die Trübe im Kreis pumpt, ist wie folgt vorzugehen:

1. Druckluftventile ein wenig öffnen
2. Rührwerk anhalten
3. Mit einem Holzstock oder einer Eisenstange abgesetzten Schwerstoff zur Auslassöffnung schieben (in den durch die Druckluft entstandenen Löchern ansetzen)
4. Rührwerk wieder einschalten; ist kein Schwerstoff mehr am Boden feststellbar, kann die Druckluft abgeschaltet werden und der Anfahrvorgang beendet werden
5. Druckluft in den Bereichen, welche frei von abgesetztem Schwerstoff sind, abschalten

Die Punkte 2 - 5 müssen so oft wiederholt werden, bis am Boden des Pumpensumpfes mit dem Holzstock oder der Eisenstange kein Schwerstoff mehr feststellbar ist.

Niederfahren ohne Entleerung des Pumpensumpfes

Soll die Trübe im Pumpensumpf nach Beendigung der Versuche dort belassen werden, um an einem anderen Zeitpunkt damit weiterarbeiten zu können, dann sind beim Niederfahren und Abschalten der Pilotanlage folgende Punkte zu beachten:

1. Pumpe abschalten
2. Pumpensumpfauslassventil schließen
3. Rührwerk abschalten und so weit herausfahren, dass es nicht mehr in Kontakt mit der Trübe steht
4. Anlagenauslassventil öffnen
5. Wasserschlauch in die Bypassauslassöffnung stecken und Wasser aufdrehen
6. Pumpe auf niedrigem Niveau (ca. 200 U/min für ca. 2 sec.) anfahren lassen und sofort wieder abschalten; so oft wiederholen, bis das Wasser aus der Anlagenauslassöffnung einigermaßen sauber herauskommt
7. Schlauch wieder aus dem Bypass herausziehen
8. Abdeckung für Pumpensumpf auflegen
9. Kontrolle der Druckluftventile und abschalten der Druckluft
10. Wichtige mechanische Teile außerhalb des Pumpensumpfes vom Schwerstoff befreien; Pumpe und Rührwerk ausschalten und gegen erneutes anfahren sichern

Niederfahren mit Entleerung des Pumpensumpfes

Wird der Schwerstoff bzw. die Trübe nicht mehr benötigt, muss der Pumpensumpf entleert werden. Folgende Punkte sind zu beachten:

1. Druckluft abschalten
2. Wasserschlauch so befestigen, dass Wasser in den Pumpensumpf läuft
3. Anlagenauslassventil öffnen
4. Pumpe laufen lassen, bis Pumpensumpf leer
5. Rührwerk ausschalten, sobald es nicht mehr von Trübe bedeckt ist
6. Anlagenauslassventil schließen und Pumpensumpf mit Wasser befüllen
7. Pumpe wieder zuschalten und Wasser im Kreis pumpen; Zyklon zeitweise in Kreislauf mit einbeziehen
8. Anlagenauslassventil öffnen und Pumpe abschalten
9. Wasserschlauch in Bypass stecken und Pumpe spülen (mehrmals Pumpe anfahren lassen, um den in der Pumpe abgesetzten Schwerstoff aufzuwirbeln)

8.) ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

8.1) ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Faktorraum für drei Faktoren mit je zwei Stufen pro Faktor [2, 4]	6
Abbildung 2: Schema der Versuchsanlage zur Schwertrübezyklonierung [15]	22
Abbildung 3: Korngrößenverteilung AMC 70	27
Abbildung 4: Korngrößenverteilung hafsil	28
Abbildung 5: Konuswinkel des Zyklons	30
Abbildung 6: Pumpensumpf mit Druckluftanschlüssen	36
Abbildung 7: Haupteffekte Spreizung der Versuchsreihe 1	41
Abbildung 8: Haupteffekt Volumenstrom der Versuchsreihe 1	42
Abbildung 9: Haupteffekt Spreizung der Versuchsreihe 2	49
Abbildung 10: Haupteffekt Volumenstrom Versuchsreihe 2	50
Abbildung 11: Die Aufgabekorngrößenverteilungen der Versuche 3.1-3.4	72
Abbildung 12: Teilungskurven der Korngrößenklasse 6,3/4 der Versuche 3.1-3.4	83
Abbildung 13: Teilungskurven der Korngrößenklasse 4/2 der Versuche 3.1-3.4	84
Abbildung 14: Dichteverläufe der Proben der Versuche 3.1-3.4	86
Abbildung 15: Henry-Reinhardt Diagramm Versuch 3.1 Aufgabe	87
Abbildung 16: Masseausbringen und Eisengehalte der Versuche 3.1-3.4	88
Abbildung 17: Flowsheet der Zyklonanlage mit Schwerstoffaufbereitung [26]	89
Abbildung 18: Korngrößenbezogene Endfallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung verschiedener Materialdichten [30]	94
Abbildung 19: Zusammenstellung Pumpensumpf und Pumpe	96
Abbildung 20: Diagramm zur Abschätzung des slurry pump factors (K_{SP}) [30]	97
Abbildung 21: Pumpenkennlinie einer typischen Trübepumpe [29]	99
Abbildung 22: Korngrößenverteilung der Produkte der Versuchsreihe 3	106

