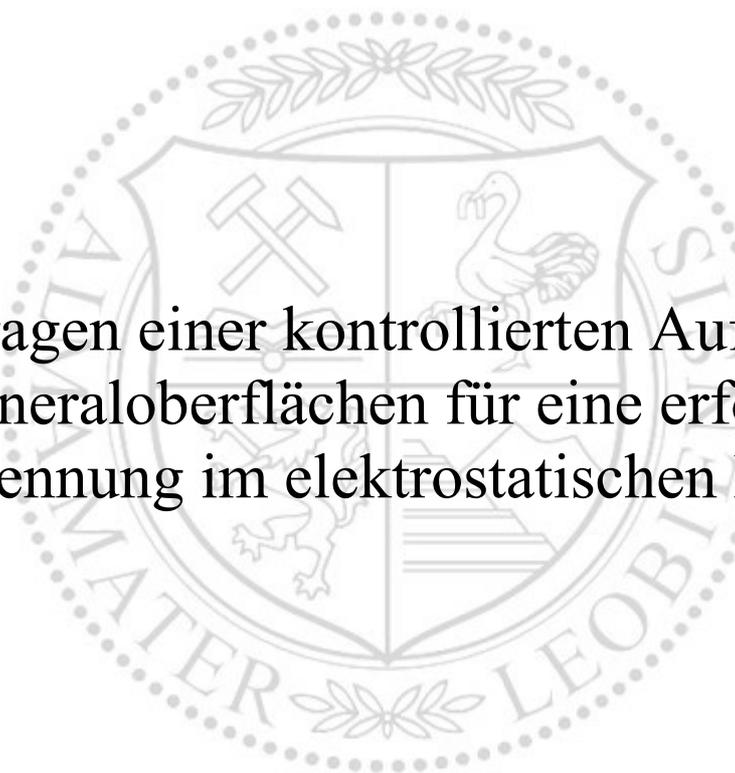




Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung

Dissertation



Zu Fragen einer kontrollierten Aufladung
von Mineraloberflächen für eine erfolgreiche
Trennung im elektrostatischen Feld

Dipl.-Ing. Sabrina Gehringer, BSc

Mai 2021



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 12.05.2021

Unterschrift Verfasser/in
Sabrina Gehringer

ABSTRACT

Innovative processing concepts and processes are of great importance for ensuring a steadily increasing, efficient, independent and sustainable production of high-quality mineral products for Europe in general and Austria in particular. In particular, efforts to further develop dry-operated processing concepts must be accelerated, as legal requirements at European and national level are becoming increasingly stringent with regard to environmental protection, but especially with regard to the careful use of water as a resource.

One possible sorting process that is considered to have a high potential for increased industrial use, but which has so far only established itself in niches as a separation process in mineral processing, is electro-separation after tribocharging. A major reason for the comparatively low frequency of use is the still limited knowledge of the complex interrelationships involved in the charging of mineral surfaces.

This is exactly where the present dissertation comes in. In large-scale test series based on statistical experimental design, sorting tests were carried out on magnesium oxide, raw magnesite, gulsenite and halite. For this purpose, the X2 laboratory belt separator developed by ST Equipment and Technology LLC was used, which - unique in the world - is located in the climatic chamber of the Chair of Mineral Processing. In particular, the influences of various factors relevant to the sorting process - such as the machine parameters of the belt separator, the raw material properties and the ambient conditions during sorting - were investigated in the course of this extensive series of tests, and optimized parameter settings were sought. Furthermore, a triboelectrostatic charging unit was developed, built and put into operation, with which the triboelectrostatic charging on various pure mineral samples or raw material types was to be influenced, quantitatively recorded and "controlled", in order to develop a better understanding of the influences acting during charging.

KURZFASSUNG

Innovative Aufbereitungskonzepte und -verfahren sind für die Sicherstellung einer stetig steigenden, effizienten, unabhängigen und nachhaltigen Produktion von qualitativ hochwertigen Mineralprodukten für Europa im Allgemeinen und Österreich im Speziellen von großer Bedeutung. Dabei sind insbesondere die Anstrengungen zur Weiterentwicklung trocken betriebener Aufbereitungskonzepte zu forcieren, da rechtliche Vorgaben auf europäischer und nationaler Ebene in Bezug auf den Schutz der Umwelt, insbesondere aber in Bezug auf die schonende Nutzung der Ressource Wasser, stetig strikter werden.

Ein möglicher Sortierprozess, dem ein hohes Potenzial für eine verstärkte industrielle Nutzung zugesprochen wird, der sich allerdings bislang lediglich in Nischen als Trennprozess in der Mineralaufbereitung etabliert hat, stellt die Elektroscheidung nach Triboaufladung dar. Ein wesentlicher Grund für die vergleichsweise geringe Einsatzhäufigkeit ist das nach wie vor geringe Wissen um die komplexen Zusammenhänge bei der Aufladung von Mineraloberflächen.

Genau hier hakt die vorliegende Dissertation ein. In groß angelegten und auf der statistischen Versuchsplanung gründenden Versuchsreihen wurden Sortierversuche an Magnesiumoxid, Rohmagnesit, Gulsenit und Halit durchgeführt. Dazu kam der von der Firma ST Equipment & Technology LLC entwickelte Labor-Bandscheider vom Typ X2 zum Einsatz, der – weltweit einzigartig – in der Klimakammer des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung situiert ist. Insbesondere wurden im Zuge dieser umfangreichen Versuchsreihen die Einflüsse von verschiedenen, für den Sortierprozess relevanten Faktoren – wie die Maschinenparameter des Bandscheiders, die Rohgutbeschaffenheit und die Umgebungsbedingungen während der Sortierung – untersucht und optimierte Parametereinstellungen gesucht. Des Weiteren wurde eine triboelektrostatische Aufladeeinheit entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen, mit welcher die triboelektrostatische Aufladung an verschiedenen Reinmineralproben bzw. Rohgutarten beeinflusst, quantitativ erfasst und „kontrolliert“ werden sollte, um damit ein besseres Verständnis der bei der Aufladung einwirkenden Einflüsse zu erarbeiten.

DANKSAGUNG

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Helmut Flachberger. Schon vor dem Beginn meiner Tätigkeit am Lehrstuhl wurde durch seinen Einsatz für das Bereitstellen eines geeigneten Projektthemas und den notwendigen finanziellen Mitteln der Grundstein für diese Arbeit gelegt. Während der gesamten Dissertationszeit stand seine Tür immer für Fragen offen, bei denen er mir weitergeholfen und mich weitergebracht hat. Auch bei meinem Mentor Dr. Holger Paulick und der Geologischen Bundesanstalt, welche dieses Projekt gefördert hat, bedanke ich mich herzlich.

Für die Unterstützung durch die experimentelle Infrastruktur und auch für zahlreiche konstruktive Diskussionen bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Wladyslaw Lewandowski und ST Equipment & Technology LLC. Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Rainer Werthmann, Manfred Grießmaier und allen Mitarbeitern der Firma Styromag, die mich mit der Bereitstellung von Rohgutproben und durch chemischen Analysen unterstützt haben. Für die Unterstützung und Ratschläge bei Laborangelegenheiten, möchte ich Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Andreas Böhm danken. Für die manchmal über die Arbeit hinausgehenden Diskussionen bedanke ich mich bei all meinen Arbeitskollegen. Auch die dabei entstandenen freundschaftlichen Verbundenheiten sind ein besonderer Gewinn!

Zu guter Letzt möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich auf meinem gesamten Weg begleitet haben, mir Durchhaltevermögen zugesprochen, oder mich zum richtigen Zeitpunkt abgelenkt haben. Danke an meine gesamte Familie, meine Freunde und an meine lieben Kollegen der Trachtenkapelle Tragöß.

Für meine Eltern

Als Ausdruck meiner Dankbarkeit für eure Unterstützung, möchte ich euch dieses Zitat widmen, welches mir schon von Kindesbeinen an, durch meinen Urgroßvater, ans Herz gelegt wurde und mich seit dem Tag meiner Philistrierung ganz besonders berührt.

„Selbstzufriedenheit ist der Schlüssel zum Glück“

Josef Schachermayr

Für meinen Gatten

Schlicht und einfach Danke, in jeder erdenklichen Hinsicht!

„Doch vom Glück und vom frohen Leben gibt es wenig zu sagen, bevor es ein Ende hat; so sind große und herrliche Werke ihr eigener Nachruhm, solange sie dauern und Augen sie sehen können und erst, wenn sie in Gefahr sind oder für immer zerbrochen, gehen sie in die Lieder ein.“

John Ronald Reuel Tolkien

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Motivation für die Durchführung der Arbeit	1
1.1.	Einführung	1
1.2.	Aufgabenstellung	3
1.3.	Ausgangssituation	4
2.	Arbeitsansatz	6
2.1.	Vorgehensweise	6
2.2.	Versuchsplanung	6
3.	Elektrostatische Sortierung	7
3.1.	Physikalische Grundlagen	7
3.2.	Auflademechanismus	9
3.3.	Trennmodelle	10
4.	Ladungsmessung	12
4.1.	Modelle zur Ladungsmessung von Korngemengen	12
5.	Grundlagen der Wirbelschichttechnik	18
5.1.	Zustandsbereiche der Wirbelschichttechnik	18
5.2.	Einteilung von Wirbelschichten	19
5.3.	Kenngößen der Wirbelschichttechnik	21
5.4.	Zustandsdiagramm nach Reh	25
5.5.	Feststoffverhalten in Gas-/Feststoff-Wirbelschichten	28
6.	Statistische Versuchsplanung	30
6.1.	Traditionelle Versuchsplanung	30
6.2.	Faktorraum	30
6.3.	Statistische Versuchsplanung	31
6.4.	Grundbegriffe	32
6.5.	Grundprinzipien	33
6.6.	Teilfaktorielle Versuchspläne	34

6.7.	Auswertung	39
7.	Das Versuchsaggregat - der triboelektrostatische Bandscheider	40
7.1.	Parameterstudie.....	42
8.	Sortierung ausgewählter Industriemineralproben mittels triboelektrostatischem Bandscheider ...	43
8.1.	Magnesiumoxid	43
8.2.	Rohmagnesit	62
8.3.	Gulsenit	72
8.4.	Halit	75
9.	Entwicklung einer triboelektrostatischen Aufladeeinheit	79
9.1.	Ermittlung des Aufladeerfolgs	79
9.2.	Technisches Konzept und erste Ansätze	79
9.3.	Dimensionierung	81
9.4.	Umsetzung & Funktionsbeschreibung	83
9.5.	Aufbau der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	85
9.6.	Bedienung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit.....	87
10.	Aufladung ausgewählter, relevanter Industriemineralproben	90
10.1.	Aufladung von Quarz.....	90
10.2.	Aufladung von Magnesiumoxid	93
10.3.	Aufladung von Rohmagnesit	96
10.4.	Aufladung von Halit	97
10.5.	Gezielte Beeinflussung der Gesamtladung ausgewählter Industriemineralproben	99
11.	Sortiersversuche am triboelektrostatischen Bandscheider mit vorbehandelten Mineraloberflächen 104	
11.1.	Veränderung der Temperatur	104
11.2.	Konditionierung.....	107
12.	Schlussbetrachtungen	112
12.1.	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....	112
12.2.	Gewonnene Erkenntnisse	115
	Tabellenverzeichnis	117
		VIII

Abbildungsverzeichnis.....	120
Abkürzungsverzeichnis.....	123
Quellenverzeichnis	124
Anhang	I
Versuchspläne	I
Analysen- & Versuchsergebnisse	II
Analysevorschriften & Arbeitsanweisungen.....	XVII
Konstruktionszeichnungen & 3D Darstellungen	XXIII

Einleitung

1. MOTIVATION FÜR DIE DURCHFÜHRUNG DER ARBEIT

1.1. EINFÜHRUNG

Der weltweite Bedarf an hochwertigen mineralischen Rohstoffe steigt kontinuierlich. Da qualitativ hochwertige Lagerstätten zur Neige gehen, werden zukünftige Lagerstätten niedrigere Gehalte und/oder ungünstigere Verwachsungsverhältnisse aufweisen. Durch die immer feiner werdenden Verwachsungsverhältnisse zwischen Wertmineral und Gangart in den in Verhieb stehenden Lagerstätten gewinnt die Aufbereitung im Feinkornbereich ($< 100 \mu\text{m}$) zunehmend an Bedeutung. Ein Großteil der Feinkornaufbereitung erfolgt derzeit in nasser Betriebsweise (z.B. Flotation, Magnetscheidung). Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Wasser und restriktiver Umweltauflagen gewinnt die trocken betriebene Feinkornaufbereitung immer mehr an Bedeutung. Zudem stellt die Forderung der weiterverarbeitenden Industrie nach immer reineren (im Sinne von höherwertigen) und funktionelleren Konzentraten gerade im Industriemineralsektor die Aufbereitung vor große Herausforderungen. (1) (2) (3) (4) (5)

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 1) veranschaulicht die weltweit steigenden Bedarfe an mineralischen Rohstoffen, in blau ist die Rohstoffgruppe der Industrieminerale dargestellt.

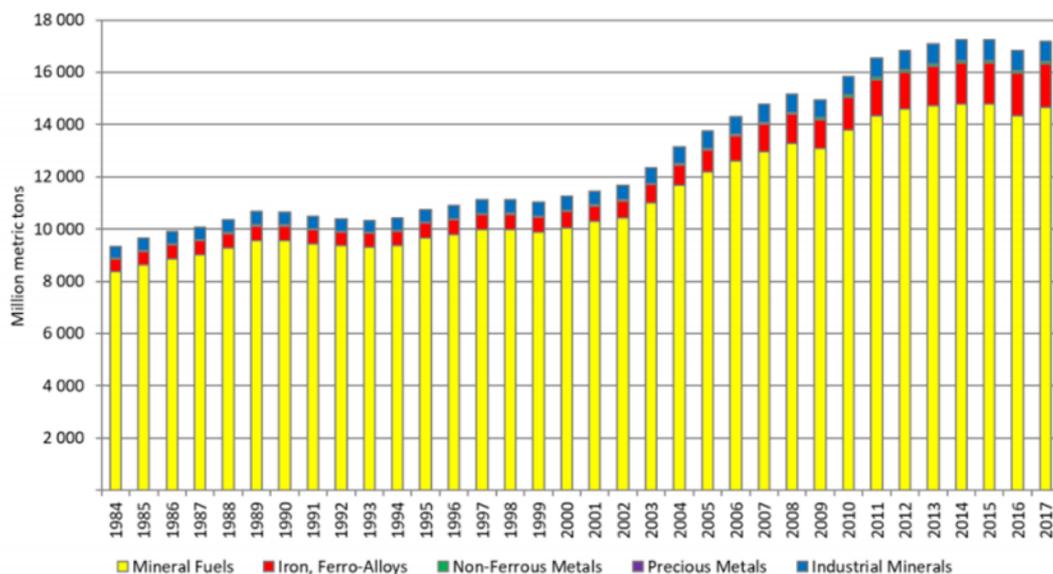


Abbildung 1: Weltweite Rohstoffproduktion 1984 – 2017 - nach Rohstoffart (3)

Ein vielversprechendes Aufbereitungsverfahren in trockener Betriebsweise ist die Elektroscheidung. Die Trennung erfolgt je nach den beteiligten Mineralphasen nach Unterschieden in der Leitfähigkeit oder der Elektronenaustrittsarbeit (Oberflächenladung). (2)

Derzeit dominieren, weltweit betrachtet, nass betriebene Prozesse und Verfahren, wiewohl diese teuer sind (Prozesswassermanagement und -behandlung, Energieverbrauch für Pumparbeit und Trocknung der Mineralprodukte) und auch große Auswirkungen auf die Umwelt (Schlammteiche, Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwässern) haben können. (2)

Es besteht kein Zweifel daran, dass innovative Aufbereitungskonzepte in trockener Betriebsweise künftig an Bedeutung gewinnen werden. Beispielsweise werden etwa bei Behörden zur Genehmigung eingereichte Anlagenerweiterungen an die Auflage geknüpft, dass der Prozesswasser-Verbrauch nicht ansteigt oder auf einen reagenzienfreien Betrieb umgestellt wird (was etwa im Falle der Flotation schlicht unmöglich oder bei der Prozesswasserklärung zumindest schwierig ist). (2)

Trotz der Tatsache, dass Österreich als wasserreiches Binnenland zu bezeichnen ist, wird der schonende Umgang mit dieser wertvollen Ressource immer wichtiger. Ein erster Marker für diese Tendenz ist, dass der durchschnittliche Wasserverbrauch in Österreich stetig abnimmt. Auch die in Österreich beheimatete Industrie, die immer noch 56 % der gesamten Wassermenge verbraucht (siehe Abbildung 2), geht mit dem Prozesswasser, vorrangig aus Kostengründen, sparsamer um, als früher. Oftmals werden Kreislaufsysteme und Wasseraufbereitungsanlagen eingesetzt. (6)

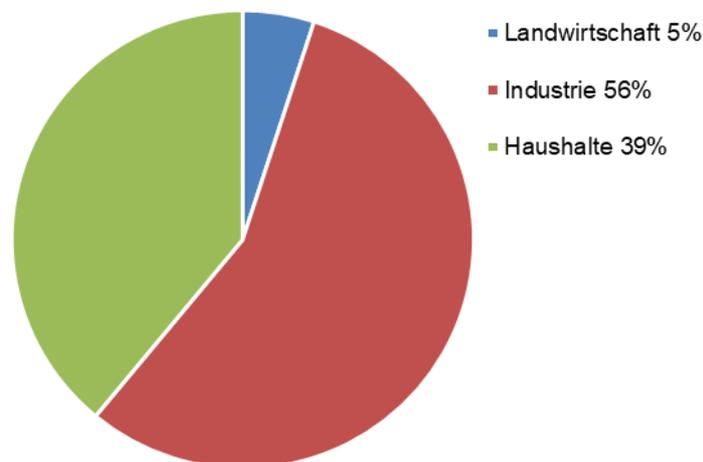


Abbildung 2: Hauptnutzer von Wasser in Österreich (6)

Durch den verstärkten Einsatz und die Etablierung trocken betriebener Aufbereitungsprozesse und Aufbereitungsverfahren in der für Europa im Allgemeinen und Österreich im Speziellen strategisch bedeutenden Industriemineralbranche, etwa durch Einsatz der triboelektrostatischen Sortierung, könnte ein weiterer bedeutender Beitrag zur Senkung des Wasserverbrauchs geleistet werden. Dabei gilt es

festzustellen, dass sich die Elektroscheidung nach Triboaufladung bislang lediglich in Nischen als Trennprozess in der Mineralaufbereitung etabliert hat, so etwa in der Kalisalzaufladung. (7)

Ein Grund dafür ist sicher das immer noch geringe bzw. fehlende Verständnis um die komplexen Zusammenhänge bei der Aufladung von Mineraloberflächen. Ein anderer Grund sind die (gegenwärtig noch) zeitaufwändigen Trial-and-Error-Untersuchungen zur Auffindung optimierter Parametereinstellungen. Der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung hat seit mehr als zwölf Jahren einen Forschungsschwerpunkt auf die Elektroscheidung nach Triboaufladung gesetzt. Die bis dato gewonnenen Erkenntnisse zeigen auf, dass die Elektroscheidung nach Triboaufladung ein großes Potential aufweist, insbesondere bei der Aufbereitung von Industriemineralen und einigen kritischen mineralischen Rohstoffen verstärkt zum Einsatz zu gelangen. Es kristallisierte sich aber auch klar heraus, dass es insbesondere beim gezielten Aufladen von Mineralphasenoberflächen einer intensivierten Forschungstätigkeit bedarf.

1.2. AUFGABENSTELLUNG

Das Thema des im Zuge eines von der Geologischen Bundesanstalt geförderten, in einem Zeitraum von drei Jahren abgewickelten Forschungsprojektes mit dem Titel „Mineralphasentrennung nach Triboaufladung“ (P 018 – F - 03 – 50) lautet: (8)

Systematische aufbereitungstechnische Untersuchungen an Rohgutproben aus ausgesuchten Industriemineralagerstätten unter besonderer Berücksichtigung einer kontrollierten Aufladung der Mineralphasenoberflächen für eine erfolgreiche Trennung im elektrostatischen Feld. (8)

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojektes war es, ein besseres Verständnis über die, bei der Triboaufladung wirkenden Faktoren zu erarbeiten. Mit den bis dato nutzbaren Maschinen- und Rohgutparametern ist die gezielte Beeinflussung des Aufladeverhaltens und die Auffindung optimierter Betriebspunkte nur mit aufwändigen Trial-and-Error-Versuchsserien möglich. Das grundlegende Verständnis über all das, was die Aufladevorgänge begünstigt bzw. beeinträchtigt, ist nach wie vor sehr begrenzt. Die Entwicklung einer triboelektrostatischen Aufladeeinheit wurde als ein zentraler Forschungspfeiler dieser Dissertation vorab definiert, um damit die Möglichkeit zu schaffen, auf die Aufladung einwirkende Parameter zu detektieren, diese kontrolliert zu verändern und gleichzeitig Veränderungen im Aufladeverhalten zu beobachten, genau definierte Umgebungsbedingungen zu schaffen und dadurch das vorhandene Wissen auf diesem Gebiet zu erweitern. (8)

Das kontrollierte Aufladeverhalten in unterschiedlichen Mineralphasengemengen stellt einen stark grundlagenorientierten Forschungsaspekt dar, weil der Einfluss der Einzelparameter, vor allem aber deren Zusammenwirken und gegenseitige Beeinflussung, gegenwärtig nur unzureichend verstanden werden.

Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich somit insbesondere mit der Frage des Einflusses der Aufladart für eine kontrollierte, mineralphasenspezifische Aufladung, die für den Trennerfolg von entscheidender Bedeutung ist. Dabei sollten etwa die in vorgeschalteten Aufbereitungsprozessen vonstattengehenden Aufladungsvorgänge „simuliert“ bzw. evaluiert und einander vergleichend gegenübergestellt werden. Darüber hinaus galt es den bedeutenden Einfluss der Rohgutvorbehandlung zu berücksichtigen, etwa durch thermische und/oder chemische Modifizierung der Mineraloberflächen. Die Untersuchungen wurden an Magnesiumoxid-, Magnesit-, Gulsenit- und Halitproben durchgeführt. Übergeordnetes Ziel dieses Projektes war und ist es, ein besseres Verständnis für den Einfluss der Auflademethode zu erhalten, aber auch eine Untersuchungsroutine zu entwickeln, mit der der bislang notwendige Untersuchungsaufwand deutlich verkürzt bzw. vereinfacht werden kann. Der Lehrstuhl möchte mit der verstärkten Etablierung der Elektroscheidung nach Triboaufladung einen Akzent zur verstärkten Nutzung trockener Aufbereitungsverfahren im Korngrößenbereich < 2 mm setzen und damit auch einen Beitrag für eine nachhaltige Rohstoffversorgung des für Österreich bzw. in Europa so bedeutenden Industriemineralsektors leisten.

1.3. AUSGANGSSITUATION

Der globale jährliche Wasserverbrauch wird bis zum Jahr 2025 auf etwa 5.139 km^3 ansteigen, was eine Erhöhung um 31 % zum Bezugsjahr 2000 bedeutet. Unter Einbeziehung der gegenwärtigen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die steigende Weltbevölkerung und die zunehmende Rohstoffproduktion, kann davon ausgegangen werden, dass Süßwasser nicht mehr in dem Ausmaß für technische Prozesse zur Verfügung stehen wird, wie dies bisher der Fall war. (9) (2)

Nun nimmt das Medium Wasser in der konventionellen Mineralaufbereitung eine bedeutende Rolle ein, viele etablierte Aufbereitungsprozesse werden gegenwärtig nass betrieben. Für einen Anteil Feststoff werden dabei etwa 3 bis 4 Anteile Wasser benötigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass künftig zum einen die Bemühungen zu einer strengen Kreislaufführung bzw. Nachbehandlung der Prozesswässer und einer umfangreichen Prozesskontrolle deutlich erhöht werden müssen, zum anderen der Trend zur Nutzung trockener Aufbereitungsprozesse steigen wird. Für ein Erreichen der letztgenannten Zielsetzung auf einem breiten Anwendungsfeld bieten u.a. neue Entwicklungen der Elektroscheidung nach Triboaufladung sehr gute Aussichten. (2)

Mit Ausnahme der Salzmineralaufbereitung, wo dieser Trennprozess seit Jahrzehnten großtechnisch mit Erfolg zum Einsatz gelangt, ist der Einsatz in der Mineralaufbereitung bislang von untergeordneter Bedeutung. Ganz anders in der Sekundärrohstoffaufbereitung, wo die Elektroscheidung beim Kabelrecycling, der Elektronikschrottaufbereitung und der Kunststoff-/Kunststoff-Trennung bereits eingeführt ist. (10)

Auf Basis der bisherigen Forschungserkenntnisse kann gefolgert werden, dass die Elektroscheidung nach Triboaufladung als trocken betriebenes Sortierverfahren eine sowohl wirtschaftlich sinnvolle als auch technisch machbare Alternative zur nass betriebenen Flotation darstellt, wobei die Umsetzungschancen besonders für die Industriemineralaufbereitung und einige kritische Rohstoffe als hoch bewertet werden. (2) (11)

So hat etwa die Firma Sibelco Italia S.p.A. in Fossanova/Italien, die Quarz-/Feldspat-Trennung schon vor Jahren auf eine Kombination trocken betriebener, elektrostatischer und magnetischer Trennprozesse umgestellt. Es ist zu erwarten, dass andere Anwendungsfälle folgen werden. In umfangreichen Untersuchungen wurden bereits weitere Einsatzmöglichkeiten mit dem Schwerpunkt auf der Nichtleiter-/Nichtleiter-Trennung mittels des HAMOS Freifallscheiders EMS500 geprüft, etwa zur Trennung von Talk/Pyrit, Baryt/Fluorit und Quarz/Glimmer, Magnesit/SiO₂ u.v.a.m. Mit dem ebenfalls auf dem triboelektrostatischen Auflademechanismus arbeitenden Bandscheider der Firma ST Equipment & Technology LLC gelang nunmehr auch die Erschließung des Korngrößenbereiches < 300 µm, von welchen auch in Österreich einer dieser Bandscheider im industriellen Maßstab zur Zufriedenheit des Anlagenbetreibers läuft. (12)

Der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung hat seit mehr als zwölf Jahren einen Forschungsschwerpunkt auf die Elektroscheidung nach Triboaufladung gesetzt. Wenngleich sich Erfolge aufgrund dieser Forschungsaktivitäten einstellten, muss doch festgestellt werden, dass die Einflüsse der Prozessbedingungen bei der Aufladung von Mineraloberflächen nach wie vor unzureichend verstanden werden, was zu einer gewissen Verunsicherung der Entscheidungsträger bei Investitionsentscheidungen beiträgt. Zudem gestalten sich die notwendigen Trial-and-Error-Untersuchungen zur Auffindung optimierter Parametereinstellungen nach wie vor zeitaufwändig. Aber gerade die Auffindung optimierter Prozessbedingungen hinsichtlich Rohgutfuchte und -temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und gewisser prozessstützender Konditioniermittelzugaben in minimalen Mengen ist oftmals entscheidend für den Sortiererfolg. Hier ist die statistische Versuchsplanung ein unverzichtbares Werkzeug, um die notwendige Versuchsanzahl, bei gleichem Informationsgewinn, auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Die in den vergangenen zwölf Jahren gemeinsam mit Forschungspartnern aus dem In- und Ausland durchgeführten Forschungsarbeiten des Lehrstuhls haben sich insbesondere mit der Auslotung der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der Elektroscheidung nach Triboaufladung auseinandergesetzt.

Die im Zuge des Forschungsvorhabens durchzuführenden Untersuchungen wurden beispielhaft an hinsichtlich der Versorgungssicherheit seitens der EU als kritisch ausgewiesenen mineralischen Rohstoffen – wie z.B. Magnesit – durchgeführt. Als Forschungspartner der Rohstoffindustrie konnten die Firmen Styromag Steirische Montanindustrie GmbH (für Magnesit) und die Salinen Austria AG (für Halit) gewonnen werden. Als Forschungspartner des Maschinen- und Anlagenbaus wurden die Firmen M.A.L. Metallbau Anlagenservice- Leitungsbau GmbH und ST Equipment & Technology LLC miteinbezogen.

2. ARBEITSANSATZ

2.1. VORGEHENSWEISE

Zu Beginn der Arbeit werden mittels triboelektrostatischer Bandscheidung systematische Sortierversuche durchgeführt, um das Aufladeverhalten ausgewählter Industriemineralproben zu untersuchen und das bestmögliche Sortierergebnis ermittelt, welches ausschließlich durch die Optimierung der Maschineneinstellungen, ohne Einsatz von Reagenzien oder vorgeschalteten Aufladeprozessen, am triboelektrostatischen Bandscheider erzielbar ist. Nach der Erarbeitung dieser Basisdaten wird eine triboelektrostatische Aufladeeinheit entwickelt, um die Aufladung der Mineralphasen zu verbessern, bzw. in gewünschter Weise zu beeinflussen und den zeitlichen Aufladeverlauf quantitativ zu erfassen. Des Weiteren bietet diese Aufladeeinheit die Möglichkeit der Verabreichung von Reagenzien und zur Einstellung von physikalischen Bedingungen wie Luftvolumenstrom, Lufttemperatur und Strömungsverhalten in der Wirbelkammer. Die Aufladerversuche werden mit Industriemineralproben durchgeführt, für welche eine trockene Sortierung aufgrund der Rohguteigenschaften, oder des Produktionsprozesses vorteilhaft ist, wie beispielweise kaustisch gebrannter Magnesit (chemisch: Magnesiumoxid – MgO), welcher auch als Magnesia bezeichnet wird. Dieses Magnesitprodukt liegt nach dem Brennprozess mit einer maximalen Korngröße von ca. 300 µm vor und hat eine starke Reaktivität gegenüber Wasser. Bei Kontakt mit Wasser setzt sich das Magnesiumoxid (MgO) zu Magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂) um, was natürlich unerwünscht ist. (13) (14)

2.2. VERSUCHSPLANUNG

Die Versuchsplanung basiert auf den Grundlagen der statistischen Versuchsplanung, welche eine effiziente Planung und Auswertung von Versuchsreihen mit zahlreichen veränderlichen Parametern bietet. (15) (16)

Dieses „Hilfsinstrument“ soll die zeit- und kostenaufwändige experimentelle Versuchsdurchführung im Labor- und Technikumsmaßstab auf das Nötigste reduzieren, dabei muss nur ein minimaler Informationsverlust hingenommen werden.

Technische Grundlagen

3. ELEKTROSTATISCHE SORTIERUNG

Die Elektrosortierung, insbesondere die elektrostatische Sortierung, basiert auf einem Phänomen, welches bereits in der Antike entdeckt, aber bis zum heutigen Tage nicht grundlegend erforscht wurde.

Die Anfänge der Elektrostatik reichen zurück bis zu den griechischen Philosophen. Bereits im antiken Griechenland soll Thales von Milet erkannt haben, dass durch die Reibung von Bernstein an einem Katzenfell kleine Staubkörner angezogen werden. Die Beobachtung der triboelektrostatischen Aufladung war schließlich die Basis für die heutige Elektrizität und somit auch für die Elektrosortierung. (17) (18)

Die Anwendung der Elektrostatik in der Elektroscheidung zur Sortierung fester mineralischer Rohstoffe reicht zurück bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Durch das Aufkommen der Flotation und die vorerst noch unzureichend beherrschbare Hochspannungstechnik wurde die Elektroscheidung, von Nischenanwendungen abgesehen, auf Jahrzehnte aus der Mineralaufbereitung verdrängt. Ab den 1970er Jahren gewann sie abermals an Bedeutung und ist mittlerweile ein Standardverfahren bei der Aufbereitung von Kalirohsalzen (im Primärrohstoffbereich). (10) (19)

Zu Beginn stand vor allem die Trennung von elektrisch leitenden von nichtleitenden Mineralphasen im Vordergrund (z.B. Trennung Erz von Gangart). In den 1950er Jahren wurden die ersten erfolgreichen Sortiersuche an Salzmineralen durchgeführt. Seit den 1970er Jahren ist die Elektroscheidung ein Standardverfahren in der Aufbereitung von Kalisalzen, welches in diesem Einsatzbereich durchaus mit der Flotation konkurrieren kann. Auch bei der Kunststoff-/Kunststoff-Trennung, oder Kunststoff-/Metall-Trennung hat die Elektroscheidung vielfach Einzug gehalten. (7) (20) (10)

Die Forschungstätigkeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung zum Thema „elektrostatische Sortierung“ begann vor knapp 20 Jahren und wird seither kontinuierlich, durch Dissertations-, Forschungs-, und Industrieprojekte, fortgesetzt. Dabei liegt der Fokus der Forschungsarbeiten im Sektor der Industriemineralaufbereitung mit elektrostatischer Sortierung. (1) (21)

3.1. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

3.1.1. COULOMB'SCHES GESETZ

Elektrische Ladungen lassen sich durch die Kraftwirkung nachweisen, die sie auf andere elektrische Ladungen ausüben. Gleiche Ladungen stoßen sich ab, ungleiche ziehen sich an. (10)

Bei Anwendung der elektrostatischen Sortierung gilt es daher, die Oberflächenladungen der in den Korngemengen enthaltenen Mineralphasen so zu erzeugen, dass sie in einem elektrischen Feld selektiv ausgelenkt und in weiterer Folge getrennt werden können.

Die Basis für die Bewegung von geladenen Körnern im elektrischen Feld bildet das Coulomb'sche Gesetz: (10)

$$F_C = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

Dabei ist die Coulombkraft F_C die resultierende Kraftwirkung, die sich aus den Punktladungen q_1 und q_2 , in inverser quadratischer Abhängigkeit vom Abstand zueinander ergibt. ϵ_0 steht für die elektrische Feldkonstante oder auch Permittivität des Vakuums und beträgt ca. $8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm.

Für die elektrostatische Sortierung sind hauptsächlich zwei Sonderfälle dieses Gesetzes von Bedeutung:

Sonderfall 1 - Eine Punktladung q steht einer unendlich ausgedehnten Fläche gegenüber, welche auf jedem Flächenstück A die Ladung Q trägt. In diesem Fall ist die Coulombkraft unabhängig vom Abstand zwischen Ladung und Fläche. Die Coulombkraft F_C berechnet sich wie folgt: (10) (19)

$$F_{C1} = \frac{1}{2 \cdot \epsilon_0} \cdot q \cdot \frac{Q}{A} \quad (\text{Gleichung 3.2})$$

Sonderfall 2 - Eine Punktladung q befindet sich zwischen zwei Ebenen, die gleich große, jedoch entgegengesetzte Ladungen Q auf jedem Flächenstück A tragen. Die Coulombkraft ist in diesem Fall doppelt so groß wie in Sonderfall 1, da jeweils eine Platte die Ladung q anzieht, während sie von der anderen Platte mit gleicher Kraft abgestoßen wird. F_C beträgt in diesem Fall: (10) (19)

$$F_{C2} = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot q \cdot \frac{Q}{A} \quad (\text{Gleichung 3.3})$$

Die beiden Sonderfälle sind in Abbildung 3 grafisch veranschaulicht.

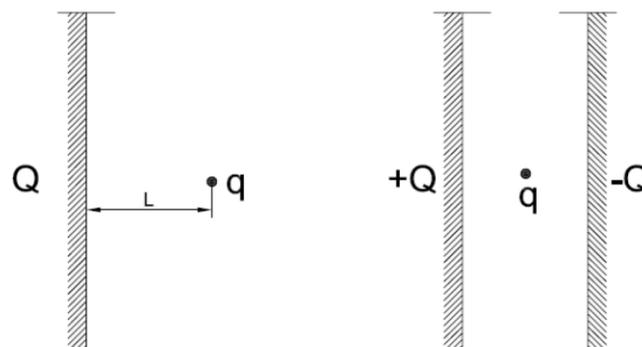


Abbildung 3: links – Punktladung q im Abstand L von einer ausgedehnten, elektrisch geladenen Fläche; rechts – Punktladung zwischen zwei gegensinnig, elektrisch geladenen Platten (10)

3.2. AUFLADEMECHANISMUS

In der technischen Elektrosortierung kommen drei unterschiedliche Auflademechanismen, nämlich - *Kontaktpolarisation*, *Aufladung im Koronafeld* und *Tribopolarisation* - zum Einsatz. Diese Mechanismen können in zwei übergeordnete Gruppen eingeteilt werden: (10) (22)

- a) Ladungserzeugung basierend auf der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit der Körner
- b) Erzeugung von Oberflächenladungen aufgrund von Unterschieden in der Aufladbarkeit durch Reibung bzw. Kontakt (22)

Im Rahmen dieser Dissertation wird der Mechanismus b), die sogenannte Tribopolarisation, behandelt, um das grundlegende Verständnis auf dem Gebiet der (gezielten) Erzeugung bzw. Beeinflussung von Oberflächenladungen zu erweitern.

3.2.1. TRIBOPOLARISATION

Der elektrostatische Auflademechanismus „Tribopolarisation“ wird für die Nichtleiter-/Nichtleiter-Trennung eingesetzt. Diese elektrostatische Aufladung von Oberflächen, umgesetzt durch Reibung der beteiligten Oberflächen aneinander, gehört zu den ältesten bekannten Phänomenen der Elektrizität. Nichts desto trotz ist die Erforschung der ihr zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien bis zum heutigen Tag noch nicht vollständig abgeschlossen. Eine weit verbreitete Lehrmeinung ist, dass die elektrostatische Aufladung von Oberflächen ein Resultat von Elektronenübergängen zwischen den sich berührenden Oberflächen ist, welches nur quantenmechanisch mit Hilfe des Tunneleffektes erklärt werden kann. Zwei Oberflächen, die in mechanischem Kontakt miteinander stehen, gleichen ihre elektrischen Oberflächenzustände durch Ladungsbewegung aus. Sie befinden sich am Ort der Berührung in einem Zustand gleichen Oberflächenpotentials, wobei der Ladungsfluss von demjenigen Kontaktpartner mit der geringeren Elektronenaustrittsarbeit zu jenem mit der höheren Elektronenaustrittsarbeit erfolgt, wodurch sich in weiterer Folge eine positive bzw. negative Oberflächenladung ergibt. (10) (19) (23) (24)

Die Intensität dieses Ladungsflusses hängt u.a. von der Größe der Kontaktfläche wie auch von Kontaktdauer, -frequenz und -stärke ab. Der Auflademechanismus wird in der technischen Anwendung durch heftigen Korn-/Korn-Kontakt und Korn-/Wand-Kontakt in Gang gesetzt. Dies geschieht meist in vorgeschalteten Aggregaten (mit Ausnahme der triboelektrostatischen Bandscheidung – Kapitel 3.4.2), die selbst nicht am Trennprozess beteiligt sind, wie zum Beispiel durch den Einsatz von Vibrorinnen, Trommel(-trocknern), Fließbett(-trocknern) oder Zyklonen. (10) (11) (19) (20) (25)

Bei der Tribopolarisation bietet sich die Möglichkeit der selektiven Veränderung der Oberflächenladung. Durch Oberflächenzustände können sich die Energiezustände der Oberfläche und dem Inneren des Kornes unterscheiden. Diese Beeinflussung kann beispielsweise durch physikalische Faktoren, wie

Rohguttemperatur, Temperatur und relative Luftfeuchte in der Sortierumgebung, oder auf dem chemischen Wege, ganz nach Vorbild des Flotationsprozesses, umgesetzt werden. (10) (11) (19) (25)

3.3. TRENNMODELLE

Bei der elektrostatischen Sortierung werden hauptsächlich zwei Trennmodelle angewandt, auf denen die technischen Ausführungen aufbauen. Diese werden im nachfolgenden Abschnitt kurz erläutert. In den meisten Fällen basieren die Elektroscheider auf dem Prinzip der Ablenksortierung, dabei wirkt das elektrische Feld quer zur Bewegungsrichtung der Körner und lenkt diese aus dem elektrischen Feld aus, die ausgelenkten Körner werden anschließend selektiv aufgefangen. (10)

3.3.1. FREIFALLSCHEIDER

Der elektrostatische Freifall- oder Plattenscheider wird für die Nichtleiter-/Nichtleiter-Trennung eingesetzt. Die nichtleitenden Körner werden in Aufladeeinheiten mittels Tribopolarisation gegensinnig aufgeladen, im Anschluss durchfallen sie von oben das elektrostatische Feld im Trennraum, welcher durch zwei Elektroden begrenzt ist. Die Aufladung der Körner wird häufig durch vorgeschaltete Trommeln oder Wirbelschichteinheiten realisiert. (10) (19)

Freifallscheider können in der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen in einem Korngrößenbereich von etwa 100 μm bis 3 mm betrieben werden. Diese Werte basieren auf der Abschätzung des Einflussverhältnisses zwischen Coulombkraft und Schwerkraft sowie Turbulenzeinflüssen in der Trennkammer. Genaue rohgutsspezifische untere bzw. obere Korngrenzen bedürfen jedoch einer experimentellen Ermittlung. (10) (19)

In Abbildung 4 ist das Trennmodell des elektrostatischen Freifallscheiders dargestellt.

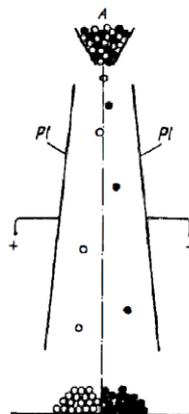


Abbildung 4: Trennmodell eines elektrostatischen Freifallscheiders (10)

3.3.2. TRIBOELEKTROSTATISCHER BANDSCHEIDER

Der triboelektrostatische Bandscheider wird ebenfalls für die Nichtleiter-/Nichtleiter-Trennung, allerdings in einem Korngrößenbereich $< 300 \mu\text{m}$ eingesetzt und daher auch als „dry flotation“ bezeichnet. Der grundlegende Unterschied zu herkömmlichen Elektroscheider-Trennmodellen liegt in der Systematik des Auflademechanismus. Beim Bandscheider findet die triboelektrostatische Aufladung und die Trennung in einem gemeinsamen Prozessraum, und zwar im Zwischenraum eines gegenseitig umlaufenden, perforierten Kunststoffbandes, statt. Das Aufgabegut gelangt von oben mittels einer Vibrorinne (im Labormaßstab) oder einer Förderschnecke (Pilot- und Industriemaßstab) in den Trennraum. Dieser ist von zwei gegenseitig geladenen Elektroden begrenzt. Zwischen den beiden Elektroden baut sich das elektrostatische Feld auf. Die Aufladung der Körner erfolgt durch Tribopolarisation, welche durch multiple Reibbeanspruchungen innerhalb des schnell umlaufenden Kunststoffbandes erzeugt wird. Durch das Kunststoffband erfolgt auch der Transport der Körner im und aus dem Trennraum. Die an den Elektroden haftenden Körner werden durch das Kunststoffband abgeschabt und mitgenommen, verlassen so das elektrostatische Feld und fallen je nach Ladung an der linken oder rechten Seite herab, wo sie aufgefangen werden. (26) (14) (27) (28)

In Abbildung 5 ist das Trennmodell des triboelektrostatischen Bandscheiders schematisch dargestellt.

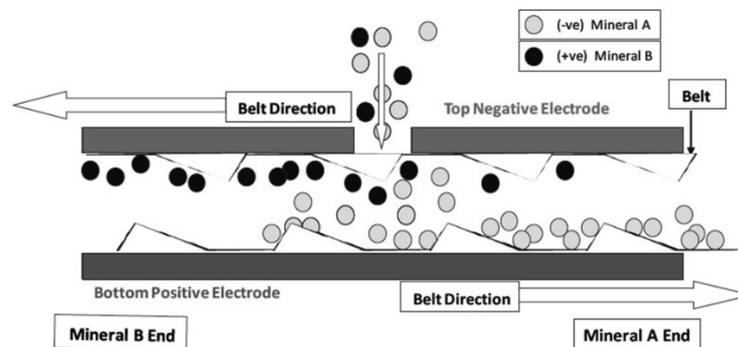


Abbildung 5: Trennmodell eines triboelektrostatischen Bandscheiders (26)

4. LADUNGSMESSUNG

4.1. MODELLE ZUR LADUNGSMESSUNG VON KORNGEMENGEN

Um die Ladung von Körnern bzw. Korngemengen quantitativ zu erfassen gibt es direkte und indirekte Methoden. Bei den indirekten Varianten wird zum einen aus der Bewegungsbahn der Körner auf deren Oberflächenladung rückgerechnet, zum anderen der Ladungstransfer zwischen den Körnern und der Oberfläche von beteiligten Aufladeaggregaten (z.B. Zyklonen) bestimmt und darauf auf die Kornladung geschlossen. Bei direkten Varianten wird ein Korngemenge mit bekannter Masse triboelektrostatisch aufgeladen und die Gesamtladung des Gemenges gemessen. (29) (30)

4.1.1. FARADAY CUP

Die Ladungsmessung im Faraday Cup (oder Faraday-Becher) ist die einfachste und aus diesem Grund auch die am häufigsten angewandte Methode. Sie zählt zu den direkten Methoden. Der Faraday Cup besteht aus zwei gegeneinander isolierten, konzentrisch angeordneten Metallzylindern. Der äußere Zylinder ist geerdet und dient zur Abschirmung von äußeren Ladungen. Der innere Zylinder ist an ein Elektrometer (oder Elektroskop) angeschlossen. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erzielen, muss das Elektrometer eine hohe Eingangsimpedanz haben und eine gute Isolierung des inneren Zylinders gewährleistet sein. Die Ladungsmessung basiert auf dem Influenzprinzip. Eine schematische Darstellung der direkten Ladungsmessung mittels Faraday Cup ist in Abbildung 6 ersichtlich. (30)

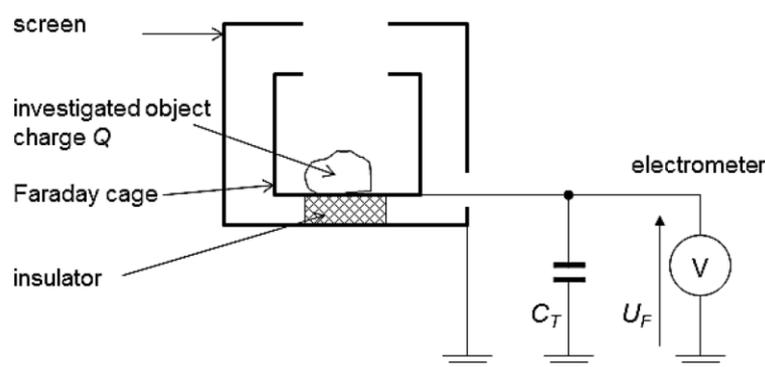


Abbildung 6: Schematische Darstellung der direkten Ladungsmessung mittels Faraday Cup (31)

Die Probe (Korngemenge) und dadurch eine bestimmte Ladung Q wird in den inneren (Mess-)Zylinder eingebracht. Dieser erzeugt eine gleich große, aber gegensinnige Influenzladung Q . Die quantitative

Erfassung der Ladungsmenge erfolgt mit einem Elektrometer nach dem Coulombmeter-Prinzip. Die zu messende Ladung wird mittels Koaxialkabel (meist in Form einer BNC-Steckfindung) an einen Kondensator mit definierter Kapazität C übertragen. Die am Kondensator anliegende Spannung U wird gemessen, auf die Ladung des eingebrachten Korngemenges kann laut Formel (4.1) rückgerechnet werden. (30)

$$Q = U * C \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

$Q [C] \dots$	<i>Ladung</i>
$U [V] \dots$	<i>Spannung</i>
$C [F] \dots$	<i>Kapazität</i>

Zur Ermittlung der masse- bzw. oberflächenspezifischen Ladung ist die Bestimmung von Masse und der spezifischen Oberfläche des gesamten analysierten Korngemenges notwendig. Dabei soll eine Oberflächenmessmethode zum Einsatz gelangen, bei welcher keine Bestimmung der inneren Oberfläche erfolgt, da sich die mittels Tribopolarisation erzeugte Oberflächenladung ausschließlich auf der äußeren Kornoberfläche zeigt. Aus diesem Grund scheidet in diesem Fall die Oberflächenmessung durch Gasadsorption nach *Brunauer Emmett & Teller* aus. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche wäre in diesem Fall eine auf dem Durchströmungswiderstand des Korngemenges basierende, wie z.B. die *Oberflächenmessung nach Blaine*. (32) (33)

Die masse- (q_m) und oberflächenspezifische (q_s) Ladung errechnen sich wie folgt:

$$q_m = \frac{U * C}{m} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

$$q_s = \frac{U * C}{\frac{s}{m}} \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

$q_m [C/g] \dots$	<i>massespezifische Oberflächenladung</i>
$q_s [C/m^2] \dots$	<i>oberflächenspezifische Ladung</i>
$m [kg] \dots$	<i>Masse</i>
$s [m^2] \dots$	<i>Oberfläche</i>

4.1.2. MESSUNG IN ROHRSTRÖMUNGEN

Die Messung von Ladungen in Rohrströmungen kann durch eine modifizierte Anwendung des Konzepts eines Faraday Cup realisiert werden. Sie zählt zu den indirekten Methoden. Beschrieben wird in diesem Fall die Änderung der Ladung Δq der Körner bei der Durchströmung eines Metallrohres mit der Länge Δx , wie in Gleichung (4.4) dargestellt. (34)

$$\frac{I}{m_p} = \Delta q = q(x + \Delta x) - q(x) = (q_0 - q_\infty)(e^{-Kn(x)})(1 - e^{-Kn(\Delta x)}) \quad (\text{Gleichung 4.4})$$

m_p [kg/h] ...	<i>Massenstrom</i>
q_0, q_∞ [C] ...	<i>Ladung der Körner bei $x = 0$ und $x = \infty$</i>
$n_{(\Delta x)}$ [-] ...	<i>Anzahl der Kornkontakte mit der Rohrwand</i>
K [-] ...	<i>Konstante</i>

Das von Körnern durchströmte Rohr muss elektrisch isoliert und geerdet werden, um ein Abfließen der an die Rohrwand übertragenen Ladungen zu ermöglichen. Die pro Zeiteinheit übertragene Ladungsmenge kann über die Messung des Stroms I quantifiziert werden. Ist der Massestrom bekannt, kann dadurch die massespezifische Kornladung q_∞ nach Gleichung (4.4) berechnet werden. (35)

Die quantitative Erfassung der Ströme erfolgt ähnlich wie bei Messaufbau des Faraday Cups, unter Zuhilfenahme eines Elektroskops, über die Spannungsmessung an einem Kondensator mit bekannter Kapazität.

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit der berührungslosen Ladungsmessung in Rohrströmungen nach *Gajewski J.B.* auf Basis des Influenzprinzips. Bei der Bewegung von geladenen Körnern durch einen Metallring bekannter Geometrie, der an der Außenseite eines nichtleitenden Rohres angebracht ist, wird durch das elektrische Feld der sich bewegenden Ladungsträger eine Influenzladung Q im Metallring aufgebaut, welche wiederum mittels Nanocoulombmeter gemessen werden kann. Bei bekannter Geschwindigkeit der Ladungsträger kann von der Influenzladung auf die Kornladung geschlossen werden. (36)

4.1.3. AUFFÄCHERUNG IM ELEKTROSTATISCHEN FELD

Bewegen sich Ladungsträger durch ein elektrostatisches Feld, so werden diese durch die Coulombkraft F_c in Richtung des Feldes abgelenkt. Wirkt die Richtung der Coulombkraft entgegen der Gewichtskraft

F_g , erfolgt durch das Kräftegleichgewicht eine Auffächerung der Ladungsträger nach deren massespezifischer Ladung q_m . Für den Fall einer vertikalen Bewegung der Ladungsträger im freien Fall durch ein horizontal ausgerichtetes elektrostatisches Feld, kann das Kräftegleichgewicht unter Gültigkeit des Stokes-Gesetzes aufgestellt werden. In weiterer Folge kann durch die Messung der horizontalen v_x und vertikalen v_y Geschwindigkeitskomponente – und zwar bei bekannter elektrischer Feldstärke E , Feststoffdichte ρ_s und dynamischer Viskosität des Gases η – der Äquivalentdurchmesser des Ladungsträgers $d_{\text{äqui}}$ und die Ladung Q berechnet werden, wie in den nachfolgenden Gleichungen (4.6) bis (4.13) beschrieben. Bei dieser Berechnung gilt die Annahme eines homogenen elektrostatischen Feldes und keine Beeinflussung der Ladungsträgerbewegung durch Luftströmungen. (37)

$$F_g = \frac{1}{6} d^3 * \pi * \rho_s * g \quad (\text{Gleichung 4.6})$$

$$F_{el} = Q * E = \sigma * d^2 \pi * E \quad (\text{Gleichung 4.7})$$

$$F_d = 3 * \pi * \eta * d * v \quad (\text{Gleichung 4.8})$$

g [m/s ²] ...	<i>Erdbeschleunigung</i>
E [V/m] ...	<i>elektrostatische Feldstärke</i>
Q [C] ...	<i>Kornladung</i>
σ [As/m ²] ...	<i>Oberflächenladungsdichte</i>
η [Pa·s] ...	<i>dynamische Viskosität</i>
v [m/s] ...	<i>Ladungsträger-Geschwindigkeit</i>
m [kg] ...	<i>Ladungsträger-Masse</i>

Im nächsten Schritt der Berechnung kann das Kräftegleichgewicht in horizontale und vertikale Richtung aufgestellt werden: (37)

$$F_{el} + F_{d,x} = 0 \rightarrow Q * E + 3 * \pi * \eta * d * v_x = 0 \quad (\text{Gleichung 4.9})$$

$$F_g + F_{d,y} = 0 \rightarrow m * g + 3 * \pi * \eta * d * v_y = 0 \quad (\text{Gleichung 4.10})$$

Durch Umformen der Gleichungen kann die horizontale Ablenkgeschwindigkeit v_x und die stationäre Sinkgeschwindigkeit v_y eines Ladungsträgers im elektrostatischen Feld und in weiterer Folge der Ablenkwinkel aus der vertikalen Flugbahn berechnet werden: (37)

$$v_x = \frac{Q \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d} \quad (\text{Gleichung 4.11})$$

$$v_y = \frac{m \cdot g}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d} \quad (\text{Gleichung 4.12})$$

$$\tan(\alpha) = \frac{v_x}{v_y} = \frac{Q \cdot E}{m \cdot g} \quad (\text{Gleichung 4.13})$$

Eine weitere Variante zur Ladungsmessung bietet die Auffächerung von Ladungsträgern im elektrostatischen Feld mit anschließendem Auffangen dieser Ladungsträger. Das Messprinzip ähnelt dem vorab beschriebenen. Die Ermittlung der Kornladung erfolgt über die Berechnung der horizontalen Ablenkung aus der Bewegungsgleichung. Die Fallhöhe und die Größe des elektrostatischen Feldes sind in diesem Fall bekannt. Die Berechnung wird in den Gleichungen (4.14) bis (4.18) gezeigt. (11) (37)

$$F_{el} = m \cdot \frac{dx''}{dt''} = Q \cdot E \quad (\text{Gleichung 4.14})$$

$$F_g = m \cdot \frac{dy''}{dt''} = m \cdot g \quad (\text{Gleichung 4.15})$$

Zur Vereinfachung der Bewegungsgleichung wird die Annahme getroffen, dass die horizontale v_x und vertikale v_y Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Eintretens in das elektrostatische Feld gleich *Null* sind. (37)

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q \cdot E}{m} \cdot t^2 \quad (\text{Gleichung 4.16})$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (\text{Gleichung 4.17})$$

Aus Gleichung (4.16) und (4.17) kann so in weiterer Folge die massespezifische Ladung berechnet werden: (37)

$$q_m = \frac{Q}{m} = \frac{x \cdot g}{y \cdot E} \quad (\text{Gleichung 4.18})$$

4.1.4. LADUNGSMESSUNG IM PNEUMATISCHEN ZYKLON

Der experimentelle Aufbau zur Ladungsmessung in einem pneumatischen Zyklon (nach Ireland und Jameson) ist in Abbildung 7 dargestellt. (38)

Der Zyklon besteht aus einem zylindrischen (nicht konischen), gegen äußere Ladungseinflüsse isolierten Stahlrohr, welches vor jeder Messung geerdet wird. Der obere Teil des Zyklons wird durch ein Fenster begrenzt, über welchem eine Highspeed-Kamera installiert ist, um zusätzlich Informationen über die Kornbewegung im Zyklon zu erhalten. Das Einlassrohr für den Gasstrom und die Körner befindet sich tangential zum Zyklon, an seinem oberen Ende. Mit der Zykloninnenwand ist ein Elektroskop verbunden, welche den Ladungsfluss über die Zyklonwand detektiert. Um aus dem gemessenen Wert die Oberflächenladung des Korngemenges zu berechnen, muss lediglich das Vorzeichen umgekehrt werden. (39)

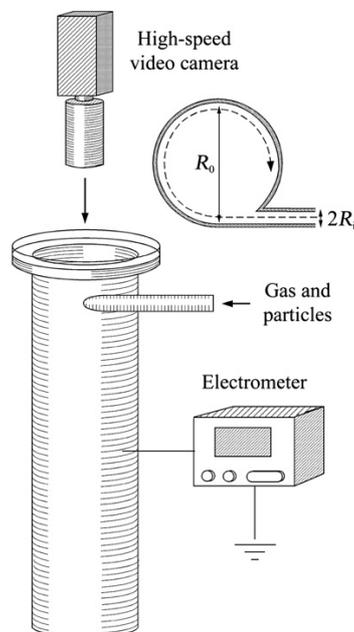


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Ladungsbestimmung in einem pneumatischen Zyklon (38)

5. GRUNDLAGEN DER WIRBELSCHICHTTECHNIK

Die Wirbelschichttechnik wurde 1922 von Fritz Winkler entwickelt und erstmals 1926 großtechnisch im Bereich der Kohlevergasung eingesetzt. Seitdem hat sich die Wirbelschichttechnik in vielen anderen Bereichen der Technik etabliert und wird heutzutage für unterschiedlichste physikalische Prozesse – wie beispielweise beim Heizen, Trocknen, Kühlen oder Klassieren – und chemische Prozesse – wie beispielweise beim Verbrennen, Verkoken und Gasreinigen – eingesetzt. Der Begriff Wirbelschicht (auch als Fließbett bezeichnet) beschreibt den fluidisierten Zustand einer Kornschüttung. In diesem Zustand nimmt die Feststoffschüttung fluidähnliche Eigenschaften an, dies führt zu einer effizienten Wärmeübertragung und einem besseren Stoffaustausch zwischen Fluid und Feststoff. Eine Wirbelschicht entsteht durch einen aufwärtsgerichteten Fluidstrom (Gas, Flüssigkeit), welcher eine Kornschüttung durchströmt und ab einer bestimmten Durchströmungsgeschwindigkeit die Feststoffschüttung vom festen Zustand in eine Wirbelschicht überführt. (40) (41)

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wird die Wirbelschichttechnik angewandt, um den triboelektrostatischen Aufladeprozess in Gang zu setzen und in weiterer Folge gezielt, durch Variation der Strömungsgeschwindigkeiten und -verhältnisse zu beeinflussen. Des Weiteren soll eine homogene Konditionierung der Mineralphasenoberflächen im trockenen Zustand, durch die intensive Durchmischung der Körner während des Fluidisiervorganges, umgesetzt werden.

5.1. ZUSTANDSBEREICHE DER WIRBELSCHICHTTECHNIK

Das Grundprinzip der Wirbelschichttechnik ist, durch eine aufwärtsgerichtete Fluidströmung eine Aufwirbelung, die sogenannte Fluidisierung eines Korngemenges aus einer ruhenden Feststoffschüttung herbei zu führen. Die Ausbildung einer Wirbelschicht ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und dem daraus resultierenden Druckverlust Δp , was dem Differenzdruck oberhalb und unterhalb der Körnerschüttung entspricht. Auf Basis dieser Parameter kann in der Wirbelschichttechnik zwischen den Zuständen: *Festbett*, *Wirbelschicht (oder -bett)* und *pneumatische Förderung* unterschieden werden. In Abbildung 8 sind diese drei unterschiedlichen Zustände der Wirbelschicht grafisch dargestellt. (42) (43) (44)

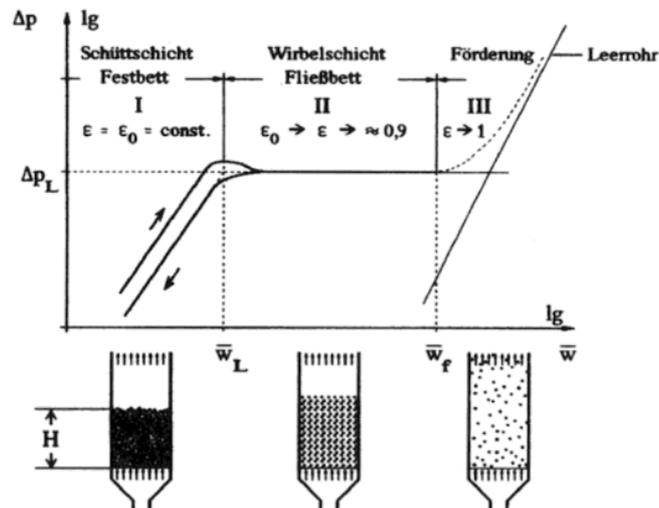


Abbildung 8 Druckverlustdiagramm einer homogenen fluidisierten Schicht (Leerrohrgeschwindigkeit auf der Abszisse, Druckverlust auf der Ordinate) (42)

Im Zustandsbereich *I - Festbett* befindet sich die Kornschtüttung in Ruhe, die Strömungsgeschwindigkeit ist nicht ausreichend, um eine Fluidisierung zu erreichen. Der Übergang vom *Festbett (I)* zur *Wirbelschicht (I)* wird durch den sogenannten *Lockerungspunkt* mit der zugehörigen Leerrohrgeschwindigkeit w_L charakterisiert. Ab diesem Punkt beginnen sich die Körner zunehmend gegeneinander zu bewegen und es bildet sich eine *Wirbelschicht* aus. Der Druckverlust im Zustandsbereich *II - Wirbelschicht* befindet sich im Gleichgewicht und bleibt über den gesamten Wirbelschichtbereich konstant, da ab dem Lockerungspunkt die Schüttung im aufgewirbelten Zustand vorliegt und die Ursprungsverfestigung bereits überwunden werden konnte. Bei weiterer Erhöhung der Leerrohrgeschwindigkeit erreicht das Wirbelbett den sogenannten *Wirbelpunkt* bei einer Leerrohrgeschwindigkeit von w_F . In diesem Punkt ist die durch den Fluidstrom erzeugte Auftriebskraft größer als die Summe aus Schwerkraft und Reibungskraft der Körner. Demzufolge kommt es zu einem pneumatischen Austrag der Körner und es erfolgt der Übergang in den Zustandsbereich *III - pneumatische Förderung*. (42) (43)

5.2. EINTEILUNG VON WIRBELSCHICHTEN

Die Einteilung von Wirbelschichten erfolgt nach dem Strömungsverhalten in der Wirbelschicht. Es wird zwischen vier Wirbelschichtarten unterschieden, und zwar in homogene, inhomogene, stoßende und turbulente Wirbelschichten. *Homogene Wirbelschichten* treten vor allem auf, wenn das Fluid eine Flüssigkeit ist. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die Feststoffschtüttung gleichmäßig mit

zunehmender Strömungsgeschwindigkeit expandiert und es dabei zu keiner Entmischung oder Klassierung des Feststoffes kommt (Abbildung 9b, c). *Inhomogene Wirbelschichten* bilden sich hauptsächlich in Gas-/Feststoff-Wirbelschichten aus, oder wenn sich in der im Wirbelschichtreaktor enthaltenen Körnerschüttung Klassier- bzw. Sortiereffekte ausbilden. Abhängig von der Durchströmungsgeschwindigkeit und der Blasenbildung erfolgt bei den *inhomogenen Wirbelschichten* eine weitere Unterteilung in *brodelnde* und *stoßende Wirbelschichten*. Bei *brodelnden Wirbelschichten* bilden sich ab einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit annähernd feststofffreie Gasblasen, welche beim Aufsteigen anwachsen und der Wirbelschicht einen brodelnden Charakter verleihen (Abbildung 9d). In engen und ausreichend hohen Behältern können sich die Blasen vereinigen und den gesamten Querschnitt ausfüllen. Dadurch wird der Feststoff periodisch gehoben und fällt wieder herunter. Dieses Verhalten wird als *stoßende Wirbelschicht* bezeichnet (Abbildung 9e). Ab einer bestimmten Leerrohrgeschwindigkeit (w_F) kommt es zu einem zunehmenden Feststoffaustrag. Die Grenze zwischen dem Bereich der Wirbelschicht und dem freien Gasraum verschwimmt und es kann keine Obergrenze der Wirbelschicht mehr festgestellt werden. Dieser Zustand wird als *turbulente Wirbelschicht* bezeichnet (Abbildung 9f). Um in diesem Zustand einen stationären Betrieb des Wirbelschichtreaktors aufrechtzuerhalten, wird mithilfe einer apparativen Einheit (z.B. Zyklon) der Feststoff vom Gas getrennt und wieder zurückgeführt. Diese Kombination wird oft als *zirkulierende Wirbelschicht* bezeichnet. (41) (42) (43)

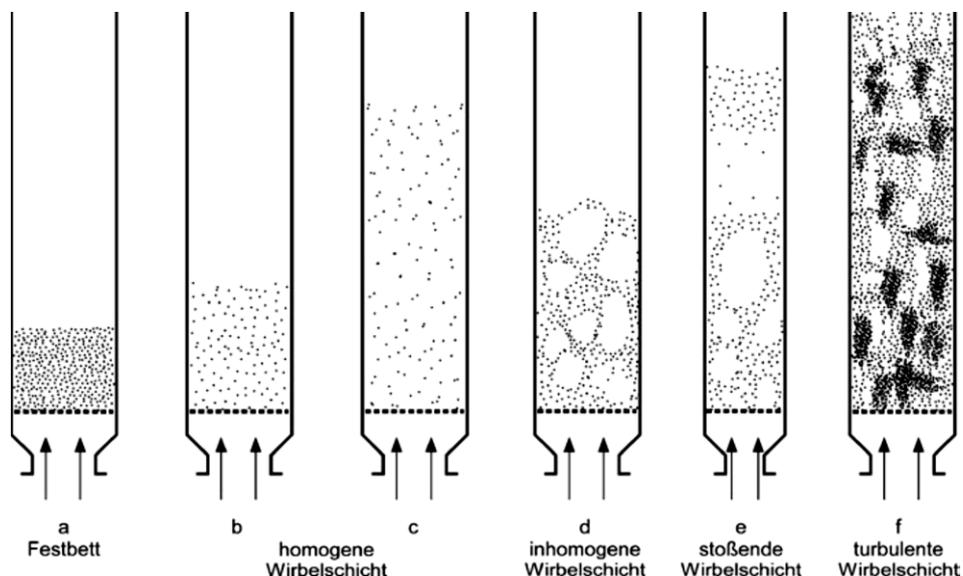


Abbildung 9 Charakteristische Strömungszustände in Wirbelschichten (41)

5.3. KENNGRÖSSEN DER WIRBELSCHICHTTECHNIK

Die Zustände in Wirbelschichten können durch drei wichtige Kenngrößen beschrieben werden, dazu zählen der Druckverlust, der Lockerungspunkt und der Austragspunkt. Diese Kenngrößen werden im folgenden Abschnitt kurz erläutert. Eine weitere Größe zur Beschreibung von polydispersen Korngemenge durch einen rechnerischen Ersatzdurchmesser ist der Sauterdurchmesser, welcher ebenfalls hier erklärt wird. (41)

5.3.1. DRUCKVERLUST

Der Druckverlust Δp entspricht dem Differenzdruck oberhalb und unterhalb der Körnerschüttung in der Wirbelschichtkammer. Er ergibt sich aus der um die Auftriebskraft verminderte Gewichtskraft bezogen auf die Querschnittsfläche der Wirbelkammer (41):

$$\Delta p = \frac{F_G - F_A}{A} = \frac{V_S(\rho_s - \rho_f) * g}{A} = H * (1 - \epsilon) * (\rho_s - \rho_f) * g \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

Δp [Pa] ...	<i>Druckverlust</i>
F_G [N] ...	<i>Gewichtskraft</i>
F_A [N] ...	<i>Auftriebskraft</i>
A [m ²] ...	<i>Querschnittsfläche der Wirbelkammer</i>
V_s [m ³] ...	<i>Volumen der Körnerschüttung</i>

Im Druckverlustdiagramm (Abbildung 8) ist der theoretisch ideale Druckverlustverlauf eines porösen Schüttgutes in einer Wirbelschicht dargestellt. Der Druckverlust wird in Abhängigkeit von der Leerrohrgeschwindigkeit (w_L) dargestellt. Bei laminarer Strömung steigt der Druckverlust Δp im Festbett proportional mit der Strömungsgeschwindigkeit an. Bei Erreichen des Lockerungspunktes wird durch die zunehmende Fluidisierung die Anfangsverfestigung zerstört und Δp fällt im Wirbelschichtbereich auf den Gleichgewichtswert Δp_L (Abbildung 8). Bei weiterer Erhöhung der Leerrohrgeschwindigkeit dehnt sich das Wirbelbett zwar aus, jedoch bleibt der Druckverlust über die gesamte Wirbelschicht unverändert, da das Lückenvolumen ϵ (Porosität) gleichermaßen ansteigt (Abbildung 10). (45)

Der Druckverlust kann in diesem Fall wie folgt berechnet werden:

$$\Delta p = H * (1 - \epsilon) * (\rho_s - \rho_f) * g \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

H [m] ...	<i>Höhe der Körnerschüttung</i>
ϵ [-] ...	<i>Porosität</i>

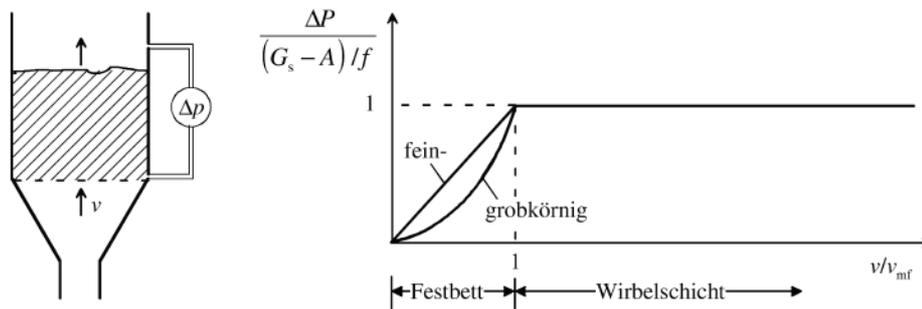


Abbildung 10 Darstellung des Druckverlustes im Festbett und in der Wirbelschicht (46)

Wenn die Anströmgeschwindigkeit die Sinkgeschwindigkeit der Körner überschreitet, kommt es zum pneumatischen Austrag. Die Porosität geht demnach gegen eins, der Druckverlust entspricht dem eines Leerrohres und steigt proportional zum Quadrat mit der Strömungsgeschwindigkeit an, was einer turbulenten Strömung entspricht. (41)

5.3.2. LOCKERUNGSPUNKT

Der Lockerungspunkt, auch als Minimalfluidisierung bezeichnet, wird durch die Lockerungsgeschwindigkeit v_L und den Druckverlust Δp definiert (Abbildung 8). Sie bildet den Übergangspunkt zwischen Festbett und der Ausbildung einer Wirbelschicht. In diesem Punkt ist die Gewichtskraft und der Reibungswiderstand der Körnerschüttung gleich der Auftriebskraft durch das Fluid. Im Lockerungspunkt gelten sowohl die Gesetze des ruhenden Festbetts als auch der fluidisierten Schicht. Das bedeutet, die Druckverluste der beiden Zustände dürfen gleichgesetzt werden. (41) (42)

Der Lockerungspunkt kann beispielsweise mithilfe der Ergun-Gleichung (benannt nach dem türkischen Chemieingenieur Sabri Ergun) berechnet werden: (41) (47)

$$\frac{\Delta p}{H} = 4,17 * a_p^2 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * \eta_g * v_L + 0,29 * a_p \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} * \rho_s * v_L^2 \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

Durch Gleichsetzen der Ergun-Gleichung (Gleichung 5.3) mit dem Druckverlust laut Gleichung 5.1 kann die Lockerungsgeschwindigkeit v_L durch Gleichung 5.4 beschrieben werden. Diese Gleichung basiert auf der Überlegung, dass sich der Wirbelpunkt genau auf der Grenze zwischen einer Schicht von ruhenden und fluidisierten Körnern befindet, weshalb in diesem Fall beide Gleichungen (5.1 und 5.3) gültig sind. (41)

$$v_l = 7,14 * (1 - \varepsilon_L) * v_f * a_p * \left\{ \sqrt{1 + 0,067 * \frac{\varepsilon_L^3}{(1 - \varepsilon_L)^2} * \frac{(\rho_s - \rho_f) * g}{\rho_f * v_f^2} * \frac{1}{a_p^3}} - 1 \right\} \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

Um die Lockerungsgeschwindigkeit grob abzuschätzen, kann diese auch durch einen empirischen Ansatz berechnet werden. (48)

$$v_l = \frac{\eta_f}{\rho_f * d_p} * \left(\sqrt{C_1^2 + C_2 * Ar} - C_1 \right) \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

Für die Konstanten C_1 und C_2 geben verschiedene Autoren unterschiedliche Werte an. Tabelle 1 zeigt beispielhaft Werte von Grace & Wen und Yu. (48)

Konstante:	C_1	C_2
Grace	27,2	0,0408
Wen & Yu	33,7	0,0408

Tabelle 1: Konstanten zur Berechnung der Lockerungsgeschwindigkeit nach Grace und Wen & Yu (48)

Des Weiteren wird für die Berechnung der Lockerungsgeschwindigkeit nach dem empirischen Ansatz die *Archimedes-Zahl* Ar benötigt. Die *Archimedes-Zahl* ist eine dimensionslose Kennzahl, welche das Verhältnis von Auftriebskraft und Trägheitskraft darstellt. (42)

$$Ar = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} * \frac{g * d_p^3}{v^2} \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

5.3.3. AUSTRAGSPUNKT

Der Austragspunkt ist der Übergangspunkt zwischen der Wirbelschicht und dem pneumatischen Austrag der Körner. An diesem Punkt überschreitet die Fluidgeschwindigkeit die freie Sinkgeschwindigkeit der Körner und ist durch die vom Korndurchmesser abhängige Austragsgeschwindigkeit gekennzeichnet (Abbildung 8). Die Austragsgeschwindigkeit stellt somit eine wichtige Kenngröße in der Wirbelschichttechnik dar, da diese den Arbeitsbereich des Wirbelschichtreaktors begrenzt und jene Grenzgeschwindigkeit definiert, bei welchem die Körner durch das strömende Fluid entgegen der Erdanziehung ausgetragen werden. Der Austragspunkt kann mithilfe der Schwebegeschwindigkeit u_s abgeschätzt werden. Dieser stellt ein Kräftegleichgewicht zwischen der um die Auftriebskraft verringerten Gewichtskraft und der durch die Strömung entstehenden

Widerstandskraft an einer idealen Kugel dar und ist jene Geschwindigkeit, bei der eine ideale Kugel aus der Wirbelschicht theoretisch ausgetragen wird. (49) (45)

$$u_s = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{d_p}{c_D} * \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}} \quad (\text{Gleichung 5.6})$$

Für die Berechnung der Schwebegeschwindigkeit muss vorab der Widerstandsbeiwert c_D ermittelt werden. Abhängig davon, ob das vorliegende Strömungsregime im turbulenten oder im laminaren Bereich liegt, kann c_D folgendermaßen berechnet werden: (45)

a) Laminarer Bereich: ($Re < 0,2$)

$$c_D = \frac{24}{Re} \quad (\text{Gleichung 5.7})$$

b) Turbulenter Bereich: ($Re > 1.000$)

$$c_D = 0,43 \quad (\text{Gleichung 5.8})$$

c) Übergangsbereich: ($0,2 < Re < 1.000$)

$$c_D = \frac{24}{\sqrt{Re}} + \frac{4}{Re} \quad (\text{Gleichung 5.9})$$

Die Reynolds-Zahl kann nach einem empirischen Ansatz berechnet werden. Die Konstanten C_1 und C_2 entsprechen jenen aus der in Abschnitt 5.3.2 gezeigten Tabelle 1. (45)

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 * Ar} - C_1 \quad (\text{Gleichung 5.10})$$

Bei der Berechnung der Schwebegeschwindigkeit durch die oben genannten Zusammenhänge ist zu beachten, dass diese nur für ein Einzelkorn bzw. für Monokorngemenge gilt. Bei polydispersen Korngemengen kann die um ein Vielfaches höher sein als die Schwebegeschwindigkeit und deswegen keine zuverlässige Aussage darüber geben, ab welcher Geschwindigkeit ein relevanter Austrag aus der Wirbelschicht erfolgt. Aus diesem Grund kann mithilfe der Schwebegeschwindigkeit die Austragsgeschwindigkeit nur grob abgeschätzt werden. Erst durch die Betrachtung des Wirbelschicht-Zustandsdiagramms nach Reh ist eine eindeutige Bestimmung möglich. (45)

5.3.4. SAUTERDURCHMESSER

Reale Korngemenge liegen üblicherweise nicht mit einheitlichen Korndurchmessern vor, aus diesem Grund ist es oftmals sinnvoller die vorliegende Korngrößenverteilung durch einen rechnerisch ermittelten Ersatzdurchmesser zu beschreiben. Dieser wird als *Sauterdurchmesser* bezeichnet und verkörpert den charakteristischen Korndurchmesser für ein gesamtes Korngemenge, mit welchem sich das gleiche Volumen und die gleiche spezifische Oberfläche, wie die ursprüngliche Kornverteilung ergeben. (41)

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{p_i}^3}{\sum_{i=1}^n a_{p_i}^2} \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

5.4. ZUSTANDSDIAGRAMM NACH REH

Mithilfe des Wirbelschicht-Zustandsdiagramms nach Reh, welches für durchströmte Körnerschüttungen anzuwenden ist, können für homogene und inhomogene Strömungszustände charakteristische Betriebsbereiche einer Wirbelschicht bestimmt werden. Das Zustandsdiagramm hilft dabei, die erforderliche Gasgeschwindigkeit zur Einstellung des gewünschten Betriebszustands in der Wirbelkammer abzuschätzen. Im Zustandsdiagramm nach Reh (Abbildung 11) wird die erweiterte Froude-Zahl Fr^* gegen die Reynolds-Zahl Re aufgetragen. Liegt eine Korngrößenverteilung vor, so soll für den charakteristischen Teilchendurchmesser d_p der Sauterdurchmesser d_{32} verwendet werden. Für die praktische Handhabung ist im Reh-Diagramm ein Hilfsliniennetz, bestehend aus der dimensionslosen Archimedeszahl Ar und der Ω -Zahl eingezeichnet, welches die Handhabung des Diagramms erleichtern soll. (42) (50)

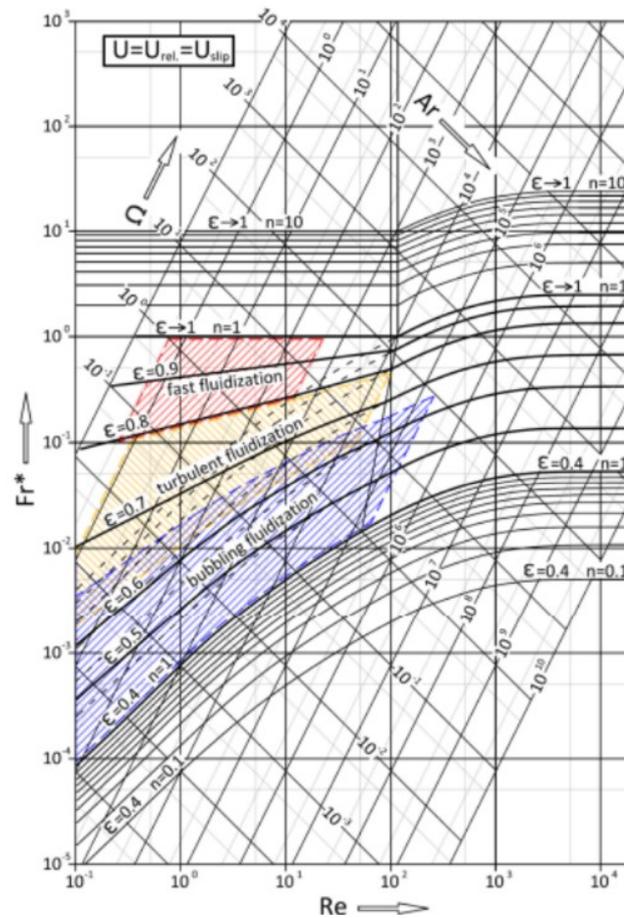


Abbildung 11 Zustandsdiagramm nach Reh (51)

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Porosität ϵ eines Korns oder auch Lückenvolumensanteil genannt. Die Porosität ist definiert als Verhältnis von Porenvolumen zu Gesamtvolumen (*Gleichung 5.11*) und liegt in einer Größenordnung zwischen 0 bis 1. Bei 0 besitzt der Festkörper keine Hohlräume, der Wert eins stellt einen feststofffreien Hohlraum dar. (52) (46)

$$\epsilon = \frac{V_Z}{V_G} \quad (\text{Gleichung 5.11})$$

ϵ [-] ... Porosität

V_Z [m³] ... Volumen das die Hohlräume im Korn einnehmen

V_G [m³] ... Gesamtvolumen des Korns

Die Porositätskurven $\varepsilon = 0,4$ und $\varepsilon \rightarrow 1$ bilden im Zustandsdiagramm nach Reh klare Grenzen zwischen den unterschiedlichen Zuständen in Wirbelschichten. Die Kurve $\varepsilon = 0,4$ gibt die Grenze zwischen Festbett und Wirbelbett an und wird als *Lockerungslinie* bezeichnet. Unterhalb dieser Linie ist die Körnerschüttung in Ruhe. Zwischen der Porosität von $\varepsilon = 0,4$ und $\varepsilon \rightarrow 1$ werden die Körner in Schwebelage gehalten und es liegt der Zustand einer Wirbelschicht vor. Über der Linie $\varepsilon \rightarrow 1$ kommt es zum Feststoffaustrag bzw. zur pneumatischen Förderung der Körner aus der Wirbelkammer. Bei homogener Fluidisierung sind die Lockerungslinie ($\varepsilon = 0,4$) und der Feststoffaustrag ($\varepsilon \rightarrow 1$) klar voneinander getrennt. Bei inhomogener Fluidisierung nimmt der Übergangsbereich bei abnehmender Archimedes-Zahl bzw. durch die kleiner werdenden Korndurchmesser zu. Im Übergangsbereich (zwischen der durchbrochenen und der durchgezogenen Linie bei $\varepsilon \rightarrow 1$) bilden sich zirkulierende Wirbelschichten aus. Oberhalb der vollständig durchgezogenen $\varepsilon \rightarrow 1$ -Linie kommt es zum pneumatischen Transport der Körner in einem Gas-/Feststoff-System. (42)

5.4.1. KENNZAHLEN IM ZUSTANDSDIAGRAMM NACH REH

Mithilfe des Zustandsdiagrammes nach Reh werden die Strömungszustände in homogenen und inhomogenen Wirbelschichten angegeben. Im Diagramm werden dimensionslose Kennzahlen aufgetragen. Jede dieser Kennzahlen repräsentiert einen Einflussfaktor auf den Strömungszustand in der Wirbelkammer. (52)

1. Die *Froude-Zahl* Fr ist eine dimensionslose Kennzahl, welche das Verhältnis von Trägheitskraft zu Schwerkraft darstellt und tritt bei der Beschreibung von Bewegungsvorgängen im Schwerfeld auf. (46)

$$Fr = \frac{v^2}{d_p * g} \quad (\text{Gleichung 5.12})$$

2. Die *erweiterte Froude-Zahl* Fr^* gibt bei allen Zweiphasenströmungen das Verhältnis von Trägheitskraft zu der um den Auftrieb verminderten Gewichtskraft an. (42)

$$Fr^* = \frac{3}{4} Fr * \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (\text{Gleichung 5.13})$$

3. Die *Reynolds-Zahl* Re ist eine dimensionslose Kennzahl, welche das Verhältnis von Trägheitskraft zu Zähigkeitskraft beschreibt. Sie gibt Auskunft darüber, ob es sich um eine laminare oder eine turbulente Strömung handelt und damit auch, welche Form das Strömungsprofil aufweist. (52)

$$Re \equiv \frac{v * d_p}{\nu} \quad (\text{Gleichung 5.14})$$

4. Die *Omega-Zahl* Ω und die *Archimedes-Zahl* Ar sind dimensionslose Kennzahlen aus der Strömungslehre. Mithilfe dieser zwei Parameter kann für die praktische Anwendung das Reh-Diagramm durch ein Hilfsliniennetz erweitert werden, bei dem die zwei Kenngrößen Korndurchmesser und Leerrohrfluidgeschwindigkeit unabhängig voneinander eingetragen werden können. Während die dimensionslose *Archimedes-Zahl* Ar neben den Stoffdaten des Fluid-/Feststoff-Systems nur den Korndurchmesser enthält und nicht die Leerrohrfluidgeschwindigkeit, ist es bei der *Omega-Zahl* Ω genau umgekehrt: Diese enthält neben den Stoffdaten des Fluid-/Feststoff-Systems nur die Leerrohrgeschwindigkeit und nicht den Korndurchmesser. (46)

$$\Omega = \frac{\rho_f \cdot v^3}{(\rho_s - \rho_f) \cdot v \cdot g} \quad (\text{Gleichung 5.15})$$

$$Ar = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \cdot \frac{g \cdot d_p^3}{v^2} \quad (\text{Gleichung 5.16})$$

5.5. FESTSTOFFVERHALTEN IN GAS-/FESTSTOFF-WIRBELSCHICHTEN

Das Verhalten von Gas-/Feststoff-Wirbelschichten wird maßgeblich von den Feststoffeigenschaften der Schüttgüter bestimmt. Feste Stoffe können aufgrund des unterschiedlichen Fluidisierungsverhaltens nach der von *Geldart D.* entwickelten Klassifikation in vier unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. Die Klassifikation von *Geldart D.* beruht auf experimentellen Messergebnissen, welche durch *Molerus O.* aufgrund physikalisch plausibler Erklärungen präzisiert wurden. Die charakteristischen Größen zur Einteilung der Schüttgüter sind der Korndurchmesser und die Dichtedifferenz zwischen den Feststoff und dem Fluid. In Abbildung 12 ist die Darstellung unterschiedlicher Typen von fluidisierten Feststoffen bei Umgebungsbedingungen nach Geldart D. ersichtlich.

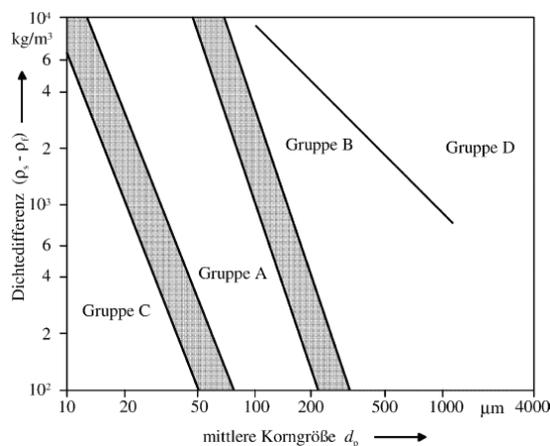


Abbildung 12 Darstellung unterschiedlicher Typen von fluidisierten Feststoffen bei Umgebungsbedingungen nach Geldart D. (53) (Grenzen nach Molerus O. (54))

Gruppe A: Zur Gruppe A gehören die meisten pulverförmigen Katalysatoren. Die Feststoffe haben eine Korngröße von 20-100 μm und eine relativ geringe Dichte von unter 1,4 kg/m^3 . Die Wirbelschicht expandiert oberhalb der Minimalfluidisierung zuerst homogen bis zum Zwei- bis Dreifachen der Schichtdicke, bevor eine Blasenbildung einsetzt. Ab einer bestimmten Wirbelbetthöhe stellt sich eine konstante Blasengröße ein. Bei Abschaltung der Fluidzufuhr kollabiert das Wirbelbett sehr langsam. (42) (46)

Gruppe B: Die Feststoffe haben eine Korngröße von 40-500 μm und eine Dichte von ca. 1,4-1,5 kg/m^3 . Bei Wirbelschichten der Gruppe B setzt die Blasenbildung unmittelbar nach dem Überschreiten der Minimalfluidisierung ein. Ein typisches Merkmal dieser Gruppe ist das Zusammenwachsen der Blasen durch Koaleszenz. Dadurch existiert keine maximale Blasengröße und bei ausreichend hoher Gasgeschwindigkeit kann es zur Ausbildung einer stoßenden Wirbelschicht kommen. Im Vergleich zur Gruppe A ist die Wirbelbettausdehnung gering und beim Abschalten der Fluidzufuhr kollabiert das Wirbelbett schlagartig. (42) (46)

Gruppe C: Zu dieser Gruppe gehören Schüttgüter mit ausgeprägt hoher Kohäsion. Die Körner sind mit einer Größe von 20-30 μm sehr fein und zeichnen sich durch eine hohe Kohäsion aus. Die Körner können sich nicht relativ zueinander bewegen, da die Haftkraft zwischen den Körnern größer ist als die vom Fluidisierungsgas ausgeübte Strömungskraft auf die Körner. Es kommt kaum zur Fluidisierung der Schüttung, stattdessen bilden sich Kanäle, durch die das Gas nach oben strömt, oder die Schicht wird als Ganzes angehoben. Die Berechnung des Druckverlustes ist nur begrenzt anwendbar, da es sich um kein poröses Schüttgut mehr handelt. Begrenzt fluidisieren lassen sich Schüttgüter der Gruppe C durch Zugabe von Fließhilfsmittel (z. B. Aerosil) oder mithilfe mechanischer Hilfsmittel (z. B. Rührer, Vibratoren). (42) (46)

Gruppe D: Zu dieser Gruppe gehören feste Stoffe mit einer Korngröße von $> 600 \mu\text{m}$ und einer hohen Dichte. Die Blasenbildung beginnt wie auch bei Schüttgütern der Gruppe B direkt nach dem Erreichen der Minimalfluidisierung. Für die Fluidisierung werden jedoch aufgrund der hohen Dichten vergleichsweise hohe Fluidgeschwindigkeiten benötigt. Die Geschwindigkeit der Gasblasen ist kleiner als die des Zwischenraumgases und es kommt zu einer Kurzschlussströmung des Gases in der Suspension. Weiters ist die Durchmischung der Körner relativ schlecht und beim Stopp der Fluidzufuhr kommt es zu einem schnellen Zusammenfall des Wirbelbettes. (42) (46)

6. STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG

Die statistische Versuchsplanung ist eine Weiterentwicklung klassischer Verfahren zur Versuchsplanung. Durch detaillierte Planung und gezielte Veränderung von Einflussgrößen, kann die Effizienz des Versuchsaufbaus gesteigert werden und die Anzahl der nötigen Versuche auf ein Minimum reduziert werden, wobei nur geringer Informationsverlust in Kauf genommen werden muss. Bei den durchgeführten Versuchen wird die Frage beantwortet, welche Wirkungsart und Wirkungshöhe die Einflussgrößen auf das Ergebnis, bzw. die vorab definierte Zielgröße, haben. Bei dieser Art der Versuchsplanung ist es notwendig, vorab einen kurzen Vergleich zur klassischen Versuchsplanung zu zeigen, den Faktorraum zu definieren und einige wichtige Grundbegriffe und Grundprinzipien, wie z.B. Effekt, Level, Wiederholung, Randomisierung (Zufallszuteilung), Blockbildung und Symmetrischer Aufbau zu beschreiben. (55) (15)

6.1. TRADITIONELLE VERSUCHSPLANUNG

Bei der traditionellen, oder klassischen Versuchsplanung wird eine Grundeinstellung für alle auf das zu untersuchende System wirkenden Einflussgrößen definiert. Diese Einflussgrößen werden als auch Faktoren bezeichnet. Bei der Versuchsdurchführung wird immer ein einziger dieser Faktoren verändert, die anderen konstant gehalten und die Auswirkung dieses Faktors auf das Gesamtsystem beurteilt. Danach wird dieser Faktor wieder auf die definierte Grundeinstellung zurückgestellt. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist, die dokumentierten Effekte direkt den veränderten Faktoren zuzuordnen. Der Startpunkt bzw. die Faktorgrundeinstellung ist dabei immer gleich. Alle Veränderungen von Faktoren sind damit auf diesen Punkt bezogen. Die Möglichkeit, dass bereits die Auswahl des Startpunktes einen Einfluss auf das Ergebnis ausübt, wird dabei völlig außer Acht gelassen. Dadurch hat solch ein traditioneller Versuchsaufbau bereits einen systematischen Fehler. Der zweite wesentliche Fehler ist die Annahme, dass der durch die Veränderung eines einzelnen Faktors erzielte Effekt unabhängig von den anderen, zu diesem Zeitpunkt unveränderten Einflussgrößen ist. (15) (56)

6.2. FAKTORRAUM

Der Faktorraum wird in Abbildung 13 anhand eines Beispiels erklärt, welches einen Versuchsplan darstellt, der drei Faktoren (bezeichnet mit A, B und C) enthält. Für jeden dieser drei Faktoren werden je zwei Faktoreinstellungen (hier: „-“ und „+“) gewählt. Diese Faktoreinstellungen werden in der statistischen Versuchsplanung als Levels bezeichnet. Der Faktorraum in diesem Beispiel kann in einem Koordinatensystem als Würfel dargestellt werden. Die Achsen bilden die Faktoren A, B und C. Der

Würfel entsteht durch die Verbindung der beiden Levels (hier: „-“ und „+“) der drei Faktoren. Die traditionelle Versuchsplanung geht bei jeder neuen Einstellung erneut vom Nullpunkt (A-/B-/C-) des Koordinatensystems aus. Alle Faktoren werden auf die Grundeinstellung eingestellt. Dann wird die erste Faktoreinstellung von „-“ auf „+“ verstellt und der dadurch erzielte Effekt dokumentiert. Im Anschluss wird dieser Faktor wieder auf den Nullpunkt zurückgestellt. Dieser Vorgang wird für die übrigen zwei Faktoren wiederholt. Die Veränderungen während der gesamten Versuchsserie finden ausschließlich entlang der Achsen des Würfels statt. Die anderen vier theoretisch möglichen Faktorkombinationen bleiben ungeachtet. (15) (56)

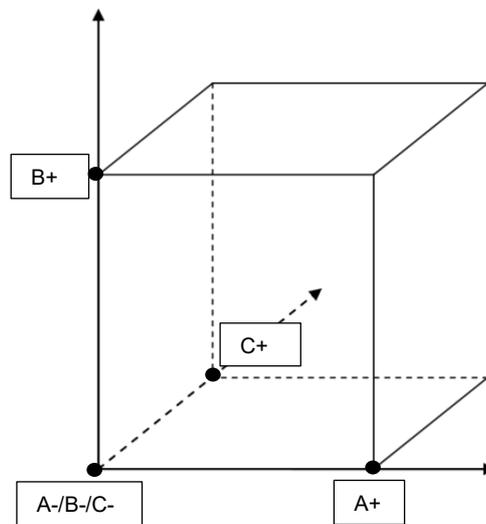


Abbildung 13: Faktorraum für drei Faktoren mit je zwei Levels (15)

6.3. STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG

Ein statistischer Versuchsplan ist nicht von den grundsätzlichen Fehlern eines herkömmlichen Versuchsplanes belastet. Bei einem Versuchsplan, der nach Grundprinzipien der statistischen Versuchsplanung aufgebaut ist, wird der gesamte Faktorraum gleichmäßig abgetastet. Dies erfordert die Wahl eines Ausgangspunktes, auf den sich die Variation der Faktoren bezieht. Es wird angenommen, dass die Wahl dieses Punktes keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Durch den statistischen Versuchsplan erfährt jeder Faktor mehrere Umstellvorgänge, die von unterschiedlichen Punkten aus, im Faktorraum starten. Entscheidend dabei ist die Konstruktion des Planes. Dieser muss orthogonal und ausgewogen sein. Orthogonal ist ein Versuchsplan immer dann, wenn die Einstellungsmuster aller Faktoren voneinander unabhängig sind. Ein Versuchsplan ist ausgewogen, wenn bei einem bestimmten Level des einen Faktors die unterschiedlichen Levels des anderen Faktors gleich oft vorkommen. (15)

6.4. GRUNDBEGRIFFE

Die statistische Versuchsplanung ist ein weltweit standardisiertes Werkzeug zur effizienten Versuchsplanung. Bei dieser Methode werden Grundbegriffe wie z.B. *Faktor*, *Effekt* und *Wechselwirkung* verwendet. In der statistischen Versuchsplanung besteht sozusagen ein gewisses „Basisvokabular“, welches für eine deutliche Kommunikation und das Verständnis der Vorgehensweise von Bedeutung ist. (15)

6.4.1. SYSTEM

Als System wird die „Konstruktion“, welche untersucht werden soll, bezeichnet. Hierbei ist es notwendig, die Grenzen des Systems klar zu definieren. Bei der Wahl der Systemgrenzen ist es wichtig, zu entscheiden, wie eng es abgegrenzt werden soll, damit nicht zu viele Parameter ungenutzt bleiben. Von den Parametern, die im System verbleiben, wird das Optimum gesucht. Die übrigen Größen können in der Praxis variieren. Das System muss trotz der Variation der äußeren Einflüsse stabil bleiben. Für einen Versuchsaufbau ist es von Vorteil, diese Einflüsse, soweit möglich, konstant zu halten. (15)

6.4.2. QUALITÄTSMERKMALE

Qualitätsmerkmale müssen kontinuierliche Größen sein, damit Effekte, die von diesen Merkmalen hervorgerufen werden, berechnet werden können. Als Qualitätsmerkmal werden Ergebnisse herangezogen, wie zum Beispiel der Wertstoffgehalt. Dadurch kann die Veränderung des Systems eindeutig beurteilt werden. In der Praxis müssen häufig mehrere Qualitätsmerkmale für die Beurteilung herangezogen werden. (15)

6.4.3. PARAMETER & FAKTOREN

Die Gesamtheit aller theoretisch möglichen Eingangsgrößen bilden die Parameter. Zu Beginn der Versuchsplanung ist eine vollständige Parameterliste zu erstellen. Parameter, welche in den Versuchsplan aufgenommen werden, werden als Faktoren bezeichnet. Alle Faktoren müssen genau und reproduzierbar einstellbar sein. (15)

6.4.4. LEVEL

Die aus der Parameterliste ausgewählten Faktoren werden auf die sogenannten Level eingestellt. Es werden mindestens zwei Level benötigt. Diese müssen einen ausreichend großen Abstand zueinander haben, um einen deutlichen Effekt zu erzielen. Kleine Unterschiede haben in der Regel kleine Effekte zur Folge. Die Festlegung der Level beruht auf für das System sinnvollen, physikalischen Grundlagen. (15)

6.4.5. EFFEKT

Der Effekt beschreibt die Wirkung eines Faktors auf das System. Er ist die Differenz der beiden Mittelwerte, der Beurteilungsgröße, die auf zwei unterschiedlichen Level ermittelt wurden. Durch den Effekt wird die mittlere Änderung eines Qualitätsmerkmals bei der Variation der Level eines Faktors ermittelt. Der Effekt hat dadurch Stabilität gegenüber möglichen Versuchsstreuungen. Effekte, die direkt durch Faktoren hervorgerufen werden, werden als Haupteffekte bezeichnet. (15)

6.4.6. WECHSELWIRKUNG

Wenn der Effekt eines Faktors von der Veränderung eines anderen Faktors beeinflusst wird, spricht man von einer Wechselwirkung. Wechselwirkungen treten in der Praxis sehr häufig auf. Die auf diesem Wege hervorgerufenen Effekte werden als Nebeneffekte bezeichnet. (15)

6.5. GRUNDPRINZIPIEN

Die statistische Versuchsplanung beruht auf drei Grundprinzipien, welche jeder statistische Versuchsplan erfüllen muss. Diese sind Randomisierung, Wiederholung und Blockbildung. (56)

6.5.1. RANDOMISIERUNG

Für die Versuchsreihenfolge darf es keine Systematik geben. Dies soll Schutz vor zeitabhängigen Einflüssen, wie Temperaturschwankungen, bieten. Die Reihenfolge wird bereits bei der Erstellung eines Versuchsplans, oftmals unter Zuhilfenahme eines Zufallsgenerators, festgelegt. Die Versuchsreihenfolge kann also nicht vom Durchführenden bestimmt werden. (56)

6.5.2. WIEDERHOLUNG

Die Wiederholung von Messvorgängen ist allgemein üblich, um die Einzelergebnisse statistisch abzusichern. Durch eine größere Anzahl von Einzelmessungen erfolgt eine Annäherung an den wahren Wert des Messwertes und dadurch eine verbesserte Genauigkeit erzielt. Die Berechnung der Streuung gibt Aufschluss über die Zuverlässigkeit einer Messung. Um die Streuung der Versuchsergebnisse zu überprüfen, muss der gesamte Versuch wiederholt werden. Ansonsten wird nur die Streuung des Messsystems ermittelt. Das bedeutet, dass im Zuge eines Versuchsprogramms der gleiche Versuch mehrmals durchgeführt wird und auch die Faktoren jedes Mal neu eingestellt werden. (56)

6.5.3. BLOCKBILDUNG

Manche Störgrößen sind zwar bekannt, können aber nicht vollständig eliminiert werden. Durch die Bildung von Blöcken soll der Einfluss dieser bekannten Störgrößen verringert werden. Zur Veranschaulichung der Notwendigkeit dieser Blockbildung wird hier ein kurzes Gedankenexperiment aus der Agrikultur angeführt: Ein Landwirt will auf seinem Feld zwei Sorten Weizen mit zwei unterschiedlichen Düngern testen. Das verfügbare Feld wird in vier 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, werden die Ergebnisse in diesem Bereich davon beeinflusst. Dieser Effekt kann berücksichtigt werden, indem zuerst das Feld nach den äußeren Gegebenheiten in Abschnitte unterteilt und dann in jedem Abschnitt alle vier Kombinationen getrennt voneinander untersucht wird. So kann der Versuch unabhängig vom Einfluss des Schattens durchgeführt werden. Des Weiteren erhält der Landwirt die Zusatzinformation über den Einfluss von Schatten und Sonne in den Abschnitten. Der Nachteil in diesem Beispiel ist jedoch der steigende Aufwand für Aussaat und Auswertung. Dieser Tatsache wird durch die Erstellung sogenannter teilfaktorielles Versuchspläne abgeholfen werden, welche im folgenden Abschnitt genauer erläutert werden. (15) (56) (57)

6.6. TEILFAKTORIELLE VERSUCHSPLÄNE

Grundsätzlich werden viele unterschiedliche Varianten von statistischen Versuchsplänen in der Praxis eingesetzt. Im Zuge dieser Arbeit wurden vollfaktorielles und teilfaktorielles Versuchspläne verwendet.

Die sogenannten teilfaktorielles Versuchspläne sind ein wichtiger und eigenständiger Teil der statistischen Versuchsplanung. Mit dieser Art von Versuchsplänen kann mit vertretbarem Aufwand und statistischer Sicherheit eine große Anzahl an Faktoren untersucht werden. Teilfaktorielles Versuchspläne stoßen aber bei der Analyse von nicht linearen Zusammenhängen an ihre Grenzen. Sie können nicht

lineare Zusammenhänge zwar erkennen, aber nur unzureichend beschreiben. Um einen nicht linearen Zusammenhang ausreichend zu beschreiben, wird der Versuchsaufwand in diesem Fall sehr groß. Zur Untersuchung nicht linearer Zusammenhänge werden vorzugsweise andere Typen von statistischen Versuchsplänen (z.B. Monte-Carlo-Verfahren oder Central-Composite-Design) eingesetzt. (15) (57)

6.6.1. AUFBAU EINES VOLLFAKTORIELLEN VERSUCHSPLANS

Bei den vollfaktoriellen Versuchsplänen werden alle theoretisch möglichen Faktorkombinationen tatsächlich eingestellt. Dabei werden die Faktoren auf zwei Level verändert. Die Bezeichnung dieser Level erfolgt mit „+“ und „-“ bezeichnet. Um die Effekte von z.B. drei Faktoren und den Nebeneffekt aus deren Wechselwirkungen zwischen einander zu überprüfen, sind acht Versuchsdurchgänge nötig. Die Wechselwirkungen errechnen sich durch Multiplikation der Faktorspalten. Dieses Versuchsmodell wird als Typ „2³“ bezeichnet. Die drei veränderlichen Faktoren werden mit A, B und C bezeichnet. Die Anzahl der Versuche ergibt sich aus der Zahl der Level und der Zahl der Faktoren: (15)

$$\text{Versuchsanzahl} = \text{Zahl Level}^{\text{Zahl Faktoren}} \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

Tabelle 2 veranschaulicht einen solchen Versuchsaufbau, mit den tatsächlich durchgeführten Faktoreinstellungen. (15)

Versuch Nr.	A	B	C
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Tabelle 2: Vollfaktorieller Versuchsplan vom Typ „2³“ (15)

In Tabelle 3 sind die Faktoreinstellungen und die aus deren Multiplikation miteinander gebildeten Wechselwirkungen zusammengefasst. Die Multiplikation der Einstellung „+“ vom Faktor A und der Einstellung „+“ des Faktors B ergibt wiederum „+“ für die Wechselwirkung AB. (15)

Versuch Nr.	Einstellungen				Wechselwirkungen		
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	-	-	+	+
5	-	+	+	-	-	+	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	-	-	+	+	-	-	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Tabelle 3: Vollfaktorieller Versuchsplan vom Typ „2³“ mit Wechselwirkungen (15)

Teilfaktorielle Versuchspläne haben den Zweck, die Anzahl der benötigten Versuche zu reduzieren, aber auch den Informationsverlust so gering wie möglich zu halten. Ein Optimum zwischen Aufwand und Informationsgewinn muss geschaffen werden. Das ist durch den speziellen Aufbau dieser Art von Versuchsplänen möglich. (15) (57)

6.6.2. ENTWICKLUNG EINES TEILFAKTORIELLEN VERSUCHSPLANS AUS EINEM VOLLFAKTORPLAN

Theoretisch kann eine Dreifachwechselwirkung zwischen A, B und C berechnet werden, da es in realen Systemen normalerweise keine so komplexen Zusammenhänge zwischen einzelnen Faktoren gibt. Bei Verzicht auf die Informationen aus der Berechnung der Dreifachwechselwirkung kann durch Multiplikation der drei Faktorspalten (A, B, C) die Einstellungsvorschrift für einen vierten Faktor berechnet werden. 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 neuen Faktor verwendet werden darf, ohne statistische Gesetze der Versuchspläne zu verletzen. In Tabelle 4 ist ein Versuchsplan dargestellt, bei dem die Dreifachwechselwirkung für die Einstellung eines neuen Faktors verwendet wird. Diese Art Versuchsplan wird als Typ „2⁴⁻¹“ bezeichnet. (15) (57)

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

Tabelle 4: Teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁴⁻¹“ (15)

Die Dreifachwechselwirkung (ABC) entspricht der Einstellung für den zusätzlichen Faktor D. Mit acht Versuchen können nun vier Faktoren überprüft werden. Um die neu entstandenen Wechselwirkungen durch den Faktor D berechnen zu können, werden erneut die Wechselwirkungsspalten mittels Multiplikation erstellt. Durch die Berechnung der Wechselwirkungen ist ersichtlich, dass sich die Spalten teilweise gleichen. Die Haupteffekte (A, B, C, D) sind immer mit den Dreifachwechselwirkungen vermengt, die Zweifachwechselwirkungen sind untereinander vermengt. Die Ergebnisse von gleichen Spalten können nicht mehr unterschieden werden, daher ist nicht mehr möglich, einen Effekt genau dem „Verursacher“ zuzuordnen. Da in realen Systemen jedoch keine so komplexen Zusammenhänge wie Dreifachwechselwirkungen existieren, können die Haupteffekte zuverlässig bestimmt werden. Informationen über die Zweifachwechselwirkungen gehen verloren, da sich die Spalten exakt gleichen. Dadurch kann nicht mehr zugeordnet werden, von welcher Zweifachwechselwirkung die Auswirkung auf das System ausgeht. (15) (57)

6.6.3. TEILFAKTORIELLER VERSUCHSPLAN ZUR ÜBERPRÜFUNG VON FÜNF FAKTOREN

Diese Art von teilfaktoriellen Versuchsplänen ist eine der in der Praxis am häufigsten verwendeten Varianten. Zur Überprüfung von fünf Faktoren mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan (Typ „2⁵“) sind insgesamt 32 Versuche notwendig. Bei der Nutzung eines teilfaktoriellen Versuchsplans sind hierfür nur noch 16 Versuche auszuführen. Ein solcher Versuchsplan wird als Typ „2⁵⁻¹“ bezeichnet. Die Faktoren werden mit A, B, C, D und E bezeichnet. Hierbei werden 50 % aller theoretisch möglichen Kombinationen tatsächlich umgesetzt. Die Erstellung des Versuchsplans erfolgt wie im vorigen

Abschnitt (6.6.2) beschrieben. Es können alle Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen berechnet werden, die statistische Sicherheit ist ebenfalls gegeben. Die Haupteffekte sind mit den Vierfachwechselwirkungen, die Zweifachwechselwirkungen mit Dreifachwechselwirkungen vermengt, aber untereinander völlig getrennt. Dies ist der große Vorteil dieses Versuchsplans, da in der Realität üblicherweise nur Haupteffekte und Zweifachwechselwirkungen vorkommen und diese untereinander nicht vermengt sind. Jeder einzelne Faktor wird achtmal auf dem Level „+“ und achtmal auf dem Level „-“ getestet. Die Variation von fünf unterschiedlichen Faktoren bietet in der Praxis in den meisten Fällen einen ausreichenden Raum für die Untersuchung der wichtigsten Einflussgrößen. Dabei bleibt der Gesamtaufwand für die Versuchsdurchführung in einem praktikablen Rahmen. (15)

Versuch Nr.	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
1	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
2	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+
3	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
4	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-
5	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
6	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-
7	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+
9	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-
10	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
11	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
12	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
13	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+
14	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-
15	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-
16	+	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 5: Teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁵⁻¹“ mit Haupteffekten und Nebeneffekten

6.6.4. BENENNUNG VON TEILFAKTORIELLEN VERSUCHSPLÄNEN

Für die Benennung von teilfaktoriellen Versuchspläne gibt es keine Norm. Die folgende Variante ist jedoch weit verbreitet:

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

Die Anzahl der Level X gibt an, auf wie viele Werte die Faktoren eingestellt werden. Die Reduktionsstufe Z zeigt an, wie viele Faktoren keine eigene Einstellungsvorschrift besitzen, sondern aus der Berechnung von Wechselwirkungen stammen. Berechnet man „ X^{Y-Z} “, erhält man die Anzahl der Versuche. (15)

6.7. AUSWERTUNG

Für die Auswertung solche Pläne bieten sich zwei Methoden an. Einerseits kann diese über die Bewertung der Mittelwerte auf den unterschiedlichen Levels erfolgen, andererseits kann eine Varianzanalyse durchgeführt. (58)

6.7.1. AUSWERTUNG ANHAND DER MITTELWERTE

Zu Beginn wird jeweils der Mittelwert von den Beurteilungsmerkmalen aller Versuche mit derselben Level Einstellung, bezogen auf die einzelnen Faktoren, gebildet. Dadurch kann der Einfluss des Faktors auf das Trennergebnis festgestellt werden. Von den beiden Mittelwerten bei Einstellung „+“ und „-“ wird die Differenz gebildet, was eine Aussage über die Größe des Einflusses des jeweiligen Faktors ermöglicht.

6.7.2. AUSWERTUNG MITTELS VARIANZANALYSE

Mithilfe einer Varianzanalyse wird der Einfluss von Faktoren auf ein beobachtetes Qualitätsmerkmal untersucht. Im einfachsten Fall ist die Varianzanalyse der Vergleich zweier Mittelwerte. Mit mehreren Stichproben wird eine Nullhypothese H_0 aufgestellt. Unterscheiden sich die verglichenen Mittelwerte auf dem gewählten Signifikanzniveau α , gilt die Nullhypothese als abgelehnt und der Faktor hat einen relevanten Einfluss auf das Trennergebnis. (58)

Experimenteller Teil**7. DAS VERSUCHSAGGREGAT - DER TRIBOELEKTROSTATISCHE BANDSCHEIDER**

Die Versuche zur triboelektrostatischen Sortierung im Feinkornbereich wurden mithilfe eines ST Bandscheiders der Type „X2“ (Abbildung 14) durchgeführt, welcher für die Nichtleiter-/Nichtleiter-Trennung im Korngrößenbereich $< 300 \mu\text{m}$ eingesetzt wird.

Die Anwendung der Elektroscheidung in der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe war vor der bahnbrechenden Entwicklung des triboelektrostatischen Bandscheiders auf eine Feinheit von ca. $100 \mu\text{m}$ nach unten begrenzt. (59) (60) Der grundlegende Unterschied zu herkömmlichen Elektroscheider-Trennmodellen liegt in der Systematik der triboelektrostatischen Aufladung, welche hier direkt im Trennraum stattfindet (siehe dazu auch Abbildung 7). Der Prozessraum des triboelektrostatischen Bandscheiders ist durch zwei Elektroden (Kopf- und Fußelektrode) nach oben und unten begrenzt. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich ein, in einer speziellen Form perforiertes Kunststoffband, welches sich zwischen der Kopf- und Fußelektrode gegenläufig bewegt. Die Polarität der beiden Elektroden kann an die Trennaufgabe angepasst werden. Die Körner werden direkt im Prozessraum aufgeladen, in dem ihnen durch die rasche Umlaufbewegung des Kunststoffbandes eine intensive Reibbeanspruchung – gleichbedeutend mit zahllosen Korn-/Korn- und Korn-/Band-Kontakten – aufgezwungen wird. Sobald die Körner eine ausreichende Oberflächenladung aufweisen, werden sie von der entgegengesetzt geladenen Elektrode (nach oben zur Kopf-, oder nach unten zur Fußelektrode) angezogen. Der Abstand zwischen den Elektroden und die Elektrodenspannung können stufenlos, am Laborbandscheider zwischen 9 und 14 mm bzw. zwischen 0 und 6 kV, eingestellt werden. Diese beiden Parameter definieren die Größe des elektrostatischen Feldes im Trennraum. Das Kunststoffband im Trennraum bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu 36 fps (ca. 11 m/s), damit sind im industriellen Maßstab Durchsatzraten von bis zu 40 t/h möglich. (59) (60) (19)

Durch die hohe Geschwindigkeit des Kunststoffbandes in Kombination mit dem geringen Abstand zwischen den Elektroden, welche den Trennraum begrenzen, entstehen zum einen intensive Kontakte für die Aufladung, zum anderen werden auch Agglomerate im Aufgabegut dispergiert, welche aufgrund elektrostatischer Kräfte zwischen gegensinnig geladenen, fein- bis feinstdispers vorliegenden Körnern entstehen. Die „pflugartige“ Perforation im Kunststoffband bewirkt eine Ablösung und einen Abtransport von Körnern, die direkt an den Elektroden anhaften. Alle Körner befinden sich dadurch im Prozessraum und beteiligen sich weiterhin aktiv an der Aufladung, die angelegte Elektrodenspannung wird nicht durch Haftkorn in ihrer Wirkung beeinträchtigt und die gesamte Länge des Prozessraumes, welche beim Laborbandscheider 2 m beträgt, kann für die Sortierung genutzt werden. Die gegensinnig geladenen

Körner verlassen den Prozessraum und somit auch das elektrostatische Feld je nach Ladung auf der linken oder rechten Seite, wo die zwei Sortierprodukte aufgefangen werden. (59) (19) (61)

In Abbildung 14 ist der Bandscheider im Labormaßstab dargestellt, mit dem die dissertationsrelevanten Versuchsserien durchgeführt wurden. Er befindet sich im Klimaraum des Lehrstuhles für Aufbereitung und Veredlung, um auch die für die elektrostatische Sortierung wichtigen Umgebungsparameter – Raumtemperatur und relative Luftfeuchte – kontrollieren, regulieren und konstant halten zu können.