8.2) TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Aufbau eines klassischen Versuchsplans [2, 3]	5
Tabelle 2: ausgewogener und orthogonaler Versuchsplan (Vollfaktorplan) [2, 4, 5]	7
Tabelle 3: Vollfaktorplan für drei Faktoren [5, 11]	13
Tabelle 4: Vollfaktorplan für drei Faktoren mit Spalten für Wechselwirkungen [5, 11]	14
Tabelle 5: Teilfaktorplan für vier Faktoren mit allen Wechselwirkungen [11]	15
Tabelle 6: Teilfaktorplan für vier Faktoren mit allen Wechselwirkungen [11]	15
Tabelle 7: Teilfaktorplan für fünf Faktoren [11, 12]	16
Tabelle 8: Teilfaktorplan für fünf Faktoren mit Vermengungsstruktur [11]	17
Tabelle 9: chemische Zusammensetzung AMC 70 [17]	27
Tabelle 10: chemische Zusammensetzung hafsil [18]	28
Tabelle 11: Versuchsplan der Versuchsreihe 1	34
Tabelle 12: Faktoreinstellungen der verworfenen Versuche	37
Tabelle 13: Ergebnisse der verworfenen Versuche	37
Tabelle 14: Ergebnisse Versuchsreihe 1	39
Tabelle 15: Wechselwirkung Aufgabedruck / FeSi-Type	44
Tabelle 16: Versuchsplan der Versuchsreihe 2	46
Tabelle 17: Ergebnisse der Versuchsreihe 2	48
Tabelle 18: geplanter Versuchsplan Versuchsreihe 3	54
Tabelle 19: tatsächlicher Versuchsplan Versuchsreihe 3	55
Tabelle 20: Probenübersicht Versuchsreihe 3	60
Tabelle 21: Korngrößenklassen Versuchsserie 3	62
Tabelle 22: Dichteklassen Versuchsreihe 3	63
Tabelle 23: Masseausbringen der Korngrößenklassen für die Auswertung	70
Tabelle 24: Korngrößenklassen für Auswertung der Erzproben	71
Tabelle 25: Eisenbilanz Versuche 3.1-3.4 mit rückgerechneten Aufgaben und Anfangs- und Endaufgabeproben	74
Tabelle 26: Fe-bezogene Detailbilanz des Versuchs 3.1	77
Tabelle 27: Henry-Reinhardt-Diagramm für die Aufgabe von Versuch 3.1	79
Tabelle 28: Trennschnitllage nach Tromp und Ecart Probable der Versuche 3.1-3.4	81
Tabelle 29: Kennwerte für die Auslegung der Aufgabesiebe [28]	92
Tabelle 30: Kennwerte für die Auslegung der Abtropf- und Waschsiebe [28]	102
	126