Bei dieser Ausführung des Bandscheiders gelangt das Aufgabegut von oben über eine Vibrorinne in den Prozessraum. Die Vibrationsintensität der Vibrorinne, welche eine Veränderung der Aufgaberate bewirkt, kann zwischen den Stufen 1 und 10 stufenlos variiert werden. Eine exakte Zuordnung der Vibrationsintensität zu einer definierten Aufgaberate (z.B. in g/s oder kg/h) ist aufgrund der unterschiedlichen Rohgutarten und Korngrößenverteilungen nicht möglich. Die Probenmasse je Versuch beträgt ca. 500 g. Der Produktaustrag erfolgt an der linken und rechten Seite des Bandscheiders nach dem Verlassen des Prozessraumes. Die beiden Sortierprodukte werden in Kunststoff-Säcken aufgefangen. (62)



Abbildung 14: Vorderansicht des Bandscheiders der Type „X2“

7.1. PARAMETERSTUDIE

Der ST Bandscheider X2 ermöglicht die Variation zahlreicher Parameter. Um Kenntnisse über den Einfluss dieser Parameter zu erhalten, wurden diese und deren Wechselwirkungen zueinander analysiert. Für die Durchführung der Versuche wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁵⁻¹⁴“ gewählt. Am ST Bandscheider X2 können folgende Maschineneinstellungen verändert werden: (14)

- a) angelegte Spannung
- b) Elektrodenabstand
- c) Bandgeschwindigkeit
- d) Polarität der Kopfelektrode
- e) Aufgaberate (Vibrations-Intensität der Vibrorinne)

Ad a) Die an den Elektroden angelegte Spannung kann stufenlos von 0 bis 6 kV verstellt werden. Für die Versuche wurden für die angelegte Spannung die Levels bei 3 und 6 kV festgelegt.

Ad b) Der Elektrodenabstand wird durch die geometrischen Gegebenheiten begrenzt. Für den maximalen Abstand wird ein Wert von 14 mm ermittelt, für den minimalen sind es 9 mm. Diese beiden Extremwerte werden als Level in den Versuchsplan übernommen.

Ad c) Für die Umlaufgeschwindigkeit des Kunststoffbandes werden maximal 35-36 fps (das entspricht ca. 11 m/s) erreicht. Dieser Maximalwert wird als oberer Level definiert. Für den unteren Level werden 17-18 fps (das entspricht ca. 5,5 m/s) ausgewählt.

Ad d) Die Polarität der Kopf- und Fußelektrode kann positiv oder negativ eingestellt werden. Dabei muss für die Erzeugung eines elektrostatischen Feldes immer eine Elektrode positiv und eine negativ sein. Für die Versuche wurden beiden Varianten umgesetzt. Weitere Angaben zur Polarität beziehen sich immer auf die Kopfelektrode.

Ad e) Die Vibrations-Intensität der Vibrorinne und dadurch die Aufgaberate können beliebig zwischen den Stufen 1 bis 10 eingestellt werden. Als Level wurden die Stufen 5 und 10 definiert. Durch die starken Schwankungen des Durchsatzes, bei unterschiedlichen Rohgutarten und Korngrößenverteilungen, kann in diesem Fall keine Durchsatzrate in den üblichen Einheiten kg/h oder g/s angegeben werden., daher wurde in diesem speziellen Fall die eher abstrakte Betrachtung über die Stufen gewählt.

Der Versuchsplan der zur Überprüfung der Maschineneinstellungen am triboelektrostatischen Bandscheider, aus den Parametern a) bis e) erstellt wurde, ist im Anhang in Tabelle 40 ersichtlich.

8. SORTIERUNG AUSGEWÄHLTER INDUSTRIEMINERALPROBEN MITTELS TRIBOELEKTROSTATISCHEM BANDSCHEIDER

Die Sortierversuche an ausgewählten Industriemineralproben dienen der Erarbeitung von Basiswissen über das triboelektrostatische Aufladeverhalten und die Sortierbarkeit dieser Rohgutarten. Diese wurden mittels des triboelektrostatischen Labor-Bandscheiders vom Typ X2 (wie in Abschnitt 7 beschrieben) umgesetzt.

Zusätzlich zu den Maschinenparametern am Bandscheider wurden auch die Umgebungs- und Rohgutbedingungen in der Klimakammer im Aufbereitungstechnikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung kontrolliert und gezielt variiert, um deren Einfluss auf das Aufladeverhalten der Rohgutproben zu untersuchen und in weiterer Folge diese Aufladung zu verstärken oder zu unterdrücken.

8.1. MAGNESIUMOXID

Das Magnesiumoxid (MgO) wurde von der Firma „Styromag Steirische Magnesitindustrie GmbH“ bereitgestellt. Die Philosophie dieses Rohstoffunternehmens lautet: *Mit unserer Umwelt - nicht gegen unsere Umwelt - mit den Menschen, mit den Kunden, Lieferanten, Mitarbeitern und Nachbarn im gegenseitigen Respekt und unter Beachtung ethischer Grundsätze langfristig und nachhaltig erfolgreich wirtschaften*. Das Unternehmen verfolgt das Ziel des sinnvollen und nachhaltigen Einsatzes von Naturprodukten unter dem Motto *„Was wir der Natur entnommen haben, soll der Natur wieder zugutekommen“*. Damit sollen verantwortungsvoll hergestellte, qualitativ hochwertige, sinnvolle und menschenfreundliche Produkte zur Verfügung gestellt werden. Diese Unternehmenspolitik und Bereitschaft zur nachhaltigen Rohstoffproduktion bietet eine optimale Basis für die Durchführung einer gemeinsamen Forschungstätigkeit im Bereich der trockenen Mineralaufbereitung. (63)

8.1.1. EINLEITUNG

Magnesiumoxid ist eines der wichtigsten Produkte der Feuerfestindustrie. Es wird üblicherweise durch thermische Zersetzung von bergmännisch gewonnenem Magnesit (MgCO_3), oder einem mittels Seewasserprozess erzeugtem Brucit (Mg(OH)_2) hergestellt. Die Eigenschaften des Magnesiumoxid-Produktes werden hauptsächlich durch die Art und Qualität des Rohgutes bzw. Ausgangsproduktes, die Brenntemperatur und die Verunreinigungen beeinflusst. Kaustisch, oder „weich“ gebranntes Magnesiumoxid wird bei Temperaturen unter 900°C gebrannt. Es findet Verwendung in Düngemitteln, als Tierfutter und als Rohstoff für verschiedene Magnesiumoxid-Chemikalien zur Herstellung von

Zellstoff und Papier, Keramik und Zement. Eine charakteristische Eigenschaft dieses Magnesiumoxid-Produktes ist seine mäßige bis hohe chemische Reaktivität. Aufgrund dieser Reaktivität ist es unbedingt erforderlich, nach einem trocken betriebenen Aufbereitungsverfahren für die Anreicherung des Magnesiumoxids zu suchen. Andernfalls würde eine Umwandlung in Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) stattfinden, die das Produkt auf unerwünschte Weise beeinflusst. Bis dato konzentrieren sich jegliche Methoden zur Steigerung der Produktqualität auf die Anreicherung des Rohmagnesits, oder auf die Prozessführung während des Kalziniervorganges. Die trockene Aufbereitung des gebrannten Produktes ist ein neuer Ansatz. (64) (65) (66)

8.1.2. ROHGUTCHARAKTERISIERUNG

Das zu untersuchende Rohgut wurde seitens Styromag vorbereitet und in Plastiksäcken, doppelt luftdicht verpackt zur Verfügung gestellt. Die Proben wurden nach dem Erzeugungsdatum als Charge *Juni 2018* und *Dezember 2018* bezeichnet. Um einen ersten Eindruck über die Mineralphasenverteilung in den Korngrößenklassen zu erhalten, wurde eine Siebanalyse durchgeführt und in den erzeugten Fraktionen die chemische Zusammensetzung bestimmt. Des Weiteren wurde die Reaktivität gegenüber dehydrierter Zitronensäure ermittelt. Die Ergebnisse der Analyse der Eingangsproben sind in Abbildung 15 bis Abbildung 18 zusammengefasst.

Die Korngrößenverteilungen der beiden Chargen zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der k_{80} -Wert der Charge Juni 2018 beträgt 89 μm , der k_{80} -Wert der Charge Dezember 2018 beträgt 76 μm . Die graphische Darstellung der Korngrößenverteilungen ist in Abbildung 15 ersichtlich.

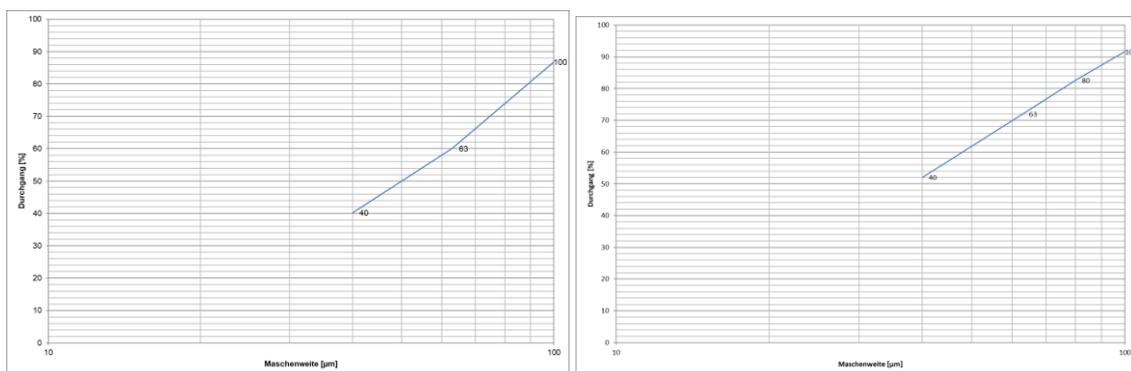


Abbildung 15: Korngrößenverteilung der Eingangsprobe im einfach-logarithmischen Netz: links – Charge *Juni 2018*, rechts – Charge *Dezember 2018*

In Abbildung 16 und Abbildung 17 ist die chemische Zusammensetzung in den Korngrößenklassen der beiden Chargen dargestellt. Der Magnesiumoxid-Gehalt steigt bei beiden untersuchten Proben mit sinkender Korngröße, die beiden begleitenden Bestandteile Kalziumoxid und Siliziumdioxid zeigen einen gegenläufigen Trend. (14)

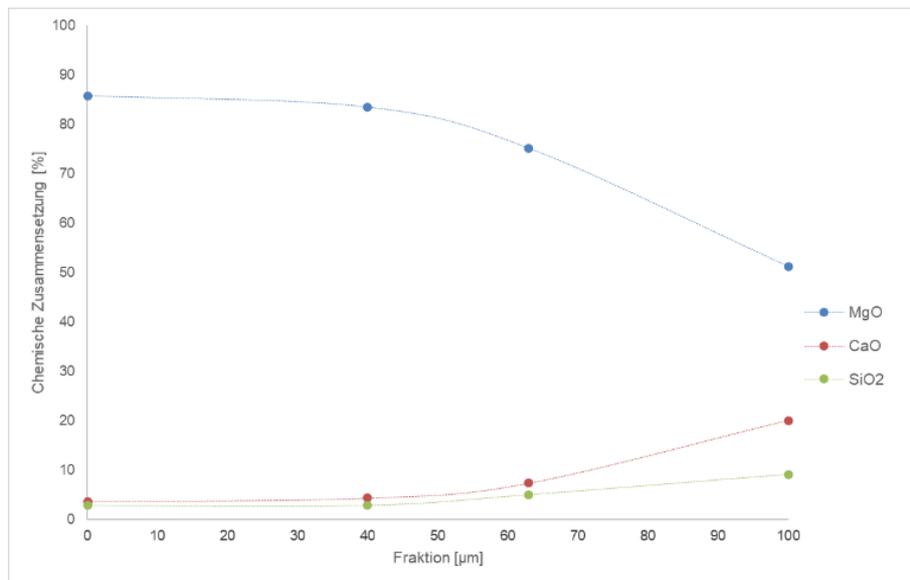


Abbildung 16: Chemische Zusammensetzung in den Fraktionen der Eingangsprobe: Charge *Juni 2018* (14)

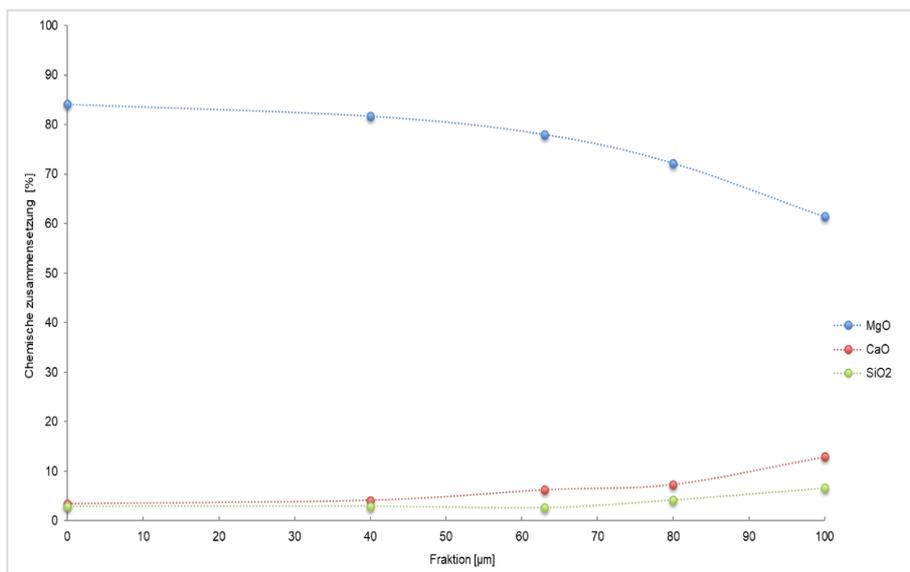


Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung in den Fraktionen der Eingangsprobe: Charge *Dezember 2018*

Im Rahmen der Rohgutanalytik wurde zusätzlich noch die Reaktivität beider untersuchten Magnesiumoxid-Chargen (*Juni 2018* und *Dezember 2018*) gegenüber einer wässrigen Zitronensäurelösung (28 g/L) für 300 s bestimmt, um einen Zusammenhang zwischen Probenalter bzw. Reaktivität und Aufladeeffizienz festzustellen. Die pH-Wert-Verläufe bei der Neutralisationsreaktion sind in Abbildung 18 dargestellt. Die Messung wurde für jede Probe an jeweils zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Wie zu erkennen ist, steigt der pH-Wert bei der Charge *Dezember 2018* (blaue und orange Linien) deutlich schneller an, als dies bei der älteren Charge *Juni 2018* (grüne und rote Linien) der Fall ist. Ein schneller Anstieg der Kurve bei der Neutralisationsreaktion beziffert den Anteil an „aktivem“ Magnesiumoxid in der Probe. Bei älteren Proben und Proben, welche länger der Umgebungsluft ausgesetzt waren, ist ein Teil des reaktiven Magnesiumoxids in Magnesiumhydroxid umgewandelt, was eine langsamere Neutralisation der Zitronensäurelösung bewirkt. (67)

Die Analysevorschrift zur Reaktivitätsprüfung mittels Zitronensäure ist im Anhang (Kapitel „Analysevorschriften & Arbeitsanweisungen“) ersichtlich.

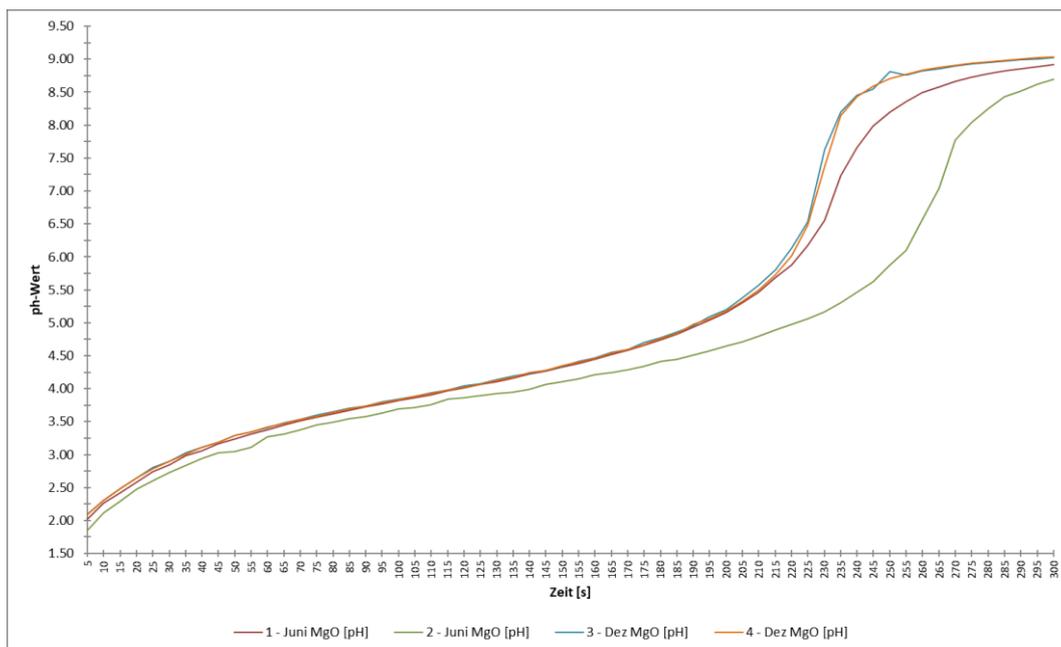


Abbildung 18: Reaktivität gegenüber Zitronensäure der Proben *Juni 2018* und *Dezember 2018*

8.1.3. SORTIERVERSUCH AM TRIBOELEKTROSTATISCHEN BANDSCHEIDER IN DISKONTINUIERLICHER BETRIEBSWEISE

8.1.3.1. Untersuchung des Einflusses der Maschinenparameter

Der ST Bandscheider ermöglicht die Variation zahlreicher Parameter. Um Kenntnisse über den Einfluss dieser Parameter auf das Sortierergebnis zu erhalten, wurden diese und deren Wechselwirkungen zueinander analysiert. Für die Durchführung der Versuche wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁵⁻¹“ (Anhang Tabelle 40) eingesetzt. Die Beurteilung des Trennerfolgs erfolgte über die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA, die seitens der Firma Styromag durchgeführt wurde.

Beim Versuchsaufbau wurden die Maschineneinstellungen, wie zuvor im Versuchsplan festgelegt, verändert. Die Einflüsse außerhalb des Systems – Raumtemperatur, relative Luftfeuchte und Rohguttemperatur – wurden dabei, soweit möglich, konstant gehalten. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Das Magnesiumoxid wurde mit Umgebungstemperatur aufgegeben. Für diese Versuche wurde die Charge *Juni 2018* eingesetzt. Die Aufgabemasse je Versuch betrug 500 g. Die Beurteilung des Einflusses der Maschinenparameter erfolgte durch die gemittelten Gehalte an Magnesiumoxid (MgO), Kalziumoxid (CaO) und Siliziumdioxid- (SiO₂) des Konzentrates und des Masseausbringens an Konzentrat bei den unterschiedlichen Einstellungen. Die Mittelwerte wurden immer aus den, bei unterschiedlichen Level-Einstellungen erzielten Ergebnissen berechnet. Von den beiden Mittelwerten bei Einstellung (+) und (-) wurde zudem die Differenz gebildet, die die Größe des Einflusses des Faktors beschreibt. In Tabelle 6 ist die Bilanz des besten Sortierversuchs dargestellt, die gesamten Versuchsergebnisse und Auswertungen sind im Anhang (Tabelle 44) zusammengefasst. Aus Tabelle 6 geht eindrucksvoll hervor, dass bei einem Masseausbringen an Konzentrat in Höhe von 87,38 % lediglich 26,84 % des SiO₂-Inhaltes und immerhin 90,78 % des CaO-Inhaltes wie auch 89,76 % des MgO-Inhaltes ebendort ausgebracht werden. Die ermittelten optimalen Maschineneinstellungen sind in Tabelle 7 dargestellt.

(14)

Versuch Nr,	Produkt	Masse	SiO ₂			CaO		MgO	
			r_m	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
4.2	Berge	12,62	21,76	73,16	3,79	9,22	65,55	10,24	
	Konzentrat	87,38	1,15	26,84	5,39	90,78	82,97	89,76	
	Aufgabe	100,00	3,75	100,00	5,19	100,00	80,77	100,00	

Tabelle 6: Bilanz zum besten Sortierversuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter

Spannung [kV]	Bandgeschwindigkeit [fps]	Aufgaberate	Elektrodenabstand [mm]	Polarität
6	36	5	9	+

Tabelle 7: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Magnesiumoxid (14)

Für alle weiteren Tests, die sich nicht auf die Optimierung der Maschineneinstellungen beziehen, wurden fortan die in Tabelle 7 genannten Einstellungen verwendet.

8.1.3.2. Einfluss der Aufgabetemperatur

Um den Einfluss der Aufgabetemperatur zu untersuchen, wurde das Magnesiumoxid (Charge *Juni 2018*) bei 80 °C im Trockenschrank vorgewärmt. Manipulationsbedingt entspricht das etwa einer Aufgabetemperatur von 65 °C. Diese Aufgabetemperatur entspricht der maximalen Temperatur, mit der das Rohgut auf den Bandscheider aufgegeben werden kann, ohne Verschmelzungen zwischen Rohgut und Kunststoffband zu verursachen. Die Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Rohguttemperatur sind in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 8) zusammengefasst.

Aufgabe Temperatur	Produkt	Masse	SiO ₂			CaO		MgO	
		r_m	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
65 °C	Berge	59,79	3,43	63,72	5,01	59,35	81,79	59,62	
	Konzentrat	40,21	2,91	36,28	5,10	40,65	82,37	40,38	
	Aufgabe	100,00	3,22	100,00	5,05	100,00	82,02	100,00	
25 °C	Berge	16,16	13,42	77,43	3,89	12,88	74,70	14,53	
	Konzentrat	83,84	0,39	11,57	5,10	87,70	85,01	85,77	
	Aufgabe	100,00	2,80	100,00	4,87	100,00	83,10	100,00	
Differenz r_{ij} [%]	Berge	43,63		-13,71		46,46		45,09	
	Konzentrat	-43,63		24,71		-47,05		-45,39	

Tabelle 8: Bilanzen zum Einfluss der Aufgabetemperatur auf die Sortierung von Magnesiumoxid (14)

Wie der Tabelle 8 zu entnehmen ist, verschlechterte sich die triboelektrostatische Aufladung im Vergleich zu den Versuchen, bei denen das Aufgabegut mit Raumtemperatur sortiert wurde. Die Erhöhung der Temperatur wirkte sich negativ auf alle Bereiche, ausgenommen dem Inhaltsausbringen an CaO aus. Dieses erhöhte sich im Bergeprodukt um 40,46 %-Punkte auf einen Wert von 59,35 % und sank im Konzentrat um 47,05 %-Punkte auf 40,65 %. Dieser Effekt ist auf die allgemeine Verschlechterung des triboelektrostatischen Aufladeverhaltens zurück zu führen. (14)

8.1.3.3. Einfluss der Bandgeschwindigkeit

Die Umlaufgeschwindigkeit des Kunststoffbandes wurde in der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter als Haupteinflussfaktor identifiziert. Aus diesem Grund wurde die Bandgeschwindigkeit im Detail untersucht. Für diese Versuche wurde die Charge *Juni 2018* eingesetzt. Die Bilanz hierzu und die Verläufe der Konzentratqualität bezogen auf Gehalt und Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid (MgO), Kalziumoxid (CaO) und Siliziumdioxid (SiO₂) sind in Tabelle 9 und den Abbildungen - Abbildung 19 bis Abbildung 21 - zusammengefasst. (14)

Produkt	Masse [%]	SiO ₂		CaO		MgO		Bandgeschwindigkeit [fps]
		g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]	
Berge	19,17	13,25	79,03	3,27	12,72	76,21	17,68	
Konzentrat	80,83	0,83	20,97	5,31	87,28	84,12	82,32	12
Aufgabe	100,00	3,21	100,00	4,92	100,00	82,61	100,00	
		3,32		5,02		82,76		
Berge	24,14	11,33	88,10	3,55	17,27	77,59	22,65	
Konzentrat	75,86	0,49	11,90	5,41	82,73	84,33	77,35	20
Aufgabe	100,00	3,10	100,00	4,96	100,00	82,71	100,00	
Berge	18,52	12,79	89,35	3,98	14,51	75,11	16,78	
Konzentrat	81,48	0,35	10,65	5,34	85,49	84,69	83,22	28
Aufgabe	100,00	2,65	100,00	5,08	100,00	82,91	100,00	
Berge	16,16	13,42	77,43	3,89	12,88	74,70	14,53	
Konzentrat	83,84	0,39	11,57	5,10	87,70	85,01	85,77	36
Aufgabe	100,00	2,80	100,00	4,87	100,00	83,10	100,00	
Berge	16,91	15,75	90,58	3,62	11,72	72,63	14,94	
Konzentrat	83,09	0,33	9,42	5,55	88,28	84,18	85,06	44
Aufgabe	100,00	2,94	100,00	5,23	100,00	82,23	100,00	

Tabelle 9: Bilanzen zum Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf die Sortierung von Magnesiumoxid (14)

In Abbildung 19 ist ersichtlich, dass der Gehalt und das Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid bei einer Bandgeschwindigkeit von 36 fps ein Maximum von 85,01 % bzw. 85,77 % erreichen. (14)

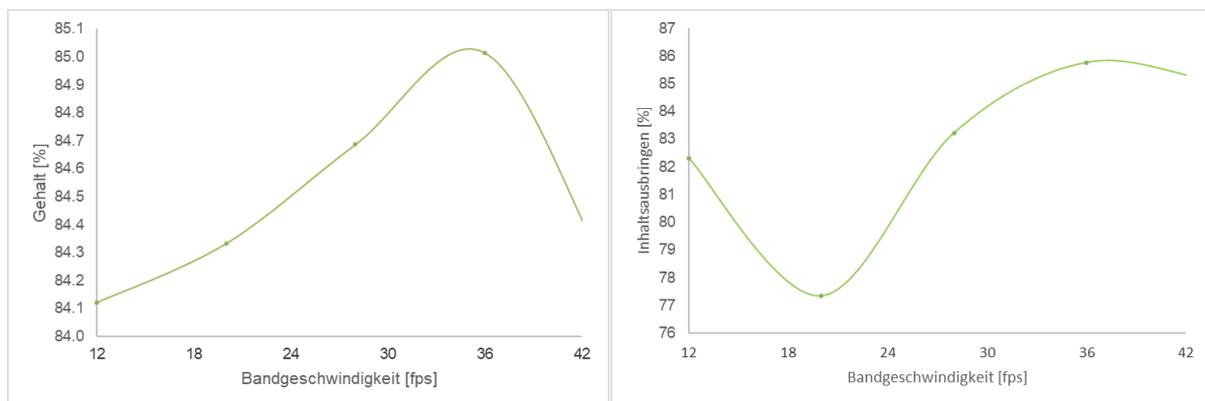


Abbildung 19: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Magnesiumoxid im Konzentrat

Der Gehalt und das Inhaltsausbringen an SiO_2 im Konzentrat befinden sich bei einer Bandgeschwindigkeit von 36 fps ebenfalls in einem günstigen Bereich. Der SiO_2 -Gehalt im Konzentrat beträgt in diesem Fall 0,39 %, das Inhaltsausbringen 11,57 %.

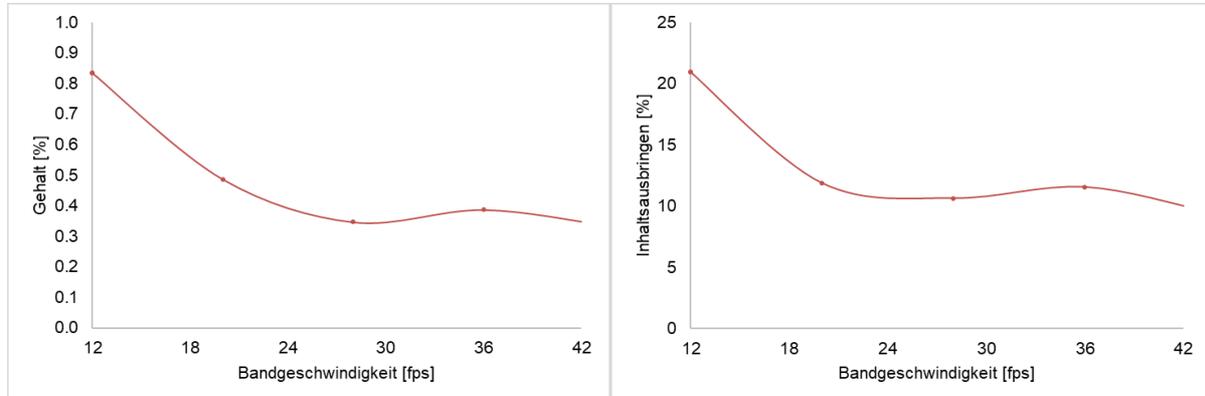


Abbildung 20: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Siliziumdioxid im Konzentrat

Der Gehalt und das Inhaltsausbringen an CaO im Konzentrat erreichen bei der Bandgeschwindigkeit von 36 fps jedoch mit 5,10 % und 87,70 % Werte nahe dem jeweiligen Maximum von 5,55 % und 88,28 %. (14)

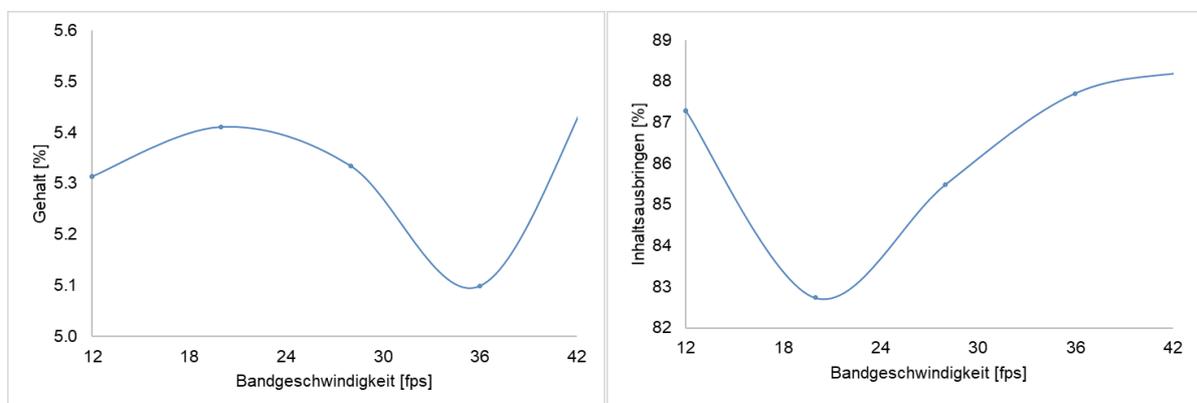


Abbildung 21: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Kalziumoxid im Konzentrat

8.1.3.4. Einfluss der Proben-Vorgeschichte

Um zu überprüfen, wie sich verschiedene Lagerungsbedingungen von Magnesiumoxid auf das triboelektrostatische Aufladeverhalten auswirken, wurden die zwei von der Firma Styromag bereit gestellten Magnesiumoxid-Chargen (*Juni 2018*, *Dezember 2018*) unter folgenden Bedingungen für jeweils ca. 100 Stunden gelagert:

- a) Im Technikum bei Raumtemperatur (25 °C) und einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit von 40 %
- b) Im Trockenschrank bei 80 °C und Abkühlung der Proben auf Raumtemperatur unter Luftabschluss
- c) Im Klimaraum bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 25 %

Die Bilanztafel zu den Sortierversuchen bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Lagerung im Technikum bei Raumtemperatur und einer hohen relativen Luftfeuchte führte zum geringsten Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid im Konzentrat (E2) bei beiden Chargen, dieses betrug 86,72 % bei der Charge *Juni 2018* und 73,04 % bei der Charge *Dezember 2018*. Das Inhaltsausbringen an CaO zeigte bei der Charge *Dezember 2018* die gleiche Tendenz, mit einem Inhaltsausbringen von 67,61 % im Konzentrat, bei der Charge *Juni 2018* unterscheidet sich dieses bei der Lagerung im Technikum und im Klimaraum kaum. Es wurden Inhaltsausbringen von 86,41 % und 85,48 % erzielt. Das Inhaltsausbringen an Quarz (SiO₂) im Konzentrat ist bei der Charge *Dezember 2018* nach der Probenlagerung im Technikum mit 16,54 % am geringsten, bei der Charge *Juni 2018* jedoch mit 34,07 % am höchsten. Die höchsten Werte für das Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid (MgO) und Kalziumoxid (CaO) im Konzentrat wurden bei der Lagerung der Proben im Trockenschrank mit anschließender Abkühlung auf Raumtemperatur unter Luftabschluss erzielt, dieses betrug 87,10 % bei der Charge *Juni 2018* und 85,47 % bei der Charge *Dezember 2018*.

Die Ergebnisse aus diesen Sortierversuchen machen deutlich, dass eine fortschreitende Probenalterung, welche durch Lagerung an Luft vorangetrieben wird, sich negativ auf das triboelektrostatische Aufladeverhalten und dadurch auch auf den Sortiererfolg auswirken.

Charge / Lagerungsbedingung	Produkt	Masseausbringen [%]	SiO ₂ g [%]	r _i [%]	CaO g [%]	r _i [%]	MgO g [%]	r _i [%]
<i>Charge Juni 2018</i>								
<i>Lagerungsbedingung</i>								
a)	<i>Berge</i>	14,27	8,37	65,93	4,66	13,59	76,24	13,28
	<i>Konzentrat</i>	85,73	0,72	34,07	4,93	86,41	82,88	86,72
	<i>Aufgabe</i>	100,00	1,81	100,00	4,89	100,00	81,93	100,00
<i>Lagerungsbedingung</i>								
b)	<i>Berge</i>	14,39	16,91	78,04	3,52	10,77	70,55	12,37
	<i>Konzentrat</i>	85,61	0,80	21,96	4,90	89,23	83,97	87,63
	<i>Aufgabe</i>	100,00	3,12	100,00	4,70	100,00	82,04	100,00
<i>Lagerungsbedingung</i>								
c)	<i>Berge</i>	15,05	15,36	79,39	4,61	14,52	69,80	12,90
	<i>Konzentrat</i>	84,95	0,71	20,61	4,81	85,48	83,49	87,10
	<i>Aufgabe</i>	100,00	2,91	100,00	4,78	100,00	81,43	100,00
<i>Charge Dezember 2018</i>								
<i>Lagerungsbedingung</i>								
a)	<i>Berge</i>	29,35	8,67	83,46	5,71	32,39	74,41	26,96
	<i>Konzentrat</i>	70,65	0,71	16,54	4,95	67,61	83,74	73,04
	<i>Aufgabe</i>	100,00	3,05	100,00	5,17	100,00	81,00	100,00
<i>Lagerungsbedingung</i>								
b)	<i>Berge</i>	13,44	18,24	81,72	3,98	10,30	68,85	11,29
	<i>Konzentrat</i>	86,56	0,63	18,28	5,38	89,70	84,01	88,71
	<i>Aufgabe</i>	100,00	3,00	100,00	5,19	100,00	81,97	100,00
<i>Lagerungsbedingung</i>								
c)	<i>Berge</i>	17,42	14,25	81,41	5,70	18,64	67,45	14,53
	<i>Konzentrat</i>	82,58	0,69	18,59	5,25	81,36	83,72	85,47
	<i>Aufgabe</i>	100,00	3,05	100,00	5,33	100,00	80,89	100,00

Tabelle 10: Bilanz zum Einfluss der Lagerungsbedingungen auf den Aufladeerfolg von den Magnesiumoxid Chargen *Juni 2018* und *Dezember 2018*

8.1.3.5. Versuche mit reduzierter Aufgabetemperatur

Wie im Rahmen der Versuche zum Einfluss der Aufgabetemperatur mit der Charge *Juni 2018* ermittelt, wirkt sich eine Erhöhung der Aufgabetemperatur auf ca. 60 °C negativ auf die triboelektrostatische Aufladung der Oxide aus. Um ergänzend zu diesen Versuchen zu testen, wie sich eine Verringerung der Aufgabetemperatur auf den Sortiererfolg auswirkt, wurde die beiden Chargen für 24 Stunden luftdicht verpackt, im Laborkühlschrank gelagert und anschließend elektrostatisch sortiert. Die Maschineneinstellungen am Bandscheider wurden laut Tabelle 7 eingestellt. Die Bilanzen zu den Sortierversuchen mit reduzierter Aufgabetemperatur für die beiden Chargen *Juni 2018* und *Dezember 2018* sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Versuche mit reduzierter Aufgabetemperatur ergaben die höchsten bisher erreichten Inhaltsausbringenswerte an Magnesiumoxid (MgO) im

Konzentrat für beide Chargen, dieses betrug 90,52 % bei der Charge *Juni 2018* und 92,10 % bei der Charge *Dezember 2018*. Dabei wurden Magnesiumoxid-Gehalte von 84,06 % und 83,91 % erzielt.

Charge	Produkt	Masse	SiO ₂		CaO		MgO	
		[%]	g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]
Charge Juni 2018	Berge	11,36	18,35	75,42	3,87	9,46	68,67	9,48
	Konzentrat	88,64	0,77	24,58	4,75	90,54	84,06	90,52
	Aufgabe	100,00	2,76	100,00	4,65	100,00	82,31	100,00
Charge Dezember 2018	Berge	9,80	21,69	74,97	3,57	6,91	66,25	7,90
	Konzentrat	90,20	0,79	25,03	5,23	93,09	83,91	92,10
	Aufgabe	100,00	2,84	100,00	5,06	100,00	82,18	100,00

Tabelle 11: Bilanzen zu den Versuchen mit gesenkter Aufgabetemperatur (Magnesiumoxid-Chargen *Juni 2018* und *Dezember 2018*)

8.1.3.6. Versuche mit stufenweiser Variation der Elektrodenspannung

Auf der Suche nach Möglichkeiten zur Abreicherung von Kalziumoxid aus dem Magnesiumoxid-Konzentrat wurde die angelegte Elektrodenspannung am triboelektrostatischen Bandscheider beginnend bei 1 kV bis zum Maximalwert von 6 kV in Abständen von 1 kV erhöht. Die dabei anfallenden Trennprodukte jedes Versuchs wurden chemisch analysiert. Die in Tabelle 12 angeführten Maschinenparameter am Bandscheider wurden dabei konstant gehalten.

Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
[fps]		[mm]	
36	5	9	+

Tabelle 12: Konstant gehaltene Maschinenparameter bei Versuchen mit variiert Spannung

In Tabelle 13 sind die Bilanzen zu den Versuchen mit stufenweiser Erhöhung der Elektrodenspannung zwischen 1 kV und 6 kV zusammengefasst. Die Inhaltsausbringenswerte an Kalziumoxid und Magnesiumoxid gleichen sich bei den unterschiedlichen Einstellungen und weisen auch denselben Trend, nämlich den einer kontinuierlichen Steigerung im Konzentrat, auf. Bei dem Sortierversuch mit 1 kV angelegter Spannung wurde im Konzentrat ein Inhaltsausbringen an Kalziumoxid von 72,85 % und ein Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid von 72,17 % erzielt. Bei der Erhöhung der Spannung auf 2 kV wurde ein Inhaltsausbringen an Kalziumoxid von 78,49 % und ein Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid von 77,32 % erzielt, dies entspricht einer Erhöhung des Inhaltsausbringens um 5,64 %-Punkte für das

Inhaltsabringen an Kalziumoxid und 5,15 %-Punkte für das Inhaltsabringen an Magnesiumoxid. Bei der nächsten Steigerung der Spannung auf 3 kV wird das Inhaltsabringen an Kalziumoxid im Konzentrat um weitere 2,46 %-Punkte und das Inhaltsabringen an Magnesiumoxid um 3,67 %-Punkte, verglichen mit den Ergebnissen bei 2 kV, höher. Dieser Trend setzt sich fort, bis zu den maximalen Werten für das Inhaltsabringen an Kalziumoxid und Magnesiumoxid, bei einer Elektroden-Spannung von 6 kV. Bei der höchsten Spannungseinstellung wird ein Inhaltsabringen an Kalziumoxid von 89,60 % und ein Inhaltsabringen an Magnesiumoxid von 88,56% erzielt. Verglichen mit dem Versuch bei 1 kV angelegter Spannung sind die Werte für das Inhaltsabringen um 16,75 %-Punkte und 16,39 %-Punkte gestiegen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich Kalziumoxid und Magnesiumoxid nahezu identisch verhalten, aus diesem Grund kann eine Trennung dieser beiden Oxide durch alleinige Veränderung der Spannungsintensität ausgeschlossen werden.

Spannung	Produkt	Masse	SiO ₂		CaO		MgO	
		[%]	g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]	g [%]	r _i [%]
1 kV	Berge	29,62	8,89	83,99	4,26	27,15	77,11	27,83
	Konzentrat	70,38	0,71	16,01	4,81	72,85	84,14	72,17
	Aufgabe	100,00	3,14	100,00	4,64	100,00	82,06	100,00
2 kV	Berge	24,53	10,29	77,58	4,12	21,51	75,88	22,68
	Konzentrat	75,47	0,69	16,08	4,89	78,49	84,07	77,32
	Aufgabe	100,00	3,25	100,00	4,70	100,00	82,06	100,00
3 kV	Berge	21,06	12,23	79,14	4,09	19,05	74,11	19,01
	Konzentrat	78,94	0,86	20,86	4,64	80,95	84,19	80,99
	Aufgabe	100,00	3,25	100,00	4,52	100,00	82,06	100,00
4 kV	Berge	14,23	16,15	79,43	3,66	11,17	71,04	12,25
	Konzentrat	85,77	0,69	20,57	4,82	88,83	84,37	87,75
	Aufgabe	100,00	2,89	100,00	4,66	100,00	82,48	100,00
5 kV	Berge	14,18	15,83	80,84	3,81	11,53	71,10	12,24
	Konzentrat	85,82	0,62	19,16	4,83	88,47	84,23	87,76
	Aufgabe	100,00	2,78	100,00	4,68	100,00	82,37	100,00
6 kV	Berge	13,24	16,24	81,39	3,80	10,40	70,81	11,44
	Konzentrat	86,76	0,57	18,61	4,99	89,60	83,67	88,56
	Aufgabe	100,00	2,64	100,00	4,83	100,00	81,97	100,00

Tabelle 13: Bilanz zu den Versuchen mit stufenweiser Erhöhung der Elektroden-Spannung

8.1.3.7. Korngrößenverteilungen der Produkte

Um zu untersuchen, ob es Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der Sortierprodukte gibt, wurden die Produkte eines Sortierversuchs (Versuch 4: Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter - Tabelle 6) einer Siebanalyse unterzogen. In den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 14 und Tabelle 15) ist die Korngrößenverteilung von Konzentrat und Bergeprodukt dargestellt. Das Bergeprodukt weist eine gröbere Korngrößenverteilung als das Konzentrat auf, was auf den höheren Silikatanteil zurückzuführen ist. In beiden Produkten sind die Gehalte an Magnesiumoxid in der feinsten Fraktion und die Gehalte an CaO und SiO₂ in der größten Fraktion am höchsten. (14)

<i>Bergeprodukt</i> [μm]	<i>m</i> [%]	<i>D</i> [%]	<i>MgO</i> [%]	<i>CaO</i> [%]	<i>SiO₂</i> [%]
>100	12,46	87,54	52,55	19,80	8,45
100/63	33,99	53,54	77,66	6,49	4,27
63/40	15,86	37,68	83,26	4,38	2,94
40/0	37,68	0,00	85,67	3,57	2,99

Tabelle 14: Korngrößenverteilung des Bergeproduktes (14)

<i>Konzentrat</i> [μm]	<i>m</i> [%]	<i>D</i> [%]	<i>MgO</i> [%]	<i>CaO</i> [%]	<i>SiO₂</i> [%]
>100	14,09	85,91	49,67	20,37	10,01
100/63	17,87	68,04	72,09	8,47	6,04
63/40	24,74	43,30	83,73	4,36	2,91
40/0	43,30	0,00	85,90	3,69	2,70

Tabelle 15: Korngrößenverteilung des Konzentrates (14)

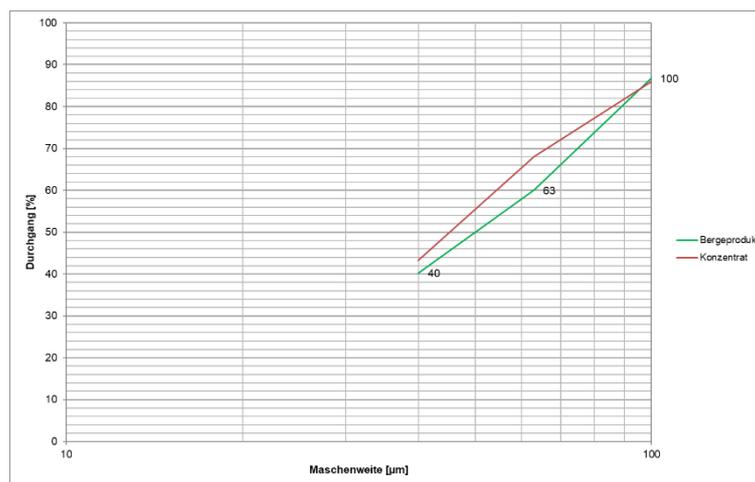


Abbildung 22: Graphische Darstellung der Korngrößenverteilung von Konzentrat und Bergeprodukt im einfach-logarithmischen Netz

8.1.3.8. Bestimmung der Teilungszahl

Aus den durch die Siebanalyse erhaltenen Fraktionen und der chemischen Analyse dieser, wurden die Teilungszahlen in den Korngrößenklassen berechnet. Diese Berechnung erfolgte gemäß Gleichung 8.1: (14)

$$T = \frac{r_{mj} * m_{\mu j}}{m_{\mu 0}} \quad (\text{Gleichung 8.1})$$

Die konzentratbezogenen Teilungskurven für Magnesiumoxid (MgO), Kalziumoxid (CaO) und Siliziumdioxid (SiO₂) sind in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 23 bis Abbildung 25) dargestellt. Die höchsten Inhalte an Magnesiumoxid, Kalziumoxid und Siliziumdioxid wurden in der Fraktion 63/40 µm ermittelt. Die konzentratbezogenen Teilungszahlen in dieser Fraktion ergaben sich zu:

- 56,3 % für Magnesiumoxid,
- 56,0 % für Kalziumoxid und
- 55,8 % für Siliziumdioxid. (14)

Die Teilungszahlen von Magnesiumoxid und Kalziumoxid zeigen in allen Fraktionen gleichartige Beträge. Diese Ähnlichkeit der Teilungszahlen von Kalziumoxid und Magnesiumoxid ist auf die ähnlichen Zerkleinerungseigenschaften dieser beiden Oxide zurückzuführen. Die Teilungszahl von Siliziumdioxid ist in der Fraktion 40/20 µm um 4,2 %-Punkte geringer als jene von Magnesiumoxid und Kalziumoxid. Dieser Effekt kann durch den höheren Zerkleinerungswiderstand und den daraus resultierenden geringeren Nachzerkleinerungseffekt im Trennraum des triboelektrostatischen Bandscheiders erklärt werden. Dieser durch die Darstellung der Teilungszahlen veranschaulichte Effekt ist jedoch geringer als ursprünglich vermutet, da Siliziumdioxid einen sehr hohen Zerkleinerungswiderstand aufweist, Kalziumoxid und Magnesiumoxid hingegen einen sehr geringen und die Differenz der Teilungszahlen nur 4,2 %-Punkte beträgt.

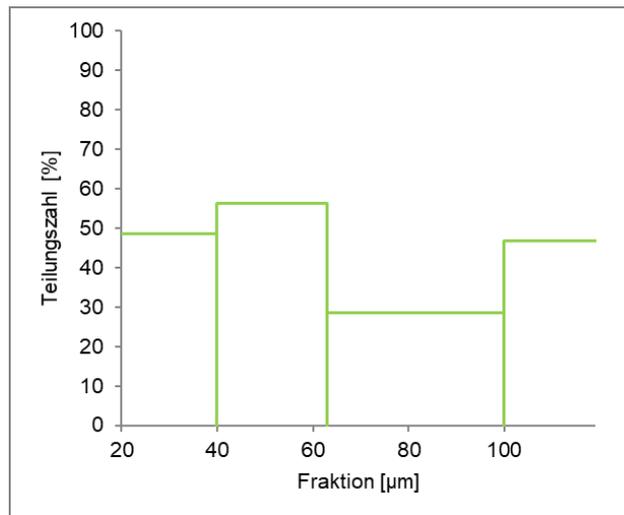


Abbildung 23: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Magnesiumoxid)

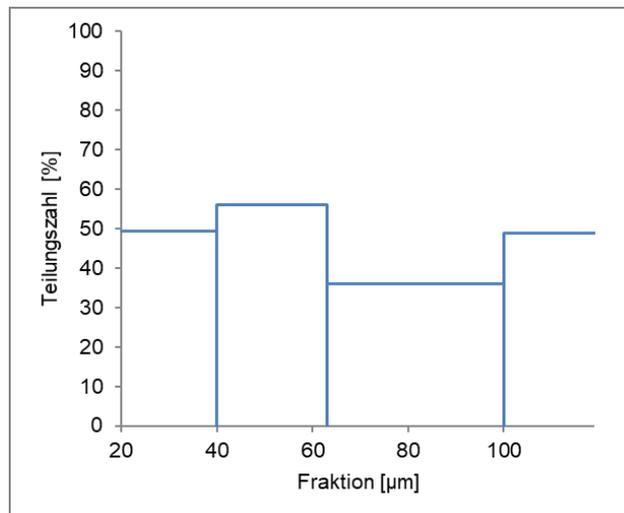


Abbildung 24: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Kalziumoxid) (14)

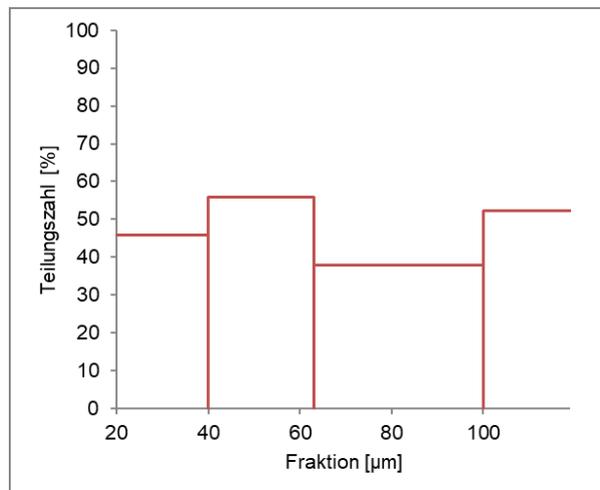


Abbildung 25: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Siliziumdioxid) (14)

8.1.4. SORTIERVERSUCHE AM TRIBOELEKTROSTATISCHEN BANSCHIEDER IN KONTINUIERLICHER BETRIEBSWEISE

8.1.4.1. Versuche mit Repetition (Locked cycle Tests)

Um die Magnesiumoxid-Verluste in den Bergen zu reduzieren, wurde der Einsatz sogenannter Locked Cycle Test geprüft. Dabei wurde das Bergezwischenprodukt (Berge 1) aus dem Rougher (Rougher 1) erneut dem ST Bandscheider aufgegeben, dieser ergänzende Sortierschritt wurde mit Scavenger 1 bezeichnet. Der Scavenger 1 erzeugte das finale Bergeprodukt (Berge 2) und das Konzentrat 2, welches gemeinsam mit der Frischaufgabe erneut dem Rougher zugeführt wurde. Dieser Vorgang wurde fünfmal wiederholt. Das Prinzip dieser Versuchsabfolge ist in Abbildung 26 dargestellt. Das gesamte Flussdiagramm mit allen fünf Wiederholungs-Stufen ist im Anhang in Abbildung 55 ersichtlich. Die zugehörigen Bilanzen sind im Anhang in Abbildung 55 und Tabelle 45 zusammengefasst.

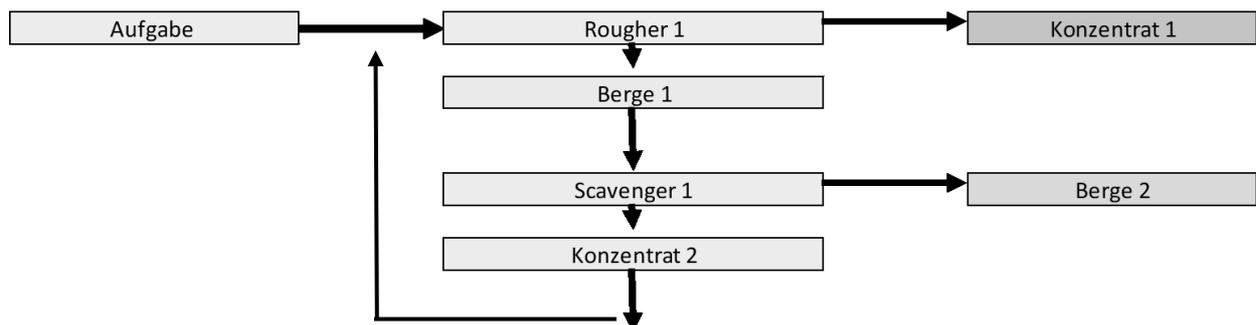


Abbildung 26: Versuche mit Repetition mit einem Rougher und einem Scavenger

Die nachfolgende Abbildung (Abbildung 27) zeigt den Verlauf der Konzentratqualität über die fünf Rougher-Wiederholungs-Stufen. Mit dieser aufwändigen Versuchsabfolge mit insgesamt fünf Wiederholungs-Stufen konnte keine stabile Konzentratqualität erzielt werden.

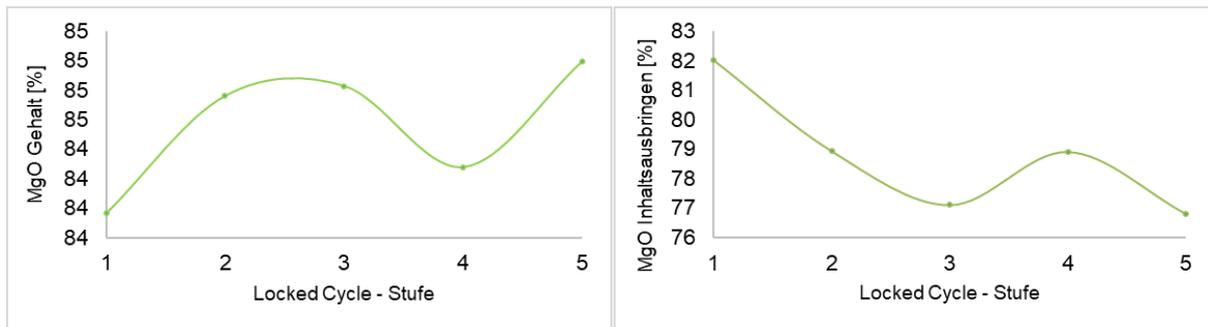


Abbildung 27: Verlauf von Magnesiumoxid Gehalt (links) und Inhaltsausbringen im Konzentrat (K1) des Roughers

Abbildung 28 zeigt den Verlauf der Verluste an Magnesiumoxid im Bergeprodukt. Diese zeigen ebenso wie das Konzentrat keine stabilen Werte.

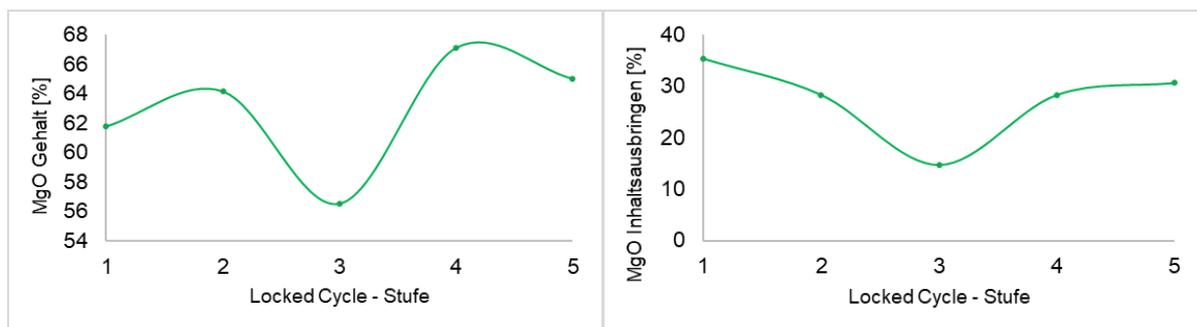


Abbildung 28: Verlauf von Magnesiumoxid Gehalt (links) und Inhaltsausbringen in den Bergen (B2) des Scavengers

8.1.5. RESÜMEE

Die Rohgutcharakterisierung ergab, dass sich Magnesiumoxid, im Gegensatz zu Kalziumoxid und Siliziumdioxid, im Feingut anreichert. Die Versuche mit erhöhter Rohguttemperatur (80°C) zeigten einen eindeutig negativen Einfluss auf den Sortiererfolg durch die Temperaturerhöhung. Die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Bandgeschwindigkeit ergab ein Optimum bei 36 fps. Bei dieser Umlaufgeschwindigkeit des Bandes wurde ein Magnesiumoxid-Inhaltsausbringen von 85,8 % und ein Magnesiumoxid-Gehalt von 85,0 % im Konzentrat erzielt. Die Versuche mit den bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gelagerten Proben zeigten, dass sich der Kontakt mit Luftfeuchte und die dadurch hervorgerufene Magnesiumhydroxidbildung negativ auf den Sortiererfolg auswirkt. Eine Überprüfung des Magnesiumhydroxidanteils in einer Magnesiumoxidprobe kann durch die Geschwindigkeit der Neutralisation einer wässrigen Zitronensäurelösung, der sogenannten *Zitronensäurezahl*, bestimmt werden. Eine Erweiterung der klassischen aufbereitungstechnischen

Rohgutanalytik mit der Bestimmung der Zitronensäurezahl ist in diesem Fall ein wichtiger Punkt, um eine Aussage über die Eignung der Probe für die triboelektrostatische Sortierung zu erlangen.

Versuche mit gekühlten (8 °C), unter Luftabschluss gelagerten Magnesiumoxidproben, führten zu dem höchsten Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid im Konzentrat von 92,10 %. Die Kühlung und der Luftabschluss ermöglichen eine effektive Unterdrückung der Bildung von Magnesiumhydroxid, was diese effiziente Sortierung erklärt.

Die Bilanzen aller durchgeführten Versuche zeigen, dass sich die beiden Oxide Kalziumoxid und Magnesiumoxid stets gleichsinnig (positiv) aufladen und dadurch gemeinsam von der negativen Elektrode angezogen und ins gleiche Produkt ausgetragen werden. Um eine Abreicherungsmöglichkeit von Kalziumoxid aus dem Magnesiumoxid-Konzentrat zu finden, wurde der Einfluss der stufenweisen Veränderung der angelegten Elektrodenspannung getestet, um festzustellen, ob sich diese beiden Oxide unterschiedlich effizient aufladen, und dadurch eine Maschineneinstellung für die Kalzium-/Magnesiumoxid-Trennung zu finden. Diese Versuche mit stufenweiser Veränderung der Spannung wurden nach einem vorangehenden Sortierversuch am triboelektrostatischen Bandscheider, welcher der Abreicherung von Siliziumdioxid (SiO_2) und andere Begleitminerale dient, durchgeführt. Die Versuche mit stufenweiser Erhöhung der Elektrodenspannung (von 1 kV bis 6 kV) zeigten deutlich, dass sich Kalziumoxid und Magnesiumoxid nahezu identisch verhalten. Daher kann eine Trennung dieser beiden Oxide, durch alleinige Veränderung der Spannungsintensität, nicht erfolgen.

Um die Verluste an Magnesiumoxid in den Bergen zu reduzieren, wurde ein sogenannter Locked Cycle Test durchgeführt. Der in Abbildung 26 dargestellte Ablauf wurde fünfmal wiederholt. Überraschenderweise zeigte sich, dass im Zuge des Locked Cycle Tests mit Magnesiumoxid keine stabile Konzentratqualität erreicht werden konnte, was darauf hinweist, dass sich das mehrmalige Nachreinigen bei der Sortierung von Magnesiumoxid negativ auf das Sortierergebnis auswirkt. Dieser Effekt kann durch die Bildung von Magnesiumhydroxid während der Durchführung des Locked Cycle Tests erklärt werden, bei der die Proben immer wieder mit der Umgebungsluft in Kontakt kommen.

8.2. ROHMAGNESIT

Der Rohmagnesit (Hauptbestandteil: MgCO_3) wurde von der Firma „Styromag Steirische Magnesitindustrie GmbH“ bereitgestellt. Die durchgeführten Versuchsreihen dienten in erster Linie der Erarbeitung von Basiswissen über das triboelektrostatische Aufladeverhalten und die Sortierbarkeit von Rohmagnesit und dem Vergleich der Sortiererfolge mit den Magnesiumoxid-Proben.

8.2.1. EINLEITUNG

Rohmagnesit kommt in den meisten Lagerstätten gemeinsam mit Kalkstein, Dolomit, eisenhaltigen Mineralen, Quarz und anderen Silikaten vor. Die wichtigsten Qualitätskriterien für Magnesitkonzentrate sind die Gehalte an Magnesiumoxid (MgO), Kalziumoxid (CaO), Siliziumdioxid (SiO_2), für manche Anwendungen auch Eisen(III)Oxid (Fe_2O_3) und der in Salzsäure (HCl) unlöslichen Bestandteil (bestehend aus der Summe von Eisen(III)Oxid und Aluminiumoxid (Al_2O_3)), welcher zusammengefasst als Rest (R_2O_3) angegeben wird. Diese säureunlöslichen Bestandteile (in den Tabellen mit *HCl unlöslich* bezeichnet) senken den Schmelzpunkt herab, was die Weiterverarbeitung des Magnesitkonzentrates negativ beeinflusst. Die Anreicherung von Magnesit aus gröberen Fraktionen wird üblicherweise mit Dichtesortierung, sensorgestützter Sortierung und Trocken-Magnetscheidung realisiert. Die Aufbereitung im Feinkornbereich, dem Dispersitätsbereich $< 200 \mu\text{m}$, erfolgt hauptsächlich in nasser Betriebsweise mittels Nass-Magnetscheidung und Flotation. (68) (69)

8.2.2. ROHGUTCHARAKTERISIERUNG

Für die Versuche mit Rohmagnesit wurden drei unterschiedliche Proben mit der *Bezeichnung RMF 1, RMF 2 und RMF 4* zur Verfügung gestellt. Die Rohmagnesitproben wurden analysiert, die Ergebnisse der chemischen Analysen sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Proben *RMF 1* und *RMF 2* weisen höhere Gehalte an Siliziumdioxid (SiO_2) und weniger Magnesiumoxid (MgO) als *RMF 4* auf, was mit sinkenden Werten hinsichtlich des Glühverlustes einhergeht. Die restlichen Inhaltsstoffe weichen nur geringfügig voneinander ab.

Probe	GLV [%]	HCl unlöslich [%]	SiO ₂ [%]	R ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]
RMF 1	38,50	23,50	15,67	2,44	1,40	2,80	32,80
RMF 2	40,90	19,70	13,13	2,05	1,30	2,50	34,70
RMF 4	46,83	7,85	5,23	2,30	1,69	2,38	40,52

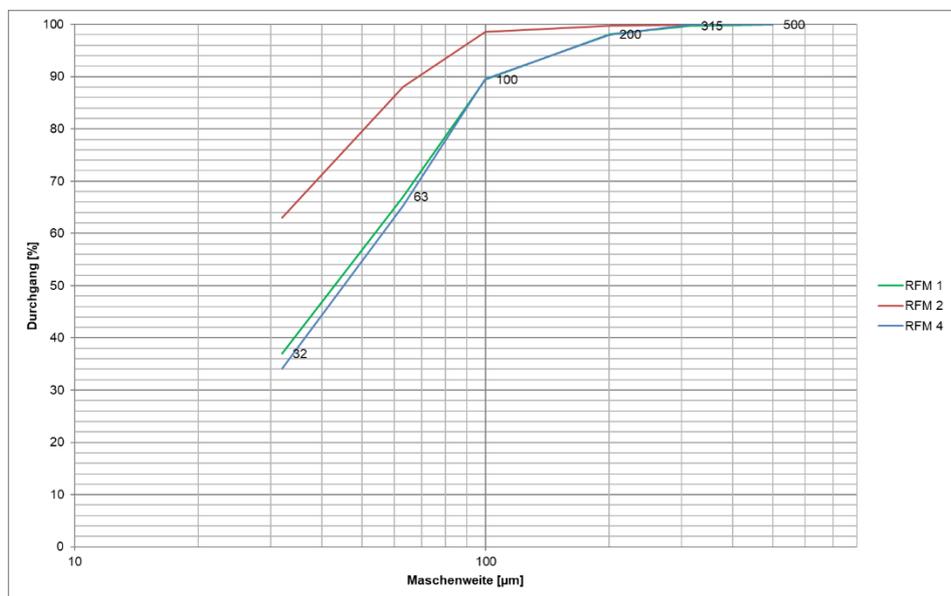
Tabelle 16: chemische Analysen der Rohmagnesitproben RMF 1, RMF 2, RMF 4

An den drei Proben wurde die Schüttdichte bestimmt, die Ergebnisse sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Arbeitsanleitung zur Bestimmung der Schüttdichte ist im Anhang ersichtlich.

Schüttdichte (lose) [g/l]	RMF 1	RMF 2	RMF 4
	1.171	894	1.457

Tabelle 17: Schüttdichte der Eingangsproben (RMF1, RMF 2, RMF 4)

Des Weiteren wurde eine Siebanalyse mit Maschenweiten von 500, 315, 200, 100, 63 und 32 μm durchgeführt. In Abbildung 29 sind die Korngrößenverteilungen der Eingangsproben zusammengefasst. *RFM 1* und *RFM 4* unterschieden sich kaum, *RFM 2* ist deutlich feiner.

Abbildung 29: Korngrößenverteilungen der Eingangsproben im einfach-logarithmischen Netz (*RFM1*, *RFM 2*, *RFM 4*)

Die k_{80} -Werte liegen bei 82 μm für RMF 01, 83 μm für RMF 4 und 50 μm für RMF 02. Aufgrund der Feinheit der Probe *RMF 2* erfolgte eine zusätzliche Messung der Korngrößenverteilung mittels Sedigraph. Die grafische Darstellung der mittels Sedigraph bestimmten Korngrößenverteilungen ist in Abbildung 30 ersichtlich. Dargestellt sind zwei Einzelmessungen und der Mittelwert aus diesen. Die Messung zeigt, dass 86 % von RMF 2 in einer Korngröße unter 20 μm vorliegen, der Massenanteil < 1 μm beträgt 6 %.

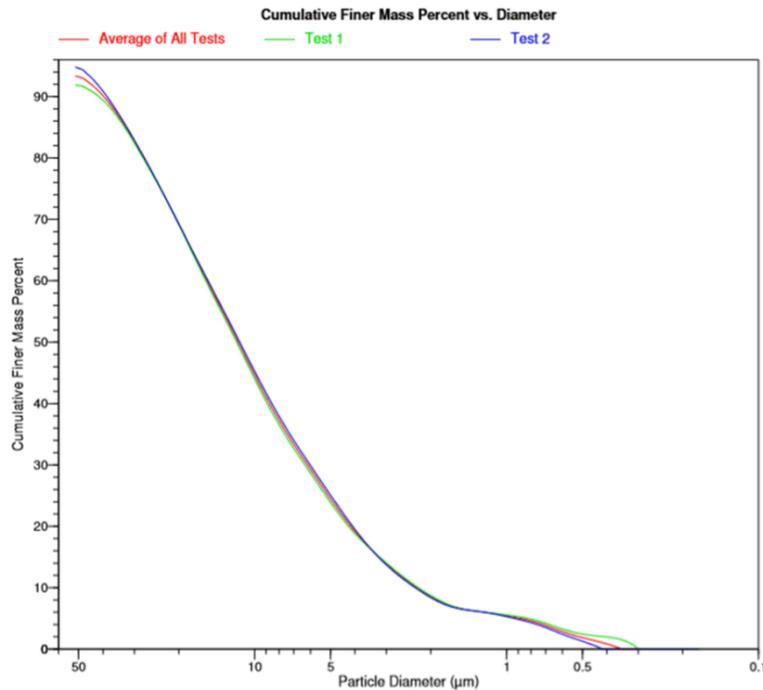


Abbildung 30: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung von *RFM 2* (gemessen mittels Sedigraph)

Im Zuge der Rohgutanalytik wurde von Rohmagnesitproben und Magnesitprodukten, die seitens der Firma Styromag bereits chemisch analysierten wurden, der Glühverlust bestimmt, um zu ermitteln, ob damit eine kosten- und zeiteffiziente Ergänzung zur Abschätzung der Gehalte an Magnesiumoxid an HCl unlöslichen Bestandteilen gefunden werden kann. Wie aus Abbildung 31 eindrucksvoll hervor geht, zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem auf der Abszisse aufgetragenen Glühverlust und den auf der Ordinate aufgetragenen Gehalten an Magnesiumoxid (blaue Linie) und an HCl unlöslichen Bestandteilen (rote Linie). Durch diesen linearen Zusammenhang wurde ein effizientes Beurteilungskriterium für die Versuchsserien am triboelektrostatischen Bandscheider festgelegt.

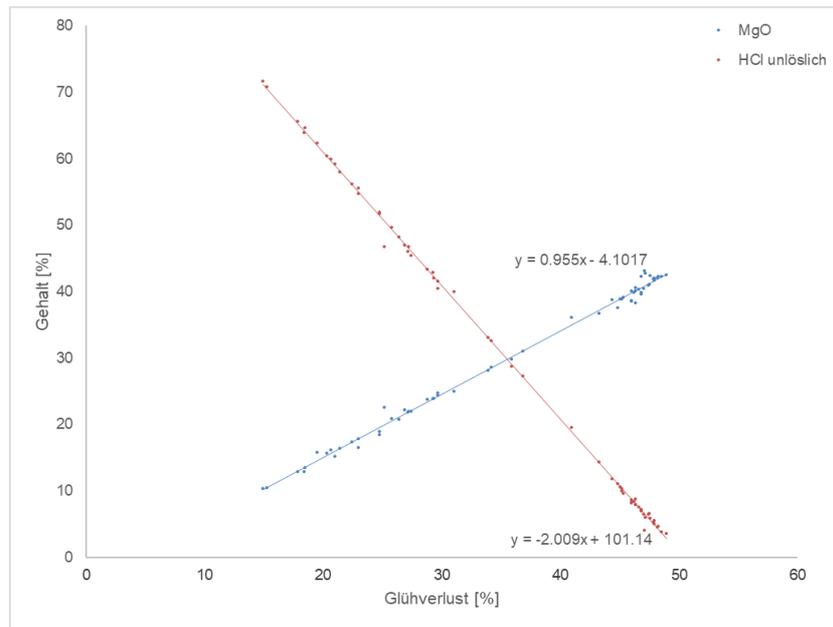


Abbildung 31: Lineare Abhängigkeit der Gehalte an Magnesiumoxid (MgO) und an säureunlöslichen (HCl unlöslichen) Bestandteilen vom Glühverlust

8.2.3. SORTIERVERSUCHE AM TRIBOELEKTOSTATISCHEN BANDSCHEIDER

8.2.3.1. Untersuchung des Einflusses der Maschinenparameter

Der ST Bandscheider ermöglicht die Variation zahlreicher Parameter. Um Kenntnisse über den Einfluss dieser Parameter zu erhalten, wurden diese und deren Wechselwirkungen zueinander analysiert. Für die Feststellung der optimalen Parametereinstellungen für das Rohgut wurde die Rohmagnesitprobe *RMF 2* verwendet. Für die Durchführung dieser Versuche wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁵⁻¹“ (Anhang Tabelle 40) eingesetzt. Die Beurteilung des Trennerfolgs erfolgte durch Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA und durch Bestimmung der säureunlöslichen Bestandteile mittels Salzsäure (HCl). Die Analysen wurden seitens der Firma Styromag durchgeführt.

Beim Versuchsaufbau wurden die Maschineneinstellungen, wie zuvor im Versuchsplan festgelegt, verändert. Die Einflüsse von Parametern, die nicht im Versuchsplan enthalten sind (z.B. relative Luftfeuchte sowie Raum- und Rohguttemperatur), wurden konstant gehalten. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Rohmagnesitprobe wurde mit Umgebungstemperatur aufgegeben. Die Aufgabemasse je Versuch betrug 600 g. Die Beurteilung des Einflusses der Maschinenparameter erfolgte durch die Mittelwerte

der Gehalte an Magnesiumoxid (MgO), Kalziumoxid (CaO) und Siliziumdioxid (SiO₂) im Konzentrat und dem Masseausbringen an Konzentrat bei den unterschiedlichen Einstellungen. Die Mittelwerte wurden immer aus den, bei den unterschiedlichen Levels (definiert in Kapitel 7.1) erzielten Ergebnissen berechnet. Von den beiden Mittelwerten bei Einstellung (+) und (-) wurde zudem die Differenz gebildet, die die Größe des Einflusses des Faktors beschreibt. Die Bilanz zum besten Versuch ist in Tabelle 18, die gesamten Versuchsergebnisse und Auswertungen sind im Anhang (Tabelle 46 bis Tabelle 48) zusammengefasst. Aus Tabelle 18 geht eindrucksvoll hervor, dass bei einem Masseausbringen an Konzentrat in Höhe von 80,00 % lediglich 32,73 % des Inhaltes an HCl unlöslichen Bestandteilen und immerhin 90,34 % des CaO-Inhaltes wie auch 93,71 % des MgO-Inhaltes ebendort ausgebracht werden. Die durch diese Vorgehensweise ermittelten optimalen Maschineneinstellungen sind in Tabelle 19 dargestellt.

Versuch Nr,	Produkt	Masse	HCL unlöslich			CaO		MgO	
		r_m	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}	g_{ij}	r_{ij}	
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
1.1	Berge	20,00	71,68	67,27	1,68	9,66	10,28	6,29	
	Konzentrat	80,00	8,27	32,73	3,93	90,34	38,30	93,71	
	Aufgabe	100,00	21,31	100,00	3,48	100,00	32,70	100,00	

Tabelle 18: Bilanz zum besten Sortierversuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter

Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
[kV]	[fps]		[mm]	
6	35	10	14	+

Tabelle 19: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Rohmagnesit (ermittelt mit RMF 2)

Für alle weiteren Tests mit Rohmagnesit, die sich nicht auf die Optimierung der Maschineneinstellungen beziehen, wurden fortan die in Tabelle 19 genannten Einstellungen verwendet.

8.2.3.1. Versuche zur Reproduzierbarkeit

Für die Versuche zur Reproduzierbarkeit wurde ein statistischer Versuchsplan vom Typ „2³⁻¹“ verwendet. Dabei wurden jene Parameter am Bandscheider verändert, die sich bei der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter als die größten Einflussfaktoren herausgestellt

haben, nämlich die Aufgaberate, die Bandgeschwindigkeit und der Elektrodenabstand. Der Versuchsplan ist in Tabelle 20 dargestellt. Tabelle 21 zeigt die Bilanz des besten Sortierversuchs, die gesamten Auswertungen zu dieser Versuchsreihe sind im Anhang in Tabelle 50 ersichtlich.

<i>Faktor</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Test Nr.</i>	<i>Aufgaberate</i>	<i>Bandgeschwindigkeit</i>	<i>Elektrodenabstand</i>
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

Tabelle 20: Versuchsplan zur Reproduzierung der Versuche mit RMF 2

In der nachfolgenden Tabelle ist die Bilanz zum besten Versuch, der bei der Versuchsreihe zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit erzeugt wurde, dargestellt. Die Werte für das Masseausbringen des Konzentrates und des Bergeproduktes unterscheiden sich nur um 0,8 und 0,2 %-Punkte. Das Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid im Konzentrat ist um 4,05 %-Punkte geringer, der Gehalt jedoch um 2,42 %-Punkte höher. Diese geringen Abweichungen sind auf unvermeidbare manipulationsbedingte Unterschiede in der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Da die Versuchsergebnisse bei allen vier durchgeführten Versuchen jedoch nur geringe Unterschiede zeigen, kann die Reproduzierbarkeit bestätigt werden.

<i>Versuch Nr.</i>	<i>Produkt</i>	<i>Masse</i>		<i>HCL unlöslich</i>			<i>CaO</i>		<i>MgO</i>	
		<i>r_m</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>		
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		
1	Berge	19,20	49,83	57,50	1,96	14,26	19,76	10,34		
	Konzentrat	80,80	8,75	42,50	2,80	85,74	40,72	89,66		
	Aufgabe	100,00	16,64	100,00	2,64	100,00	36,70	100,00		

Tabelle 21: Bilanz zum besten Sortierversuch, bei den Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit

8.2.3.2. Körngrößenverteilungen der Trennprodukte

Um zu untersuchen, ob es Unterschiede in den Korngrößenverteilungen der Sortierprodukte gibt, wurde von den Produkten, aus den laut Versuchsplan (Tabelle 20) mit der Probe *RMF 02* durchgeführten

Versuchen, die Korngrößenverteilungen der Konzentrate und Bergeprodukte ermittelt. Die Korngrößenverteilungen der Konzentrate und Bergeprodukte sind im Anhang in Tabelle 51 bis Tabelle 54 und in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 32 bis Abbildung 33) einander vergleichend gegenüber gestellt.

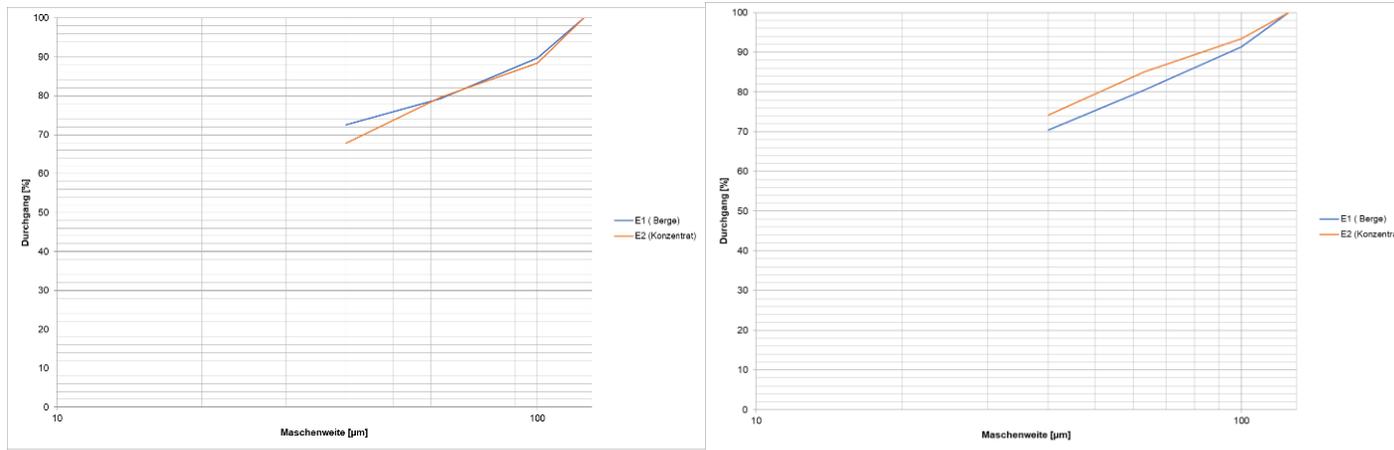


Abbildung 32: Korngrößenverteilungen der Trennprodukte (RMF2 Berge & Konzentrat) aus Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts) im einfach-logarithmischen Netz

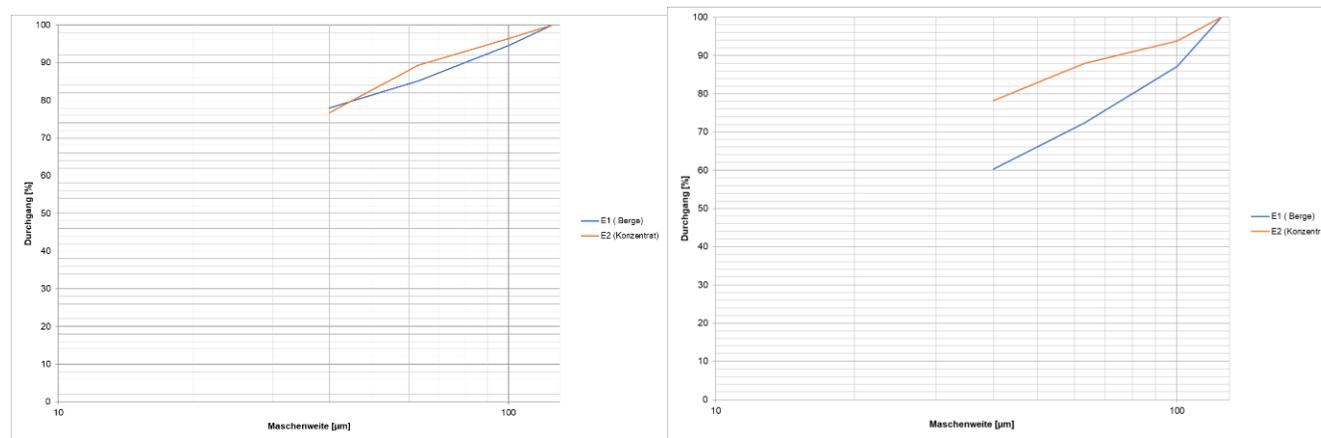


Abbildung 33: Korngrößenverteilung der Produkte (RMF2 Berge & Konzentrat) aus Versuch 3 (links) und Versuch 4 (rechts) im einfach-logarithmischen Netz

Die Korngrößenverteilungen der Produkte aus Versuch 1 unterscheiden sich nur sehr gering. Die k_{80} -Werte von Konzentrat und Bergeprodukt sind identisch mit einem Wert von 68 μm . Die Korngrößenverteilung des Konzentrates aus Versuch 2 ist feiner als die des Bergeproduktes, diese geringe Abweichung ist durch den höheren Silikatanteil im Bergeprodukt erklärbar, da die enthaltenen Silikate einen höheren Zerkleinerungswiderstand als Karbonate aufweisen. Die Korngrößenverteilungen aus Versuch 3 sind nahezu ident, wie in Abbildung 33 (links) ersichtlich. Die k_{80} -Werte von Konzentrat und Bergeprodukt sind sehr ähnlich und betragen 46 μm und 47 μm . Die Korngrößenverteilungen von Konzentrat und Bergeprodukt aus Versuch Nummer 4 unterscheiden sich am stärksten. Das Bergeprodukt weist eine deutlich gröbere Korngrößenverteilung als das Konzentrat auf. Dies ist durch den deutlich höheren Silikatanteil im Bergeprodukt erklärbar, da die enthaltenen Silikate einen wesentlich höheren Zerkleinerungswiderstand als die Karbonate haben. Der k_{80} -Wert des Konzentrates beträgt 44 μm , der des Bergeproduktes 80 μm .

8.2.4. RESÜMEE

Im Zuge der Versuche mit der Rohmagnesitprobe *RMF 2* konnte eine Anreicherung von Magnesit (ermittelt durch Bestimmung des Gehalts von Magnesiumoxid mittels RFA) im Konzentrat und eine Anreicherung der in Salzsäure (HCl) unlöslichen Bestandteile im Bergeprodukt erzielt werden. Die Bilanz zum besten Sortiersversuch ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Versuch Nr,	Produkt	Masse	HCL unlöslich		CaO		MgO	
		r_m [%]	g_{ij} [%]	r_{ij} [%]	g_{ij} [%]	r_{ij} [%]	g_{ij} [%]	r_{ij} [%]
1.1	Berge	20,00	71,68	67,27	1,68	9,66	10,28	6,29
	Konzentrat	80,00	8,27	32,73	3,93	90,34	38,30	93,71
	Aufgabe	100,00	21,31	100,00	3,48	100,00	32,70	100,00

Tabelle 22: Bilanz zum besten Sortiersversuch mit Rohmagnesit (RMF 02)

Im Konzentrat wurde bei einem Masseausbringen von 80,0 % ein maximales Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid von 93,71 % und ein Glühverlust von 46,34 % erzielt. Das dabei im Bergeprodukt erzielte Inhaltsausbringen an säureunlöslichen Bestandteilen betrug 67,27 % mit einem Glühverlust von 14,93 %. Die Bilanzen zu allen Versuche, die im Rahmen dieser Tests durchgeführt wurden, sind im Anhang in Tabelle 46 bis Tabelle 48 zusammengefasst.

In weiterer Folge wurde die Reproduzierbarkeit der erhaltenen Ergebnisse als Grundlage für die erfolgreiche triboelektrostatische Sortierung von Rohmagnesit überprüft, welche im Zuge der Versuche eindeutig bestätigt werden konnte. Die Werte für das Masseausbringen des Konzentrates und des Bergeproduktes unterscheiden sich nur um 0,8 und 0,2 %-Punkte. Das Inhaltsausbringen an Magnesiumoxid im Konzentrat ist um 4,05 %-Punkte geringer, der Gehalt jedoch um 2,42 %-Punkte höher. Diese geringen Unterschiede sind auf unvermeidbare manipulationsbedingte Unterschiede in der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Da die Versuchsergebnisse bei allen vier durchgeführten Versuchen jedoch nur geringe Unterschiede zeigen, kann die Reproduzierbarkeit bestätigt werden.

8.3. GULSENIT

Die Gulsenit-Eingangspröbe wurde ebenfalls von der Firma „Styromag Steirische Magnesitindustrie GmbH“ bereitgestellt. Die durchgeführten Versuchsreihen dienten in erster Linie der Erarbeitung von Basiswissen über das triboelektrostatische Aufladeverhalten und die Sortierbarkeit von Gulsenit mit dem übergeordneten Ziel, ein silikatreiches Konzentrat zu erzeugen

8.3.1. EINLEITUNG

Gulsenit ist eine hoch aktive, natürliche Kieselerde mit hoher spezifischer innerer Oberfläche. Die Hauptanwendungsgebiete sind in der Getränkeindustrie zur Eiweißstabilisierung, in der Feuerfestindustrie und zur Erhöhung der Feuchtigkeitsbeständigkeit von Magnesiafußböden. Es entsteht durch Säureaufschluss von Serpentin. Neben dem Hauptbestandteil Kieselgel (röntgenamorph) enthält es Serpentin, Talk, Magnetit und Chromit. Die Anreicherung erfolgt durch trockene Magnetscheidung. Das Fließbild zur Produktion von Gulsenit ist im Anhang in Abbildung 59 dargestellt. (63) (70)

8.3.2. ROHGUTCHARAKTERISIERUNG

Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Siebanalyse an der vorliegenden Gulsenit-Eingangspröbe bei Maschenweiten von 150, 125, 100, 80, 63 und 40 μm durchgeführt. Die Korngrößenverteilung ist in Tabelle 23 und Abbildung 34 zusammengefasst.

<i>Maschenweite</i> <i>[μm]</i>	<i>R</i> <i>[%]</i>	<i>D</i> <i>[%]</i>
>150	0,01	100,0
125/150	76,6	23,4
125/100	84,9	15,1
100/80	91,9	8,1
80/63	95,1	4,9
63/40	98,4	1,6
40/0	100,0	0,0

Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Gulsenit-Eingangspröbe

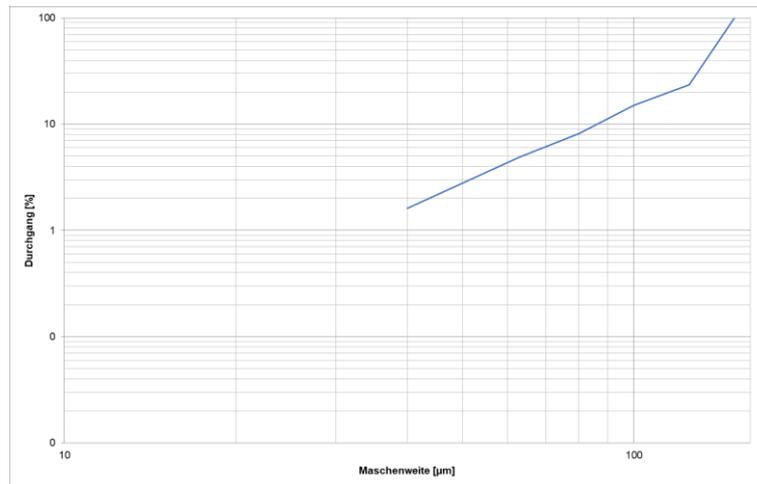


Abbildung 34: Korngrößenverteilung der Gulsenit-Eingangsprouben im doppelt-logarithmischen Netz

8.3.3. SORTIERVERSUCHE AM TRIBOELEKTOSTATISCHEN BANDSCHEIDER

8.3.3.1. Untersuchung des Einflusses der Maschinenparameter

Der ST Bandscheider ermöglicht die Variation zahlreicher Parameter. Um Kenntnisse über den Einfluss dieser Parameter zu erhalten, wurden diese und deren Wechselwirkungen zueinander analysiert. Für die Durchführung der Versuche wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2⁵⁻¹“ (Anhang Tabelle 40) eingesetzt. Die Beurteilung des Trennerfolgs erfolgte in erster Linie über das Inhaltsausbringen an SiO₂ im Konzentrat. Die Bestimmung des SiO₂-Gehaltes bzw. der säureunlöslichen Bestandteile erfolgte mittels RFA und Auflösung in HCl. Die Analysen wurden seitens der Firma Styromag durchgeführt.

Beim Versuchsaufbau wurden die Maschineneinstellungen, wie zuvor im Versuchsplan festgelegt, verändert. Die Einflüsse außerhalb des Systems – Raumtemperatur, relative Luftfeuchte und Rohguttemperatur – wurden dabei, soweit möglich, konstant gehalten. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Gulsenitprobe wurde mit Umgebungstemperatur aufgegeben. Die Aufgabemasse je Versuch betrug 700 g. Die Beurteilung des Einflusses der Maschinenparameter erfolgte durch die Mittelwerte des Inhaltsausbringens an SiO₂ in den erzeugten Konzentraten bei den unterschiedlichen Einstellungen. Die Mittelwerte wurden immer aus den, bei den unterschiedlichen Levels erzielten Ergebnissen berechnet. Von den beiden Mittelwerten bei Einstellung (+) und (-) wurde zudem die Differenz gebildet, die die Größe des Einflusses des Faktors beschreibt. Tabelle 24 zeigt die Bilanz des besten

Sortierversuchs, die gesamten Versuchsergebnisse und Auswertungen sind im Anhang (Tabelle 55 bis Tabelle 57) zusammengefasst. Aus Tabelle 24 geht hervor, dass bei einem Masseausbringen an Konzentrat in Höhe von 45,9 % lediglich 53,7 % des SiO₂-Inhaltes und 45,90 % des CaO-Inhaltes wie auch 37,2 % des MgO-Inhaltes ebendort ausgebracht werden. Die durch diese Vorgehensweise ermittelten optimalen Maschineneinstellungen sind in Tabelle 25 dargestellt.

Versuch Nr,	Produkt	Masse	SiO ₂			CaO		MgO	
			<i>r_m</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>	<i>g_{ij}</i>	<i>r_{ij}</i>
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
11	Berge	54,1	63,26	46,3	0,56	54,10	4,33	62,8	
	Konzentrat	45,9	86,58	53,7	0,56	45,90	3,02	37,2	
	Aufgabe	100,00	73,98	100,00	0,56	100,00	3,73	100,00	

Tabelle 24: Bilanz zum besten Sortierversuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter

Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
[kV]	[fps]		[mm]	
6	35	10	9	-

Tabelle 25: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Gulsenit

8.3.4. RESÜMEE

Bei der Versuchsreihe zur Untersuchung des Einflusses der Maschinenparameter zeigte sich, dass die Variation der Einstellungen deutlich geringeren Einfluss auf das Sortierergebnis hat als bei den zuvor sortierten Proben wie Rohmagnesit und Magnesiumoxid. Der Trennerfolg konnte durch das Verändern der Maschineneinstellungen nur in sehr geringen Maß beeinflusst werden. Beim besten erzielten Versuchsergebnis (Tabelle 24) wurde ein Gehalt an Siliziumdioxid von 86,58% erzielt, das entspricht verglichen mit dem Gehalt der Aufgabe eine Steigerung von nur 12,6 %-Punkten, bei einem Masseausbringen an Konzentrat von 45,9 %. Diese schwach ausgeprägte Tendenz bedeuten in weiter Folge, dass die ermittelten Ergebnisse eine geringere Aussagekraft haben und auch weniger Ansatzpunkte für weitere Versuche bieten. Die gesamten Versuchsergebnisse sind im Anhang in Tabelle 55 bis Tabelle 56 zusammengefasst.

8.4. HALIT

Die Probe wurden von den Salinen Austria AG (SAAG) bereitgestellt. Die SAAG betreibt im Salzbergbau Altaussee eine untertägige Aufbereitungsanlage zur Erzeugung spezieller Bergkristallsalzprodukte. Die Sortierung erfolgt derzeit mittels Starkfeld-Magnetscheider, der die unerwünschten (unlöslichen) Bestandteile in ein Magnetprodukt austrägt, während sich im unmagnetischen Produkt, dem Konzentrat, die löslichen Wertminerale (Na^+ -, K^+ - und Mg^{2+} -Salze mit der Hauptkomponente Steinsalz) anreichern.

Die Betriebsleitung plant eine deutliche Erhöhung der Produktionskapazität von derzeit etwa 300 t/a auf künftig etwa 1.000 t/a. Dazu soll das bestehende Aufbereitungskonzept erweitert bzw. optimiert werden. Ein Teil des Optimierungspotentials bietet hier die sogenannte *Restfraktion* (kurz: RF), welche direkt beim Gewinnungsprozess anfällt und in einem Korngrößenbereich $< 315 \mu\text{m}$ vorliegt. Diese Restfraktion wird derzeit keinem Aufbereitungsprozess unterzogen. Des Weiteren wird die Fraktion $< 315 \mu\text{m}$ einer Halit-Probe von geringer Qualität, bezeichnet mit *Qualität 2* (kurz: Q2), untersucht. Um die beiden zu Verfügung gestellten Proben für die SAAG als Produkt absetzbar zu machen, muss der Gehalt an löslichen Bestandteilen im Konzentrat $> 98,5 \%$ betragen. (71)

Die elektrostatische Sortierung, welche nachfolgend ausgeführt wird, wurde im Auftrag der Salinen Austria GmbH im Rahmen von umfassenden aufbereitungstechnischen Untersuchungen zur Optimierung der Bergkristallsalzaufbereitung der SAAG durchgeführt. (71)

8.4.1. EINLEITUNG

Zur Anwendung der Elektroscheidung in der Salzaufbereitung erschien erstmals 1941 in Deutschland eine Veröffentlichung von *Hampel*, welche ganz allgemein die Aufbereitung von Hartsalzen im elektrischen Feld bei Temperaturen zwischen 40 und 120 °C beschreibt. In dieser Studie werden Kaliumchlorid gegen Natriumchlorid, Kieserit und Ton bzw. Kaliumchlorid und Natriumchlorid gegen Kieserit und Ton aufgeladen und anschließend das Verhalten beim Einbringen in ein elektrostatisches Feld untersucht. In den 1950er Jahren gewannen elektrostatische Trennverfahren auf dem Gebiet der Kalisalzaufbereitung, durch die Arbeiten der *International Minerals & Chemical Corporation (IMC)*, *Chicago*, welche heute Teil der *Cargill Incorporated* ist, zunehmend an Bedeutung. Seit den 1970er Jahren stellt die elektrostatische Sortierung in der Kalisalzaufbereitung ein Standardverfahren dar, dass es mit der Flotation durchaus aufzunehmen vermag. (72), (73)

Die bis dato eingesetzten Methoden zur elektrostatischen Sortierung von Salzen sind jedoch mit einer minimalen Korngröße von etwa 100 μm begrenzt. Die triboelektrostatische Bandscheidung könnte in diesem Korngrößenbereich ein neuer Ansatz zur trockenen Feinkornaufbereitung von Salzen sein.

8.4.2. SORTIERVERSUCHE AM TRIBOELEKTROSTATISCHEM BANDSCHEIDER

Am triboelektrostatischen Bandscheider wurden Tastversuche an zwei unterschiedlichen Steinsalzqualitäten der SAAG untersucht, einerseits die Korngrößenklasse $< 0,315$ mm der sogenannten *Qualität 2 (Q2)*, andererseits die *Restfraktion (RF)*, welche direkt nach der Gewinnung in der Kornklasse $< 0,315$ mm anfällt. Die Versuchseinstellungen sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

<i>Versuch</i>	<i>Qualität</i>	<i>Korngröße</i> [mm]	<i>Spannung</i> [kV]	<i>Bandgeschwindigkeit</i> [fps]	<i>Aufgaberrate</i> [-]
Q2/1	2	<0,315	5,9	35,2	10
RF/1	RF*	<0,315	5,9	35,2	10
RF/2	RF*	<0,315	5,9	35,2	7

Tabelle 26: Versuchseinstellung am triboelektrostatischen Bandscheider bei den Tastversuchen mit Q2 und RF

Die Einflussfaktoren - Raumtemperatur, relative Luftfeuchte und Rohguttemperatur – wurden dabei konstant gehalten. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Aufgabemasse je Versuch betrug 600 g. Die Beurteilung des Trennerfolgs erfolgte durch Bestimmung der löslichen Bestandteile laut Arbeitsanweisung (siehe Anhang Abschnitt 4: *Analysevorschriften & Arbeitsanweisungen*).

In der nachfolgenden Tabelle sind die Versuchsergebnisse des Tastversuchs mit Q2 zusammengefasst. Bei einem Masseausbringen von 75,6 % an Konzentrat konnte der Gehalt an löslichen Bestandteilen $g_{\text{lös}}$ um nur 0,2 %-Punkte gesteigert werden.

<i>Versuch</i>	<i>Produkt</i>	r_m [%]	$g_{\text{lös}}$ [%]	$r_{\text{,lös}}$ [%]
Q2/1	Konzentrat	75,6	71,3	75,8
	Berge	24,4	70,6	24,2
	Aufgabe	100,0	71,1	100,0

Tabelle 27: Bilanz zur einstufigen Sortierung von Q2 am Bandscheider

In Tabelle 28 bis Tabelle 29 sind die Versuchsergebnisse zusammengefasst, welche bei der Sortierung der Restfraktion erzielt wurden. Bei Versuch 1 (siehe Tabelle 30) wurde die Probe mit der maximalen Aufgaberate sortiert, dabei wurde ein Masseausbringen von 73,6 % an Konzentrat, bei einer Steigerung des Gehaltes an löslichen Bestandteilen um 0,5 %-Punkte erreicht. Bei Versuch 2 (siehe Tabelle 31) wurde die Aufgaberate von 10 auf 7 gesenkt, dabei wurde ein Masseausbringen von 94,3 % an Konzentrat, bei einer Steigerung des Gehaltes an löslichen Bestandteilen um 0,7 %-Punkte erreicht, das entspricht einem Inhaltsausbringen von 94,9 % an löslichen Bestandteilen im Konzentrat.

<i>Versuch</i>	<i>Produkt</i>	<i>r_m</i>	<i>g_{lös}</i>	<i>r_{i,lös}</i>
<i>RF/1</i>		[%]	[%]	[%]
	Konzentrat	73,6	98,0	73,9
	Berge	26,4	96,2	26,1
	Aufgabe	100,0	97,5	100,0

Tabelle 28: Bilanz zu Versuch 1 der einstufigen Sortierung von RF am Bandscheider

<i>Versuch</i>	<i>Produkt</i>	<i>r_m</i>	<i>g_{lös}</i>	<i>r_{i,lös}</i>
<i>RF/2</i>		[%]	[%]	[%]
	Konzentrat	94,3	98,0	94,9
	Berge	5,8	86,7	5,1
	Aufgabe	100,0	97,3	100,0

Tabelle 29: Bilanz zu Versuch 2 der einstufigen Sortierung von RF am Bandscheider

8.4.3. RESÜMEE

Die mit den beiden Steinsalzqualitäten erzielten Ergebnisse der triboelektrostatischen Bandscheidung zeigen bei einstufiger Sortierung ein zu geringes Anreicherungspotential, um dieses Sortierverfahren für die Erzeugung hochwertiger Produkte einzusetzen. Bei keinem der durchgeführten Versuche wurde der Mindestgehalt an löslichen Bestandteilen im Konzentrat von 98,5 % erreicht. Von zwei bzw. mehrstufiger Sortierung am Bandscheider ist bei dieser Rohgutart abzusehen, da sich bereits bei einmaliger Aufgabe eine starke Nachzerkleinerung der Produkte erkennen lässt. Die Problematik der Sortierung von Steinsalz ist auf diesen starken Nachzerkleinerungseffekt zurückzuführen. In einigen Studien wurde nachgewiesen, dass feine Körner dazu neigen, sich negativ aufzuladen, auch wenn gröbere Anteile derselben Mischung sich positiv aufladen. Steinsalz ist ein Rohgut, das sich erfahrungsgemäß positiv auflädt. Durch die Entstehung des zusätzlichen Feinanteils im Prozessraum

des triboelektrostatischen Bandscheiders werden somit Verluste an Steinsalz im Bergeprodukt begünstigt. (61) (79) (80) (81). Beim Einsatz von Freifallscheidern, die in der Salzindustrie verbreitet sind, stellt dieser Effekt kein Problem dar, da die minimale Korngröße mit ca. 100 µm begrenzt ist.

Um diesen in der Literatur beschriebenen Effekt detaillierter zu untersuchen, sollte das Aufladeverhalten von Steinsalz in der, im Zuge dieses Projektes entwickelten, triboelektrostatischen Aufladeeinheit näher untersucht werden (siehe dazu Kapitel 10.4).

9. ENTWICKLUNG EINER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

Die Entwicklung einer triboelektrostatischen Aufladeeinheit diente dem Zweck, ein klar abgegrenztes System zu erzeugen, in dem die triboelektrostatische Aufladung verschiedener Rohgutarten durchgeführt, quantitativ erfasst und damit in weiterer Folge kontrolliert werden kann. Dieses System sollte zusätzlich noch weitere Parameter zur Beeinflussung des Aufladeverhaltens bieten. Diese Parameter sollten während des Aufladevorganges exakt eingestellt, variiert und überwacht werden können, um den Prozess besser verstehen und in weiterer Folge gezielt beeinflussen zu können.

9.1. ERMITTLUNG DES AUFLADEERFOLGS

Um den Aufladeerfolg der betrachteten Rohgutproben quantitativ zu erfassen und den zeitlichen Verlauf dieser zu verfolgen, wurde eine Möglichkeit zur Probenahme direkt aus dem Aufladeraum der triboelektrostatische Aufladeeinheit integriert. Die Ladungsmessung wurde durch einen Messaufbau aus Elektroskop und Faraday Cup nach der triboelektrostatischen Aufladung durchgeführt. Der Messaufbau aus Elektroskop und Faraday Cup erfolgte diskontinuierlich und ermöglichte eine einfache und rasche Messung. (30)

9.2. TECHNISCHES KONZEPT UND ERSTE ANSÄTZE

Das gesamte System sollte aus einer Gasversorgungseinheit, einer Konditionier- und Messeinheit und der Wirbelkammer, in der die triboelektrostatische Aufladung stattfindet, bestehen. Die Prinzipskizze, in der die ersten Überlegungen zur triboelektrostatischen Aufladeeinheit festgehalten wurden, ist in der nachfolgenden Darstellung (Abbildung 35) veranschaulicht.

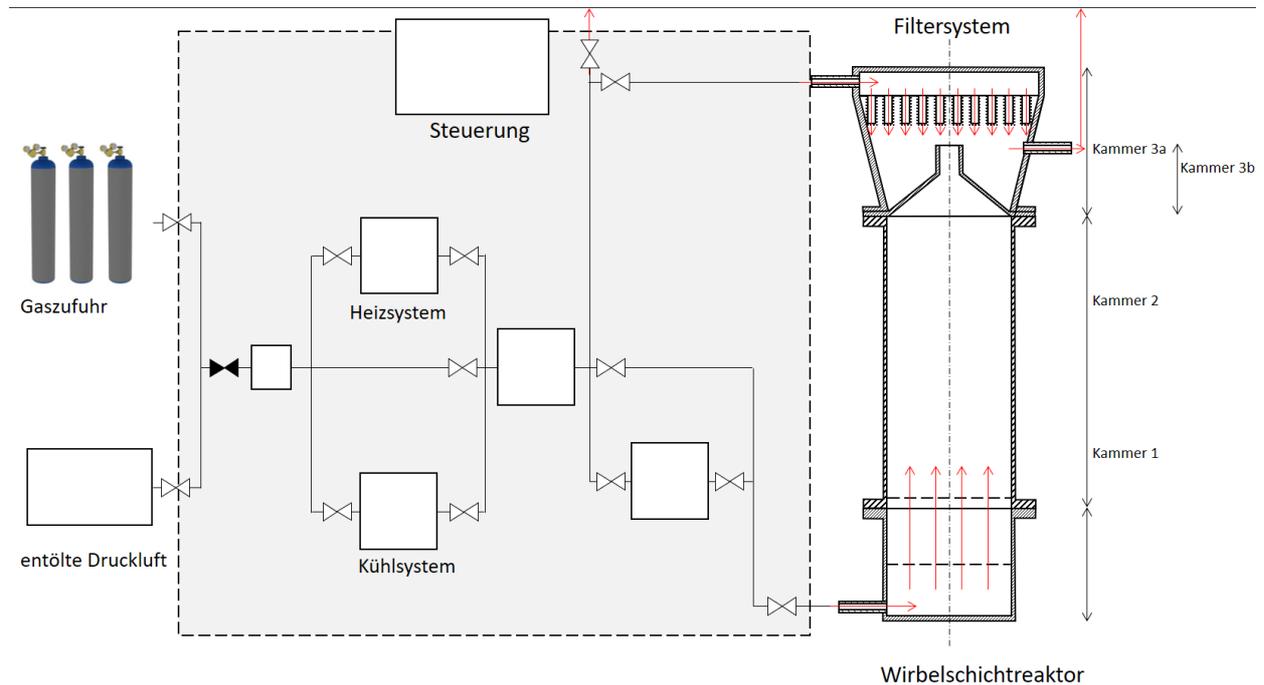


Abbildung 35: Prinzipskizze der triboelektrostatischen Aufladeinheit

Die Gasversorgung erfolgt durch entölte Druckluft (max. 6 bar) vom hauseigenen Druckluftnetz. Des Weiteren besteht eine Möglichkeit der Versorgung mit unterschiedlichen Gasen (z.B. Stickstoff, Argon) über Gasflaschen. In der Konditionier- und Messeinheit erfolgt zuerst eine Durchflussmessung. Im Anschluss daran wird der Gasstrom mit Ventilen in einen von drei Wegen geleitet. Der Gasstrom bleibt entweder unbeeinflusst oder wird in einem elektrischen Heizsystem auf bis zu 200 °C aufgeheizt. Das Gas wird im Anschluss in die Wirbelkammer geleitet, um die gewünschte Rohgutprobe zu fluidisieren.

Das Wirbelbett besteht aus drei unterschiedlichen Kammern, die durch lösbare Verbindungen (z.B. Flansche, oder Schnellverschlüsse) miteinander verbunden sind (Abbildung 36 links). Die Lufttemperatur kann zwischen 20 und 200 °C eingestellt werden. Die eingesetzte Druckluft wird vor der Zuführung in das System entölt, um die Aufladung nicht in unerwünschter bzw. unkontrollierter Art und Weise zu beeinflussen.

In der ersten Kammer erfolgt die Zuführung der Druckluft (6 bar). In dieser Kammer sind zwei perforierte Böden aus Edelstahl platziert, um ein ideales Strömungsbild für die darüber angeordnete zweite Kammer zu erzeugen. In der zweiten Kammer befindet sich die Körnerschüttung. Die Be- und Entladung der Körner in die zweite Kammer der Wirbelkammer erfolgt durch Lösen der Verbindungen zwischen den beiden Kammern. Die Höhe dieser Kammer beträgt ca. 100 cm. Um den Einfluss von verschiedenen Wandoberflächen auf das Aufladeverhalten zu untersuchen, ist der Rohrstützen leicht

austauschbar und in unterschiedlichen Werkstoffen ausgeführt. In dritten Kammer (Part 3) sind an der Decke Filter angebracht, um die feinsten Körner aufzufangen.

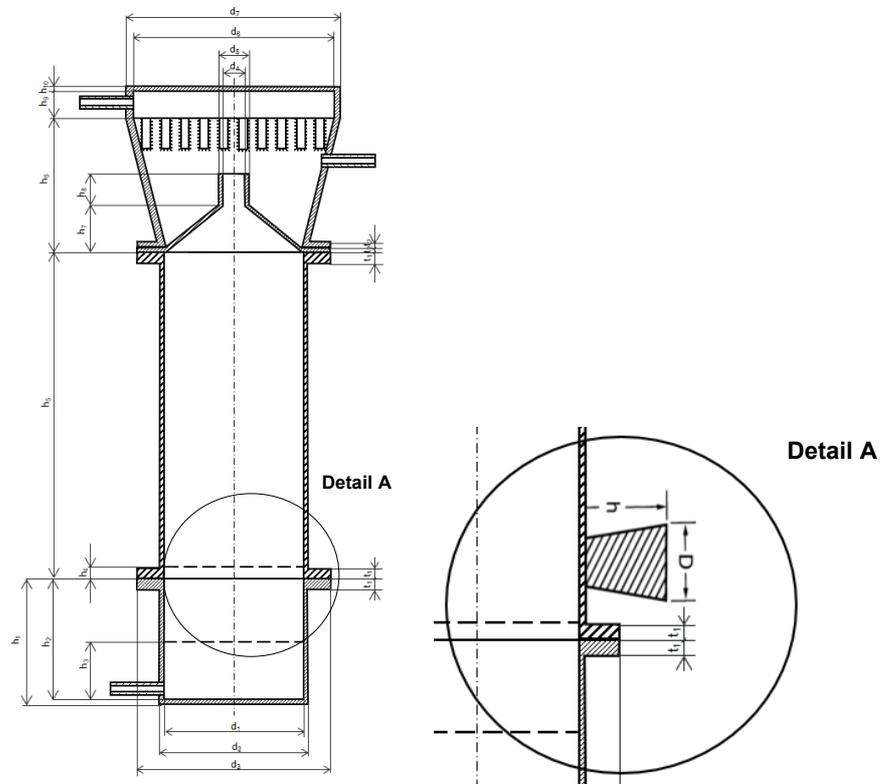


Abbildung 36: Prinzipskizze des Wirbelschichtreaktors mit Probenahmestelle - Detail A

9.3. DIMENSIONIERUNG

Zu Beginn der Dimensionierungsarbeiten wurde die in der Klimakammer, in der die Aufladeeinheit positioniert werden sollte, garantiert verfügbare und durch das hauseigene Druckluftnetz zur Verfügung gestellte Druckluftmenge, ermittelt. Unter Berücksichtigung des gleichzeitigen Betriebs anderer Druckluftverbraucher in der Klimakammer wurde der garantiert verfügbare Volumenstrom mit $1,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ bei einem Betriebsdruck von 6 bar festgelegt. (74)

Im Anschluss daran wurden der verarbeitbare Korngrößenbereich zwischen $40 \mu\text{m}$ und 1 mm , das Dichtespektrum zwischen $2,1$ und $3,5 \text{ g/cm}^3$ festgelegt. Damit sollte sichergestellt werden, dass eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Industriemineralien fluidisiert werden können. Ein möglicher Austrag des Feinstanteils ($<20 \mu\text{m}$) im Filtersystem wurde bewusst in Kauf genommen, da sich dieser im Elektroscheidungsprozess ohnehin häufig negativ auf die Selektivität auswirkt.

Für die Berechnungen im Zuge der Dimensionierung wurden zwei relevante Mineralproben, Halit und Magnesiumoxid, ausgewählt. Für diese Proben wurden die optimalen Leerrohrgeschwindigkeiten für

die Versuchsdurchführung ermittelt. Dazu waren in einem ersten Schritt die *Minimalfluidisierung* und die *Schwebegeschwindigkeit* der beiden Mineralphasen mithilfe der Gleichungen 5.4 für v_l und 5.6 für u_s (Kapitel 5.3) für die Grenzdurchmesser der Proben zu bestimmen.

Die für die Berechnungen notwendigen Fluideigenschaften von Luft sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

Fluideigenschaften		
Dichte	1,1885	kg/m ³
Dynamische Viskosität	18,205	μPa*s
Kinematische Viskosität	153,2 x 10 ⁻⁷	m ² /s

Tabelle 30: Fluideigenschaften (Luft)

Die Proben-Eigenschaften, sowie die ermittelten Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeiten für Halit und Magnesiumoxid sind in Tabelle 31 ersichtlich.

	Einheit	Halit	Magnesiumoxid
Dichte	[g/cm ³]	2,2	3,4
minimaler Durchmesser	[μm]	63,0	63,0
maximaler Durchmesser	[μm]	300,0	300,0
Lockerungsgeschwindigkeit v_l (d_{\min})	[m/s]	0,0033	0,0051
Lockerungsgeschwindigkeit v_l (d_{\max})	[m/s]	0,0879	0,1300
Schwebegeschwindigkeit u_s (d_{\min})	[m/s]	0,0100	0,0150
Schwebegeschwindigkeit u_s (d_{\max})	[m/s]	0,0198	0,2940

Tabelle 31: Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeiten der beiden Mineralphasen

Mithilfe des Reh-Diagramms wurden folgende Leerrohrgeschwindigkeiten, bei denen sich eine Wirbelschicht einstellen sollte, ermittelt. Die Reh Diagramme (Abbildung 56 und Abbildung 57) sind im Anhang ersichtlich.

	Einheit	Halit	Magnesiumoxid
Leerrohrgeschwindigkeit w_L	[m/s]	0,0829	0,0697

Tabelle 32: Leerrohrgeschwindigkeiten für die untersuchten Mineralphasen

Da sich für die Halit-Probe die höhere Leerrohrgeschwindigkeit ergeben hat, wurde diese für die Abschätzung des Durchmessers verwendet. Da die Aufladeeinheit ein möglichst breites Anwendungsgebiet für verschiedene Rohgutproben und Korngrößenverteilungen garantieren soll, wurde die für Halit ermittelte Leerrohrgeschwindigkeit (laut Empfehlung (75)) mit einem Sicherheitsfaktor $S = 20$ multipliziert. Somit ergab sich eine Leerrohrgeschwindigkeit von 1,66 m/s für die weiteren Berechnungen.

Die Leerrohrgeschwindigkeit (w_L) lässt sich wie folgt berechnen: (41)

$$w_L = \frac{\dot{V}}{A} \quad (\text{Gleichung 9.1})$$

Daraus kann in weiterer Folge der Durchmesser berechnet werden:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot w_L}} \quad (\text{Gleichung 9.2})$$

Bei der Annahme des minimalen garantierten Volumenstroms in der Klimakammer ergab sich somit ein Durchmesser für die Wirbelkammer der triboelektrostatischen Aufladeeinheit von 0,14 m.

9.4. UMSETZUNG & FUNKTIONSBESCHREIBUNG

Die triboelektrostatische Aufladeeinheit wurde in Kooperation mit der Firma *M.A.L. Metallbau Anlagenservice- Leitungsbau GmbH* entwickelt und gebaut. Sie besteht aus einer Gasversorgungseinheit, einer Regelstrecke, einem Wirbelschichtreaktor mit Probenahmeverrichtung, einem Filtersystem und einem Bedien- / Schaltschrank. In der realisierten Aufladeeinheit werden mineralische Rohgutarten in einem Korngrößenbereich zwischen 40 μm 1 mm, mithilfe der Wirbelschichttechnik gleichmäßig fluidisiert und triboelektrostatisch aufgeladen, um diese im Anschluss mithilfe eines triboelektrostatischen Bandscheiders zu trennen, bzw. um vorab das Aufladeverhalten zu beurteilen. (44)

Die technischen Kenndaten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit sind in der nachfolgenden Tabelle 33 zusammengefasst. (44)

Kenngröße		Einheit
<i>Nennspannung</i>	400	V
<i>Luftdruck</i>	6	bar
<i>Luftvolumenstrom</i>	1,5 - 10	Nm ³ /h
<i>Lufterwärmung</i>	200	°C
<i>Abmessungen Wirbelschichtboden</i>	14	cm
<i>max. Aufgabemenge</i>	1,5	kg

Tabelle 33 Auslegungsrelevante Kenndaten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit (44)

9.5. AUFBAU DER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

In der nachfolgenden Abbildung ist der Aufbau der triboelektrostatischen Aufladeeinheit detailliert dargestellt. Die Bezeichnung der Komponenten (Nr. 1-20) ist in Tabelle 34 ersichtlich.