Tabelle 31: Masseausbringen und Durchgänge in den Korngrößenklassen der zwei FeSi-Typen	104
Tabelle 32: Masseausbringen und Durchgänge in den Korngrößenklassen der Produkte der Versuchsreihe 3	105
Tabelle 33: Bilanz für Fe, CaO und SiO ₂ der Versuchsreihe 3	107
Tabelle 34: Bilanz für MgO, Mn und Al ₂ O ₃ der Versuchsreihe 3	108
Tabelle 35: Bilanz für Na ₂ O, K ₂ O und die Summe der Alkalien der Versuchsreihe 3	109
Tabelle 36: Detailbilanz für Eisen des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	110
Tabelle 37: Detailbilanz für Kalziumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	111
Tabelle 38: Detailbilanz für Siliziumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	112
Tabelle 39: Detailbilanz für Magnesiumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	113
Tabelle 40: Detailbilanz für Mangan des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	114
Tabelle 41: Detailbilanz für Aluminiumoxid des Versuchs 3.1 aufgeschlüsselt in Korngrößen- und Dichteklassen	115
Tabelle 42: Teilungszahlen für Versuch 3.1	116
Tabelle 43: Teilungszahlen für Versuch 3.2	117
Tabelle 44: Teilungszahlen für Versuch 3.3	118
Tabelle 45: Teilungszahlen für Versuch 3.3	119

9.) QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 19-21
- [2] Karl Siebertz, David van Bekker, Thomas Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE); Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2010); S. 5-9
- [3] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 165-166
- [4] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 215-219
- [5] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 289-294
- [6] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 4
- [7] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 162-165
- [8] Karl Siebertz, David van Bekker, Thomas Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE); Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2010); S. 12-21
- [9] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 12-13
- [10] Karl Siebertz, David van Bekker, Thomas Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE); Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2010); S. 87-94
- [11] Karl Siebertz, David van Bekker, Thomas Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE); Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2010); S. 25-30
- [12] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 294-297
- [13] Karl Siebertz, David van Bekker, Thomas Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE); Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2010); S. 37-45
- [14] Douglas C. Montgomery: Design and Analysis of Experiments; Wiley (New York NY 1997); S. 417-479
- [15] Christoph Blasch: Schwertrübezyklonierung am steirischen Erzberg, Masterarbeit; Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben (2010)
- [16] Christoph Luckeneder: Untersuchung der Aufbereitbarkeit von steirischem Eisenerz mittels Schwertrübezyklonierung, Aufbereitungstechnische Projektstudie; Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben (2011)
- [17] <http://www.kovohuty.com>
- [18] <http://hafsil.com>

- [19] Besprechung mit DI Dr.mont. Andreas Böhm und DI Dr.mont. Alfred Stadtschnitzer; 22. Februar 2012; VA Erzberg
- [20] Heinrich Schubert: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band 2; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (Leipzig 1967); S. 51-58
- [21] Heinrich Schubert: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band 2; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (Leipzig 1967); S. 125-130
- [22] Besprechung mit DI Dr.mont. Andreas Böhm und DI Dr.mont. Alfred Stadtschnitzer; 06. April 2012; Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität
- [23] Heinrich Schubert: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band 2; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (Leipzig 1967); S. 29-35
- [24] Telefonat mit DI Dr.mont. Alfred Stadtschnitzer; 12.03.2012
- [25] Hans-Jürgen Bargel, Günter Schulze: Werkstoffkunde; Springer-Verlag (Berlin Heidelberg 2008); S. 300
- [26] Andrew Mular, Roshan Bhappu: Mineral Processing Plant Design; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc; New York 1980; S. 508
- [27] Andrew Mular, Doug N. Halbe, Derek J. Barratt: Mineral Processing Plant Design, Practise, and Control Proceedings; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME) 2002; S. 970
- [28] Andrew Mular, Roshan Bhappu: Mineral Processing Plant Design; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc; New York 1980; S. 341-361
- [29] Errol G. Kelly, David J. Spottiswood: Introduction to Mineral Processing; Australian Mineral Foundation; Australia 1995; S. 68-84, 384-389
- [30] Andreas Böhm: Kenngrößen und Schaubilder zur Charakterisierung des Sedimentationsverhaltens polydispenser Feststoffsuspensionen; BHM, 149 Jg. (2004), Heft 8; S. 268-294
- [31] Norman L. Weiss: SME Mineral Processing Handbook; ; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc; New York 1985; S.4-16 – 4-18
- [32] Andrew Mular, Roshan Bhappu: Mineral Processing Plant Design; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc; New York 1980; S. 376-403
- [33] Besprechung mit DI Roland Oberroither; 02.11.2012; FLS Krebs Engineers, Neusiedl am See