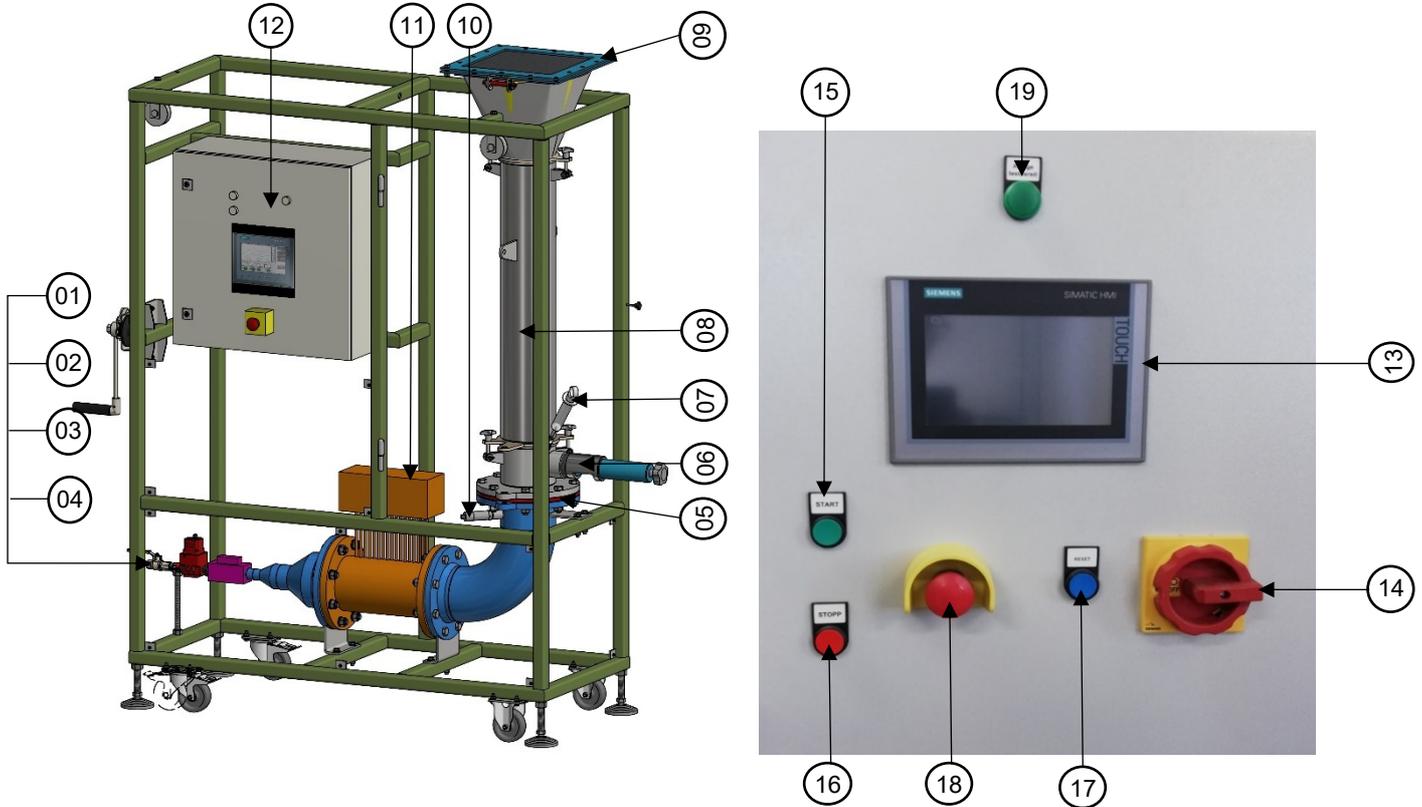


Abbildung 37: Aufbau der triboelektrostatischen Aufladeeinheit

Nr.	Bauteil	Nr.	Bauteil
01	Kugelhahn	11	Elektro- Rohrdruckluftherizer (400V)
02	Durchflusssensor	12	Schaltschrank/ Bedienelemente
03	Absperrventil	13	Touch Panel
04	Regelventil	14	Hauptschalter
05	Wirbelschichtboden/ Filterplatte	15	Start-Knopf
06	Probeentnahmevorrichtung	16	Stop-Knopf
07	Reagenzienaufgabevorrichtung	17	Reset-Knopf
08	Wirbelschichtkammer	18	Not-Aus Schalter
09	Sicherheitsabdeckung	19	Signal Leuchte
10	Temperatursensor	20	Datenspeicherung (USB-Stick)

Tabelle 34: Komponenten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit

In Abbildung 38 sind einige wichtige Bauteile der triboelektrostatischen Aufladeeinheit hervorgehoben.

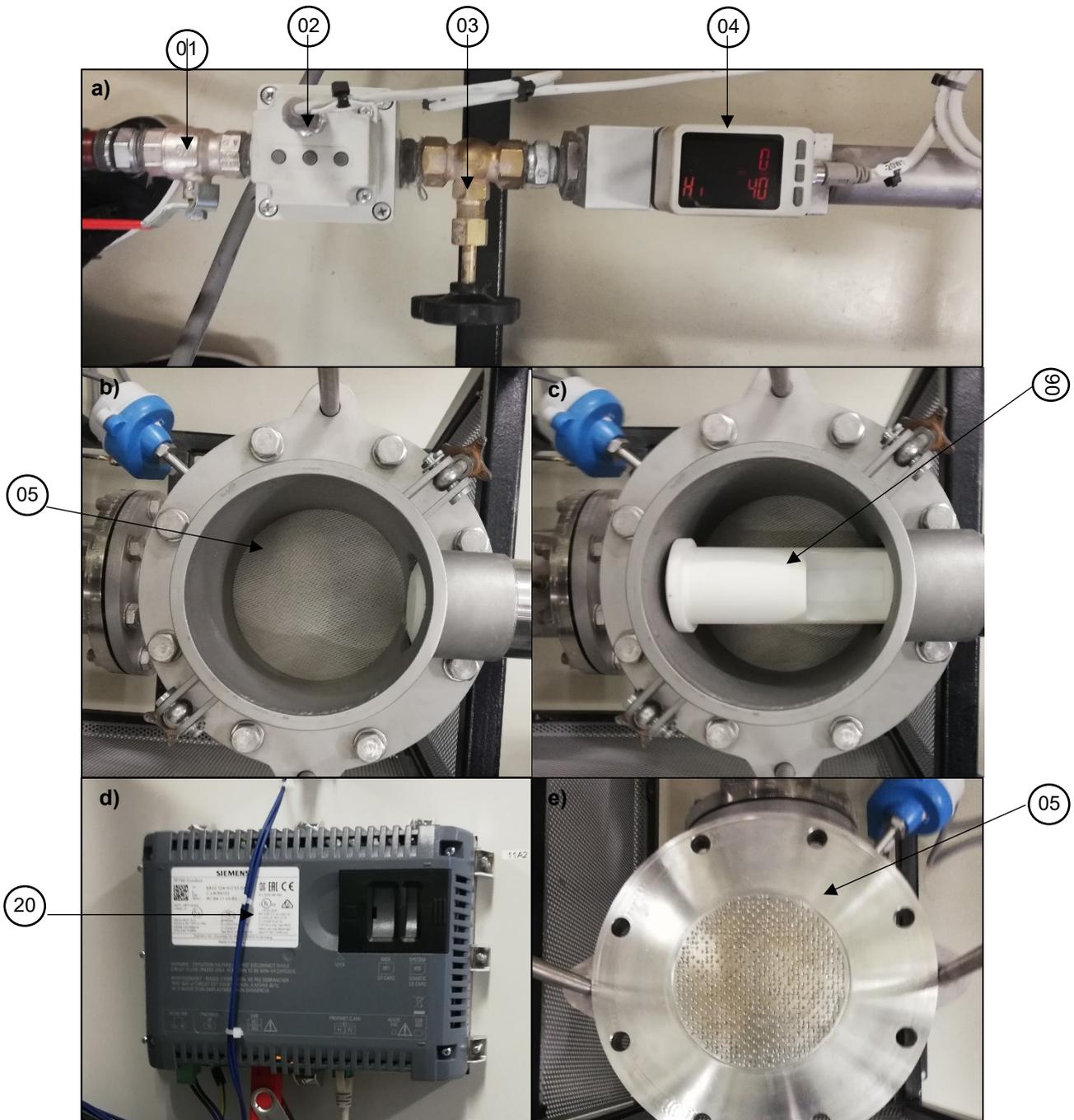


Abbildung 38: Blick auf wichtige Bauteile der triboelektrostatischen Aufladeeinheit:

- a) Regelstrecke Fluid, bestehend aus Kugelhahn, Durchflusssensor, Absperrventil und Regelventil
- b) Wirbelschichtboden,
- c) Probeentnahmevorrichtung,
- d) Datenspeicherung (USB-Stick),
- e) Standard-Filterplatte

9.6. BEDIENUNG DER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

Die Bedienung der Aufladeeinheit erfolgt über ein Touchpanel, in welchem Versuchsprogramme (*Rezepte*) gespeichert und Versuche gesteuert und kontrolliert werden können. Die wichtigsten Einflussparameter für die Versuchsdurchführung sind *Gastemperatur* und *Durchflussrate*. Diese können mithilfe von verschiedenen *Rezepten* geplant und variiert werden. Insgesamt können zwanzig verschiedene *Rezepte* gespeichert und über den Programmpunkt *Rezeptur* abgeändert werden. Um Versuche während der Durchführung zu dokumentieren, können die Einflussparameter über den Button *Logfile Aktiv* aufgezeichnet werden. Die Versuchsaufzeichnungen werden als Excel-Datei auf einem USB-Stick, welcher auf der Innenseite des Schaltschranks angebracht ist, unter dem eingegebenen Dateinamen gespeichert. (44)

Die wichtigsten Programmpunkte sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

<i>Programmpunkt</i>	<i>Information</i>
<i>Status:</i>	Gibt Auskunft über aktivierte/deaktivierte Knöpfe
<i>Alarm:</i>	Zeigt aktuelle bzw. historische Störmeldungen an
<i>Schema:</i>	Gibt den Schaltplan der Aufladeeinheit wieder
<i>Rezeptur:</i>	Zeigt alle gespeicherten Rezepte an
<i>Trend:</i>	Grafische Darstellung der Versuchskennwerte
<i>Logfile aktiv:</i>	Startet oder beendet die Versuchsaufzeichnungen
<i>Plus/Minus Button:</i>	Mithilfe des Plus- oder Minus-Button kann das gewünschte Programm ausgewählt werden

Tabelle 35: Wichtige Programmpunkte der triboelektrostatischen Aufladeeinheit

9.6.1. BETRIEB DER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

Einschalten: Vor dem Einschalten ist sicherzustellen, dass der Strom und die Druckluftzufuhr angeschlossen sind. Die Aufladeeinheit wird mit dem Hauptschalter (15) eingeschaltet, das Programm startet automatisch.

Ausschalten: Für eine regelkonforme Abschaltung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit muss der laufende Versuch gestoppt werden (*Rote Stop-Taste*). Im Anschluss kann die triboelektrostatische Aufladeeinheit durch Betätigen des Hauptschalters abgeschaltet werden. (roter Drehschalter)

Rezeptur ändern: Um Rezepte zu ändern, wählt man den Programmpunkt *Rezeptur* aus und klickt auf das zu ändernde Rezept. Nach Eingabe der neuen Parameter erfolgt die Speicherung automatisch.

Reinigen der Aufladeeinheit (Siebbodens/Filter): Nach Beenden eines Versuches muss die Wirbelkammer gereinigt werden. Die überschüssige Probe muss vom Siebboden abgesaugt, die Wirbelkammer mithilfe von Druckluft gereinigt werden. Sollte die Filterplatte in der Sicherheitsabdeckung stark verschmutzt sein, ist diese nass zu reinigen.

Wechsel Filterplatten/Wirbelschichtboden: Um den Wirbelschichtboden zu wechseln, müssen die Wirbelschichtkammer (08) und die Probeentnahmevorrichtung (06) entfernt werden. Es ist zu beachten, dass der standardmäßig eingebaute Wirbelschichtboden (05) nicht entfernt werden darf. Der einzubauende, temporäre Wirbelschichtboden wird auf den standardmäßig eingebauten Wirbelschichtboden gelegt und mithilfe von zwei Dichtungsringen abgedichtet. Im Anschluss wird die Aufladeeinheit wieder zusammengebaut

Versuchsdurchführung:

Für eine reibungslose Versuchsdurchführung sind folgende Schritte durchzuführen:

- Abschätzen der Fluidgeschwindigkeit zur Fluidisierung des Aufgabegutes, mithilfe des Reh-Diagrammes.
- Kontrolle, ob der gewünschte Wirbelschichtboden eingelegt und der Wirbelschichtreaktor geschlossen ist.
- Kontrolle, ob die Druckluft angeschlossen und der Kugelhahn geöffnet ist.
- Einschalten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit (roter Drehschalter).
- Einstellen der gewünschten Rezeptur über die plus und minus Anzeige. (Für das Ändern bzw. Neu anlegen von Rezepturen siehe „*Rezeptur ändern*“)
- Anlegen einer neuen Datei zur Speicherung der Messdaten: (Eingabe des Dateinamens unter „Dateiname Logfile“ und festlegen der Speicherintervalle unter „Schreibe alle“).
- Starten der Versuchs-Aufzeichnung durch Drücken von „Logfile Aktiv“ (wenn grün aktiv).
- Probenehmer in Ausgangsstellung bringen (ganz herausziehen).
- Starten der Aufladeeinheit durch den Grünen Start-Knopf.
- Wenn grüne Signal-Lampe „Aufladeeinheit testbereit“ leuchtet wird signalisiert, dass die Rezepttemperatur erreicht wurde. (kann bis zu 30 min dauern).
- Aufladeeinheit stoppen („roter Knopf“), Wirbelschichtkammer öffnen und Rohgutprobe aufgeben (max. 1,5 kg).

- Schließen der Wirbelschichtkammer und starten der Aufladeeinheit („grüner Knopf“).
- Probeentnahme ist mithilfe der Entnahmevorrichtung während des Versuches möglich.
- Die Zugabe von Reagenzien ist mithilfe einer Glasspritze über die Reagenzien-Aufgabevorrichtung möglich.
- Beenden des Versuches durch Betätigen der Stopp-Taste.
- Reinigen der Aufladeeinheit.

10. AUFLADUNG AUSGEWÄHLTER, RELEVANTER INDUSTRIEMINERALPROBEN

Um einen Eindruck über den Aufladevorgang von Mineralphasen zu bekommen, wurden einige relevante Reinmineralproben ausgewählt und in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, um sie triboelektrostatisch aufzuladen. Bei der Aufladung durch die Fluidisierung findet ein intensiver Kontakt zwischen den Körnern und zwischen Körnern und den Wirbelkammer-Wandungen statt, wodurch der notwendige Aufladevorgang für die triboelektrostatische Sortierung nachgestellt, bzw. realisiert werden kann. Die in die Aufladeeinheit integrierte Probenahmevorrichtung ermöglicht die Probenahme während des Fluidisiervorganges, was die zeitlich fortlaufende Dokumentation des Ladungsverlaufes ermöglicht.

10.1. AUFLADUNG VON QUARZ

Quarz und zahlreiche andere Silikate kommen häufig in heimischen Industriemineralagerstätten vor, aus diesem Grund wurde das Aufladeverhalten dieses Minerals zu Beginn untersucht.

Das Aufladeverhalten von Quarz wurde bereits in einer Studie von D.N. Ferguson für Anwendungen in der Sortierung von Schwermineralsanden untersucht und dabei eine *triboelektrische Reihe* für die Aufladung verschiedener Minerale erstellt, wobei bei in diesem Bereich der Fokus auf der Trennung von Quarz bzw. anderen nichtleitenden Mineralen von leitenden Mineralphasen lag. (76)

Mineral name	Recovery difference (%)	Charge acquired (apparent)	Comment
Apatite	-70.0	+++++++	Strong positive
Carbonates	-40.2	++++	Moderate positive
Monazite	-38.4	++++	Moderate positive
Titanomagnetite	0.4	.	Neutral
Ilmenite	0.8	.	Neutral
Rutile	2.0	.	Neutral
Leucoxene	2.4	.	Neutral
Magnetite/haematite	3.2	.	Neutral
Spinel	3.4	.	Neutral
Garnet	5.1	.	Neutral
Staurolite	6.6	.	Neutral
Altered ilmenite	13.3	-	V. weak negative
Goethite	14.4	-	V. weak negative
Zircon	20.4	--	Weak negative
Epidote	20.9	--	Weak negative
Tremolite	21.3	--	Weak negative
Hydrous silicates	22.5	--	Weak negative
Aluminosilicates	23.6	--	Weak negative
Tourmaline	24.8	--	Weak negative
Actinolite	26.0	--	Weak negative
Pyroxene	29.7	---	Weak negative
Titanite	39.1	----	Moderate negative
Feldspar	43.0	----	Moderate negative
Quartz	66.8	-----	Strong negative

Tabelle 36: Triboelektrische Reihe von Mineralen aus Schwermineralagerstätten (76)

Für die Untersuchung des triboelektrostatischen Aufladeverhaltens von Quarz wurde ein hochreines Quarzprodukt verwendet, welches ohne den Einsatz chemischer Konditionierung produziert wurde. Die Quarzprobe wurde insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung von Quarz ist in Abbildung 39 ersichtlich.

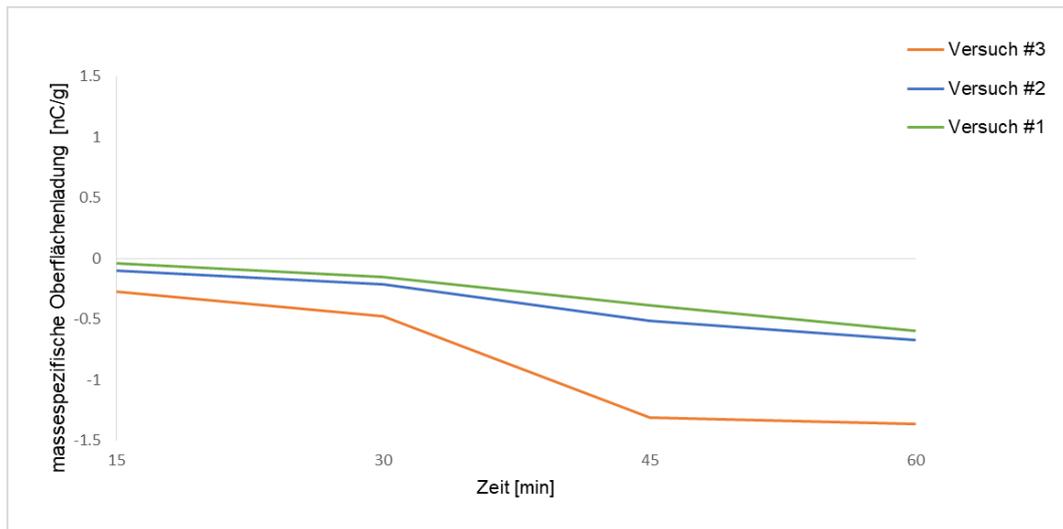


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz

Versuch 1 und 2 wurden nach dem gleichen Schema durchgeführt und zeigten einen ähnlichen zeitlichen Ladungsverlauf. Zu Beginn von Versuch 1 und 2 wurde die Quarzprobe in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit platziert und anschließend in Abständen von 15 min Teilproben zur Ladungsmessung entnommen. Bei dieser Art der Versuchsdurchführung wurden nach 60 min maximale negative Gesamtladungen von $-0,24$ nC/g und $-0,26$ nC/g gemessen. Bei Versuch 3 wurde nach jeder Ladungsmessung der Versuch mit einer neuen Quarzprobe erneut gestartet, das bedeutet zu Beginn wurde die erste Quarzprobe in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit platziert, für 15 min fluidisiert, die Ladungsmessung durchgeführt und im Anschluss die übrige Probe aus der Wirbelkammer der Aufladeeinheit entfernt. Danach wurde erneut eine Quarzprobe in die Wirbelkammer gegeben, für 30 min fluidisiert, die Ladungsmessung durchgeführt und im Anschluss wieder die restliche Probe aus der Wirbelkammer entfernt. Dieser Vorgang wurde auch mit einer Fluidisierungsdauer von 45 min und 60 min wiederholt. Bei dieser Art der Versuchsdurchführung wurde nach 60 min die größte negative Gesamtladung von $-1,48$ nC/g gemessen. Das Ergebnis bei Versuch 3 lässt sich dadurch erklären, dass immer wieder neue *Auflade-Partner* zu Verfügung standen, wodurch die triboelektrostatische Ladung der Quarzkörner effizienter funktioniert hat. Alle drei Kurven bestätigen jedoch die Stellung von Quarz in der *triboelektrischen Reihe*, wo er mit *stark negativ* eingeordnet ist (siehe Tabelle 36).

10.2. AUFLADUNG VON MAGNESIUMOXID

Das Magnesiumoxid wurde von der Firma „Styromag Steirische Magnesitindustrie GmbH“ zur Verfügung gestellt. Die bereitgestellte Magnesiumoxidprobe wurde in zwei Teilproben aufgeteilt, Probe A wurde doppelt eingeschweißt, luftdicht verpackt aufbewahrt, Probe B wurde offen bei ca. 20 °C und 30 % relativer Luftfeuchte in der Klimakammer gelagert.

Für Untersuchung des triboelektrostatischen Aufladeverhaltens der beiden Magnesiumoxidproben wurden aus dem ofenfallenden, kaustisch gebrannten Magnesit, Produkte verschiedener Reinheitsgrade hergestellt. Die Trennung des Magnesiumoxides von den Begleitmineralen, welche hauptsächlich Quarz und andere Silikate sind, erfolgte mit dem ST Bandscheider der Type „X2“. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Das Fließbild zur Herstellung die Proben ist in Abbildung 40 ersichtlich. Die rot markierten Trennprodukte wurden zur Ladungsmessung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit ausgewählt. Die Herstellung der Trennprodukte erfolgte für Probe A und B nach demselben Schema.

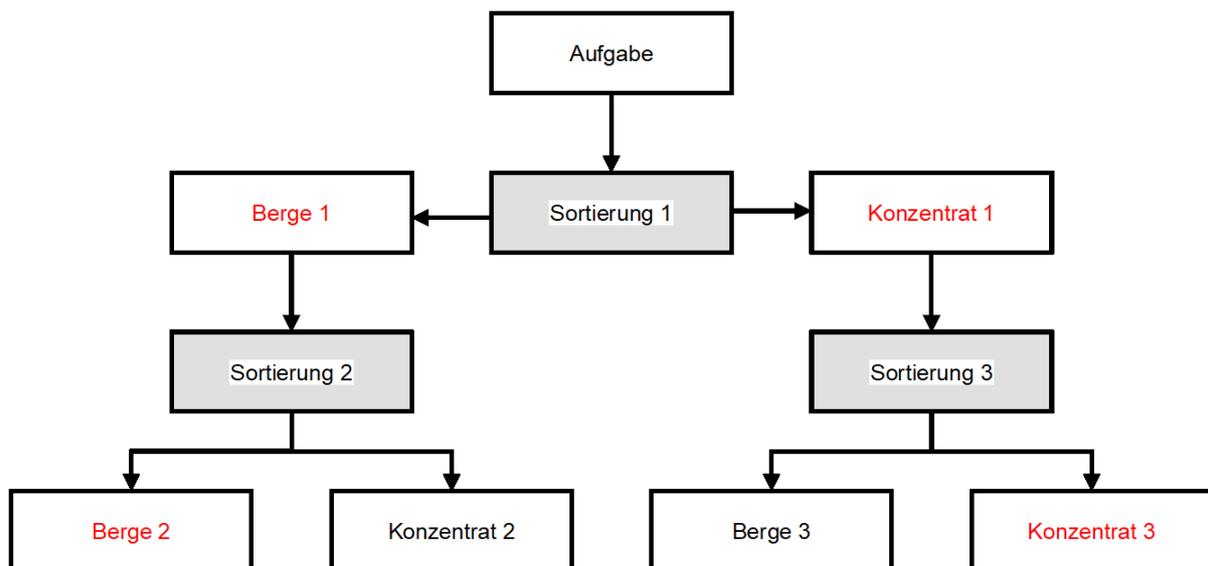


Abbildung 40: Fließbild zur Vorbereitung der Magnesiumoxidproben zur Aufladung und Ladungsmessung

10.2.1. AUFLADUNG VON MGO-PROBE A

Alle vier zuvor erzeugten Trennprodukte der Probe A wurden insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der

Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung von verschiedenen Reinheitsgraden von Magnesiumoxid ist in Abbildung 41 ersichtlich.

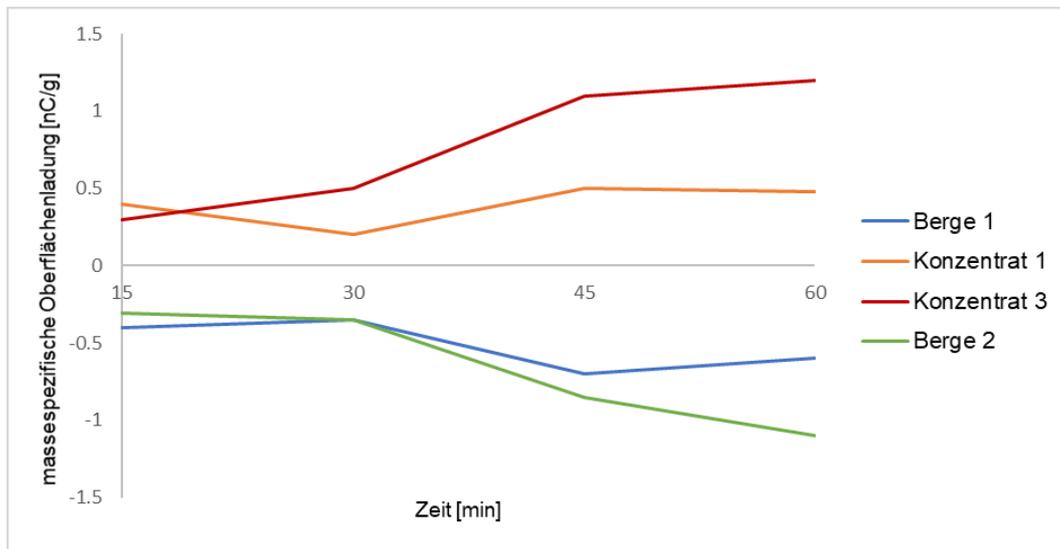


Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Magnesiumoxid-Trennprodukten

Die Aufladekurven der Produkte Berge 1 und 2 verlaufen ausschließlich im negativen Bereich. Es wurden nach 60 min negative Gesamtladungen von - 0,51 nC/g (Berge 1) und - 1,15 nC/g (Berge 2) gemessen. Da der Hauptbestandteil dieser beiden Produkte Quarz und andere Silikate sind, bestätigt dies die Tendenz zur negativen Aufladung von Silikaten, welche auch in Abbildung 39 dargestellt ist. Die beiden oxidreichen Konzentrate (1 und 3) zeigen einen ausschließlich positiven Ladungsverlauf. Es wurden nach 60 min Gesamtladungen von 1,25 nC/g (Konzentrat 1) und 0,50 nC/g (Konzentrat 3) gemessen. Dieser Ladungsverlauf bestätigt die Ergebnisse bzw. die Sortiererfolge bei der Trennung von Magnesiumoxid und Silikaten mittels triboelektrostatischer Bandscheidung (Kapitel 8.1), wo die Silikate von der positiven Elektrode angezogen wurden (entspricht einer negativen Oberflächenladung), die Oxide wurden von der negativen Elektrode angezogen, was einer positiven Oberflächenladung entspricht.

10.2.2. AUFLADUNG VON MGO-PROBE B

Der Versuchsablauf für die Aufladung durch Fluidisierung von Probe B ist ident mit dem von Probe A. Dies dient dem Zweck, Informationen über den Einfluss der Lagerung der MgO-Proben bzw. dem dabei gebildeten Magnesiumhydroxid auf das triboelektrostatische Aufladeverhalten zu erlangen. Alle vier

Magnesiumoxidprodukte der Probe B wurden insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung von verschiedenen Reinheitsgraden von Magnesiumoxid-Trennprodukten ist in Abbildung 42 ersichtlich.

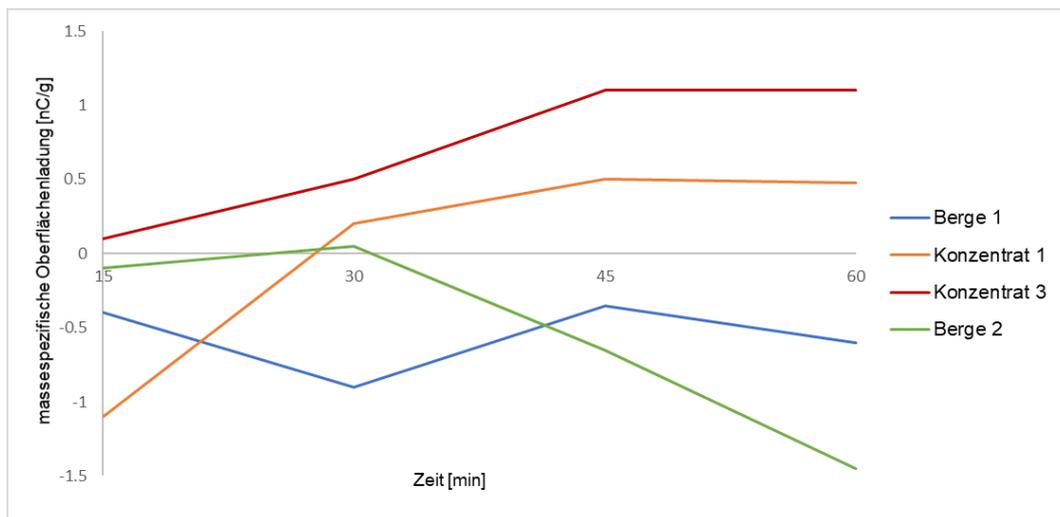


Abbildung 42: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von gelagerten Magnesiumoxid-Trennprodukten

Die aus Probe B erzeugten Produkte zeigen, mit Ausnahme von Berge 1 keinen durchgehend positiven oder negativen Ladungsverlauf, über die gesamte Fluidisierungsdauer von 60 min. Dieser Effekt kann darin gründen, dass bei den gelagerten Proben (offen bei ca. 20 °C und 30 % relativer Luftfeuchte) eine Umwandlung eines Teiles des Magnesiumoxides in Magnesiumhydroxid stattgefunden hat. Dieser Alterungsvorgang des Oxides wird durch den Kontakt mit Luft aus der Umgebung hervorgerufen. Der negative Einfluss der Magnesiumhydroxid-Bildung auf die triboelektrostatische Aufladung von Magnesiumoxid-Proben wurde auch bei der Sortierung am triboelektrostatischen Bandscheider festgestellt und durch die Aufladung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit bestätigt. (siehe Kapitel 8.1.11).

10.3. AUFLADUNG VON ROHMAGNESIT

Für die Untersuchung des triboelektrostatischen Aufladeverhaltens von Rohmagnesit wurde ein Magnesitprodukt von hoher Reinheit (Korngröße 100 % < 300 µm) verwendet, welche ohne den Einsatz chemischer Konditionierung produziert wurde. Die Magnesitprobe wurde insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung von Quarz ist in Abbildung 43 ersichtlich. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit wurde der Versuch mit denselben Einstellungen dreimal durchgeführt.

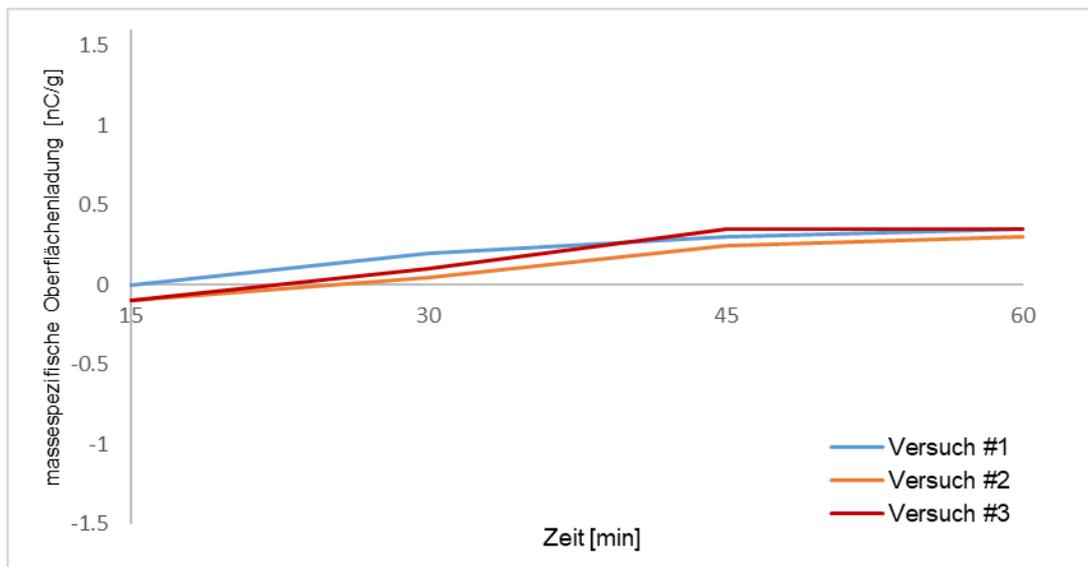


Abbildung 43 Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm

Die Verläufe der massespezifischen Oberflächenladungen der drei Versuche zeigen eine sehr ähnliche Tendenz. Zu Beginn der Versuche wurden massespezifische Oberflächenladungen zwischen -0,05 nC/g und 0,01 nC/g gemessen, gefolgt von einem Anstieg der Ladung in den positiven Bereich bis zu einem Maximum von 0,35 nC/g. Die geringfügig negative bzw. nur schwach ausgeprägt positive Aufladung, die bei der ersten Messung im Faraday Cup ermittelt wurde, ist auf das Fehlen der sich negativ ladenden Aufladepartner, z.B. Silikate, zurückzuführen. Durch diese Tatsache funktioniert die triboelektrostatische Aufladung ineffizienter, da nur die Wandung der Aufladeeinheit und andere Magnesit-Körner zur Verfügung stehen.

10.4. AUFLADUNG VON HALIT

Die Probe für die Betrachtung des triboelektrostatischen Aufladeverhaltens von Halit wurde von den Salinen Austria AG (SAAG) bereitgestellt. Der Gehalt an NaCl in der Probe wurde mit > 98 % angegeben. Die Halitprobe wurde insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung von Halit ist in Abbildung 44 ersichtlich.

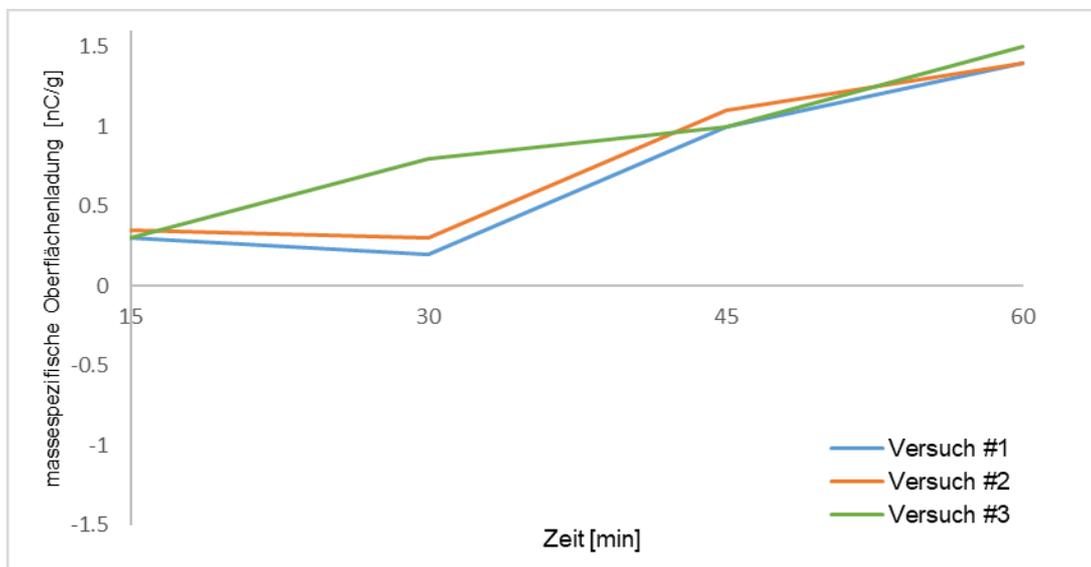


Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Halit

Versuch 1 und 2 wurden nach dem gleichen Ablauf durchgeführt und zeigen einen ähnlichen zeitlichen Ladungsverlauf, wobei die orange Kurve (Versuch 2) bei allen Messpunkten eine geringfügig höhere positive Gesamtladung aufweist. Zu Beginn von Versuch 1 und 2 wurde die Halitprobe in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit platziert und anschließend in Abständen von 15 min Teilproben zur Ladungsmessung entnommen. Bei diesen beiden Versuchen wurde nach einer Fluidisierungsdauer von 60 min, eine Gesamtladung von 1,48 nC/g gemessen. Bei Versuch 3 wurde nach jeder Ladungsmessung der Versuch mit einer neuen Halitprobe wiederholt gestartet, das bedeutet zu Beginn wurde die erste Halitprobe in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit platziert, für 15 min fluidisiert, die Ladungsmessung durchgeführt und im Anschluss die übrige Probe aus der Wirbelkammer der Aufladeeinheit entfernt. Danach wurde erneut eine Halitprobe in die Wirbelkammer gegeben, für 30 min

fluidisiert, die Ladungsmessung durchgeführt und im Anschluss wieder die restliche Probe aus der Wirbelkammer entfernt. Dieser Vorgang wurde auch mit einer Fluidisierungsdauer von 45 min und 60 min wiederholt. Bei diesem Versuch wurde ein schnellerer Anstieg der Oberflächenladung und zu Versuchsende mit 1,51 nC/g die höchste positive Gesamtladung gemessen. Dieses Ergebnis lässt sich dadurch erklären, dass immer wieder neue Auflade-Partner zu Verfügung standen, wodurch die triboelektrostatische Ladung der Halitkörner effizienter funktioniert hat.

10.5. GEZIELTE BEEINFLUSSUNG DER GESAMTLADUNG AUSGEWÄHLTER INDUSTRIEMINERALPROBEN

Aufbauend auf den Ergebnissen der „Basis-Kurven“ (Kapitel 10) des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Oberflächenladungen ausgewählter Industriemineralproben, wird durch Veränderung physikalischer und chemischer Bedingungen während der Versuchsdurchführung ein Effekt auf die Oberflächenladung durch diese Einflussfaktoren untersucht. Ein besonderes Augenmerk bei der Auswahl der Reagenzien liegt hierbei auf der gesundheitlichen Unbedenklichkeit.

10.5.1. QUARZ

10.5.1.1. Veränderung der Temperatur

Um den Temperatureinfluss auf das Aufladeverhalten von Quarz zu untersuchen, wurden aus der vorliegenden Quarzprobe drei Teilproben entnommen und im Trockenschrank für ca. 12 Stunden bei 60, 80 und 100 °C vorgeheizt. Die Proben wurden im Anschluss in der Aufladeeinheit insgesamt für 60 min fluidisiert. Bei der Aufladung durch Fluidisierung wurde die Luft vor Eintritt in die Wirbelkammer auf die jeweilige Vorheiztemperatur (60°C, 80°C und 100 °C) erhitzt. Der Versuchsablauf erfolgte für alle drei Proben gleich. Die Fluidisierzeit wurde in Abständen von jeweils 15 min bis zu einem Maximum von 60 min gesteigert, dabei wurden für jede Temperatur und Fluidisierzeit Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung ist in Abbildung 45 ersichtlich. Als Vergleichsbasis ist zusätzlich der massespezifische Ladungsverlauf von Quarz bei Raumtemperatur (Versuch Nr. 3 Abbildung 39) dargestellt.

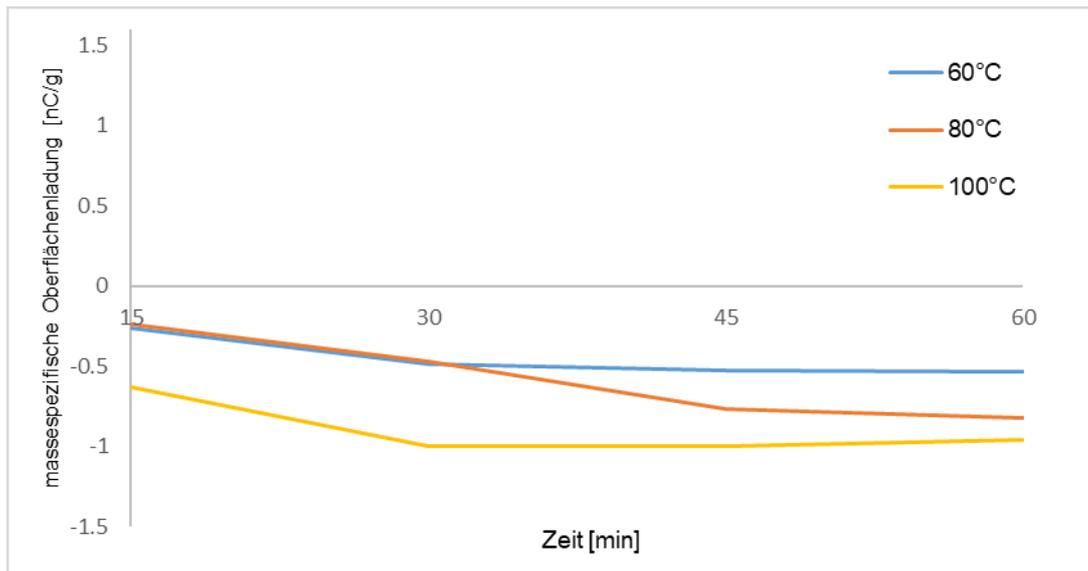


Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz bei 60, 80 und 100 °C

Die Verläufe der massespezifischen Ladung der Quarzproben, die bei 60 und 80 °C fluidisiert wurden, zeigen eine deutlich geringere Steigung der Kurve über die gesamte Fluidisierzeit, als die Quarzprobe, die bei 100 °C fluidisiert wurde. Auch der Endwert der negativen Gesamtladung der Probe bei 100 °C (nach 60 min Fluidisierdauer) war mit - 0,96 nC/g der höchste. Bei der Probe, die bei 60 °C fluidisiert wurde, betrug der Endwert nach 60 min Fluidisierdauer - 0,48 nC/g und bei 80°C - 0,84 nC/g. Verglichen mit den Ergebnissen bei der Aufladung von Quarz bei Raumtemperatur (ca. 25 °C: Abbildung 39 – Versuch 1) wurde eine Steigerung der negativen Gesamtladung um 0,24 nC/g bei 60 °C, um 0,60 nC/g bei 80 °C und um 0,72 nC/g bei 100 °C erzielt. Diese Ergebnisse weisen einen eindeutig positiven Effekt der Temperaturerhöhung auf die triboelektrostatische Aufladung von Quarz nach, welcher mit fortlaufender Steigerung der Temperatur (von 60 über 80 auf 100 °C) stärker wird.

10.5.1.2. Konditionierung

Der Einfluss von chemischer Aktivierung der Quarzoberfläche wurde durch die Beimengung dehydrierter Zitronensäure in verschiedenen Massenanteilen untersucht. Die Probe wurde gemeinsam mit 0,5 m-% (Versuch 1), 1,0 m-% (Versuch 2) und 2,0 m-% (Versuch 3) Zitronensäure, insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15 min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des

zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung der drei unterschiedlichen Konzentrationen ist in Abbildung 46 dargestellt.

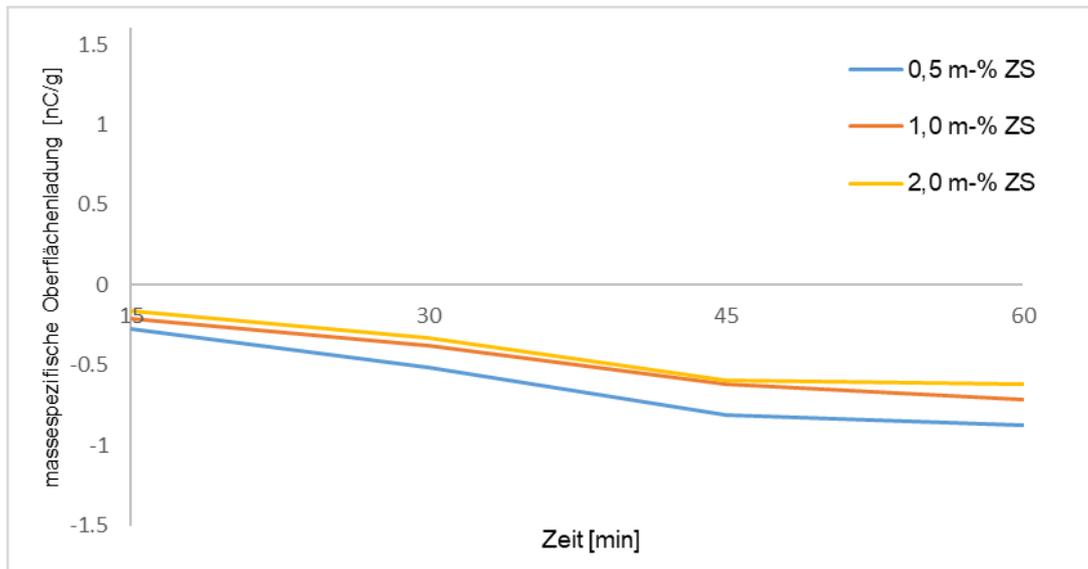


Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz, konditioniert mit Zitronensäure

Bei der Konditionierung mit 0,5 m-% dehydrierter Zitronensäure wurde eine maximale negative Gesamtladung von - 0,77 nC/g gemessen. Bei 1,0 m-% verringerte sich dieser Wert auf - 0,69 nC/g, bei der Beimengung von 2,0 m-% dehydrierte Zitronensäure auf - 0,62 nC/g. Bei den Versuchen mit unkonditioniertem Quarz wurde eine maximale negative Gesamtladung von - 0,24 nC/g (Abbildung 39 Versuch 1) erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringe Beimengung von dehydrierter Zitronensäure einen positiven Effekt hat, der jedoch mit Erhöhung des Massenanteils dieser Säure schwächer wird. Bei 0,5 m-% wurde die maximale negative Gesamtladung, verglichen mit dem unkonditionierten Versuch (Abbildung 39 Versuch 1), um 0,53 nC/g gesteigert. Bei der Zugabe von 1,0 m-% betrug diese Steigerung 0,45 nC/g, bei 2,0 m-% nur mehr 0,38 m-%.

10.5.2. ROHMAGNESIT

10.5.2.1. Veränderung der Temperatur

Um den Temperatureinfluss auf das Aufladeverhalten von Rohmagnesit zu untersuchen, wurden aus der vorliegenden Probe drei Teilproben entnommen und im Trockenschrank für ca. 12 Stunden bei 60, 80 und 100 °C vorgeheizt. Die Proben wurden im Anschluss in der Aufladeeinheit für insgesamt 60 min

fluidisiert. Bei der Aufladung wurde die Luft vor Eintritt in die Wirbelkammer auf die jeweilige Vorheiztemperatur des Magnesits (60, 80 und 100 °C) erhitzt. Die Proben zur Ladungsmessung wurden in Abständen von 15 min direkt aus der Wirbelkammer entnommen. Mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop wurde die massespezifische Ladung der entnommenen Proben bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung ist in Abbildung 47 ersichtlich.

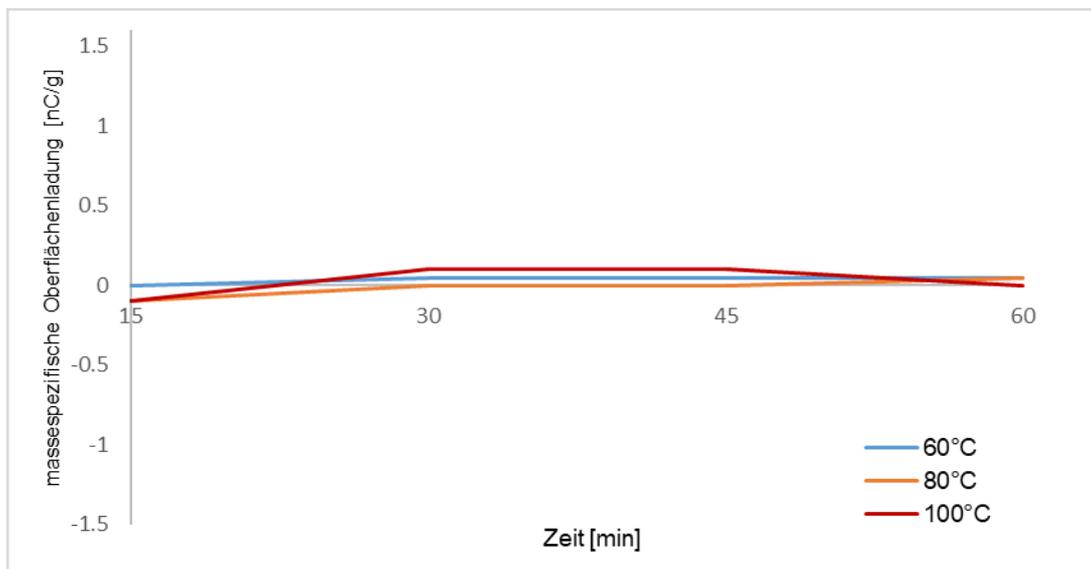


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm bei 60°C, 80°C und 100°C

Durch das Erhöhen der Temperatur wurde die Aufladung der Magnesitoberfläche bei allen drei Versuchen unterdrückt. Die Oberflächenladungen aller drei Proben betrugen nach 60 min Fluidisierzeit zwischen 0,0 und 0,1 nC/g. Die Ergebnisse zeigen einen eindeutig negativen Effekt der Temperaturerhöhung auf die triboelektrostatische Aufladung von Rohmagnesit.

10.5.2.2. Konditionierung

Der Einfluss von chemischer Aktivierung der Magnesitoberfläche wurde durch die Beimengung von dehydrierter Zitronensäure in verschiedenen Massenanteilen untersucht. Die Probe wurde gemeinsam mit 0,5 m-% (Versuch 1), 1 m-% (Versuch 2) und 2 m-% (Versuch 3) Zitronensäure, insgesamt für 60 min in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit fluidisiert, dabei wurden in Abständen von jeweils 15

min Proben direkt aus der Wirbelkammer entnommen und die massespezifische Ladung der Proben mithilfe eines Messaufbaus aus Faraday Cup und Elektroskop bestimmt. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung ca. 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der massespezifischen Ladung der drei unterschiedlichen Konzentrationen ist in Abbildung 48 dargestellt.

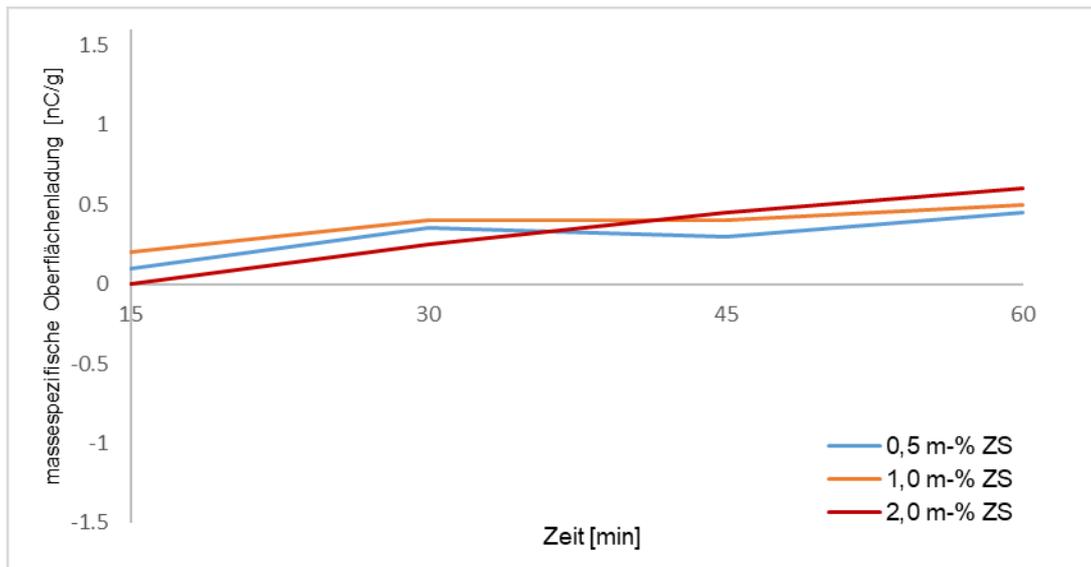


Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm, konditioniert mit Zitronensäure

Bei allen drei konditionierten Versuchen konnte die maximale positive Gesamtladung des Rohmagnesits gesteigert werden. Bei den Versuchen mit unkonditionierten Rohmagnesitproben < 300 µm wurde eine maximale Gesamtladung von 0,35 nC/g (Abbildung 43) erreicht. Bei der Konditionierung mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure konnte dieser Maximalwert um 0,25 nC/g, auf eine maximale Gesamtladung 0,6 nC/g gesteigert werden. Diese Steigerung war auch bei den beiden anderen konditionierten Versuchen ersichtlich. Bei einem Anteil von 0,5 m-% dehydrierter Zitronensäure wurde nach 60 min Fluidisierungsdauer eine maximale Gesamtladung von 0,47 nC/g gemessen, bei 1,0 m-% betrug diese 0,49 nC/g. Durch diese Ergebnisse kann ein positiver Effekt auf das triboelektrostatische Aufladeverhalten von Rohmagnesit bei der Vorbehandlung mit dehydrierter Zitronensäure festgestellt werden.

11. SORTIERVERSUCHE AM TRIBOELEKTROSTATISCHEN BANDSCHEIDER MIT VORBEHANDELTEN MINERALOBERFLÄCHEN

Um den Einfluss der Vorbehandlung von Mineralphasenoberflächen auf den Sortiererfolg am triboelektrostatischen Bandscheider zu überprüfen und somit in weiterer Folge einen praxisrelevanten Effekt durch diese Rohgutvorbehandlung zu ermitteln, wurde eine Rohmagnesitprobe, mit dem Begleitmineral Quarz, wie im Kapitel 10.5 erläutert, auf die Sortierung am triboelektrostatischen Bandscheider vorbereitet.

Für die Versuche wurde Rohmagnesit RMF 02 ausgewählt. Mit diesem Probenotyp wurden (Kapitel 8.2) schon zuvor zahlreiche systematische Sortierversuche durchgeführt und somit war auch eine ausreichende Vergleichsbasis für die Versuche mit Rohgutvorbehandlung vorhanden. Die Raumtemperatur betrug während der Versuchsdurchführung 25 °C, die relative Luftfeuchte ca. 20 %. Die Maschineneinstellungen am triboelektrostatischen Bandscheider wurden laut Tabelle 19 gewählt. Die Beurteilung des Sortiererfolgs erfolgte über die Bestimmung des Glühverlustes.

11.1. VERÄNDERUNG DER TEMPERATUR

Bei der ersten Versuchsreihe mit vorbehandelten Mineraloberflächen wurde (wie in Kapitel 10.5.2.1) die Temperatur der Rohmagnesitprobe mit 60, 80 und 100 °C gewählt. Jeder Versuch wurde doppelt durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Zusätzlich wurde ein Vergleichsversuch mit einer Probe bei Raumtemperatur (25 °C) durchgeführt.

<i>Versuch Nr,</i>	<i>Produkt</i>	<i>Temperatur [°C]</i>	<i>Masse [%]</i>	<i>GLV [%]</i>
V0.1	<i>E1 (Berge)</i>		22,2	23,8
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		77,8	46,3
	<i>Aufgabe</i>	25,0	100,0	41,3
V0.2	<i>E1 (Berge)</i>		21,1	23,7
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		78,9	46,2
	<i>Aufgabe</i>	25,0	100,0	41,5
V1.1	<i>E1 (Berge)</i>		26,7	26,9
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		73,4	45,5
	<i>Aufgabe</i>	60,0	100,0	40,5
V1.2	<i>E1 (Berge)</i>		28,8	26,8
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		71,2	45,9
	<i>Aufgabe</i>	60,0	100,0	40,4
V2.1	<i>E1 (Berge)</i>		27,8	27,3
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		72,2	45,7
	<i>Aufgabe</i>	80,0	100,0	40,6
V2.2	<i>E1 (Berge)</i>		25,5	27,7
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		74,5	45,8
	<i>Aufgabe</i>	80,0	100,0	41,2
V3.1	<i>E1 (Berge)</i>		26,5	28,1
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		73,5	44,9
	<i>Aufgabe</i>	100,0	100,0	40,4
V3.2	<i>E1 (Berge)</i>		25,7	28,8
	<i>E2 (Konzentrat)</i>		74,3	44,8
	<i>Aufgabe</i>	100,0	100,0	40,7

Tabelle 37: Bilanzen zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: RMF 02)

Bei den Sortierversuchen zeigte sich der gleiche Trend wie bei den Aufladeversuchen mit der reinen Magnesitprobe. Mit steigender Temperatur verschlechterte sich der Aufladeerfolg und somit auch das Sortierergebnis am triboelektrostatischen Bandscheider. Das beste Sortierergebnis lieferte der Versuch bei Raumtemperatur (V0.1). Bei diesem Versuch wurde im Konzentrat ein Glühverlust von 46,3 % erzielt. Bei dem Versuch (V3.1) mit der höchsten Temperatur (100 °C) wurde im Konzentrat nur mehr ein Glühverlust von 44,9 % ermittelt. Das Masseausbringen an Konzentrat verschlechterte sich ebenfalls von 77,8 % auf 73,5 %.

In den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 49 bis Abbildung 50) sind das Masseausbringen und der Glühverlust von V0 bis V3, der Konzentrate (E2) und der Bergeprodukte (E1) dargestellt. Der Versuch V0 (blaue Markierungen) der Konzentrate und Bergeprodukte hebt sich deutlich von den anderen Versuchen (V1 bis V3) ab. Es wurde sowohl ein besseres Magnesitausbringen, bei höherem Glühverlust (was einer höheren Konzentratqualität entspricht) im Konzentrat erzielt, als auch ein

besseres Silikatausbringen im Bergeprodukt, mit niedrigerem Glühverlust. Diese Ergebnisse stimmen mit den Tendenzen überein, die bei der Aufladung einer Magnesitprobe bei erhöhter Temperatur, (Kapitel 10.5.2.1) festgestellt wurden.

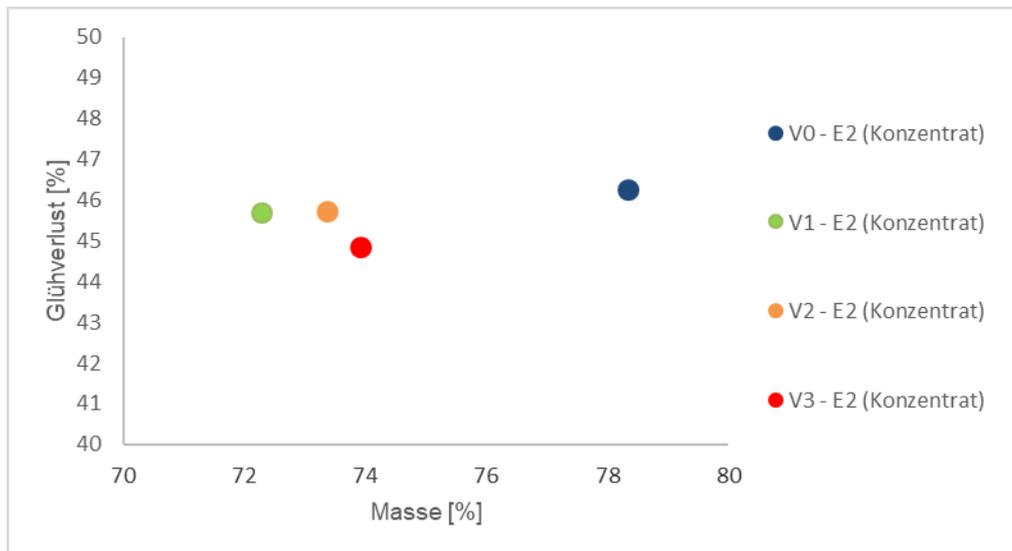


Abbildung 49: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: *RMF 02*)

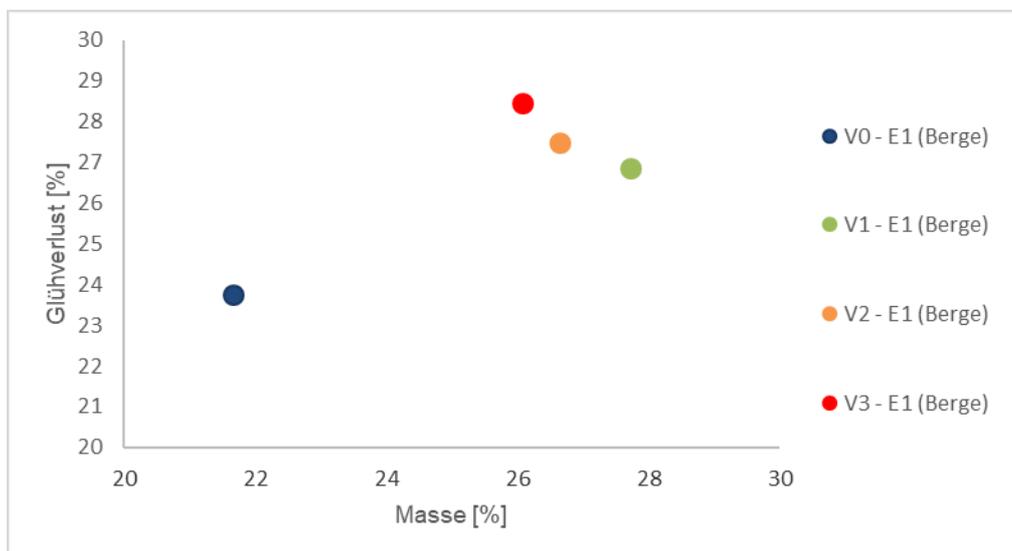


Abbildung 50. Glühverluste des Bergeproduktes zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: *RMF 02*)

11.2. KONDITIONIERUNG

Bei der zweiten Versuchsreihe mit vorbehandelten Mineraloberflächen wurde die Rohmagnesitprobe (wie in Kapitel 10.5.2.2) mit dehydrierter Zitronensäure unterschiedlicher Masseanteilen (0,5; 1,0; 2,0 – m%) konditioniert. Jeder Versuch wurde doppelt durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Zusätzlich wurde eine unkonditionierte Vergleichsprobe bei den selben Umgebungs- und Maschinenparametern sortiert.

Versuch Nr,	Produkt	m-% C ₆ H ₈ O ₇ [m-%]	Masse [%]	GLV [%]
V0.1	E1 (Berge)		22,2	23,8
	E2 (Konzentrat)		77,8	46,3
	Aufgabe	-	100,0	41,3
V0.2	E1 (Berge)		21,1	23,7
	E2 (Konzentrat)		78,9	46,2
	Aufgabe	-	100,0	41,5
V1.1	E1 (Berge)		22,5	23,3
	E2 (Konzentrat)		77,5	46,4
	Aufgabe	0,5	100,0	41,2
V1.2	E1 (Berge)		22,8	23,5
	E2 (Konzentrat)		77,2	46,7
	Aufgabe	0,5	100,0	41,4
V2.1	E1 (Berge)		22,4	21,6
	E2 (Konzentrat)		77,6	47,0
	Aufgabe	1,0	100,0	41,3
V2.2	E1 (Berge)		22,2	19,9
	E2 (Konzentrat)		77,8	47,8
	Aufgabe	1,0	100,0	41,6
V3.1	E1 (Berge)		23,1	16,3
	E2 (Konzentrat)		76,9	48,8
	Aufgabe	2,0	100,0	41,3
V3.2	E1 (Berge)		22,1	17,0
	E2 (Konzentrat)		77,9	48,7
	Aufgabe	2,0	100,0	41,7

Tabelle 38: Bilanzen zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: *RMF 02 konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure*

Bei den Sortierversuchen zeigt sich der gleiche Trend wie bei den Aufladeversuchen mit der reinen Magnesitprobe. Mit steigender Zitronensäurekonzentration verbessert sich der Aufladeerfolg und somit auch das Sortierergebnis am triboelektrostatischen Bandscheider. Das beste Sortierergebnis lieferte der Versuch mit 2,0 m-% dehydrierter Zitronensäure (V3.1). Bei diesem Versuch wurde ein Glühverlust von 48,8 % erzielt. Bei dem Vergleichsversuch (V0.1), ohne Konditionierung mit Zitronensäure, wurde im Konzentrat ein Glühverlust von 46,3 % ermittelt. Das Masseausbringen an Konzentrat verschlechterte sich bei der Konditionierung geringfügig von 77,8 % auf 76,9 %.

In den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 51 bis Abbildung 52) sind das Masseausbringen und der Glühverlust von V0 bis V3, der Konzentrate (E2) und der Bergeprodukte (E1) dargestellt. Der Versuch V3 (rote Markierungen) hebt sich deutlich von den anderen Versuchen ab. Es wurde bei einem ähnlichen Masseausbringen an Konzentrat ein höherer Glühverlust (was einer höheren Konzentratqualität entspricht) und auch ein niedriger Glühverlust im Bergeprodukt erzielt. Diese Ergebnisse sprechen für einen positiven Effekt durch die Rohgutvorbehandlung mit dehydrierter Zitronensäure, in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit. Dieser Effekt wurde auch bei den Aufladeversuchen mit anschließender Messung der Gesamtladung von konditionierten Magnesitproben ermittelt. Bei diesen Aufladeversuchen wurde bei der Konditionierung mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure die höchste Gesamtladung gemessen.

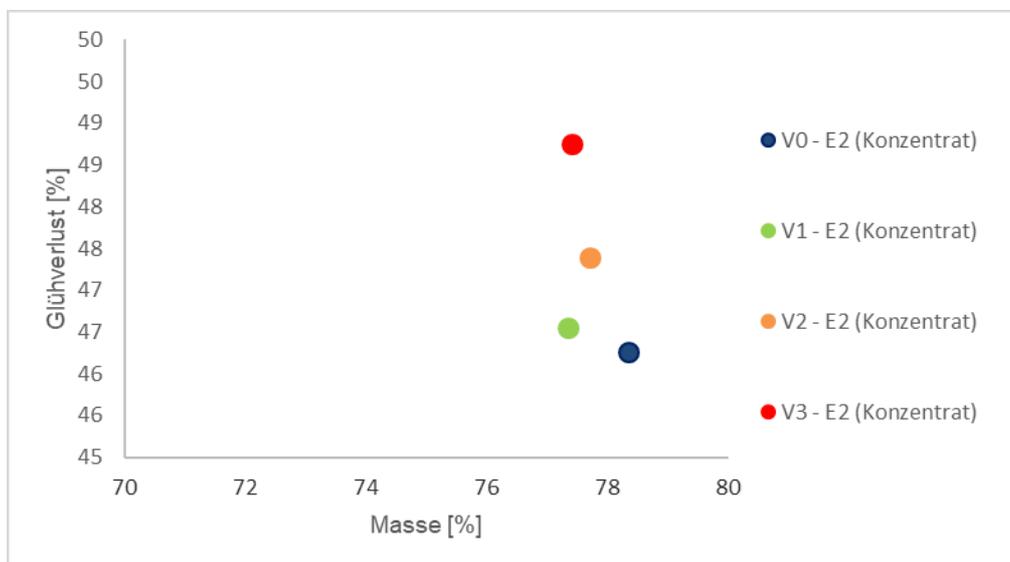


Abbildung 51: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: RMF 02 konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure

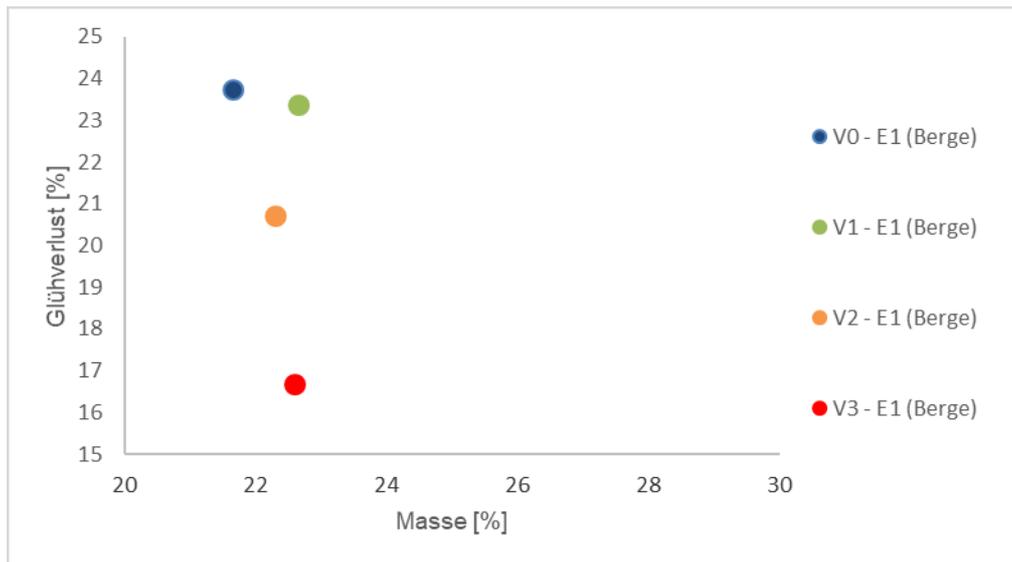


Abbildung 52: Glühverluste des Bergeproduktes zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: RMF 02 konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure

Zur Ermittlung des Erfolgs, der direkt durch die Konditionierung mit dehydrierter Zitronensäure entsteht und nicht aus der Aufladung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit hervorgeht, wurde eine Rohmagnesitprobe ohne vorangehende Aufladung mit 2,0 m-% dehydrierter Zitronensäure vermengt und anschließend direkt dem triboelektrostatischen Bandscheider aufgegeben. Der Versuch wurde doppelt durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Die Bilanz zu den Versuchen (4.1 und 4.2) ist in Tabelle 39 zusammengefasst.

Versuch Nr.	Produkt	m-% $C_6H_8O_7$ [m-%]	Masse [%]	GLV [%]
V4.1	E1 (Berge)		23,0	17,3
	E2 (Konzentrat)		77,0	48,6
	Aufgabe	2,0	100,0	41,4
V4.2	E1 (Berge)		22,6	16,2
	E2 (Konzentrat)		77,4	48,9
	Aufgabe	2,0	100,0	41,5

Tabelle 39: Bilanzen zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: RMF 02 konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)

Bei diesen Versuchen (V4.1 und V4.2) wurden Glühverluste von 48,6 % und 48,9 % im Konzentrat, bei einem Masseausbringen von 77,0 % und 77,4 % erzielt. Diese Ergebnisse sind nahezu identisch mit

den Ergebnissen die mit der vorangehenden Behandlung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit (V3.1 und V3.2) erzielt wurden. In den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 53 bis Abbildung 54) sind das Masseausbringen und der Glühverlust von V3 (Konditionierung, Aufladung und Sortierung) und V4 (Konditionierung ohne Aufladung und Sortierung), der Konzentrate (E2) und der Bergeprodukte (E1) dargestellt.

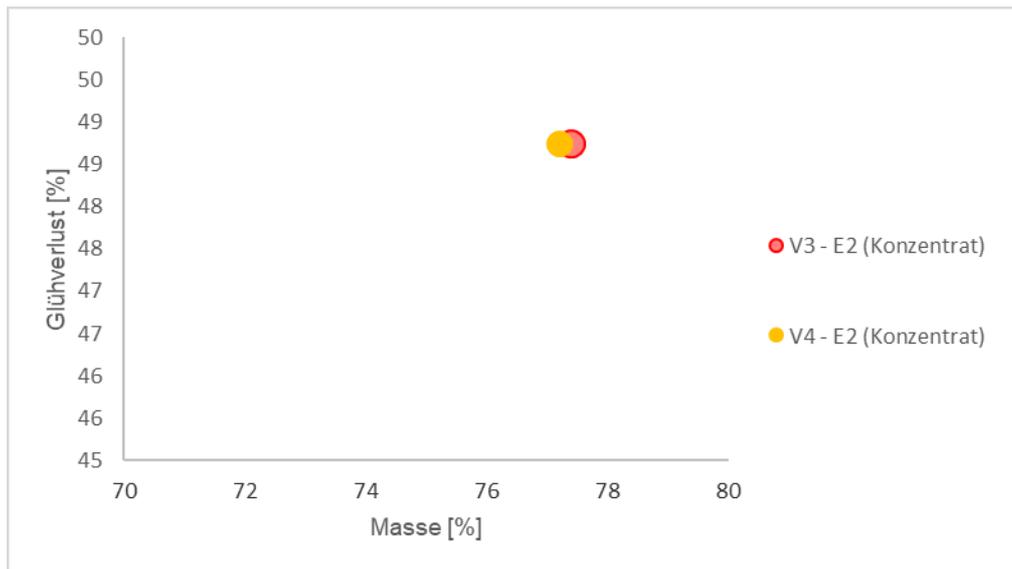


Abbildung 53: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: *RMF 02* konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)

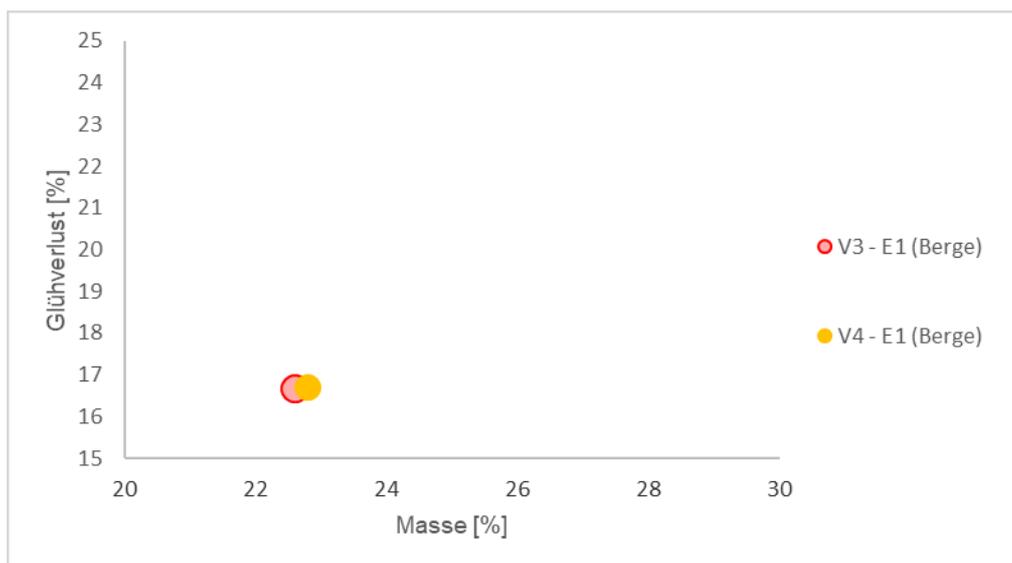


Abbildung 54: Glühverluste des Bergesprodukts zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: *RMF 02* konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)

Die Markierungspunkte von V3 und V4 sind sowohl im Konzentrat als auch im Bergeprodukt nahezu deckungsgleich. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass die Verbesserung des Sortiererfolges bei den konditionierten Versuchen nahezu ausschließlich vom Reagenz verursacht wurde und nicht durch die vorangehende Aufladung durch Fluidisierung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit. Die zusätzliche, durch die Fluidisierung erzeugte Aufladung baute sich durch die Probenmanipulation bis zur Aufgabe auf den triboelektrostatischen Bandscheider ab. Um die in der Aufladeeinheit erzeugte Oberflächenladung auszunutzen, bedarf es einer baulichen Veränderung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit, die die direkte Aufgabe der Proben aus der Wirbelkammer auf den triboelektrostatischen Bandscheider ermöglicht. Dies könnte z. B. durch pneumatische Förderung über eine Rohrleitung erfolgen. Die triboelektrostatische Aufladeeinheit in aktueller Ausführung ist ein wichtiges Aggregat, um ohne zeitintensive elektrostatische Sortierversuche eine Aussage über die Oberflächenladung (Vorzeichen und Größe) verschiedener Rohgutarten zu treffen. Des Weiteren kann der Einfluss von Temperatur und Reagenzien in der Aufladeeinheit bestimmt werden.

12. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung hat seit mehr als zwölf Jahren einen Forschungsschwerpunkt auf die Elektroscheidung nach Triboaufladung gesetzt. Die bis dato gewonnenen Erkenntnisse zeigen auf, dass die Elektroscheidung nach Triboaufladung ein großes Potential für die Aufbereitung von Industriemineralen aufweist. Diese am Lehrstuhl vorhandene Wissensbasis konnte im Zuge dieses Forschungsprojektes ausgebaut werden.

12.1. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERGEBNISSE

12.1.1. ROHGUTSPEZIFISCHE SORTIERVERSUCHE

Im Zuge dieser Dissertation wurden mittels des Einsatzes eines triboelektrostatischen Bandscheiders (Typ: STET X2) systematische Sortierversuche mit ausgewählten Industriemineralproben durchgeführt, um rohgutspezifisches Basiswissen über das triboelektrostatische Aufladeverhalten und die Sortierbarkeit zu generieren.

Die Versuchsreihen mit **Magnesiumoxid** haben ergeben, dass das Aufladeverhalten und dadurch in weiterer Folge der Sortiererfolg, stark durch die Lagerungsbedingungen und die Sortieratmosphäre beeinflusst werden. Bei Versuchen mit gekühlten (8 °C), unter Luftabschluss gelagerten Proben zeigten sich Anreicherungseffekte, wohingegen bei Versuchen mit einer vorgewärmten Magnesiumoxidprobe (80 °C) festgestellt werden konnte, dass dies einen negativen Einfluss auf den Sortiererfolg zur Folge hat. Versuche mit einer stufenweisen Erhöhung der Spannung machten deutlich, dass die Oxide (MgO und CaO) den gleichen Trend zeigen, und dieser Parameter daher keine Möglichkeit zur Trennung von Magnesiumoxid und Kalziumoxid bietet. Die detaillierte Untersuchung der Bandgeschwindigkeit ergab ein Optimum bei 36 fps. Um die MgO-Verluste in den Bergen zu reduzieren, wurden Nachreinigungsversuche im Zuge von Locked Cycle Tests durchgeführt. Im Zuge dieser Tests konnte keine stabile Konzentratqualität erreicht werden, was bedeutet, dass diese Prozessführung für diese Rohgutart ungeeignet ist.

Im Zuge der Versuche mit **Rohmagnesit** konnten deutliche Anreicherungen von Magnesit (ermittelt durch Bestimmung von MgO mittels RFA) im Konzentrat und der säureunlöslichen Bestandteile (Silikate) im Bergeprodukt erzielt werden. Das Masseausbringen an Konzentrat betrug 80 %, der MgO-Gehalt konnte von 32,70 % in der Aufgabe auf 38,3 % im Konzentrat bei einem Inhaltsausbringen an MgO von 93,71 % gesteigert werden. Die Reproduzierbarkeit der Sortierversuche konnte bestätigt werden.

Bei den Versuchen mit **Gulsenit** zeigte sich, dass die Variation der Maschineneinstellungen am triboelektrostatischen Bandscheider einen deutlich geringeren Einfluss auf das Sortierergebnis hat, als bei Magnesiumoxid und Rohmagnesit. Der Trennerfolg konnte durch das Verändern der Maschineneinstellungen nur in sehr geringen Maß beeinflusst werden.

Die mit **Steinsalz (Halit)** erzielten Ergebnisse der triboelektrostatischen Bandscheidung zeigten ein zu geringes Anreicherungspotential bei einstufiger Sortierung. Von zwei bzw. mehrstufiger Sortierung am Bandscheider ist bei dieser Rohgutart abzusehen, da sich bereits bei einmaliger Aufgabe eine starke Nachzerkleinerung der Produkte erkennen lässt.

12.1.2. ENTWICKLUNG EINER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

Des Weiteren wurde eine triboelektrostatische Aufladeeinheit entwickelt, mit welcher die triboelektrostatische Aufladung verschiedener Rohgutarten gezielt durchgeführt, quantitativ erfasst und damit in weiterer Folge kontrolliert werden kann.

Die in Zusammenarbeit mit der Firma M.A.L. Metallbau Anlagenservice- Leitungsbau GmbH entwickelte, gebaute und in Betrieb genommene triboelektrostatische Aufladeeinheit versetzt den Lehrstuhl in die Lage, mineralische Proben hinsichtlich des Aufladeverhaltens zu evaluieren. Der geeignete Dispersitätsbereich liegt zwischen 40 µm und 1 mm, die benötigte Probemenge kann mit max. 1,5 kg angegeben werden.

Zur Prüfung auf Einsatztauglichkeit der triboelektrostatischen Aufladeeinheit wurden zunächst die Reinmineralproben Quarz, Magnesiumoxid, Magnesit und Halit ausgewählt. Die Aufladung der Reinmineralproben fand unter definierten, konstanten Bedingungen statt. Dabei wurden die Proben insgesamt für 60 min fluidisiert, Teilproben zur Ladungsmessung im Faraday Cup entnommen und in weiterer Folge der zeitliche Verlauf der massespezifischen Gesamtladung in nC/g, erstellt.

Bei der Aufladung von Quarz wurde über den gesamten Messvorgang eine negative Ladung ermittelt. Die Rohmagnesit- und Magnesiumoxidproben zeigten eine Tendenz zu positiver Aufladung, wobei der Alterungsprozess des Magnesiumoxides die Aufladeeffizienz deutlich verschlechtert hat, was sich auch in den Ergebnissen der Sortierversuche widerspiegelt. Die Steinsalzprobe zeigte den schnellsten Anstieg der Ladung, welche ebenfalls im positiven Bereich war. Die Auflade-Ergebnisse, die im Zuge dieser Versuche ermittelt wurden, stimmen mit den aus den Sortierversuchen abgeleiteten Auflade-Ergebnissen überein, wodurch eine erste Bestätigung für die Aussagekraft der erstellten „Aufladekurven“ gegeben ist.

Zur gezielten Beeinflussung der Mineralphasenoberflächen bzw. zur Veränderung der Aufladekurven wurden Quarz und Rohmagnesit für insgesamt 60 min fluidisiert und kontinuierlich Teilproben zur

Ladungsmessung entnommen. Dabei wurde als erster Einflussparameter die *Temperatur* der Rohgutproben und der Luft in der Aufladeeinheit in Abständen von 20 °C stufenweise erhöht. Die Erhöhung der Temperatur zeigte eine deutliche Verbesserung der Aufladung von Quarz und eine Verschlechterung der Aufladung der Rohmagnetitprobe. Als zweiter Einflussparameter wurde die Zugabe von dehydrierter Zitronensäure zur Konditionierung und möglicher Aktivierung der Mineralphasenoberflächen untersucht. Dabei wurden verschiedene Konzentrationen (0,5, 1,0 und 2,0 m-% $C_6H_8O_7$) getestet. Bei der Quarzprobe führte die Konditionierung zu einer sehr geringen Verbesserung der Aufladung, die mit steigendem Massenanteil an Zitronensäure schwächer wurde. Bei der Magnetitprobe verbesserte sich der Aufladeerfolg mit steigender Konzentration.

12.1.3. SORTIERVERSUCHE MIT VORHERGEHENDER ROHGUTVORBEHANDLUNG IN DER TRIBOELEKTROSTATISCHEN AUFLADEEINHEIT

Der Einfluss der gezielten Beeinflussung von Mineralphasenoberflächen auf den Sortiererfolg am triboelektrostatischen Bandscheider und somit der praxisrelevante Effekt dieser Beeinflussung wurde mit einer Rohmagnetit-Quarz-Probe überprüft. Von einer systematischen Durchführung mit allen bisher untersuchten Rohgutarten musste hier Abstand genommen werden, da sich eine für den Betrieb des triboelektrostatischen Bandscheiders unumgängliche Wartung pandemiebedingt um sieben Monate verzögert hat und eine weitere Versuchsdurchführung den zeitlichen und finanziellen Rahmen des Projekts gesprengt hätte.

Bei der für diese Versuche verwendeten Rohmagnetit-Quarz-Probe konnten die in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit festgestellten Tendenzen bestätigt werden. Ein Versuch mit Konditionierung ohne vorangehende Aufladung zeigte, dass die Verbesserung des Sortiererfolges bei den konditionierten Versuchen nahezu ausschließlich vom Reagenz verursacht wird und nicht durch die vorangehende Aufladung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit. Die zusätzliche, durch Reibung erzeugte Ladung baut sich bei der Rohmagnetit-Quarz-Probe durch die Probenmanipulation bis zur Aufgabe auf den triboelektrostatischen Bandscheider wieder ab. Der Abbau der durch Reibung erzeugten Ladung geht bei verschiedenen Rohgutarten unterschiedlich schnell von statten, daher könnte diese Problematik bei anderen Rohgutarten sehr viel schwächer ausgeprägt sein, oder erst gar nicht auftreten.

Um diese in der Aufladeeinheit erzeugte Oberflächenladung auch für Rohgutarten auszunutzen, bei denen sich die Oberflächenladung schnell abbaut, bedarf es einer baulichen Veränderung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit, die die direkte Aufgabe der Proben aus der Wirbelkammer auf den triboelektrostatischen Bandscheider ermöglicht. Dies könnte z. B. durch pneumatische Förderung über eine Rohrleitung erfolgen.

12.2. GEWONNENE ERKENNTNISSE

Die im Rahmen dieser Dissertation erzielten Ergebnisse zeigen das prinzipielle Potenzial für weitere Einsatzmöglichkeiten der trocken betriebenen Elektroscheidung im für Europa so wichtigen Industriemineralsektor auf. Einen wichtigen Beitrag hat dazu die Entwicklung des triboelektrostatischen Bandscheiders geleistet, der den Einsatz im Feinkornbereich erst möglich gemacht hat.

Durch die breit angelegten, systematisch geplanten Versuche am triboelektrostatischen Bandscheider vom Typ X2, der in der Klimakammer im Aufbereitungstechnikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung installiert ist, wurden umfangreiche Erkenntnisse über die Möglichkeiten der triboelektrostatischen Sortierung der Industrieminerale Magnesiumoxid, Rohmagnesit, Gulsenit und Halit gewonnen.

Insbesondere die erfolgreiche Anreicherung des Magnesiumoxids eröffnet hierbei eine neue Prozessführung, nämlich die Möglichkeit der „nachträglichen“ Aufbereitung der reaktiv gebrannten Produkte. Für diese, prozessbedingt feinstdispers anfallenden Produkte gab es bis dato kein für die Sortierung nutzbares Aufbereitungsaggregat, da aufgrund der chemischen Reaktivität ein Aufbereitungsprozess in nasser Betriebsweise (z.B. Flotation) nicht einsetzbar ist. Die triboelektrostatische Sortierung von Rohmagnesit eröffnet neue Perspektiven zur effizienten Silikatabreicherung und die Möglichkeit zur Vermeidung einer Aufbereitung in nasser Betriebsweise.

Die für die Verfolgung und Beeinflussung des Aufladeverhaltens entwickelte triboelektrostatische Aufladeeinheit ermöglicht die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der triboelektrostatischen Aufladung unterschiedlicher mineralischer Proben. Mithilfe der dadurch erstellten „Aufladekurven“ kann vor der Durchführung von Sortierversuchen eine Aussage über die Aufladung der Mineralphasenoberflächen, die Einflussfaktoren auf die Aufladung (z.B. Temperaturveränderung oder Konditionierung), und deren prinzipielle Eignung für die triboelektrostatische Bandscheidung getroffen werden. Durch die der Sortierung vorangehende Betrachtung mithilfe der triboelektrostatischen Aufladeeinheit kann der experimentelle Aufwand deutlich reduziert und noch effizienter gestaltet werden. Sortierversuche am triboelektrostatischen Bandscheider bestätigten die Ergebnisse und die Aussagekraft der Aufladekurven.

Durch die Konditionierung von Rohmagnesit in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit mit dehydrierter Zitronensäure war es möglich, die Aufladung und dadurch auch das Sortierergebnis am triboelektrostatischen Bandscheider deutlich zu verbessern. Eine zusätzliche Verbesserung der Aufladung, die durch die Fluidisierung in der triboelektrostatischen Aufladeeinheit und nicht durch die Konditionierung hervorgerufen wird, konnte für die untersuchte Rohmagnesit-Quarz-Probe jedoch nicht bzw. nur in einem sehr geringen Ausmaß erzielt werden. Die zusätzlich erzeugte Oberflächenladung bei dieser Probe baute sich zu schnell wieder ab und konnte daher für die Sortierung nicht ausgenutzt werden. Um die in der Aufladeeinheit erzeugte Oberflächenladung auch für Rohgutarten auszunutzen,

bei denen sich die Oberflächenladung schnell abbaut, bedarf es einer baulichen Veränderung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit, die die direkte Aufgabe der Proben aus der Wirbelkammer auf den triboelektrostatischen Bandscheider ermöglicht. Dies könnte z.B. durch pneumatische Förderung über eine Rohrleitung erfolgen. Die triboelektrostatische Aufladeeinheit in der aktuellen Ausführung ist ein wichtiges Aggregat, um mit reduziertem zeitlichem Aufwand eine Aussage über das Aufladeverhalten (Vorzeichen und Größe) verschiedener Mineralarten und den Einfluss von Faktoren für die Aufladung, wie Konditionierung und Temperaturveränderung, zu treffen.

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Konstanten zur Berechnung der Lockerungsgeschwindigkeit nach Grace und Wen & Yu (48)	23
Tabelle 2: Vollfaktorieller Versuchsplan vom Typ „2 ³ “ (15)	35
Tabelle 3: Vollfaktorieller Versuchsplan vom Typ „2 ³ “ mit Wechselwirkungen (15)	36
Tabelle 4: Teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2 ⁴⁻¹ “ (15)	37
Tabelle 5: Teilfaktorieller Versuchsplan von Typ „2 ⁵⁻¹ “ mit Haupteffekten und Nebeneffekten	38
Tabelle 6: Bilanz zum besten Sortiersuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter	48
Tabelle 7: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Magnesiumoxid (14)	48
Tabelle 8: Bilanzen zum Einfluss der Aufgabtemperatur auf die Sortierung von Magnesiumoxid (14)	49
Tabelle 9: Bilanzen zum Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf die Sortierung von Magnesiumoxid (14)	50
Tabelle 10: Bilanz zum Einfluss der Lagerungsbedingungen auf den Aufladeerfolg von den Magnesiumoxid Chargen <i>Juni 2018</i> und <i>Dezember 2018</i>	53
Tabelle 11: Bilanzen zu den Versuchen mit gesenkter Aufgabtemperatur (Magnesiumoxid-Chargen <i>Juni 2018</i> und <i>Dezember 2018</i>)	54
Tabelle 12: Konstant gehaltene Maschinenparameter bei Versuchen mit variiert Spannung	54
Tabelle 13: Bilanz zu den Versuchen mit stufenweiser Erhöhung der Elektrodenspannung	55
Tabelle 14: Korngrößenverteilung des Bergeproduktes (14)	56
Tabelle 15: Korngrößenverteilung des Konzentrates (14)	56
Tabelle 16: chemische Analysen der Rohmagnesitproben RMF 1, RMF 2, RMF 4	63
Tabelle 17: Schüttdichte der Eingangsproben (<i>RMF 1</i> , <i>RMF 2</i> , <i>RMF 4</i>)	63
Tabelle 18: Bilanz zum besten Sortiersuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter	66
Tabelle 19: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Rohmagnesit (ermittelt mit <i>RMF 2</i>)	66
Tabelle 20: Versuchsplan zur Reproduzierung der Versuche mit <i>RMF 2</i>	67
Tabelle 21: Bilanz zum besten Sortiersuch, bei den Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit	67
Tabelle 22: Bilanz zum besten Sortiersuch mit Rohmagnesit (<i>RMF 02</i>)	70
Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Gulsenit-Eingangsprobe	72
Tabelle 24: Bilanz zum besten Sortiersuch, bei den Untersuchungen zum Einfluss der Maschinenparameter	74
Tabelle 25: optimale Maschineneinstellungen für die Sortierung von Gulsenit	74
Tabelle 26: Versuchseinstellung am triboelektrostatischen Bandscheider bei den Tastversuchen mit Q2 und RF	76

Tabelle 27: Bilanz zur einstufigen Sortierung von Q2 am Bandscheider	76
Tabelle 28: Bilanz zu Versuch 1 der einstufigen Sortierung von RF am Bandscheider	77
Tabelle 29: Bilanz zu Versuch 2 der einstufigen Sortierung von RF am Bandscheider	77
Tabelle 30: Fluideigenschaften (Luft)	82
Tabelle 31: Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeiten der beiden Mineralphasen	82
Tabelle 32: Leerrohrgeschwindigkeiten für die untersuchten Mineralphasen	82
Tabelle 33 Auslegungsrelevante Kenndaten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit (44).....	84
Tabelle 34: Komponenten der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	85
Tabelle 35: Wichtige Programmpunkte der triboelektrostatischen Aufladeeinheit.....	87
Tabelle 36: Triboelektrische Reihe von Mineralen aus Schwermineralagerstätten (76).....	91
Tabelle 37: Bilanzen zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: <i>RMF 02</i>)	105
Tabelle 38: Bilanzen zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02 konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure</i>	107
Tabelle 39: Bilanzen zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02 konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)</i>	109
Tabelle 40: Versuchsplan zur Ermittlung optimaler Maschinenparameter	I
Tabelle 41: Versuchsplan zur Reproduzierung der Versuche mit <i>RMF 2</i>	I
Tabelle 42: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Magnesiumoxid <i>Charge 1</i> (Versuch 1-8)	II
Tabelle 43: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Magnesiumoxid <i>Charge 1</i> (Versuch 9-16).....	III
Tabelle 44: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von Magnesiumoxid <i>Charge 1</i>	IV
Tabelle 45: Bilanz zum Locked Cycle Test mit Rougher und Scavenger mit Magnesiumoxid <i>Charge 1</i>	VI
Tabelle 46: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von <i>RMF 2</i> (Versuch 1-8).....	VII
Tabelle 47: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von <i>RMF 2</i> (Versuch 9-16).....	VIII
Tabelle 48: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von <i>RMF 2</i>	IX
Tabelle 49: Bilanz zu den Versuchen zur Reproduzierbarkeit (mit <i>RMF 2</i>	X
Tabelle 50: Auswertung der Versuchsreihe zur Reproduzierbarkeit mit <i>RMF 2</i>	X
Tabelle 51: Korngrößenverteilungen der Trennprodukte (<i>Berge</i> und <i>Konzentrat</i>) aus Versuch 1	XI
Tabelle 52: Korngrößenverteilung der Produkte (<i>RMF2 Berge</i> & <i>Konzentrat</i>) aus Versuch 2	XI
Tabelle 53: Korngrößenverteilung der Produkte (<i>RMF2 Berge</i> & <i>Konzentrat</i>) aus Versuch 3	XI
Tabelle 54: Korngrößenverteilung der Produkte (<i>RMF2 Berge</i> & <i>Konzentrat</i>) aus Versuch 4	XI
Tabelle 55: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von <i>Gulsenit</i> (Versuch 1-8)	XII
Tabelle 56: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von <i>Gulsenit</i> (Versuch 9-16)	XIII

Tabelle 57: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von
Gulsenit..... XIV

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Weltweite Rohstoffproduktion 1984 – 2017 - nach Rohstoffart (3).....	1
Abbildung 2: Hauptnutzer von Wasser in Österreich (6).....	2
Abbildung 3: links – Punktladung q im Abstand L von einer ausgedehnten, elektrisch geladenen Fläche; rechts – Punktladung zwischen zwei gegensinnig, elektrisch geladenen Platten (10).....	8
Abbildung 4: Trennmodell eines elektrostatischen Freifallscheiders (10).....	10
Abbildung 5: Trennmodell eines triboelektrostatischen Bandscheiders (26).....	11
Abbildung 6: Schematische Darstellung der direkten Ladungsmessung mittels Faraday Cup (31).....	12
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Ladungsbestimmung in einem pneumatischen Zyklon (38).....	17
Abbildung 8 Druckverlustdiagramm einer homogenen fluidisierten Schicht (Lehrrohrgeschwindigkeit auf der Abszisse, Druckverlust auf der Ordinate) (42).....	19
Abbildung 9 Charakteristische Strömungszustände in Wirbelschichten (41).....	20
Abbildung 10 Darstellung des Druckverlustes im Festbett und in der Wirbelschicht (46).....	22
Abbildung 11 Zustandsdiagramm nach Reh (51).....	26
Abbildung 12 Darstellung unterschiedlicher Typen von fluidisierten Feststoffen bei Umgebungsbedingungen nach Geldart D. (53) (Grenzen nach Molerus O. (54)).....	28
Abbildung 13: Faktorraum für drei Faktoren mit je zwei Levels (15).....	31
Abbildung 14: Vorderansicht des Bandscheiders der Type „X2“.....	41
Abbildung 15: Korngrößenverteilung der Eingangspröbe im einfach-logarithmischen Netz: links – Charge <i>Juni 2018</i> , rechts – Charge <i>Dezember 2018</i>	44
Abbildung 16: Chemische Zusammensetzung in den Fraktionen der Eingangspröbe: Charge <i>Juni 2018</i> (14).....	45
Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung in den Fraktionen der Eingangspröbe: Charge <i>Dezember 2018</i>	45
Abbildung 18: Reaktivität gegenüber Zitronensäure der Proben <i>Juni 2018</i> und <i>Dezember 2018</i>	46
Abbildung 19: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Magnesiumoxid im Konzentrat.....	50
Abbildung 20: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Siliziumdioxid im Konzentrat.....	51
Abbildung 21: Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf den Gehalt (links) und das Inhaltsausbringen (rechts) an Kalziumoxid im Konzentrat.....	51
Abbildung 22: Graphische Darstellung der Korngrößenverteilung von Konzentrat und Bergeprodukt im einfach-logarithmischen Netz.....	56
Abbildung 23: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Magnesiumoxid).....	58
Abbildung 24: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Kalziumoxid) (14).....	58
Abbildung 25: konzentratbezogene Teilungszahlen (Gehalt Siliziumdioxid) (14).....	58

Abbildung 26: Versuche mit Repetition mit einem Rougher und einem Scavenger	59
Abbildung 27: Verlauf von Magnesiumoxid Gehalt (links) und Inhaltsausbringen im Konzentrat (K1) des Roughers	60
Abbildung 28: Verlauf von Magnesiumoxid Gehalt (links) und Inhaltsausbringen in den Bergen (B2) des Scavengers	60
Abbildung 29: Korngrößenverteilungen der Eingangsproben im einfach-logarithmischen Netz (<i>RMF1</i> , <i>RMF 2</i> , <i>RMF 4</i>).....	63
Abbildung 30: Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung von <i>RFM 2</i> (gemessen mittels Sedigraph)	64
Abbildung 31: Lineare Abhängigkeit der Gehalte an Magnesiumoxid (MgO) und an säureunlöslichen (HCl unlöslichen) Bestandteilen vom Glühverlust	65
Abbildung 32: Korngrößenverteilungen der Trennprodukte (<i>RMF2</i> Berge & Konzentrat) aus Versuch 1 (links) und Versuch 2 (rechts) im einfach-logarithmischen Netz	69
Abbildung 33: Korngrößenverteilung der Produkte (<i>RMF2</i> Berge & Konzentrat) aus Versuch 3 (links) und Versuch 4 (rechts) im einfach-logarithmischen Netz.....	69
Abbildung 34: Korngrößenverteilung der Gulsenit-Eingangsproben im doppelt-logarithmischen Netz	73
Abbildung 35: Prinzipskizze der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	80
Abbildung 36: Prinzipskizze des Wirbelschichtreaktors mit Probenahmestelle - Detail A	81
Abbildung 37: Aufbau der triboelektrostatischen Aufladeeinheit.....	85
Abbildung 38: Blick auf wichtige Bauteile der triboelektrostatischen Aufladeeinheit:	86
Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz	92
Abbildung 40: Fließbild zur Vorbereitung der Magnesiumoxidproben zur Aufladung und Ladungsmessung	93
Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Magnesiumoxid-Trennprodukten	94
Abbildung 42: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von gelagerten Magnesiumoxid-Trennprodukten	95
Abbildung 43 Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm	96
Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Halit	97
Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz bei 60, 80 und 100 °C..	100
Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Quarz, konditioniert mit Zitronensäure	101
Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm bei 60°C, 80°C und 100°C.....	102
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der massespezifischen Ladung von Rohmagnesit < 300 µm, konditioniert mit Zitronensäure	103
Abbildung 49: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortiersuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: <i>RMF 02</i>).....	106

Abbildung 50: Glühverluste des Bergeproduktes zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider mit erhöhter Temperatur (Probe: <i>RMF 02</i>).....	106
Abbildung 51: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02</i> konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure	108
Abbildung 52: Glühverluste des Bergeproduktes zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02</i> konditioniert mit dehydrierter Zitronensäure	109
Abbildung 53: Glühverluste des Konzentrates zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02</i> konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)	110
Abbildung 54: Glühverluste des Bergeproduktes zu den Sortierversuchen am triboelektrostatischen Bandscheider - Probe: <i>RMF 02</i> konditioniert mit 2 m-% dehydrierter Zitronensäure (ohne Aufladung)	110
Abbildung 55: Locked Cycle Test mit fünf Rouger und Scavenger Stufen mit Magnesiumoxid <i>Charge 1</i>	V
Abbildung 56: Zustandsdiagramm nach Reh für Halit.....	XV
Abbildung 57: Zustandsdiagramm nach Reh für MgO	XVI
Abbildung 58: Einlaufgerät der Bauart Böhme	XX
Abbildung 59: Fließbild zur Gulsenitaufbereitung	XXI
Abbildung 60: 3D Modell der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	XXIII
Abbildung 61: Schnittdarstellung des 3D Modells der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	XXIV
Abbildung 62: 3D Detailansicht der Probenahmeverrichtung	XXV
Abbildung 63: Schnittdarstellung der 3D Detailansicht der Probenahmeverrichtung	XXV
Abbildung 64: Komponentenübersicht der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	XXVI
Abbildung 65: Übersichtsdarstellung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	XXVII
Abbildung 66: Rahmen der triboelektrostatischen Aufladeeinheit	XXVIII
Abbildung 67: Wirbelkammer der triboelektrostatischen Aufladeeinheit.....	XXIX
Abbildung 68: Probenahmeverrichtung der triboelektrostatischen Aufladeeinheit.....	XXX

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Nr. → Nummer

L → Leiter

NL → Nichtleiter

HL → Halbleiter

MW → Mittelwert

Δ MW → Differenz der Mittelwerte

GLV → Glühverlust

D → Durchgang

R → Rückstand

RFA → Röntgenfluoreszenzanalyse j

r_{mj} → Masseausbringen des Produktes j

r_{ij} → Inhaltsausbringen des Stoffes i im Produkt j

g_{ij} → Gehalt des Stoffes i im Produkt j

m → Masse

m-% → Masseprozent

NCH → Nasschemisch

HCl → Salzsäure

spez. → spezifisch

ZS ($C_6H_8O_7$) → Zitronensäure

QUELLENVERZEICHNIS

1. Aufbereitung Leoben. [Online] 03. 11 2019. <http://www.aufbereitung.unileoben.ac.at/>.
2. Flachberger H., Böhm A. Entwicklungstendenzen im Fachgebiet Aufbereitung und Veredlung. *BHM*. 2015, H 10-12.
3. Reichl C., Schatz M. *WORLD MINING DATA*. 2019.
4. International Organizing Committee for the World Mining Congresses. *World Mining Data*. s.l. : Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 2016.
5. Gehringer S., Flachberger H. *Vortrag zu: Herausforderungen der Elektroscheidung im Dispersitätsbereich <100 µm*. Freiberg : s.n., 2019.
6. Wasserwerk Österreich. [Online] [Zitat vom: 08. 01 2020.] <http://www.wasserwerk.at/home/alles-ueber-wasser/verbrauch>.
7. Fricke G. Elektrostatische Sortierung von Kalium- und Magnesiumsalzen . *Kali- und Steinsalz*. 1986, Bde. H. 9, S. 287.
8. geologie.ac.at. [Online] 06. 03 2020. <https://www.geologie.ac.at/index.php?id=225&projectid=77>.
9. Shiklomanov I. A., Rodda J. C. *World Water Resources at the beginning of the 21st century*. Cambridge University Press : s.n., 2003.
10. Schubert H. *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe*. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. Bd. II: Sortierprozesse.
11. Manouchehri H.-R. *Triboelectric Charge Characteristics and Electrical Separation of Industrial Minerals*. s.l. : Department of Chemical and Metallurgical Engineering.
12. Sibelco Italia. [Online] 05. 03 2020. <https://www.sibelco.com/italia/>.
13. Alvaradoa E., Torres-Martinez L. M., Fuentes A. F., Quintana P. Preparation and characterization of MgO powders obtained from different magnesium salts and the mineral dolomite. *Polyhedron*, Pages 2345-2351. November 2000, Volume 19, Issues 22–23.
14. Gehringer S., Luckeneder C., Hrach F., Flachberger H. Processing of caustic calcined magnesite (magnesium oxide) by the use of triboelectrostatic belt separation. *BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, P. 303-309. August, 2019, Vol. 164 (8).
15. Siebertz K., Bebbler D., Hochkirchen T. *Statistische Versuchsplanung (DoE)*. Berlin Heidelberg : Springer, 2010.

16. Gehringer S., Flachberger H. *Processing of industrial minerals by use of electrostatic separation*. Linz, Österreich : s.n., April, 2018. 14. Minisymposium Verfahrenstechnik.
17. *Elektrostatik*. Museum für Energiegeschichte. Sammelblatt Nr. 11, S. 2,
18. Steffen P., Paul R. *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2, Das elektrostatische Feld, elektrische Erscheinungen in Nichtleitern*. Heidelberg, Berlin : Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2019.
19. Oberrauner A. Nutzung der Elektroscheidung zur trockenen Aufbereitung von fein- und feinstdispersen Körnerschwärmen. Leoben : s.n., 2012.
20. Husemann K., Peuke U. A., Simon F., Reinsch E., Albrecht V. *Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Elektrosortierung praxisrelevanter Kunststoffabfallgemische*. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg : s.n., 2009.
21. Gehringer S., Flachberger H. *Herausforderungen der Elektroscheidung im Dispersitätsbereich <0,1mm - Status quo der Leobener Forschungsaktivitäten*. Freiberg, Deutschland : Tagung Aufbereitung und Recycling, November, 2019.
22. Ralston O. C. *Dry electrostatic separation of granular materials*. Pittsburgh, USA : IEEE, Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October, 1988.
23. Tipler P. A. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. s.l. : Springer, 2005.
24. Sharp K. A., Honig B. *electrostatic interactions in macromolecules: Theory and Applications*. New York, USA : Annu. Rev. Biophys. Biophys. Chem., 1993.
25. Boland D., Geldart D. *Electrostatic Charging in Gas Fluidised Beds*. Netherlands : Powder Technology-Elsevier Sequoia SA., Lausanne, 1971.
26. Bittner J. D., Flynn K. P., Hrach F. J. *Expanding Applications in Dry Triboelectric Separation of Minerals*. Santiago, Chile : International Mineral Processing Congress, 2014.
27. Luckeneder C., Gehringer S., Flachberger H. *Production of a talc concentrate from a talc/carbonate crude ore by utilization of the STET belt separator*. Leoben, Österreich : s.n., April 2019. 15. Minisymposium Verfahrenstechnik.
28. Mirkowska M. *Vorlesung zu Theorie der Aufbereitungsprozesse: Insight into electrostatic separation*. 2016.
29. Nicholson K., Ireland P. M., Wanless E., Jameson G. J. *Design and construction of a laboratory-scale cyclone tribocharger, p. 241*. Newcastle : Proceedings of Chemeca, 2008.

30. Keithley A. *Low Level Measurement Handbook - 7th Edition*. s.l. : Keithley A Tektronix Company, 2004.
31. Kacprzyk R. *Wybrane zagadnienia badan ladunku i jego zaniku w dielektrykach stalych*. Wroclaw : Prace Naukowe Istytutu Podstaw Electroniki i Elektrotechnologii Nr 41. Monografie Nr 14, 2004.
32. Brunauer S., Emmett P. H. , Teller E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society., Nr. 2, S. 309–319,*. Februar 1938,, Bd. Band 60.
33. DIN EN 196-6, ASTM C204. Spezifische Oberfläche nach Blaine .
34. Masuda H., Matsusaka S., Nagatani S. *Electrification of fine particle in gas-solids pipe flow*. 1998.
35. Yao J., Zhang Y., Wang C. H., Matsusaka S., Masuda H. *Electrostatics of the granularflow in pneumatic conveying systems*. s.l. : Industrial Engineering and Chemistry Research, 2004.
36. Gejewski B. J. *Non-intrusive solids charge and mass flow measurement with an electrostatic flow probe*. s.l. : Elsevier Science, 1999.
37. Niermöller F. *Ladungsverteilung in Mineralgemischen und elektrostatische Sortierung nach Triboaufladung*. TU Clausthal : s.n., 1998.
38. Ireland P. M., Nicholson K. Analysis and comparison of particle tribochargers. *Minerals Engineering*. 2011.
39. Ireland P. M., Jameson G. *Particle mechanics an the design of cyclone Tribochargers*. Brisbane, Australia : XXV International Mineral Pocessing Congress, September 2010.
40. Heinrich S. *Neue Entwicklungen in der Partikel und Wirbelschichttechnik*. 2013. S. 215.
41. Kraume M. *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*. Berlin : Springer Verlag, 2012. S. 657.
42. Stieß M. *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1997.
43. Reuter S. *Partikeldynamik in Wirbelschichtsystemen - Geschwindigkeit und Zirkulation granularer Medien untersucht mit bildgebender und geschwindigkeitskodierender NMR*. Aachen, Deutschland : Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der RWTH Aachen, 2011.
44. Luckeneder A. *Systematische Untersuchungen zur Triboelektrostatischen Sortierung und Beeinflussung der Oberflächenladung ausgewählter Industriemineralproben*. Montanuniversität Leoben : s.n., 2020.

45. Fuchs J. *Ermittlung des Betriebskennfeldes einer innovativen Zweibettwirbelschicht anhand von Kaltmodelluntersuchungen*. Leoben : s.n., 2013.
46. Gesellschaft VDI. *VDI-Wärmeatlas*. 11. Wiesbaden : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
47. Ergun S. *Fluidfluss durch gepackten Säulen*. s.l. : Chem. Eng. Prog. 48, 1952.
48. Grace J. R. Contacting modes and behaviour classification of gas—solid and other two-phase suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 06 1986, S. 353-363.
49. Hertwig K., Martens L. *Chemische Verfahrenstechnik*. 2. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2012.
50. Wirth K.-E. *Zirkulierende Wirbelschichten: Strömungsmechanische Grundlagen, Anwendung in der Feuerungstechnik*. Berlin : Springer Verlag, 1990.
51. Schmid J. C., Pröll T., Pfeifer C., Rauch R., Hofbauer H. *Cold flow model investigation on a modified riser with enhanced gas-solid contact – ocating the regions of operation in a fluidization regime map*. Neapel : 21st International Conference on Fluidized Bed Combustion, Juni, 2012.
52. Stieß M. *Mechanische Verfahrenstechnik 1. 2*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1995.
53. Geldard D. *Gas Fluidization Technology*. Chichester : Wiley, 1987.
54. Molerus O. *Principles of Flow in Disperse Systems*. London : Chapman and Hall Verlag, 1993.
55. Schiefer H., Schiefer F. *Statistik für Ingenieure - Statistische Versuchsplanung, Design of Experiments (DoE)*. Berlin : s.n., 2018. Springer Verlag.
56. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley (New York NY) : s.n., 1997.
57. Luckeneder C. *Untersuchung der Aufbereitbarkeit von Spateisenstein des steirischen Erzberges mittels Schwertrübezyklonierung unter besonderer Berücksichtigung der Methoden der statistischen Versuchsplanung*. Montanuniversität Leoben : s.n., 2012.
58. Lehrstuhl für Mathematik und Statistik. *Statistik*. Montanuniversität Leoben : s.n., 2011.
59. Dötterl M., Wachsmuth U., Waldmann L., Flachberger H., Mirkowska M., Brands L., Beier P.-M., Stahl I. Electrostatic Separation. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016.
60. Hrach F., Gasiorowski S., Guicherd H. *20 years of Triboelectrostatic Beneficiation of Fly Ash*. Vietbuild Ho Chi Minh City : s.n., June 2015.
61. Lämmerer W. *Zu Fragen der Charakterisierung, Aufbereitung und Veredlung von natürlichen Grafiten*. Montanuniversität Leoben : s.n., 2018.
62. ST Equipment & Technology. [Online] [Zitat vom: 18. März 2020.] <https://steqtech.com/>.

63. Styromag Steirische Magnesitindustrie GmbH. [Online] [Zitat vom: 18. März 2020.] <https://www.styromag.at/de/%C3%BCber-uns/unternehmenspolitik/>.
64. Alvarado E., Torres-Martinez L. M., Fuentes A. F., Quintana P. Preparation and characterization of MgO powders obtained from different magnesium salts and the mineral dolomite. *Polyhedron, Issues 22–23, Pages 2345-2351*. November 2000, Volume 19.
65. Itatani K., Nomura M., Kishioka A., Kinoshita M., Mater. J. Effect of starting particle size on hot-pressing of magnesium oxide powder prepared by vapour-phase oxidation process. *Journal of Materials Science, Issue 11, pp 2977–2984*. June 1997, Volume 32.
66. Itatani K., Itoh F. S., Howell A., Kishioka A., Kinoshita M., Mater J. Sintering of magnesium oxide powder prepared by vapour-phase oxidation process — Relationship between particle size and mechanical properties of consolidated specimens. *Journal of Materials Science, Issue 10, pp 2757–2765*. January 1996, Volume 31.
67. Marbun B. *Kinetik der Hydratation von CaO und MgO*. Indonesien : s.n., 2006.
68. Wang Q. Q., Li X. A., Wei D. Z., Dai S. J. The Application of Magnesite Processing Technics. *Applied Mechanics and Materials (Volume 71-78)*. July, 2011.
69. rhimagnesita. [Online] [Zitat vom: 20. 03 2020.] <https://www.rhimagnesita.com/de/>.
70. Werthmann R., Leiter Forschung und Entwicklung, Styromag - Steirische Magnesitindustrie GmbH. *Besprechung zu Probenanalytik und weiterer Projektvorgehensweise*. Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, 27. Jänner 2020.
71. Lanthaler M., SAAG Betriebsleiter Bergbau. *Besprechung zur Optimierung der untertägigen Aufbereitungsanlage der SAAG in Altaussee*. Leoben : s.n., Februar 2018.
72. Cargill. [Online] [Zitat vom: 24. 06 2020.] <https://www.cargill.com/about/cargill-history>.
73. Fricke G. *Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen*. Kassel : s.n., Mai 1986.
74. Stürzenbacher H. *Bestimmung des garantiert verfügbaren Volumenstroms in der Klimakammer des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung*. Leoben : s.n., 2018.
75. Harler K. *Besprechung zum Einsatz der Wirbelschichttechnik zur triboelektrostatischen Aufladung mineralischer Rohgutproben*. Gleisdorf : s.n., 02/2018.
76. Ferguson D. N. *A basic triboelectric series for heavy minerals from inductive electrostatic separation behaviour*. 2009.

ANHANG

VERSUCHSPLÄNE

<i>Versuch Nr.</i>	<i>Band- geschwindigkeit</i>	<i>Elektroden- abstand</i>	<i>angelegte Spannung</i>	<i>Polarität</i>	<i>Aufgaberate</i>
1	-	-	-	-	+
2	-	-	+	-	-
3	+	-	-	-	-
4	+	-	+	-	+
5	-	+	-	-	-
6	-	+	+	-	+
7	+	+	-	-	+
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	-	-	+	+	+
11	+	-	-	+	+
12	+	-	+	+	-
13	-	+	-	+	+
14	-	+	+	+	-
15	+	+	-	+	-
16	+	+	+	+	+

Tabelle 40: Versuchsplan zur Ermittlung optimaler Maschinenparameter

<i>Faktor</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Test Nr.</i>	<i>Aufgaberate</i>	<i>Bandgeschwindigkeit</i>	<i>Elektrodenabstand</i>
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

Tabelle 41: Versuchsplan zur Reproduzierung der Versuche mit RMF 2

ANALYSEN- & VERSUCHSERGEBNISSE

Versuchsnr.	Proben-bezeichnung	Analysen-datum	Masse	Glühverlust 1050°C		Glühverlust 400°C	HCl unl. (NCH)		SiO ₂ (rechn.)		CaO (RFA)		CaO frei (NCH)		MgO (rechn.)	
				g	ri	g	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
1	1F, E1 v. 27.12.	04.01.2018	22,5	6,8	23,9	0,0	13,5	71,1	9,0	71,1	5,5	24,0	1,0	24,4	75,2	20,7
	1F, E2 v. 27.12.	04.01.2018	77,5	6,3	76,1	0,0	1,6	28,9	1,1	28,9	5,0	76,0	0,9	75,6	83,8	79,3
			100,0	6,4	100,0	0,0	4,3	100,0	2,9	100,0	5,1	100,0	0,9	100,0	81,9	100,0
	1D, E1 v. 27.12.	04.01.2018	25,3	6,7	27,4	0,0	13,1	65,7	8,7	65,7	5,0	23,3	0,9	23,3	75,8	23,5
	1D, E2 v. 27.12.	04.01.2018	74,7	6,0	72,6	0,0	2,3	34,3	1,5	34,3	5,6	76,7	1,0	76,7	83,3	76,5
		100,0	6,2	100,0	0,0	5,0	100,0	3,4	100,0	5,4	100,0	1,0	100,0	81,4	100,0	
2	2F, E1 v. 27.12.	04.01.2018	20,8	5,4	17,9	0,0	20,4	70,6	13,6	70,6	4,1	16,7	0,7	17,0	73,6	18,9
	2F, E2 v. 27.12.	04.01.2018	79,2	6,6	82,1	0,0	2,2	29,4	1,5	29,4	5,3	83,3	0,9	83,0	82,9	81,1
			100,0	6,3	100,0	0,0	6,0	100,0	4,0	100,0	5,1	100,0	0,9	100,0	80,9	100,0
	2D, E1 v. 27.12.	04.01.2018	22,3	5,6	19,9	0,0	19,8	77,0	13,2	77,0	4,2	18,8	0,7	18,3	73,6	20,2
	2D, E2 v. 27.12.	04.01.2018	77,7	6,5	80,1	0,0	1,7	23,0	1,1	23,0	5,2	81,2	0,9	81,7	83,5	79,8
		100,0	6,3	100,0	0,0	5,7	100,0	3,8	100,0	5,0	100,0	0,9	100,0	81,3	100,0	
3	3F, E1 v. 27.12.	05.01.2018	19,6	6,6	20,3	0,5	23,2	79,6	15,5	79,6	4,5	17,9	0,7	17,6	70,2	17,0
	3F, E2 v. 27.12.	05.01.2018	80,4	6,4	79,7	0,6	1,5	20,4	1,0	20,4	5,1	82,1	0,8	82,4	83,8	83,0
			100,0	6,4	100,0	0,6	5,7	100,0	3,8	100,0	5,0	100,0	0,8	100,0	81,1	100,0
	3D, E1 v. 27.12.	05.01.2018	20,6	6,9	22,3	0,5	22,4	83,7	14,9	83,7	4,9	20,1	0,7	16,8	70,1	17,8
	3D, E2 v. 27.12.	05.01.2018	79,4	6,3	77,7	0,6	1,1	16,3	0,8	16,3	5,1	79,9	0,9	83,2	84,1	82,2
		100,0	6,4	100,0	0,6	5,5	100,0	3,7	100,0	5,0	100,0	0,9	100,0	80,2	81,2	
4	4F, E1 v. 28.12.	09.01.2018	16,7	6,6	16,8	0,4	27,3	76,6	18,2	76,6	4,3	14,1	0,7	12,3	67,9	14,0
	4F, E2 v. 28.12.	09.01.2018	83,3	6,5	83,2	0,4	1,7	23,4	1,1	23,4	5,2	85,9	1,0	87,7	83,4	86,0
			100,0	6,5	100,0	0,4	6,0	100,0	4,0	100,0	5,0	100,0	0,9	100,0	80,8	100,0
	4D, E1 v. 28.12.	09.01.2018	12,6	6,0	11,5	0,3	32,6	73,2	21,8	73,2	3,8	9,2	0,6	8,0	65,5	10,2
	4D, E2 v. 28.12.	09.01.2018	87,4	6,7	88,5	0,5	1,7	26,8	1,2	26,8	5,4	90,8	1,0	92,0	83,0	89,8
		100,0	6,6	100,0	0,5	5,6	100,0	3,8	100,0	5,2	100,0	0,9	100,0	80,8	100,0	
5	5F, E1 v. 28.12.	10.01.2018	13,4	5,8	11,1	0,3	21,0	62,9	14,0	62,9	4,2	10,1	0,6	8,5	72,8	12,0
	5F, E2 v. 28.12.	10.01.2018	86,6	7,1	88,9	0,2	1,9	37,1	1,3	37,1	5,7	89,9	1,0	91,5	81,9	88,0
			100,0	6,9	100,0	0,2	4,5	100,0	3,0	100,0	5,5	100,0	0,9	100,0	80,7	100,0
	5D, E1 v. 28.12.	10.01.2018	17,1	5,8	15,2	0,2	26,9	77,3	17,9	77,3	3,9	12,8	0,7	11,6	69,2	14,7
	5D, E2 v. 28.12.	10.01.2018	82,9	6,7	84,8	0,2	1,6	22,7	1,1	22,7	5,5	87,2	1,1	88,4	83,0	85,3
		100,0	6,5	100,0	0,2	6,0	100,0	4,0	100,0	5,2	100,0	1,0	100,0	80,6	100,0	
6	6F, E1 v. 28.12.	11.01.2018	13,1	5,5	11,3	0,6	21,8	55,8	14,6	55,8	4,1	10,1	0,7	13,1	72,5	11,7
	6F, E2 v. 28.12.	11.01.2018	86,9	6,5	88,7	0,8	2,6	44,2	1,7	44,2	5,5	89,9	0,7	86,9	82,5	88,3
			100,0	6,4	100,0	0,8	5,1	100,0	3,4	100,0	5,3	100,0	0,7	100,0	81,2	100,0
	6D, E1 v. 28.12.	11.01.2018	12,0	6,7	12,6	0,4	18,0	40,9	12,0	40,9	5,5	12,6	0,8	13,5	72,4	10,7
	6D, E2 v. 28.12.	11.01.2018	88,0	6,4	87,4	0,8	3,6	59,1	2,4	59,1	5,2	87,4	0,7	86,5	82,3	89,3
		100,0	6,4	100,0	0,8	5,3	100,0	3,5	100,0	5,2	100,0	0,7	100,0	81,1	100,0	
7	7F, E1 v. 28.12.	12.01.2018	31,7	7,2	33,9	0,3	12,3	72,8	8,2	72,8	5,5	34,3	0,9	31,7	75,5	29,6
	7F, E2 v. 28.12.	12.01.2018	68,3	6,5	66,1	0,7	2,1	27,2	1,4	27,2	4,9	65,7	0,9	68,3	83,5	70,4
			100,0	6,7	100,0	0,6	5,3	100,0	3,6	100,0	5,1	100,0	0,9	100,0	80,9	100,0
	7D, E1 v. 28.12.	12.01.2018	34,6	7,6	39,9	0,3	11,3	73,3	7,6	73,3	5,8	40,6	0,9	34,6	75,4	32,1
	7D, E2 v. 28.12.	12.01.2018	65,4	6,1	60,1	0,9	2,2	26,7	1,5	26,7	4,5	59,4	0,9	65,4	84,3	67,9
		100,0	6,6	100,0	0,7	5,3	100,0	3,6	100,0	5,0	100,0	0,9	100,0	81,2	100,0	
8	8F, E1 v. 28.12.	10.01.2018	20,4	6,3	19,5	0,2	25,7	75,0	17,1	75,0	4,4	17,3	0,8	17,0	69,1	17,6
	8F, E2 v. 28.12.	10.01.2018	79,6	6,6	80,5	0,3	2,2	25,0	1,5	25,0	5,4	82,7	1,0	83,0	82,8	82,4
			100,0	6,5	100,0	0,3	7,0	100,0	4,6	100,0	5,2	100,0	1,0	100,0	80,0	100,0
	8D, E1 v. 28.12.	10.01.2018	16,9	6,7	17,6	0,2	27,0	82,0	18,0	82,0	4,8	15,6	0,8	14,0	67,5	14,1
	8D, E2 v. 28.12.	10.01.2018	83,1	6,4	82,4	0,3	1,2	18,0	0,8	18,0	5,3	84,4	1,0	86,0	83,7	85,9
		100,0	6,5	100,0	0,3	5,6	100,0	3,7	100,0	5,2	100,0	1,0	100,0	81,0	100,0	

Tabelle 42: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Magnesiumoxid Charge 1 (Versuch 1-8)

Versuchsnr.	Proben-bezeichnung	Analysen-datum	Masse	Glühverlust 1050°C		Glühverlust 400°C	HCl unl. (NCH)		SiO ₂ (rechn.)		CaO (RFA)		CaO frei (NCH)		MgO (rechn.)	
			g	g	ri	g	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri
9	9F, E1 v.28.12.	29.01.2018	34,3	7,7	35,2	0,8	2,2	58,7	1,5	58,7	4,8	31,1	0,6	28,1	82,5	34,2
	9F, E2 v.28.12.	29.01.2018	65,7	7,4	64,8	0,6	0,8	41,3	0,5	41,3	5,6	68,9	0,8	71,9	82,8	65,8
			100,0	7,5	100,0	0,7	1,3	100,0	0,9	100,0	5,3	100,0	0,7	100,0	82,7	100,0
	9D, E1 v.28.12.	29.01.2018	46,1	7,0	45,6	0,7	9,7	89,4	6,5	89,4	5,2	46,7	0,8	49,5	77,6	44,4
	9D, E2 v.28.12.	29.01.2018	53,9	7,2	54,4	0,9	1,0	10,6	0,7	10,6	5,1	53,3	0,7	50,5	83,3	55,6
		100,0	7,1	100,0	0,8	5,0	100,0	3,3	100,0	5,2	100,0	0,7	100,0	80,7	100,0	
10	10F, E1 v.28.12.	30.01.2018	49,2	7,0	48,8	0,6	9,4	90,0	6,2	90,0	5,5	50,9	0,8	52,6	77,7	47,4
	10F, E2 v.28.12.	30.01.2018	50,8	7,1	51,2	0,8	1,0	10,0	0,7	10,0	5,1	49,1	0,7	47,4	83,4	52,6
			100,0	7,1	100,0	0,7	5,1	100,0	3,4	100,0	5,3	100,0	0,7	100,0	80,6	100,0
	10D, E1 v.28.12.	30.01.2018	54,8	6,9	54,1	0,6	8,4	92,3	5,6	92,3	5,3	55,4	0,8	58,1	78,6	53,3
	10D, E2 v.28.12.	30.01.2018	45,2	7,1	45,9	0,7	0,8	7,7	0,6	7,7	5,2	44,6	0,7	41,9	83,5	46,7
		100,0	7,0	100,0	0,6	5,0	100,0	3,3	100,0	5,3	100,0	0,8	100,0	80,8	100,0	
11	11F, E1 v.28.12.	01.02.2018	42,8	6,4	40,6	0,9	2,9	50,3	1,9	50,3	4,7	39,7	0,6	39,1	83,5	43,1
	11D, E2 v.28.12.	01.02.2018	57,2	7,0	59,4	1,4	2,2	49,7	1,4	49,7	5,3	60,3	0,7	60,9	82,5	56,9
			100,0	6,8	100,0	1,2	2,5	100,0	1,7	100,0	5,0	100,0	0,7	100,0	82,9	100,0
	11D, E1 v.28.12.	01.02.2018	34,6	7,4	36,5	0,7	10,3	77,7	6,9	77,7	5,6	36,7	0,7	34,6	76,7	32,8
	11D, E2 v.28.12.	01.02.2018	65,4	6,8	63,5	1,3	1,6	22,3	1,0	22,3	5,1	63,3	0,7	65,4	83,3	67,2
		100,0	7,0	100,0	1,1	4,6	100,0	3,1	100,0	5,3	100,0	0,7	100,0	81,0	100,0	
12	12F, E1 v.28.12.	01.02.2018	38,9	6,5	36,2	1,3	14,2	92,5	9,4	92,5	4,6	34,4	0,6	35,3	76,0	36,9
	12F, E2 v.28.12.	01.02.2018	61,1	7,3	63,8	1,3	0,7	7,5	0,5	7,5	5,5	65,6	0,7	64,7	82,9	63,1
			100,0	7,0	100,0	1,3	6,0	100,0	4,0	100,0	5,2	100,0	0,7	100,0	80,2	100,0
	12D, E1 v.28.12.	01.02.2018	23,6	6,3	22,5	0,9	17,2	87,2	11,5	87,2	4,4	20,8	0,5	18,0	74,5	21,5
	12D, E2 v.28.12.	01.02.2018	76,4	6,7	77,5	1,1	0,8	12,8	0,5	12,8	5,1	79,2	0,7	82,0	83,9	78,5
		100,0	6,6	100,0	1,1	4,7	100,0	3,1	100,0	4,9	100,0	0,7	100,0	81,7	100,0	
13	13F, E1 v. 29.12.	02.02.2018	72,2	6,8	73,5	0,6	6,3	94,8	4,2	94,8	5,2	73,4	0,9	77,0	80,2	71,2
	13F, E2 v. 29.12.	02.02.2018	27,8	6,4	26,5	1,3	0,9	5,2	0,6	5,2	4,9	26,6	0,7	23,0	84,5	28,8
			100,0	6,7	100,0	0,8	4,8	100,0	3,2	100,0	5,1	100,0	0,8	100,0	81,4	100,0
	13D, E1 v. 29.12.	02.02.2018	79,3	6,5	79,8	0,5	6,2	95,8	4,1	95,8	5,1	79,6	0,9	81,2	80,7	78,6
	13D, E2 v. 29.12.	02.02.2018	20,7	6,3	20,2	1,1	1,0	4,2	0,7	4,2	5,0	20,4	0,8	18,8	84,3	21,4
		100,0	6,4	100,0	0,7	5,1	100,0	3,4	100,0	5,1	100,0	0,9	100,0	81,5	100,0	
14	14F, E1 v. 29.12.	02.02.2018	36,4	6,1	31,2	1,0	8,8	81,3	5,9	81,3	4,4	31,0	0,7	26,7	80,0	35,8
	14F, E2 v. 29.12.	02.02.2018	63,6	7,7	68,8	1,0	1,2	18,7	0,8	18,7	5,6	69,0	1,1	73,3	82,3	64,2
			100,0	7,1	100,0	1,0	3,9	100,0	2,6	100,0	5,2	100,0	1,0	100,0	81,5	100,0
	14D, E1 v. 29.12.	02.02.2018	46,0	5,9	44,3	0,6	9,0	88,0	6,0	88,0	4,6	44,1	0,8	43,1	79,8	44,7
	14D, E2 v. 29.12.	02.02.2018	54,0	6,4	55,7	0,7	1,1	12,0	0,7	12,0	5,0	55,9	0,9	56,9	84,3	55,3
		100,0	6,2	100,0	0,6	4,7	100,0	3,1	100,0	4,8	100,0	0,9	100,0	82,2	100,0	
15	15F, E1 v. 29.12.	06.02.2018	30,8	5,7	26,4	0,7	11,0	74,5	7,3	74,5	4,3	25,1	0,7	28,0	79,2	30,0
	15F, E2 v. 29.12.	06.02.2018	69,2	7,0	73,6	0,8	1,7	25,5	1,1	25,5	5,6	74,9	0,8	72,0	82,4	70,0
			100,0	6,6	100,0	0,8	4,5	100,0	3,0	100,0	5,2	100,0	0,8	100,0	81,5	100,0
	15D, E1 v. 29.12.	06.02.2018	25,6	7,1	26,3	0,7	20,7	84,2	13,8	84,2	4,8	23,5	0,6	18,6	71,1	22,7
	15D, E2 v. 29.12.	06.02.2018	74,4	6,8	73,7	0,8	1,3	15,8	0,9	15,8	5,4	76,5	0,9	81,4	83,1	77,3
		100,0	6,9	100,0	0,7	6,3	100,0	4,2	100,0	5,3	100,0	0,8	100,0	80,1	100,0	
16	16F, E1 v. 29.12.	07.02.2018	33,2	6,4	32,3	0,7	10,9	79,5	7,3	79,5	4,8	30,9	0,8	28,4	78,0	31,7
	16F, E2 v. 29.12.	07.02.2018	66,8	6,6	67,7	0,5	1,4	20,5	0,9	20,5	5,3	69,1	1,0	71,6	83,3	68,3
			100,0	6,5	100,0	0,6	4,6	100,0	3,0	100,0	5,2	100,0	0,9	100,0	81,5	100,0
	16D, E1 v. 29.12.	07.02.2018	39,6	7,5	43,7	1,0	11,8	85,1	7,9	85,1	5,2	40,5	0,8	39,6	76,0	37,3
	16D, E2 v. 29.12.	07.02.2018	60,4	6,4	56,3	0,9	1,4	14,9	0,9	14,9	5,0	59,5	0,8	60,4	84,0	62,7
		100,0	6,8	100,0	0,9	5,5	100,0	3,7	100,0	5,0	100,0	0,8	100,0	80,8	100,0	

Tabelle 43: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Magnesiumoxid Charge 1 (Versuch 9-16)

Inhaltsausbringen - Berge						Inhaltsausbringen - Konzentrat						
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberrate	Elektrodenabstand	Polarität			angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberrate	Elektrodenabstand	Polarität
Faktor	A	B	C	D	E	SiO2	Faktor	A	B	C	D	E
-1	8,87	8,93	11,63	10,28	6,62		-1	1,03	1,06	0,92	0,95	0,78
1	11,76	11,70	9,01	10,36	14,02		1	1,05	1,03	1,17	1,14	1,30
MW	10,32	10,32	10,32	10,32	10,32		MW	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04
Delta -1 / 1	2,89	2,77	-2,62	0,08	7,40		Delta -1 / 1	0,02	-0,03	0,25	0,19	0,52
Faktor	A	B	C	D	E	CaO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	4,94	4,79	4,50	4,76	4,90		-1	5,21	5,29	5,34	5,24	5,25
1	4,61	4,76	5,05	4,79	4,65		1	5,27	5,20	5,14	5,24	5,24
MW	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78		MW	5,24	5,25	5,24	5,24	5,25
Delta -1 / 1	-0,33	-0,03	0,55	0,03	-0,25		Delta -1 / 1	0,06	-0,09	-0,20	0,00	-0,01
Faktor	A	B	C	D	E	CaO frei	Faktor	A	B	C	D	E
-1	0,76	0,78	0,69	0,71	0,73		-1	0,85	0,85	0,89	0,82	0,79
1	0,73	0,71	0,80	0,78	0,76		1	0,86	0,86	0,83	0,89	0,92
MW	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		MW	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Delta -1 / 1	-0,03	-0,07	0,11	0,07	0,03		Delta -1 / 1	0,01	0,01	-0,06	0,07	0,13
Faktor	A	B	C	D	E	Delta CaO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	4,17	4,01	3,81	4,05	4,17		-1	4,36	4,44	4,46	4,43	4,45
1	3,89	4,05	4,25	4,01	3,89		1	4,41	4,34	4,32	4,35	4,32
MW	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03		MW	4,39	4,39	4,39	4,39	4,39
Delta -1 / 1	-0,28	0,04	0,44	-0,04	-0,28		Delta -1 / 1	0,05	-0,10	-0,14	-0,08	-0,13
Faktor	A	B	C	D	E	MgO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	75,98	76,39	74,19	74,94	78,26		-1	83,37	83,22	83,16	83,33	83,35
1	73,92	73,39	75,72	74,96	71,65		1	83,23	83,37	83,43	83,26	83,24
MW	74,95	74,89	74,96	74,95	74,96		MW	83,30	83,30	83,30	83,30	83,30
Delta -1 / 1	-2,06	-3,00	1,53	0,02	-6,61		Delta -1 / 1	-0,14	0,15	0,27	-0,07	-0,11

Tabelle 44: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von Magnesiumoxid Charge 1

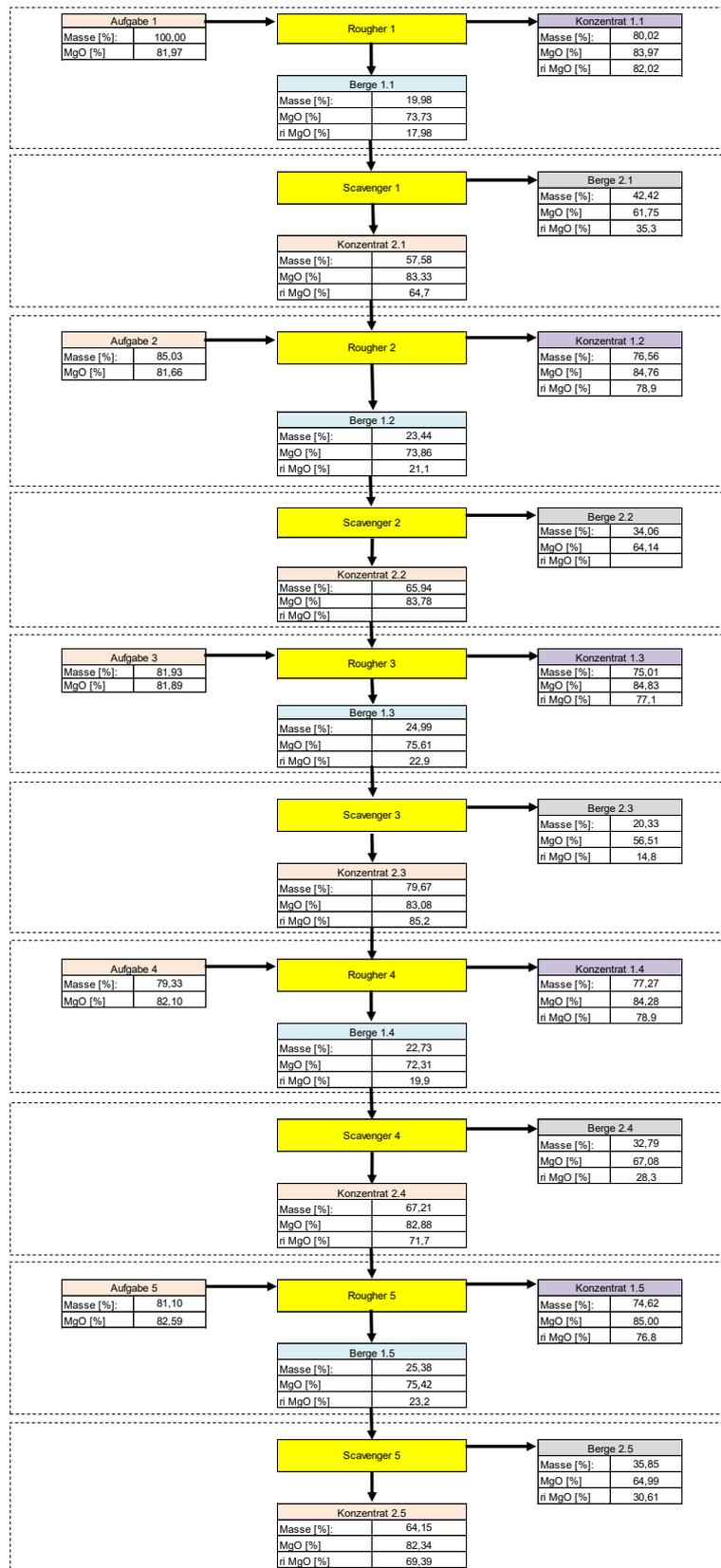


Abbildung 55: Locked Cycle Test mit fünf Rougher und Scavenger Stufen mit Magnesiumoxid Charge 1

Rougher 1	rm	MgO	l	ri
K1.1	80,02	83,97	6719,16	82,02
B1.1	19,98	73,73	1472,95	17,98
A1	100,00	81,92	8192,10	100,00
Scavenger 1	rm	MgO	l	ri
K2.1	57,58	83,33	4797,96	64,68
B2.1	42,42	61,75	2619,81	35,32
B1.1	100,00	74,18	7417,76	100,00
Rougher 2	rm	MgO	l	ri
K1.2	76,56	84,76	6489,16	78,94
B1.2	23,44	73,86	1731,62	21,06
	100,00	82,21	8220,78	100,00
Scavenger 2	rm	MgO	l	ri
K2.2	65,94	83,78	5523,89	71,66
B2.2	34,06	64,14	2185,01	28,34
B1.2	100,00	77,09	7708,90	100,00
Rougher 3	rm	MgO	l	ri
K1.3	75,01	84,83	6363,32	77,11
B1.3	24,99	75,61	1889,25	22,89
	100,00	82,53	8252,56	100,00
Scavenger 3	rm	MgO	l	ri
K2.3	79,67	83,08	6619,37	85,21
B2.3	20,33	56,51	1148,52	14,79
B1.3	100,00	77,68	7767,89	100,00
Rougher 4	rm	MgO	l	ri
K1.4	77,27	84,28	6512,09	78,91
B1.4	22,73	72,31	1643,75	19,92
	100,00	81,56	8155,84	100,00
Scavenger 4	rm	MgO	l	ri
K2.4	67,21	82,88	5570,39	71,69
B2.4	32,79	67,08	2199,21	28,31
B1.4	100,00	77,70	7769,60	100,00
Rougher 5	rm	MgO	l	ri
K1.5	74,62	85,00	6342,20	76,81
B1.5	25,38	75,42	1914,31	23,19
	100,00	82,57	8256,51	100,00
Scavenger 5	rm	MgO	l	ri
K2.5	64,15	82,34	5282,12	69,39
B2.5	35,85	64,99	2330,21	30,61
B1.5	100,00	76,12	7612,33	100,00

Tabelle 45: Bilanz zum Locked Cycle Test mit Rougher und Scavenger mit Magnesiumoxid *Charge 1*

chemische Analyse:	Versuchsdatum	Probenbezeichnung	Masse [%]	Glüherverlust 1050°C [%]	HCl Unl _(NCH)			R ₂ O ₃ (NCH)			Fe ₂ O ₃ (RFA)			CaO _(NCH)			MgO _(NCH)		
					g [%]	l [%%]	rij [%]	g [%]	l [%%]	rij [%]	g [%]	l [%%]	rij [%]	g [%]	l [%%]	rij [%]	g [%]	l [%%]	rij [%]
1	29.03.2019	Aufgabe		40,94	19,45			2,12			1,25			2,52			36,09		
	29.03.2019	V1/1 E1	20,00	14,93	71,68	1433,74	67,27	1,56	31,20	12,96	0,80	16,00	11,24	1,68	33,60	9,66	10,28	205,62	6,29
	29.03.2019	V1/1 E2	80,00	46,34	8,72	697,58	32,73	2,62	209,60	87,04	1,58	126,40	88,76	3,93	314,39	90,34	38,30	3063,93	93,71
			100,00		21,31	2131,32	100,00	2,41	240,80	100,00	1,42	142,40	100,00	3,48	348,00	100,00	32,70	3269,55	100,00
	29.03.2019	V1/2 E1	22,46	15,27	70,77	1589,30	64,91	1,53	34,36	13,50	0,79	17,74	12,58	1,96	44,02	10,63	10,48	235,35	7,49
29.03.2019	V1/2 E2	77,54	44,84	11,08	859,17	35,09	2,84	220,22	86,50	1,59	123,29	87,42	4,77	369,88	89,37	37,50	2907,85	92,51	
		100,00		24,48	2448,48	100,00	2,55	254,58	100,00	1,41	141,03	100,00	4,14	413,89	100,00	31,43	3143,20	100,00	
2	29.03.2019	V2/1 E1	18,55	20,32	60,37	1120,04	53,90	1,96	36,36	13,88	0,91	16,88	11,86	2,10	38,96	13,44	15,62	289,80	8,42
	29.03.2019	V2/1 E2	81,45	44,36	11,76	957,82	46,10	2,77	225,61	86,12	1,54	125,43	88,14	3,08	250,86	86,56	38,71	3152,82	91,58
			100,00		20,78	2077,86	100,00	2,62	261,97	100,00	1,42	142,31	100,00	2,90	289,82	100,00	34,43	3442,61	100,00
	29.03.2019	V2/2 E1	20,16	22,47	56,10	1130,82	49,71	2,21	44,55	15,64	0,96	19,35	13,91	2,24	45,15	14,94	17,34	349,53	10,66
	29.03.2019	V2/2 E2	79,84	43,28	14,33	1144,15	50,29	3,01	240,33	84,36	1,50	119,76	86,09	3,22	257,09	85,06	36,69	2929,43	89,34
		100,00		22,75	2274,96	100,00	2,85	284,87	100,00	1,39	139,12	100,00	3,02	302,25	100,00	32,79	3278,96	100,00	
3	29.03.2019	V3/1 E1	28,47	18,49	64,63	1839,86	76,53	1,78	50,67	19,91	0,85	24,20	17,27	1,82	51,81	19,04	13,41	381,75	11,64
	29.03.2019	V3/1 E2	71,53	46,33	7,89	564,39	23,47	2,85	203,87	80,09	1,62	115,68	82,73	3,08	220,32	80,96	40,52	2898,49	88,36
			100,00		24,04	2404,25	100,00	2,55	254,54	100,00	1,40	140,08	100,00	2,72	272,13	100,00	32,80	3280,24	100,00
	29.03.2019	V3/2 E1	27,04	19,50	62,33	1685,30	73,90	1,94	52,45	19,44	0,87	23,52	16,60	1,82	49,21	16,12	15,72	425,04	12,71
	29.03.2019	V3/2 E2	72,96	46,02	8,16	595,37	26,10	2,98	217,43	80,56	1,62	118,20	83,40	3,51	256,10	83,88	40,02	2919,93	87,29
		100,00		22,81	2280,67	100,00	2,70	269,88	100,00	1,42	141,72	100,00	3,05	305,31	100,00	33,45	3344,97	100,00	
4	29.03.2019	V4/1 E1	28,38	17,86	65,53	1859,70	80,18	1,70	48,24	20,90	0,86	24,39	17,60	1,68	47,68	17,77	12,90	366,09	11,23
	29.03.2019	V4/1 E2	71,62	47,06	6,42	459,80	19,82	2,55	182,63	79,10	1,60	114,23	82,40	3,08	220,59	82,23	40,42	2894,91	88,77
			100,00		23,20	2319,50	100,00	2,31	230,88	100,00	1,39	138,63	100,00	2,68	268,27	100,00	32,61	3261,00	100,00
	29.03.2019	V4/2 E1	26,64	18,38	63,91	1702,42	76,95	1,69	45,02	18,80	0,87	23,30	16,59	2,10	55,94	19,15	12,80	340,96	10,45
	29.03.2019	V4/2 E2	73,36	46,81	6,95	509,87	23,05	2,65	194,41	81,20	1,60	117,16	83,41	3,22	236,23	80,85	39,82	2921,28	89,55
		100,00		22,12	2212,29	100,00	2,39	239,43	100,00	1,40	140,46	100,00	2,92	292,17	100,00	32,62	3262,25	100,00	
5	29.03.2019	V5/1 E1	33,99	29,31	42,01	1427,94	72,22	2,33	79,20	31,25	1,03	35,01	27,05	1,82	61,86	26,05	23,89	812,03	23,60
	29.03.2019	V5/1 E2	66,01	46,19	8,32	549,20	27,78	2,64	174,27	68,75	1,43	94,39	72,95	2,66	175,59	73,95	39,82	2628,50	76,40
			100,00		19,77	1977,14	100,00	2,53	253,46	100,00	1,29	129,40	100,00	2,37	237,45	100,00	34,41	3440,53	100,00
	29.03.2019	V5/2 E1	26,22	26,88	46,94	1230,99	67,84	2,13	55,86	22,76	0,93	24,39	19,55	1,96	51,40	20,76	22,18	581,66	16,46
	29.03.2019	V5/2 E2	73,78	46,36	7,91	583,56	32,16	2,57	189,60	77,24	1,36	100,33	80,45	2,66	196,24	79,24	40,02	2952,49	83,54
		100,00		18,15	1814,55	100,00	2,45	245,46	100,00	1,25	124,72	100,00	2,48	247,64	100,00	35,34	3534,15	100,00	
6	29.03.2019	V6/1 E1	31,08	26,39	48,17	1497,05	76,94	2,00	62,16	29,55	0,97	30,15	24,47	2,24	69,62	27,52	20,76	645,19	18,58
	29.03.2019	V6/1 E2	68,92	47,52	6,51	448,68	23,06	2,15	148,18	70,45	1,35	93,04	75,53	2,66	183,33	72,48	41,03	2827,85	81,42
			100,00		19,46	1945,73	100,00	2,10	210,34	100,00	1,23	123,19	100,00	2,53	252,95	100,00	34,73	3473,04	100,00
	29.03.2019	V6/2 E1	32,23	27,46	45,41	1463,57	76,95	2,31	74,45	33,00	0,99	31,91	26,00	1,82	58,66	24,55	21,87	704,87	20,27
	29.03.2019	V6/2 E2	67,77	47,42	6,47	438,47	23,05	2,23	151,13	67,00	1,34	90,81	74,00	2,66	180,27	75,45	40,92	2773,14	79,73
		100,00		19,02	1902,04	100,00	2,26	225,58	100,00	1,23	122,72	100,00	2,39	238,93	100,00	34,78	3478,01	100,00	
7	29.03.2019	V7/1 E1	41,65	27,16	45,96	1914,11	88,01	2,50	104,12	42,95	0,96	39,98	33,67	1,96	81,63	35,70	21,77	906,66	26,99
	29.03.2019	V7/1 E2	58,35	48,20	4,47	260,84	11,99	2,37	138,30	57,05	1,35	78,78	66,33	2,52	147,05	64,30	42,03	2452,57	73,01
			100,00		21,75	2174,94	100,00	2,42	242,41	100,00	1,19	118,76	100,00	2,29	228,68	100,00	33,59	3359,23	100,00
	29.03.2019	V7/2 E1	42,82	29,68	40,42	1730,87	88,77	2,45	104,91	42,52	1,04	44,54	36,08	2,10	89,93	38,43	24,70	1057,71	30,46
	29.03.2019	V7/2 E2	57,18	48,52	3,83	218,99	11,23	2,48	141,80	57,48	1,38	78,91	63,92	2,52	144,09	61,57	42,24	2415,19	69,54
		100,00		19,50	1949,87	100,00	2,47	246,72	100,00	1,23	123,44	100,00	2,34	234,01	100,00	34,73	3472,90	100,00	
8	29.03.2019	V8/1 E1	43,63	25,18	46,77	2040,59	89,89	2,17	94,68	40,77	1,00	43,63	35,93	1,82	79,41	40,15	22,48	980,81	28,74
	29.03.2019	V8/1 E2	56,37	47,08	4,07	229,42	10,11	2,44	137,54	59,23	1,38	77,79	64,07	2,10	118,38	59,85	43,14	2431,78	71,26
			100,00		22,70	2270,02	100,00	2,32	232,22	100,00	1,21	121,42	100,00	1,98	197,78	100,00	34,13	3412,60	100,00
	29.03.2019	V8/2 E1	47,33	31,02	39,93	1889,82	90,88	2,22	105,07	50,19	1,06	50,17	40,66	2,24	106,02	40,64	25,00	1183,21	34,56
	29.03.2019	V8/2 E2	52,67	48,94	3,60	189,62	9,12	1,98	104,29	49,81	1,39	73,21	59,34	2,94	154,85	59,36	42,54	2240,66	65,44
		100,00		20,79	2079,44	100,00	2,09	209,36	100,00	1,23	123,38	100,00	2,61	260,87	100,00	34,24	3423,86	100,00	

Tabelle 46: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von RMF 2 (Versuch 1-8)

9	06.05.2019	V9/1 E1	65,93	34,18	32,57	2147,38	86,43	2,23	147,03	59,81	1,25	82,41	60,19	2,10	138,46	59,21	28,63	1887,62	58,81
	06.05.2019	V9/1 E2	34,07	45,16	9,90	337,28	13,57	2,90	98,80	40,19	1,60	54,51	39,81	2,80	95,39	40,79	38,81	1322,20	41,19
			100,00		24,85	2484,66	100,00	2,46	245,83	100,00	1,37	136,92	100,00	2,34	233,85	100,00	32,10	3209,82	100,00
	06.05.2019	V9/2 E1	70,47	36,88	27,19	1916,20	85,99	2,29	161,39	66,77	1,34	94,44	66,38	2,24	157,86	65,63	31,05	2188,23	65,63
	06.05.2019	V9/2 E2	29,53	45,07	10,57	312,08	14,01	2,72	80,31	33,23	1,62	47,83	33,62	2,80	82,67	34,37	38,81	1145,88	34,37
		100,00		22,28	2228,29	100,00	2,42	241,70	100,00	1,42	142,27	100,00	2,41	240,53	100,00	33,34	3334,12	100,00	
10	06.05.2019	V10/1 E1	33,42	25,82	49,62	1658,19	70,70	1,80	60,15	25,79	1,01	33,75	24,06	1,82	60,82	22,87	20,87	697,43	21,21
	06.05.2019	V10/1 E2	66,58	45,16	10,32	687,13	29,30	2,60	173,11	74,21	1,60	106,53	75,94	3,08	205,07	77,13	38,91	2590,72	78,79
			100,00		23,45	2345,32	100,00	2,33	233,27	100,00	1,40	140,28	100,00	2,66	265,89	100,00	32,88	3288,14	100,00
	06.05.2019	V10/2 E1	36,82	29,25	42,85	1577,53	72,17	1,85	68,11	28,23	1,11	40,86	28,66	2,10	77,31	27,54	23,89	879,51	26,25
	06.05.2019	V10/2 E2	63,18	45,34	9,63	608,47	27,83	2,74	173,13	71,77	1,61	101,73	71,34	3,22	203,46	72,46	39,11	2471,16	73,75
		100,00		21,86	2186,00	100,00	2,41	241,23	100,00	1,43	142,59	100,00	2,81	280,77	100,00	33,51	3350,67	100,00	
11	06.05.2019	V11/1 E1	34,54	24,75	51,96	1794,60	76,06	1,80	62,17	27,53	1,00	34,54	24,80	2,24	77,37	24,46	18,85	651,04	20,52
	06.05.2019	V11/1 E2	65,46	46,01	8,63	564,94	23,94	2,50	163,65	72,47	1,60	104,74	75,20	3,65	238,94	75,54	38,51	2520,94	79,48
			100,00		23,60	2359,54	100,00	2,26	225,82	100,00	1,39	139,28	100,00	3,16	316,30	100,00	31,72	3171,98	100,00
	06.05.2019	V11/2 E1	31,78	23,01	55,49	1763,41	75,83	1,76	55,93	23,10	0,96	30,51	21,63	2,52	80,08	21,80	16,53	525,31	16,63
	06.05.2019	V11/2 E2	68,22	46,04	8,24	562,14	24,17	2,73	186,24	76,90	1,62	110,52	78,37	4,21	287,21	78,20	38,61	2634,02	83,37
		100,00		23,26	2325,55	100,00	2,42	242,17	100,00	1,41	141,03	100,00	3,67	367,29	100,00	31,59	3159,32	100,00	
12	06.05.2019	V12/1 E1	37,91	24,77	51,66	1958,27	81,60	1,88	71,27	31,12	1,02	38,67	27,40	2,38	90,22	27,71	18,45	699,38	22,14
	06.05.2019	V12/1 E2	62,09	46,80	7,11	441,48	18,40	2,54	157,72	68,88	1,65	102,45	72,60	3,79	235,33	72,29	39,61	2459,50	77,86
			100,00		24,00	2399,76	100,00	2,29	228,98	100,00	1,41	141,12	100,00	3,26	325,55	100,00	31,59	3158,89	100,00
	06.05.2019	V12/2 E1	39,94	28,78	43,33	1730,54	82,91	2,13	85,07	36,26	1,11	44,33	31,04	1,96	78,28	29,73	23,79	950,14	27,01
	06.05.2019	V12/2 E2	60,06	47,18	5,94	356,76	17,09	2,49	149,55	63,74	1,64	98,50	68,96	3,08	184,99	70,27	42,74	2567,03	72,99
		100,00		20,87	2087,30	100,00	2,35	234,62	100,00	1,43	142,83	100,00	2,63	263,27	100,00	35,17	3517,26	100,00	
13	06.05.2019	V13/1 E1	37,80	29,65	41,46	1567,28	82,00	2,12	80,14	36,21	1,03	38,94	31,21	2,52	95,26	32,23	24,29	918,22	26,18
	06.05.2019	V13/1 E2	62,20	47,92	5,53	343,95	18,00	2,27	141,19	63,79	1,38	85,83	68,79	3,22	200,28	67,77	41,63	2589,29	73,82
			100,00		19,11	1911,23	100,00	2,21	221,33	100,00	1,25	124,77	100,00	2,96	295,54	100,00	35,08	3507,51	100,00
	06.05.2019	V13/2 E1	34,37	27,25	46,72	1605,73	77,58	3,23	111,01	40,07	1,02	35,06	26,65	2,24	76,99	26,70	21,97	755,09	21,41
	06.05.2019	V13/2 E2	65,63	46,83	7,07	464,01	22,42	2,53	166,05	59,93	1,47	96,48	73,35	3,22	211,33	73,30	42,23	2771,59	78,59
		100,00		20,70	2069,74	100,00	2,77	277,06	100,00	1,32	131,53	100,00	2,88	288,32	100,00	35,27	3526,68	100,00	
14	06.05.2019	V14/1 E1	52,13	33,89	32,99	1719,61	86,80	2,40	125,10	52,86	1,10	57,34	46,28	2,52	131,36	55,05	28,12	1465,76	42,20
	06.05.2019	V14/1 E2	47,87	47,93	5,46	261,40	13,20	2,33	111,55	47,14	1,39	66,55	53,72	2,24	107,24	44,95	41,93	2007,39	57,80
			100,00		19,81	1981,01	100,00	2,37	236,65	100,00	1,24	123,88	100,00	2,39	238,60	100,00	34,73	3473,15	100,00
	06.05.2019	V14/2 E1	57,17	35,92	28,64	1637,26	83,56	2,25	128,63	49,69	1,16	66,31	52,51	2,38	136,06	58,64	29,84	1705,86	49,69
	06.05.2019	V14/2 E2	42,83	46,61	7,52	322,10	16,44	3,04	130,21	50,31	1,40	59,97	47,49	2,24	95,95	41,36	40,32	1727,03	50,31
		100,00		19,59	1959,37	100,00	2,59	258,84	100,00	1,26	126,28	100,00	2,32	232,00	100,00	34,33	3432,89	100,00	
15	06.05.2019	V15/1 E1	27,37	23,02	54,69	1497,03	81,85	2,27	62,14	29,05	0,87	23,81	18,87	1,96	53,65	21,74	17,84	488,34	13,73
	06.05.2019	V15/1 E2	72,63	48,29	4,57	331,91	18,15	2,09	151,79	70,95	1,41	102,40	81,13	2,66	193,19	78,26	42,24	3067,76	86,27
			100,00		18,29	1828,94	100,00	2,14	213,93	100,00	1,26	126,22	100,00	2,47	246,84	100,00	35,56	3556,10	100,00
	06.05.2019	V15/2 E1	25,22	21,42	58,01	1463,04	78,81	2,10	52,96	23,54	0,87	21,94	17,23	1,96	49,43	19,90	16,33	411,85	11,63
	06.05.2019	V15/2 E2	74,78	47,86	5,26	393,34	21,19	2,30	171,99	76,46	1,41	105,44	82,77	2,66	198,91	80,10	41,83	3128,03	88,37
		100,00		18,56	1856,38	100,00	2,25	224,96	100,00	1,27	127,38	100,00	2,48	248,35	100,00	35,40	3539,88	100,00	
16	06.05.2019	V16/1 E1	21,05	20,67	59,87	1260,42	76,08	2,04	42,95	18,23	0,81	17,05	13,53	1,96	41,26	16,42	16,13	339,58	9,28
	06.05.2019	V16/1 E2	78,95	47,9	5,0	396,3	23,92	2,4	192,6	81,77	1,4	108,9	86,47	2,7	210,0	83,58	42,0	3318,2	90,72
			100,00		16,6	1656,7	100,00	2,4	235,6	100,00	1,3	126,0	100,00	2,5	251,3	100,00	36,6	3657,7	100,00
	06.05.2019	V16/2 E1	25,25	21,0	59,2	1493,6	77,2	2,4	61,3	28,1	0,8	21,2	17,0	3,1	77,8	38,2	15,1	381,7	10,8
	06.05.2019	V16/2 E2	74,75	47,6	5,9	441,0	22,8	2,1	157,0	71,9	1,4	103,9	83,0	1,7	125,6	61,8	42,3	3165,1	89,2
		100,00		19,3	1934,6	100,00	2,2	218,3	100,00	1,3	125,1	100,00	2,0	203,3	100,00	35,5	3546,8	100,00	

Tabelle 47: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von RMF 2 (Versuch 9-16)

Inhaltsausbringen - Berge						Inhaltsausbringen - Konzentrat						
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität		angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität	
Faktor	A	B	C	D	E	HCL unlösl.	Faktor	A	B	C	D	E
-1	77,75	73,44	77,68	73,44	79,72		-1	22,25	26,56	22,32	26,56	20,28
1	76,65	80,97	76,72	80,96	74,68		1	23,35	19,03	23,28	19,04	25,32
MW	77,20	77,21	77,20	77,20	77,20		MW	22,80	22,80	22,80	22,80	22,80
Delta -1 / 1	-1,10	7,53	-0,96	7,52	-5,04		Delta -1 / 1	1,10	-7,53	0,96	-7,52	5,04
Faktor	A	B	C	D	E	CaO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	28,00	30,96	33,05	24,98	34,24		-1	72,00	69,04	66,95	75,02	65,76
1	29,65	26,69	24,60	32,67	23,41		1	70,35	73,31	75,40	67,33	76,59
MW	28,83	28,83	28,83	28,83	28,83		MW	71,18	71,18	71,18	71,18	71,18
Delta -1 / 1	1,65	-4,27	-8,45	7,69	-10,83		Delta -1 / 1	-1,65	4,27	8,45	-7,69	10,83
Faktor	A	B	C	D	E	MgO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	23,14	26,45	27,35	21,07	27,69		-1	76,86	73,55	72,65	78,93	72,31
1	21,97	18,66	17,75	24,03	17,41		1	78,03	81,34	82,25	75,97	82,59
MW	22,56	22,56	22,55	22,55	22,55		MW	77,45	77,45	77,45	77,45	77,45
Delta -1 / 1	-1,17	-7,79	-9,60	2,96	-10,28		Delta -1 / 1	1,17	7,79	9,60	-2,96	10,28

Tabelle 48: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von RMF 2

Versuchsdatum	Probe	Versuch / Produkt	Masse	GLV	HCl unl. (NCH)			R ₂ O ₃ (NCH)			Fe ₂ O ₃ (RFA)			CaO (NCH)			MgO (NCH)		
			rmj [%]	[%]	gij [%]	lij [%%]	rij [%]	gij [%]	lij [%%]	rij [%]	gij [%]	lij [%%]	rij [%]	gij [%]	lij [%%]	rij [%]	gij [%]	lij [%%]	rij [%]
14.02.2020	RMF/02	Versuch 1 / E1	19,2	24,3	49,8	956,7	57,5	2,3	44,7	20,1	1,1	20,9	14,2	2,0	37,6	14,3	19,8	379,4	10,3
14.02.2020	RMF/02	Versuch 1 / E2	80,8	46,0	8,8	707,0	42,5	2,2	177,8	79,9	1,6	126,9	85,8	2,8	226,2	85,7	40,7	3290,2	89,7
	RMF/03	Aufgabe	100,0	41,8	16,6	1663,7	100,0	2,2	222,5	100,0	1,5	147,8	100,0	2,6	263,9	100,0	36,7	3669,6	100,0
14.02.2020	RMF/04	Versuch 2 / E1	23,8	24,1	51,8	1236,1	61,1	1,8	42,4	18,5	1,1	25,3	17,5	2,0	46,7	16,6	19,2	456,6	13,4
14.02.2020	RMF/05	Versuch 2 / E2	76,2	44,9	10,3	786,7	38,9	2,5	186,6	81,5	1,6	119,6	82,5	3,1	234,6	83,4	38,7	2948,0	86,6
	RMF/06	Aufgabe	100,0	39,9	20,2	2022,8	100,0	2,3	229,0	100,0	1,4	144,8	100,0	2,8	281,3	100,0	34,0	3404,6	100,0
14.02.2020	RMF/07	Versuch 3 / E1	25,9	19,4	62,6	1617,5	71,4	1,8	46,0	20,4	0,9	24,3	17,0	1,4	36,2	13,7	14,9	385,8	11,7
14.02.2020	RMF/08	Versuch 3 / E2	74,1	45,9	8,8	649,9	28,7	2,4	180,1	79,7	1,6	118,6	83,0	3,1	228,2	86,3	39,3	2912,9	88,3
	RMF/09	Aufgabe	100,0	39,0	22,7	2266,5	100,0	2,3	226,0	100,0	1,4	142,8	100,0	2,6	264,3	100,0	33,0	3297,4	100,0
14.02.2020	RMF/10	Versuch 4 / E1	32,7	23,8	52,5	1715,1	81,7	2,2	71,5	30,5	1,1	34,3	24,0	2,2	73,1	26,1	18,6	605,7	17,9
14.02.2020	RMF/11	Versuch 4 / E2	67,3	47,4	5,7	383,9	18,3	2,4	163,0	69,5	1,6	108,4	76,0	3,1	207,4	73,9	41,3	2783,6	82,1
	RMF/12	Aufgabe	100,0	39,7	21,0	2099,0	100,0	2,3	234,5	100,0	1,4	142,7	100,0	2,8	280,6	100,0	33,9	3389,2	100,0

Tabelle 49: Bilanz zu den Versuchen zur Reproduzierbarkeit mit RMF 2

Inhaltsausbringen - Berge				Inhaltsausbringen - Konzentrat					
	Aufgaberate	Bandgeschwindigkeit	Elektrodenabstand		Aufgaberate	Bandgeschwindigkeit	Elektrodenabstand		
Faktor	A	B	C	HCL unlösl.	Faktor	A	B	C	
-1	64,4	59,3	66,2			35,6	40,7	33,8	
1	66,3	71,4	64,5			28,6	23,5	30,4	
MW	65,4	65,4	65,4			MW	32,1	32,1	32,1
Delta -1 / 1	1,9	12,1	-1,7			Delta -1 / 1	-7,0	-17,2	-3,4
Faktor	A	B	C	CaO	Faktor	A	B	C	
-1	14,0	15,4	15,2			86,0	84,6	84,9	
1	21,3	19,9	20,2			78,7	80,1	79,8	
MW	17,7	17,7	17,7			MW	82,4	82,4	82,4
Delta -1 / 1	7,3	4,5	5,0			Delta -1 / 1	-7,3	-4,5	-5,1
Faktor	A	B	C	MgO	Faktor	A	B	C	
-1	11,0	11,9	12,6			89,0	88,1	87,5	
1	15,6	14,8	14,1			84,4	85,2	85,9	
MW	13,3	13,4	13,4			MW	86,7	86,7	86,7
Delta -1 / 1	4,6	2,9	1,5			Delta -1 / 1	-4,6	-2,9	-1,6

Tabelle 50: Auswertung der Versuchsreihe zur Reproduzierbarkeit mit RMF 2

<i>RMF 2 - Vers, 1</i>	<i>E1 (Berge)</i>		<i>E2 (Konzentrat)</i>	
	R	D	R	D
<i>Maschenweite</i>				
<i>[μm]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
>125	0,0	100,0	0,0	100,0
100/125	10,3	89,7	11,6	88,4
100/63	20,7	79,3	20,4	79,6
63/40	27,4	72,6	32,2	67,8
40/0	100,0	0,0	100,0	0,0

Tabelle 51: Korngrößenverteilungen der Produkte (RMF 2 *Berge* & *Konzentrat*) aus Versuch 1

<i>RMF 2 - Vers, 2</i>	<i>E1 (Berge)</i>		<i>E2 (Konzentrat)</i>	
	R	D	R	D
<i>Maschenweite</i>				
<i>[μm]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
>125	0,0	100,0	0,0	100,0
100/125	8,7	91,3	6,5	93,5
100/63	19,5	80,5	15,0	85,0
63/40	29,6	70,4	25,8	74,2
40/0	100,0	0,0	100,0	0,0

Tabelle 52: Korngrößenverteilung der Produkte (RMF 2 *Berge* & *Konzentrat*) aus Versuch 2

<i>RMF 2 - Vers, 3</i>	<i>E1 (Berge)</i>		<i>E2 (Konzentrat)</i>	
	R	D	R	D
<i>Maschenweite</i>				
<i>[μm]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
>125	0,0	100,0	0,0	100,0
100/125	5,5	94,5	3,7	96,3
100/63	14,9	85,1	10,7	89,3
63/40	22,0	78,0	23,3	76,7
40/0	100,0	0,0	100,0	0,0

Tabelle 53: Korngrößenverteilung der Produkte (RMF 2 *Berge* & *Konzentrat*) aus Versuch 3

<i>RMF 2 - Vers, 4</i>	<i>E1 (Berge)</i>		<i>E2 (Konzentrat)</i>	
	R	D	R	D
<i>Maschenweite</i>				
<i>[μm]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
>125	0,0	100,0	0,0	100,0
100/125	12,8	87,2	6,2	93,8
100/63	27,7	72,3	12,0	88,0
63/40	39,7	60,3	21,8	78,2
40/0	100,0	0,0	100,0	0,0

Tabelle 54: Korngrößenverteilung der Produkte (RMF 2 *Berge* & *Konzentrat*) aus Versuch 4

Versuchs-Nr.	Probenbezeichnung	Masse	Trockenverlust 110°C		Glühverlust 1050°C		HF Unl. _(NCH)		R ₂ O ₃ _(NCH)		CaO _(NCH)		MgO _(NCH)		SiO ₂ _(NCH)	
		g	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri
		[%]	ungemahlen [%]		[%]		[%]		[%]		[%]		[%]		[%]	
1	V1/1 E1 v. 29.03	55.2	2.44	45.2	6.89	54.7	7.73	73.0	9.58	91.0	0.56	49.7	4.03	55.8	71.21	51.2
	V1/1 E2 v. 29.03	44.8	3.66	54.8	7.03	45.3	3.52	27.0	1.17	9.0	0.70	50.3	3.93	44.2	83.65	48.8
		100.0	2.99	100.0	6.95	100.0	5.84	100.0	5.81	100.0	0.62	100.0	3.99	100.0	76.78	100.0
	V1/2 E1 v. 29.03	53.5	2.25	41.2	7.91	59.3	4.65	60.2	12.70	93.1	0.56	47.9	4.94	61.0	69.24	48.4
	V1/2 E2 v. 29.03	46.5	3.70	58.8	6.23	40.7	3.54	39.8	1.09	6.9	0.70	52.1	3.63	39.0	84.81	51.6
	100.0	2.92	100.0	7.13	100.0	4.13	100.0	7.30	100.0	0.63	100.0	4.33	100.0	76.48	100.0	
2	V2/1 E1 v. 29.03	44.8	1.98	25.0	5.90	43.7	9.10	65.2	9.80	87.8	0.56	44.8	4.64	42.7	70.00	40.5
	V2/1 E2 v. 29.03	55.2	3.54	68.8	6.17	56.3	3.94	34.8	1.10	12.2	0.56	55.2	5.04	57.3	83.19	59.5
		100.0	2.84	93.8	6.05	100.0	6.25	100.0	4.99	100.0	0.56	100.0	4.86	100.0	77.29	100.0
	V2/2 E1 v. 29.03	52.3	1.92	29.0	5.73	50.1	9.29	76.3	9.19	89.7	0.56	52.3	4.33	49.0	70.90	48.1
	V2/2 E2 v. 29.03	47.7	5.16	71.0	6.27	49.9	3.16	23.7	1.16	10.3	0.56	47.7	4.94	51.0	83.91	51.9
	100.0	3.47	100.0	5.99	100.0	6.37	100.0	5.36	100.0	0.56	100.0	4.62	100.0	77.11	100.0	
3	V3/1 E1 v. 29.03	51.6	4.32	47.3	6.19	51.8	3.37	48.9	3.28	74.0	0.56	58.7	6.96	65.4	79.64	50.1
	V3/1 E2 v. 29.03	48.4	5.13	52.7	6.15	48.2	3.76	51.1	1.23	26.0	0.42	41.3	3.93	34.6	84.51	49.9
		100.0	4.71	100.0	6.17	100.0	3.56	100.0	2.29	100.0	0.49	100.0	5.49	100.0	82.00	100.0
	V3/2 E1 v. 29.03	42.5	4.40	38.3	5.85	41.0	3.60	56.1	3.16	70.9	0.42	35.7	8.57	55.7	78.40	40.5
	V3/2 E2 v. 29.03	57.5	5.25	61.7	6.23	59.0	2.08	43.9	0.96	29.1	0.56	64.3	5.04	44.3	85.13	59.5
	100.0	4.89	100.0	6.07	100.0	2.73	100.0	1.90	100.0	0.50	100.0	6.54	100.0	82.27	100.0	
4	V4/1 E1 v. 29.03	55.5	3.01	40.2	5.53	52.5	10.91	84.7	5.24	87.2	0.56	55.5	6.85	65.8	70.91	50.9
	V4/1 E2 v. 29.03	44.5	5.59	59.8	6.24	47.5	2.46	15.3	0.96	12.8	0.56	44.5	4.44	34.2	85.34	49.1
		100.0	4.15	100.0	5.85	100.0	7.15	100.0	3.34	100.0	0.56	100.0	5.78	100.0	77.33	100.0
	V4/2 E1 v. 29.03	53.3	2.97	38.1	5.63	50.4	8.85	83.2	8.84	91.7	0.56	60.3	8.87	70.0	67.25	47.2
	V4/2 E2 v. 29.03	46.7	5.50	61.9	6.31	49.6	2.04	16.8	0.91	8.3	0.42	39.7	4.33	30.0	85.99	52.8
	100.0	4.15	100.0	5.95	100.0	5.67	100.0	5.14	100.0	0.49	100.0	6.75	100.0	76.00	100.0	
5	V5/1 E1 v. 29.03	50.3	4.42	43.9	6.19	51.8	4.26	57.4	5.57	83.2	0.56	57.4	4.94	46.5	78.48	48.7
	V5/1 E2 v. 29.03	49.7	5.71	56.1	5.83	48.2	3.19	42.6	1.14	16.8	0.42	42.6	5.75	53.5	83.67	51.3
		100.0	5.06	100.0	6.01	100.0	3.73	100.0	3.37	100.0	0.49	100.0	5.34	100.0	81.06	100.0
	V5/2 E1 v. 29.03	58.1	4.21	51.2	5.99	59.0	5.78	77.2	5.41	87.6	0.42	58.1	4.94	57.2	77.46	55.8
	V5/2 E2 v. 29.03	41.9	5.57	48.8	5.78	41.0	2.37	22.8	1.06	12.4	0.42	41.9	5.14	42.8	85.23	44.2
	100.0	4.78	100.0	5.90	100.0	4.35	100.0	3.59	100.0	0.42	100.0	5.02	100.0	80.71	100.0	
6	V6/1 E1 v. 29.03	56.6	4.19	49.3	5.91	55.8	2.28	45.2	6.54	88.3	0.56	56.6	7.96	66.9	76.75	54.5
	V6/1 E2 v. 29.03	43.4	5.62	50.7	6.10	44.2	3.60	54.8	1.13	11.7	0.56	43.4	5.14	33.1	83.47	45.5
		100.0	4.81	100.0	5.99	100.0	2.85	100.0	4.19	100.0	0.56	100.0	6.74	100.0	79.67	100.0
	V6/2 E1 v. 29.03	54.5	3.73	44.3	5.87	54.2	1.44	38.6	10.55	91.5	0.56	54.5	5.75	63.7	75.83	51.5
	V6/2 E2 v. 29.03	45.5	5.63	55.7	5.94	45.8	2.75	61.4	1.18	8.5	0.56	45.5	3.93	36.3	85.64	48.5
	100.0	4.80	100.0	5.90	100.0	2.04	100.0	6.29	100.0	0.56	100.0	4.92	100.0	80.29	100.0	
7	V7/1 E1 v. 29.03	46.7	5.21	46.1	6.25	48.8	1.71	21.9	1.91	46.3	0.56	46.7	6.25	52.1	83.32	47.3
	V7/1 E2 v. 29.03	53.3	5.33	53.9	5.75	51.2	5.35	78.1	1.94	53.7	0.56	53.3	5.04	47.9	81.36	52.7
		100.0	5.28	100.0	5.98	100.0	3.65	100.0	1.93	100.0	0.56	100.0	5.60	100.0	82.28	100.0
	V7/2 E1 v. 29.03	43.7	5.80	44.9	5.99	45.0	2.45	23.4	1.67	49.9	0.84	53.8	5.44	51.8	83.61	44.1
	V7/2 E2 v. 29.03	56.3	5.34	55.1	5.69	55.0	6.24	76.6	1.30	50.1	0.56	46.2	3.93	48.2	82.28	55.9
	100.0	5.45	100.0	5.82	100.0	4.58	100.0	1.46	100.0	0.68	100.0	4.59	100.0	82.86	100.0	
8	V8/1 E1 v. 29.03	51.3	3.62	46.4	5.83	51.5	13.04	75.3	4.36	81.4	0.56	51.3	2.82	41.3	73.39	48.0
	V8/1 E2 v. 29.03	48.7	4.42	53.6	5.80	48.5	4.50	24.7	1.05	18.6	0.56	48.7	4.23	58.7	83.86	52.0
		100.0	4.01	100.0	5.82	100.0	8.88	100.0	2.75	100.0	0.56	100.0	3.51	100.0	78.49	100.0
	V8/2 E1 v. 29.03	49.5	3.93	44.0	5.94	49.6	6.81	56.5	3.40	64.0	0.56	49.5	7.26	71.6	76.03	47.0
	V8/2 E2 v. 29.03	50.5	4.89	56.0	5.91	50.4	5.13	43.5	1.87	36.0	0.56	50.5	2.82	28.4	83.71	53.0
	100.0	4.41	100.0	5.92	100.0	5.96	100.0	2.63	100.0	0.56	100.0	5.02	100.0	79.91	100.0	

Tabelle 55: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Gulsenit (Versuch 1-8)

Versuchs-Nr.	Probenbezeichnung	Masse		Trockenverlust 110°C		Glühverlust 1050°C		HF Unl. _(NCH)		R ₂ O ₃ (NCH)		CaO _(NCH)		MgO _(NCH)		SiO ₂ (NCH)		
		[%]	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri	g	ri
9	V9/1 E1 v. 29.03	46.1	4.53	41.5	5.90	44.7	6.44	69.5	3.01	72.2	0.56	40.6	5.04	47.6	79.05	44.3		
	V9/1 E2 v. 29.03	53.9	5.45	58.5	6.24	55.3	2.42	30.5	0.99	27.8	0.70	59.4	4.74	52.4	84.91	55.7		
		100.0	5.02	100.0	6.08	100.0	4.27	100.0	1.92	100.0	0.64	100.0	4.88	100.0	82.21	100.0		
	V9/2 E1 v. 29.03	50.5	4.62	49.0	5.87	49.1	6.50	73.1	1.66	62.0	0.56	50.5	6.65	63.3	78.76	48.4		
	V9/2 E2 v. 29.03	49.5	4.92	51.0	6.20	50.9	2.44	26.9	1.04	38.0	0.56	49.5	3.93	36.7	85.83	51.6		
		100.0	4.77	100.0	6.03	100.0	4.49	100.0	1.35	100.0	0.56	100.0	5.31	100.0	82.26	100.0		
10	V10/1 E1 v. 29.03	48.9	2.38	31.3	5.64	47.5	5.33	52.7	9.98	86.5	0.56	48.9	5.44	54.0	73.05	45.8		
	V10/1 E2 v. 29.03	51.1	5.00	68.7	5.97	52.5	4.58	47.3	1.49	13.5	0.56	51.1	4.44	46.0	82.96	54.2		
		100.0	3.72	100.0	5.81	100.0	4.95	100.0	5.64	100.0	0.56	100.0	4.93	100.0	78.11	100.0		
	V10/2 E1 v. 29.03	49.5	2.29	29.4	5.42	47.2	19.03	80.9	7.96	86.0	0.70	55.1	2.32	27.0	64.57	43.7		
	V10/2 E2 v. 29.03	50.5	5.40	70.6	5.95	52.8	4.42	19.1	1.27	14.0	0.56	44.9	6.15	73.0	81.65	56.3		
		100.0	3.86	100.0	5.69	100.0	11.65	100.0	4.58	100.0	0.63	100.0	4.25	100.0	73.19	100.0		
11	V11/1 E1 v. 29.03	54.1	2.87	40.3	5.28	49.2	21.25	92.0	5.30	83.4	0.56	54.1	4.33	62.8	63.28	46.3		
	V11/1 E2 v. 29.03	45.9	5.01	59.7	6.43	50.8	2.17	8.0	1.24	16.6	0.56	45.9	3.02	37.2	86.58	53.7		
		100.0	3.85	100.0	5.81	100.0	12.49	100.0	3.44	100.0	0.56	100.0	3.73	100.0	73.98	100.0		
12	V12/1 E1 v. 29.03	43.9	4.66	42.3	6.08	42.8	5.69	61.4	2.63	67.1	0.84	54.0	6.85	59.6	77.91	41.6		
	V12/1 E2 v. 29.03	56.1	4.99	57.7	6.35	57.2	2.80	38.6	1.01	32.9	0.56	46.0	3.63	40.4	85.65	58.4		
		100.0	4.85	100.0	6.23	100.0	4.07	100.0	1.72	100.0	0.68	100.0	5.04	100.0	82.25	100.0		
13	V13/1 E1 v. 29.03	54.0	2.23	33.7	4.60	46.0	25.19	92.9	6.26	83.6	0.56	48.4	6.65	68.8	56.74	43.7		
	V13/1 E2 v. 29.03	46.0	5.13	66.3	6.34	54.0	2.25	7.1	1.44	16.4	0.70	51.6	3.53	31.2	85.74	56.3		
		100.0	3.56	100.0	5.40	100.0	14.63	100.0	4.04	100.0	0.62	100.0	5.21	100.0	70.09	100.0		
	V13/2 E1 v. 29.03	54.0	2.80	40.1	4.76	46.9	21.41	91.7	8.08	86.9	0.98	57.8	5.34	62.1	59.43	45.0		
	V13/2 E2 v. 29.03	46.0	4.91	59.9	6.33	53.1	2.28	8.3	1.43	13.1	0.84	42.2	3.83	37.9	85.29	55.0		
		100.0	3.77	100.0	5.48	100.0	12.61	100.0	5.02	100.0	0.92	100.0	4.65	100.0	71.32	100.0		
14	V14/1 E1 v. 29.03	47.1	4.67	45.7	6.02	45.1	6.13	61.3	6.46	59.0	0.84	47.1	4.13	68.2	76.42	44.9		
	V14/1 E2 v. 29.03	52.9	4.95	54.3	6.51	54.9	3.44	38.7	4.00	41.0	0.84	52.9	1.71	31.8	83.50	55.1		
		100.0	4.82	100.0	6.28	100.0	4.71	100.0	5.16	100.0	0.84	100.0	2.85	100.0	80.17	100.0		
	V14/2 E1 v. 29.03	49.1	4.50	47.0	6.18	48.2	5.44	66.1	3.69	72.1	0.70	44.6	5.34	58.7	78.65	47.2		
	V14/2 E2 v. 29.03	50.9	4.92	53.0	6.41	51.8	2.69	33.9	1.38	27.9	0.84	55.4	3.63	41.3	85.05	52.8		
		100.0	4.71	100.0	6.30	100.0	4.04	100.0	2.52	100.0	0.77	100.0	4.47	100.0	81.91	100.0		
15	V15/1 E1 v. 29.03	51.0	4.48	47.4	6.07	49.5	5.47	69.4	7.49	84.3	0.56	45.4	2.42	40.3	77.99	48.8		
	V15/1 E2 v. 29.03	49.0	5.17	52.6	6.44	50.5	2.51	30.6	1.45	15.7	0.70	54.6	3.73	59.7	85.17	51.2		
		100.0	4.81	100.0	6.25	100.0	4.02	100.0	4.53	100.0	0.63	100.0	3.06	100.0	81.51	100.0		
	V15/2 E1 v. 29.03	47.3	5.02	45.8	5.92	45.8	5.37	66.0	2.94	71.6	0.42	40.3	6.15	57.8	79.20	45.4		
	V15/2 E2 v. 29.03	52.7	5.33	54.2	6.30	54.2	2.49	34.0	1.05	28.4	0.56	59.7	4.03	42.2	85.57	54.6		
		100.0	5.18	100.0	6.12	100.0	3.85	100.0	1.94	100.0	0.49	100.0	5.03	100.0	82.55	100.0		
16	V16/1 E1 v. 29.03	49.1	1.98	26.2	4.98	44.2	22.67	83.0	7.32	83.7	0.56	49.1	6.25	54.5	58.22	40.5		
	V16/1 E2 v. 29.03	50.9	5.38	73.8	6.06	55.8	4.48	17.0	1.37	16.3	0.56	50.9	5.04	45.5	82.49	59.5		
		100.0	3.71	100.0	5.53	100.0	13.41	100.0	4.29	100.0	0.56	100.0	5.63	100.0	70.57	100.0		
	V16/2 E1 v. 29.03	48.7	2.34	28.4	5.20	44.1	15.76	84.9	8.39	86.0	0.56	55.9	6.25	54.1	63.84	41.9		
	V16/2 E2 v. 29.03	51.3	5.61	71.6	6.28	55.9	2.67	15.1	1.30	14.0	0.42	44.1	5.04	45.9	84.29	58.1		
		100.0	4.02	100.0	5.75	100.0	9.05	100.0	4.76	100.0	0.49	100.0	5.63	100.0	74.32	100.0		

Tabelle 56: Bilanz zur Ermittlung der Maschinenparameter von Gulsenit (Versuch 9-16)

Inhaltsausbringen Konzentrat							Inhaltsausbringen Berge					
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität			angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
Faktor	A	B	C	D	E		Faktor	A	B	C	D	E
-1	84.77	84.28	84.66	84.77	84.81	SiO ₂	-1	73.72	73.38	77.96	73.31	70.52
1	84.15	84.64	84.26	84.15	84.11		1	73.05	73.39	68.81	73.46	76.25
MW	84.46	84.46	84.46	84.46	84.46		MW	73.38	73.38	73.38	73.38	73.38
Delta. -1/1	-0.62	0.35	-0.40	-0.63	-0.70		Delta. -1/1	-0.67	0.00	-9.15	0.15	5.73
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität			angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
Faktor	A	B	C	D	E	MgO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	4.14	4.34	4.12	4.24	3.94		-1	5.44	5.15	5.49	5.69	5.27
1	4.26	4.06	4.28	4.16	4.45		1	5.74	6.03	5.69	5.49	5.91
MW	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20		MW	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59
Delta. -1/1	0.12	-0.28	0.16	-0.08	0.51		Delta. -1/1	0.31	0.88	0.19	-0.19	0.64
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität			angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
Faktor	A	B	C	D	E	CaO	Faktor	A	B	C	D	E
-1	0.60	0.63	0.59	0.57	0.63		-1	0.58	0.61	0.60	0.60	0.65
1	0.58	0.54	0.59	0.60	0.54		1	0.63	0.60	0.61	0.61	0.56
MW	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59		MW	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Delta. -1/1	-0.02	-0.09	0.00	0.03	-0.09		Delta. -1/1	0.05	-0.02	0.02	0.02	-0.09
	angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität			angelegte Spannung	Bandgeschwindigkeit	Aufgaberate	Elektrodenabstand	Polarität
Faktor	A	B	C	D	E	R2O ₃	Faktor	A	B	C	D	E
-1	1.24	1.38	1.34	1.12	1.42		-1	4.93	7.00	4.67	6.27	5.29
1	1.39	1.24	1.28	1.51	1.20		1	6.69	4.62	6.95	5.35	6.33
MW	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31		MW	5.81	5.81	5.81	5.81	5.81
Delta. -1/1	0.15	-0.14	-0.06	0.39	-0.22		Delta. -1/1	1.75	-2.39	2.28	-0.91	1.03

Tabelle 57: Auswertung der Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Maschinenparameter von Gulsenit

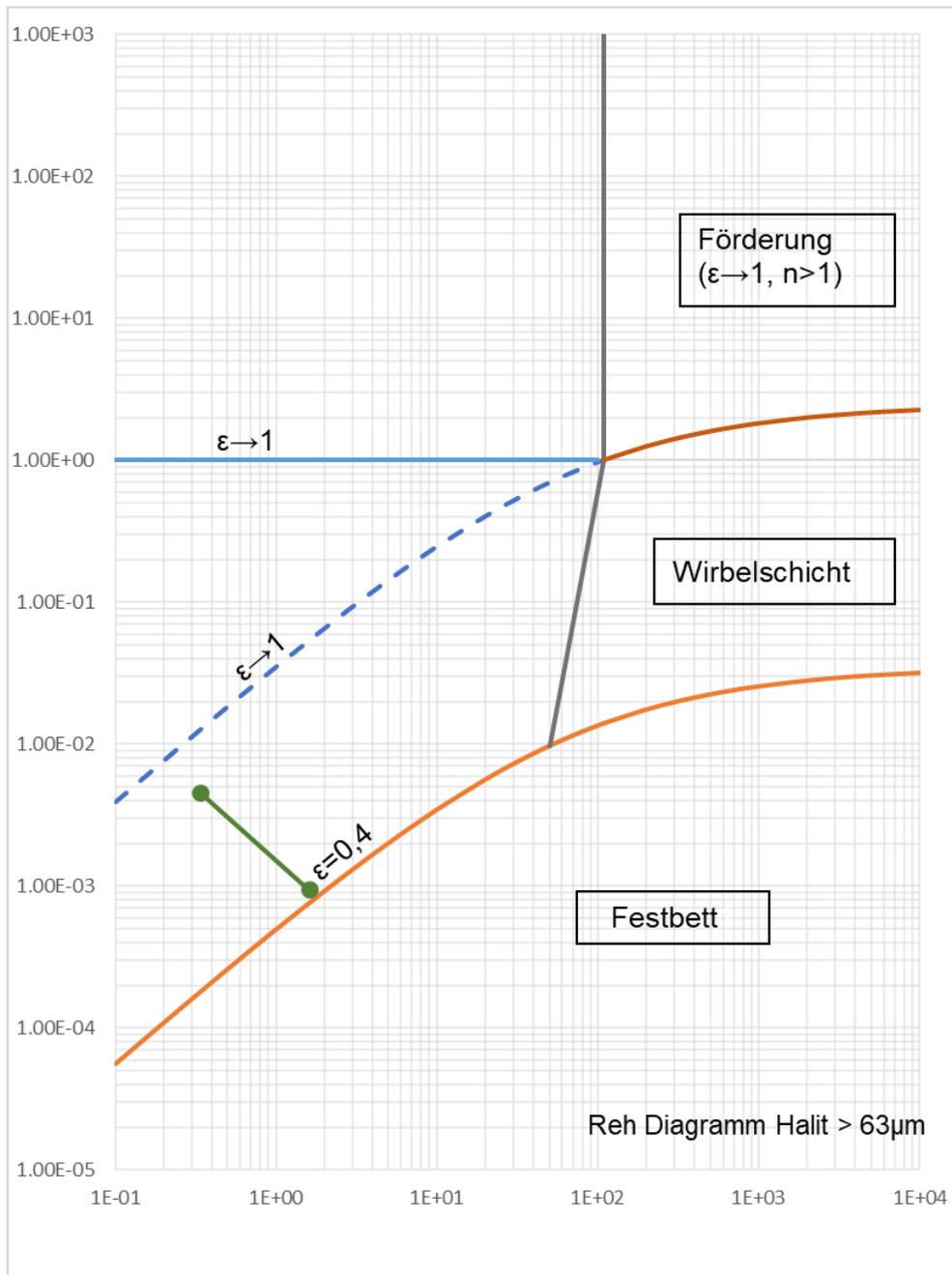


Abbildung 56: Zustandsdiagramm nach Reh für Halit

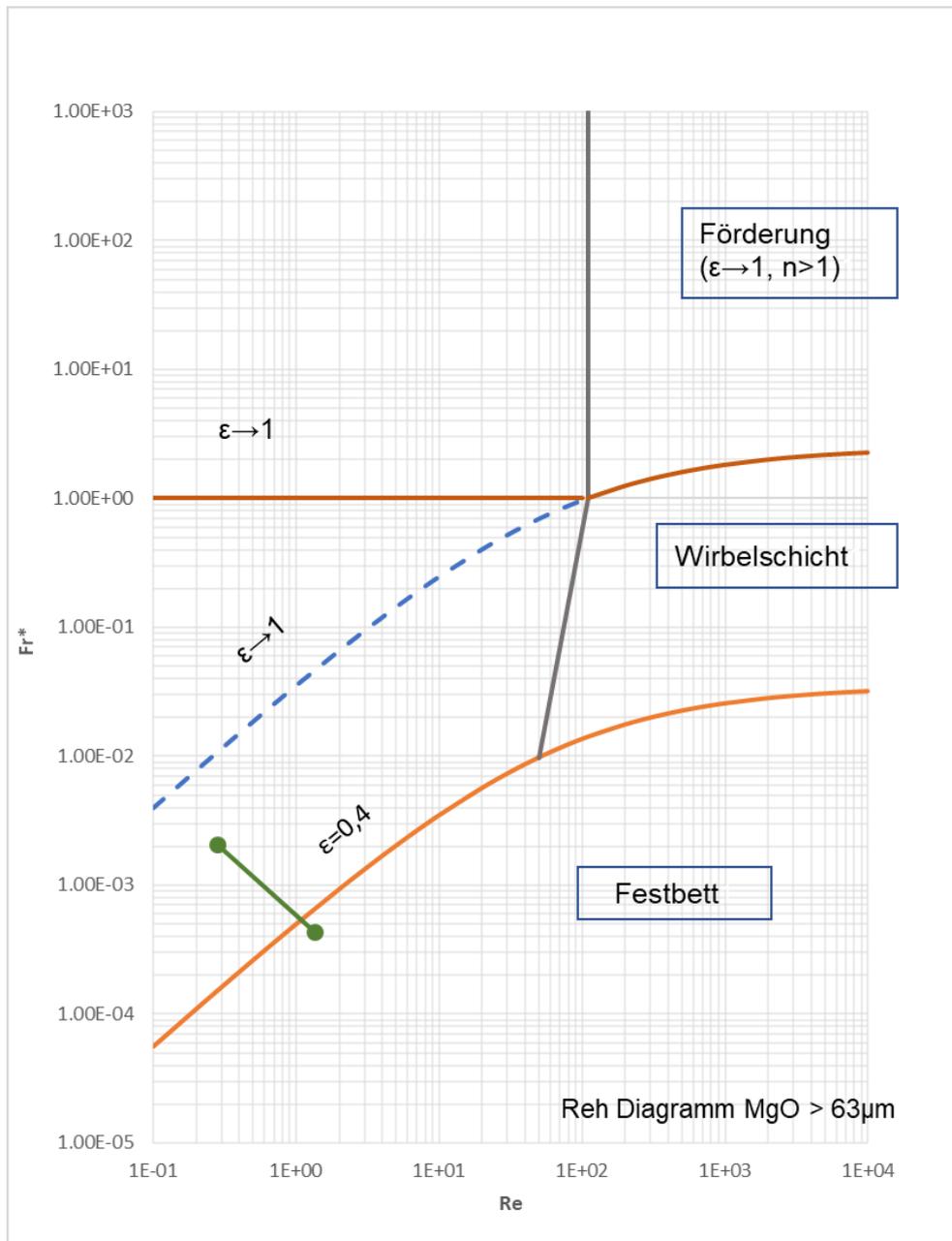


Abbildung 57: Zustandsdiagramm nach Reh für MgO

ANALYSEVORSCHRIFTEN & ARBEITSANWEISUNGEN

BESTIMMUNG DES GLÜHVERLUSTES

Anwendungsbereich

Das Verfahren dient der Bestimmung der Gewichtsänderung (Massenänderung) beim Glühen in Luft bei einer Temperatur von 1050°C. (siehe ISO 26845) Bei Bestimmung des Aschegehaltes (siehe DIN 51903)

Grundlagen des Verfahrens

Eine pulverförmige Probe wird in einen Platin- bzw. (bei speziellen Proben) Porzellantiegel eingewogen (2-5 g der Probe bez. ISO 26845) und in einen Muffelofen (1050°C) gestellt. Die Dauer der Glühung hängt vom jeweiligen Material ab. Nach Beendigung der Glühung wird der Tiegel (nachdem er in einem Exsikkator (Silicagel) auf Zimmertemperatur abgekühlt ist) abgewogen. Die prozentuelle Glühänderung kann berechnet werden (siehe ISO 26845)

Geräte und Zubehör

- a) Analysenwaage
- b) Tiegel oder Schiffchen aus geeigneten Material
- c) Elektrisch beheizter Ofen (min. 1050°C)
- d) Exsikkator mit Trocknungsmittel

Durchführung

Die pulverförmige Probe wird in einen zuvor gewogenen Platin- bzw. (bei speziellen Proben) Porzellantiegel eingewogen (2-5 g der Probe siehe ISO 26845).

1. Gewicht Tiegel leer

2. Gewicht Tiegel + Probe

Nach der Einwaage kommt der Tiegel in den Muffelofen (1050 °C). Die Glühung erfolgt bis zur Gewichtskostanz. (Bei 2 g Probe werden im Schnitt 2 Std. Glühzeit in Anspruch genommen.) Proben mit metallischen oder sonstigen schwer oxidierbaren Anteilen benötigen wesentlich länger (4 6 Std. Glühzeit). Wenn die Glühzeit vorüber ist, wird die Probe mit einer Laborzange (hitzebeständig) aus dem Muffelofen genommen und in einen Exsikkator gestellt. Wenn die Probe auf Raumtemperatur abgekühlt ist wiegt man abermals den Tiegel. Nun hat man das Gewicht des Tiegels und der Probe nach dem Glühen. Daraus kann man die Glühänderung nach ISO 26845 berechnen.

ISO 26845, DIN 51903 (für Aschegehalt)

BESTIMMUNG DER SPEZIFISCHEN OBERFLÄCHE NACH DEM BET- VERFAHREN

Diese Anweisung gilt für die Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach dem BET Verfahren (Brunauer, Emmet und Teller) an Pulver.

Verwendete Einrichtungen und Geräte zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche

- a) (FlowSorb III 2305 Single Point Surface Area)
- b) Waage (01-FU1-010)
- c) Gasflasche mit Gemisch aus Stickstoff und Helium
- d) Dewargefäße für flüssigen Stickstoff
- e) 2 Stickstoffbehälter

Durchführung

Einbau der Probe

Das leere und gesäuberte Probenrohr + Wägehilfe wird gewogen. (Leergewicht wird dokumentiert). Pulver wird eingefüllt und erneut gewogen (Rohre müssen pulverfrei sein) (Gewicht + Probe wird dokumentiert = Nassgewicht) Probenrohre werden bis zum Einbau mit Gummistopfen verschlossen (Vermeidung von Verunreinigung) Nach Kalibrierung des Gerätes wird der Probenträger + Probe in die Degas Position gesteckt. Die Probe wird nun getrocknet (wenn nicht anders gewünscht 300 °C/1h) Probe + Probenträger + Wägehilfe werden nach Trocknung erneut gewogen (= Trockengewicht) Versuchsdurchführung Das Gerät wird gemäß Manual gestartet und die Messung durchgeführt. Der Wert wird dokumentiert. (Surface Area [m²])

Versuchsauswertung

Die Auswertung erfolgt mittels Berechnung: Trockengewicht – Leergewicht = Probengewicht
Surface Area : Einwaage = spezifische Oberfläche [m²/g]

ZITRONENSÄUREZAHL

Reagenzien:

Zitronensäure (C₆H₈O₇), wasserfrei (damit wird eine Lösung der Konzentration 28 g/L hergestellt) H₂O deionisiert

Geräte:

Methrom Titrando 905 (oder handelsübliche mobile pH-Elektrode)

pH-Elektrode, METHROM 6.0262.100 pH 0-13

Prinzip:

Bestimmung des zeitlichen pH-Wert Verlaufs bei der Reaktion von analysefeinem Rohstoffpulver mit der hergestellten Zitronensäure-Lösung.

Durchführung:

Die Messung des pH Werts erfolgt mit einem Puffer vorab kalibrierten pH Meter. Für die Bestimmung der ZSZ benötigt man 2 g analysefeines Pulver der zu analysierenden Rohstoffprobe. Zu Beginn werden 100 ml der wässrigen Zitronensäurelösung (28 g/l) in einem Becherglas vorgelegt. Die Rohstoffprobe wird in die mittels Magnetrührer gerührte Zitronensäurelösung gegeben. Der pH Wert wird ab dem Zeitpunkt der Pulver Zugabe 300 s lang aufgezeichnet und anschließend graphisch dargestellt.

Ergebnis:

Graphische Darstellung von Zeit in s (x Achse) zu pH Wert (y Achse). Ablesen der Reaktionszeit. Durch das Vergleichen der graphischen Darstellung mit vorgegeben Richtwerten wird die Charakterisierung der zu analysierenden Substanz in sehr reaktiv, reaktiv oder inert ermöglicht.

Reaktive Rohstoffe erreichen einen pH-Wert von 3 in 3,8 bis 5,2 min., sehr reaktive Rohstoffsorten erreichen den pH-Wert von 3 bereits nach 1,3 bis 2,3 min. Bei inerten Rohstoffen dauert es ca. 19,4 min. bis ein pH-Wert von 3 erreicht wird. (67)

BESTIMMUNG DER SCHÜTTDICHTE

Diese Anweisung gilt für die Bestimmung der Schüttdichte (Litergewicht) an mehligem und körnigen Materialien von 0 bis max. 6 mm Korngröße.

Verwendete Einrichtungen (Messprinzip)

Einlaufgerät Bauart Böhme, Waage, Trockenschrank, Abstreichlineal

Durchführung

Feuchte Proben sind im Trockenschrank bei 120 °C 2 Stunden lang zu trocknen. Mehle, die Zusammenballungen oder Klumpen enthalten, sind auf ein Sieb mit 1 mm Maschenweite zu geben und die Klumpen und Zusammenballungen so weit als möglich durch das Sieb zu drücken. Überprüfung des Leergewichtes "G_L" des Litergefäßes bzw. tarieren dieses auf der Waage.

Zusammenbau und Befüllung des Einlaufgerätes

Zusammenbau und Befüllung des Einlaufgerätes, Verschlusskappe (3) schließen, Füllaufsatz mit Zwischenstück (2) (4) auf das Litergefäß setzen, das Prüfgut mit der Handschaufel möglichst gleichmäßig in den Füllaufsatz schütten.

Es ist so viel vom Prüfgut aufzugeben, dass dieses in seinem natürlichen Böschungswinkel über den Rand abfällt. Mit dem Drücken des Verschlusshebels (5) öffnet sich die Verschlusskappe (3) und das Prüfgut fällt in das Litergefäß (1). Nach einer Wartezeit von 2 min ist der Füllaufsatz mit Mittelteil (2) (4) erschütterungsfrei abzuheben. Mit dem Abstreichlineal ist der überstehende Prüfgutteil vom Litergefäß abzustreichen und mit einem Pinsel den Rand vom Litergefäß zu reinigen.

Bestimmung des Schüttdichtes durch Abwaage des Litergefäßes

Die Bestimmung der Schüttdichte (Litergewicht) ist dreimal, jeweils mit neuem Prüfgut durchzuführen bei Schüttdichten unter 1000 g/l z.B. Mehlen dürfen die gefundenen Prüfwerte nicht mehr als 10 g voneinander abweichen. Bei Schüttdichten über 1000 g/l z.B. Eisenpulver darf die Abweichung nicht mehr als 1 % der ermittelten Schüttdichte betragen.

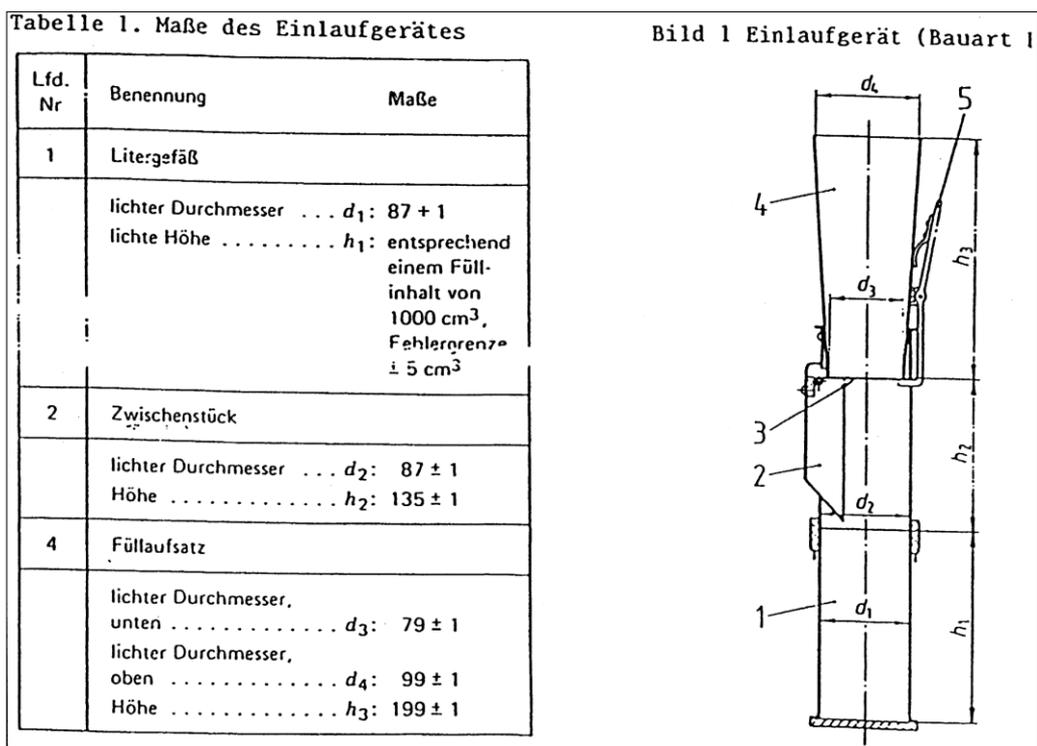


Abbildung 58: Einlaufgerät der Bauart Böhme

GULSENITAUFBEREITUNG

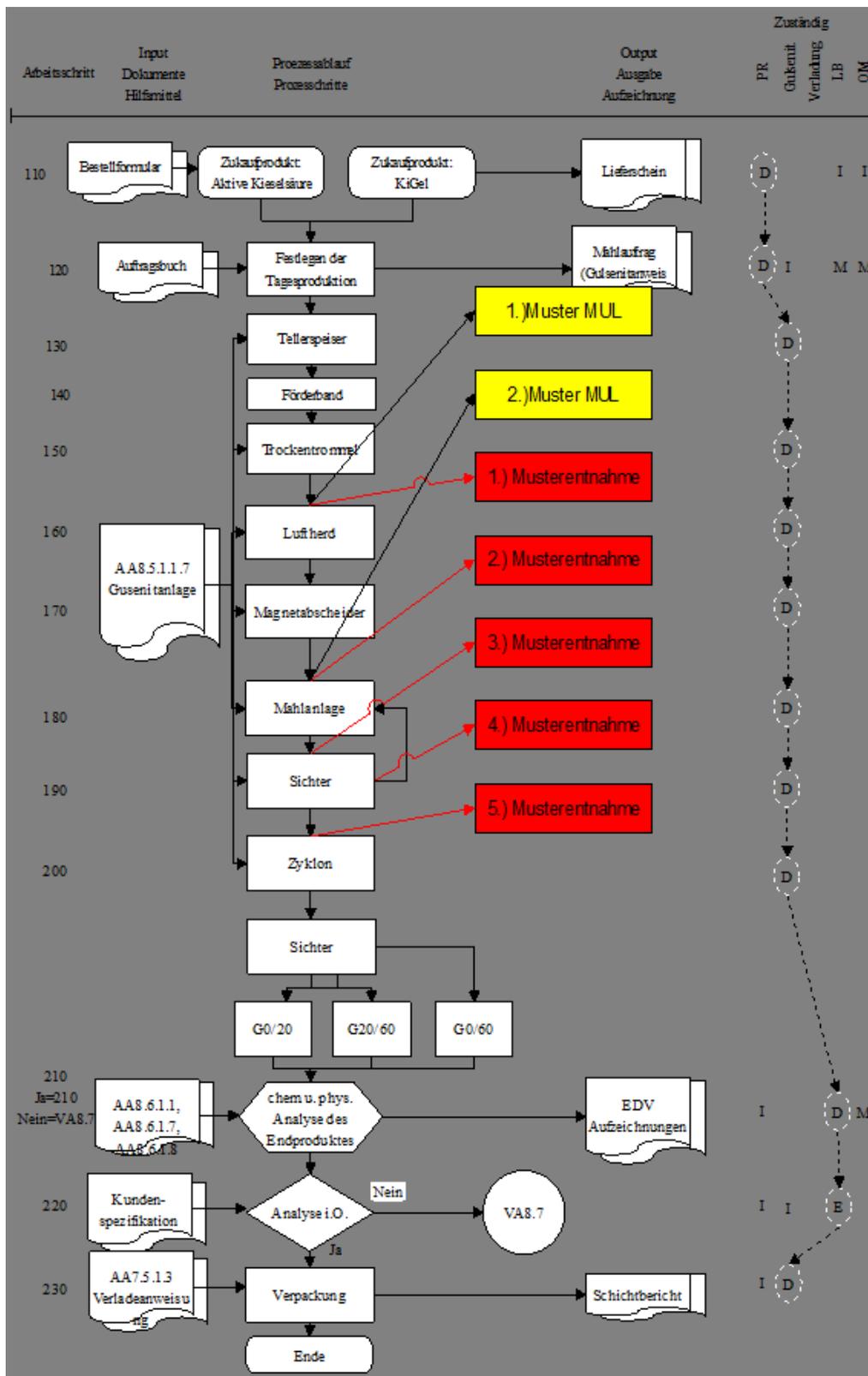


Abbildung 59: Fließbild zur Gulsenitaufbereitung

BESTIMMUNG DES ANTEILS AN LÖSLICHEN BESTANDTEILEN

Für eine einheitliche Analyse der löslichen Bestandteile wurde folgende Versuchsdurchführung definiert:

- Auflösen löslicher Anteile in destilliertem Wasser, und zwar exakt im Masseverhältnis ein Teil Probe, fünf Teile Wasser
- Rühren mittels Magnetrührer für 10 min
- Abfiltrieren mittel Nutsche (Filterporengröße 2-3 μm)
- Trocknen des Filtrückstandes im Trockenschrank bei 65 °C
- Wiegen des getrockneten Rückstands mit Filter

Die Filter wurden im Trockenschrank vorbereitend getrocknet und hernach die Trockenmasse ermittelt.

Die Bestimmung des Anteils an löslichen Bestandteilen erfolgte mittels folgender Beziehung:

$$g_{\text{lös}} = \left(1 - \frac{m_{\text{Rückstand}}}{m_{\text{Probe}}}\right) * 100$$

KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN & 3D DARSTELLUNGEN



Abbildung 60: 3D Modell der triboelektrostatischen Aufladeeinheit

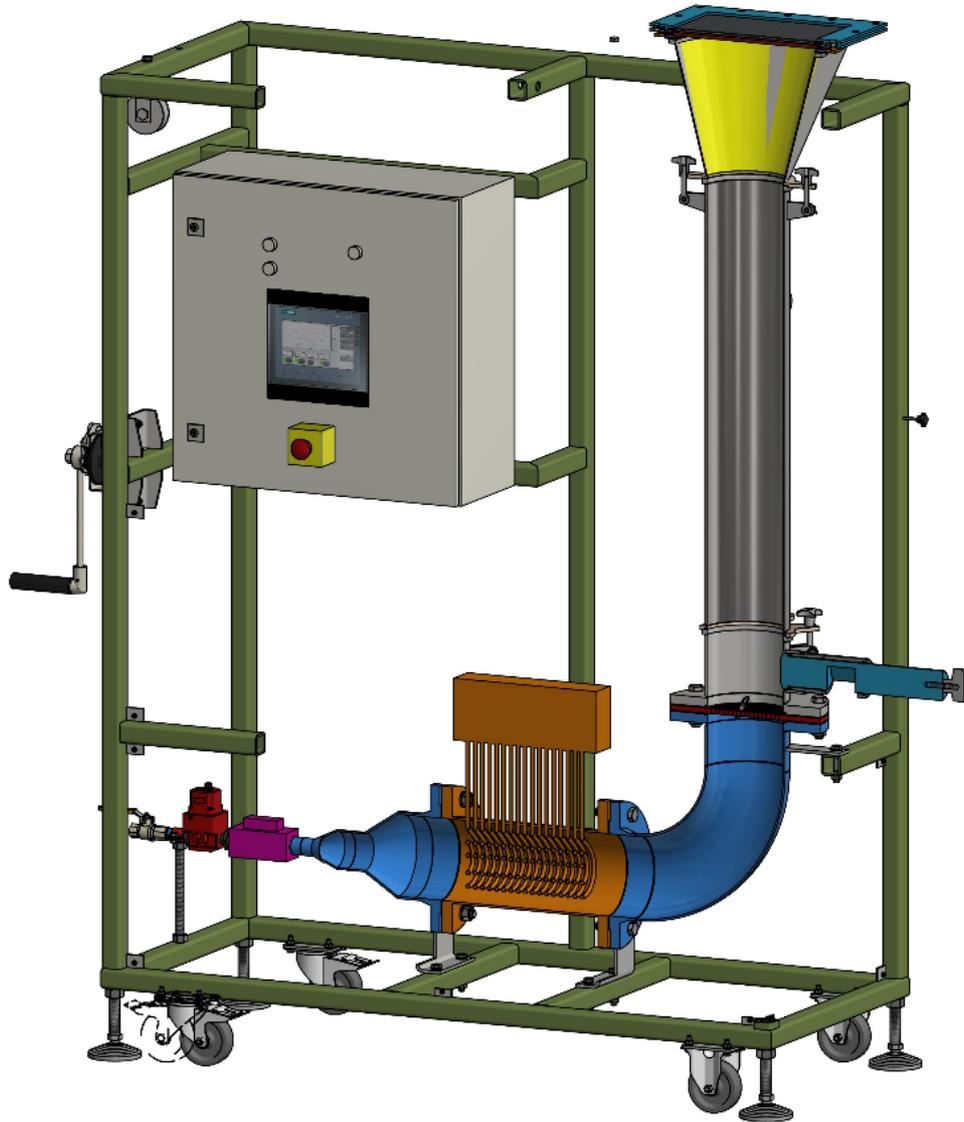


Abbildung 61: Schnittdarstellung des 3D Modells der triboelektrostatischen Aufladeinheit

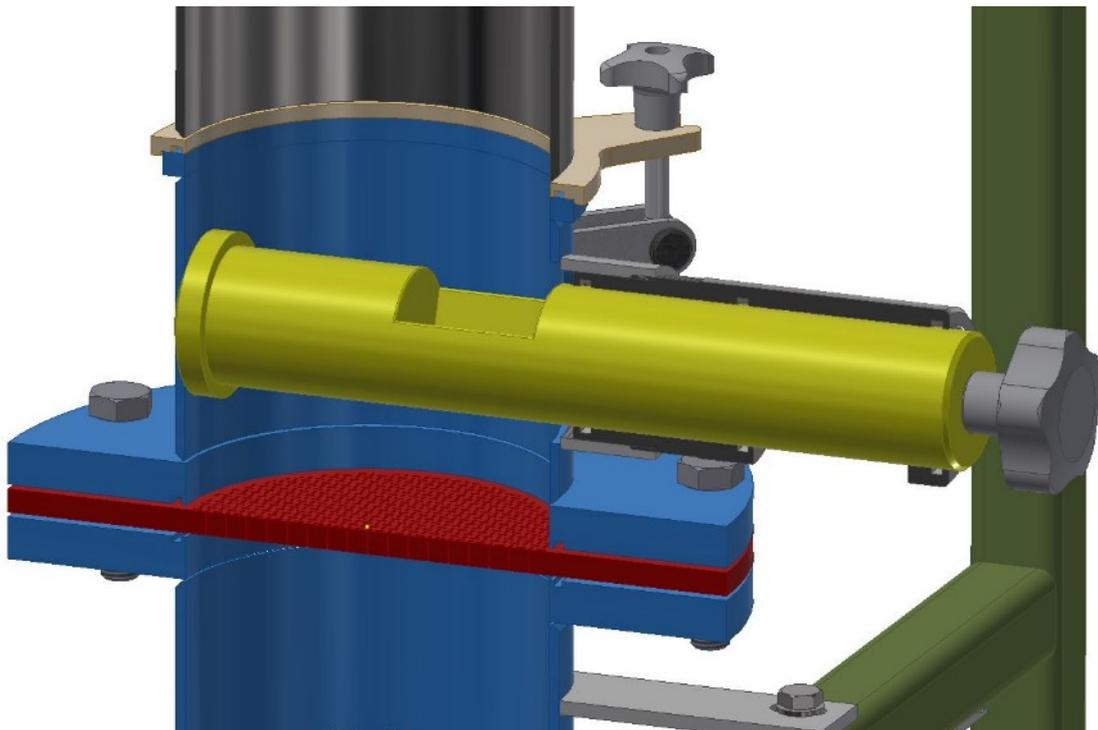


Abbildung 62: 3D Detailansicht der Probenahmeverrichtung

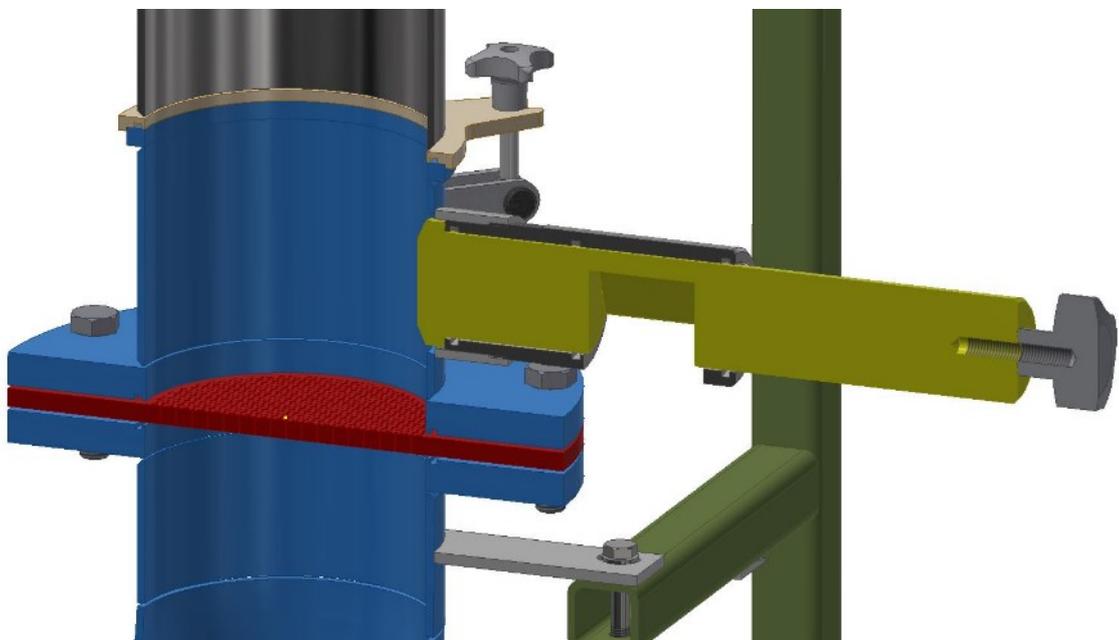


Abbildung 63: Schnittdarstellung der 3D Detailansicht der Probenahmeverrichtung

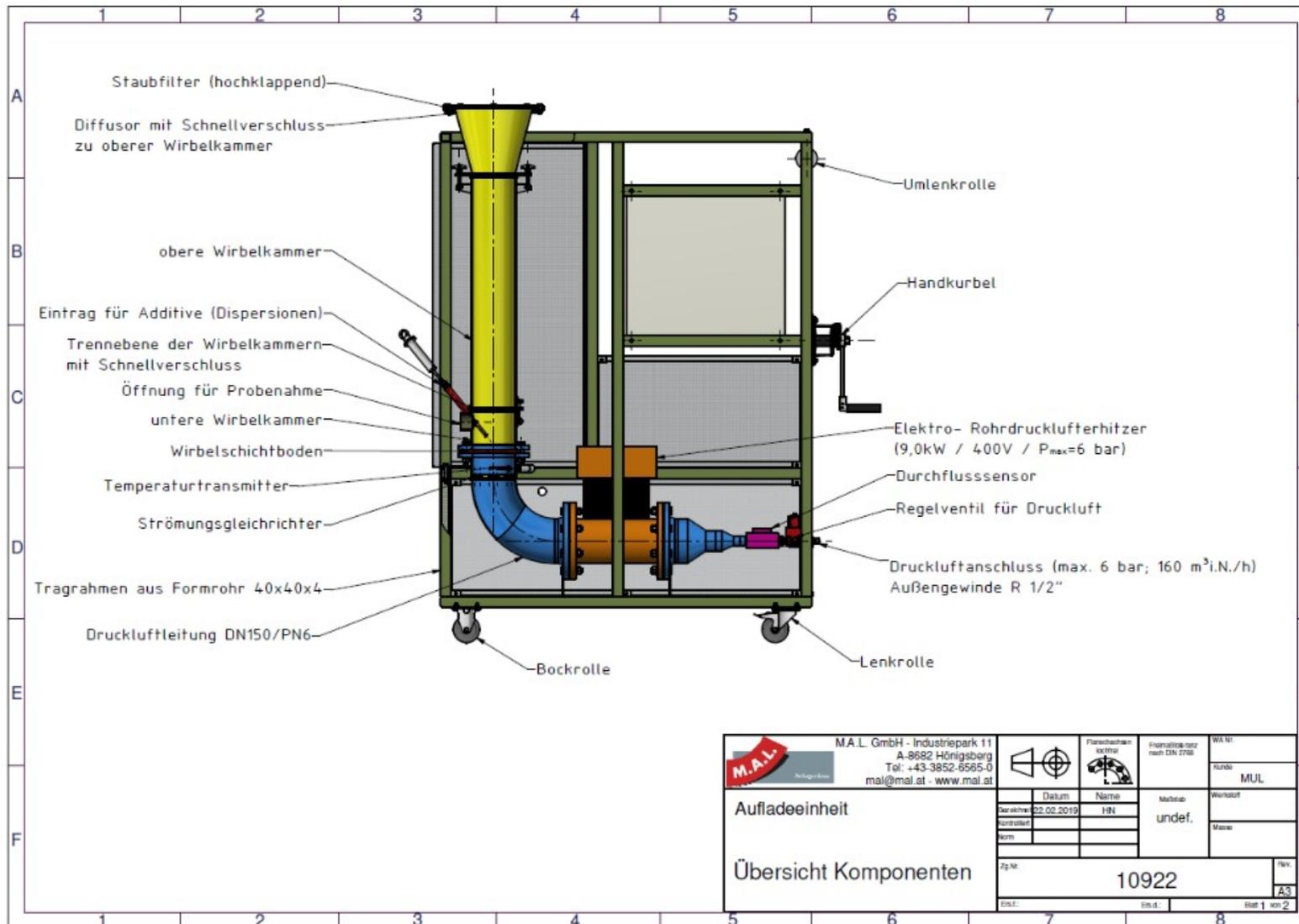


Abbildung 64: Komponentenübersicht der triboelektrostatischen Aufladeinheit

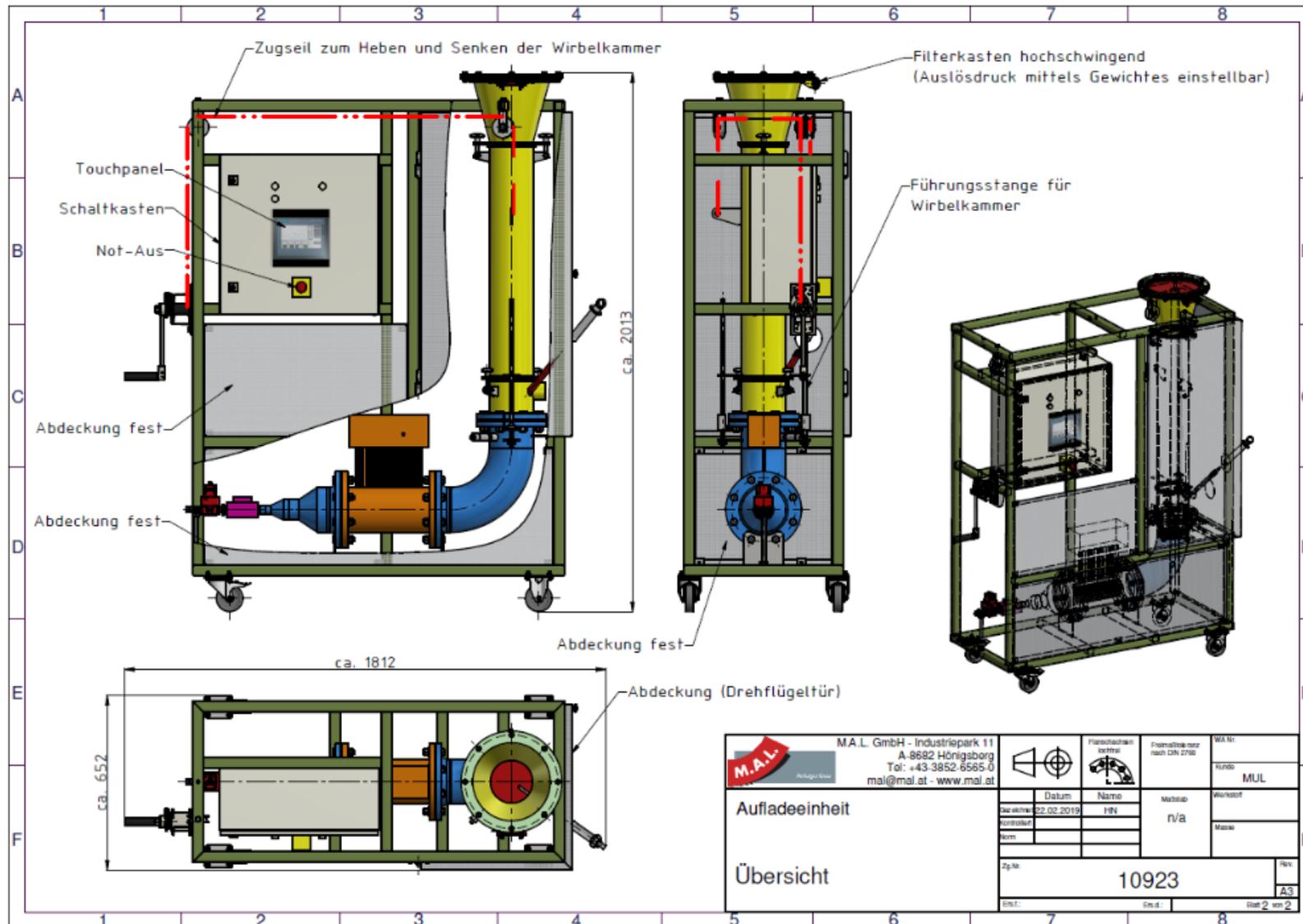


Abbildung 65: Übersichtsdarstellung der triboelektrostatischen Aufladeinheit

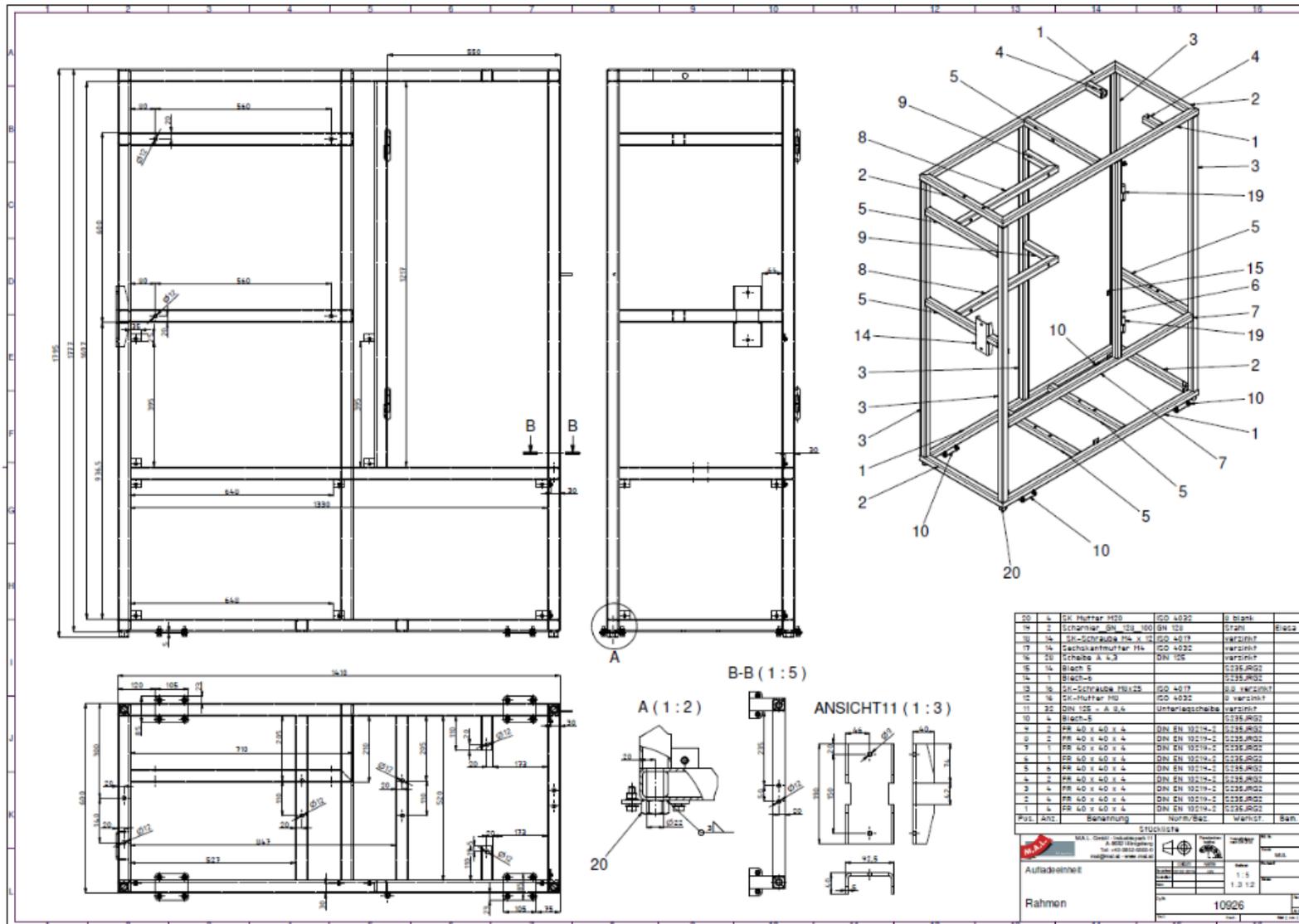


Abbildung 66: Rahmen der triboelektrostatischen Aufladeinheit

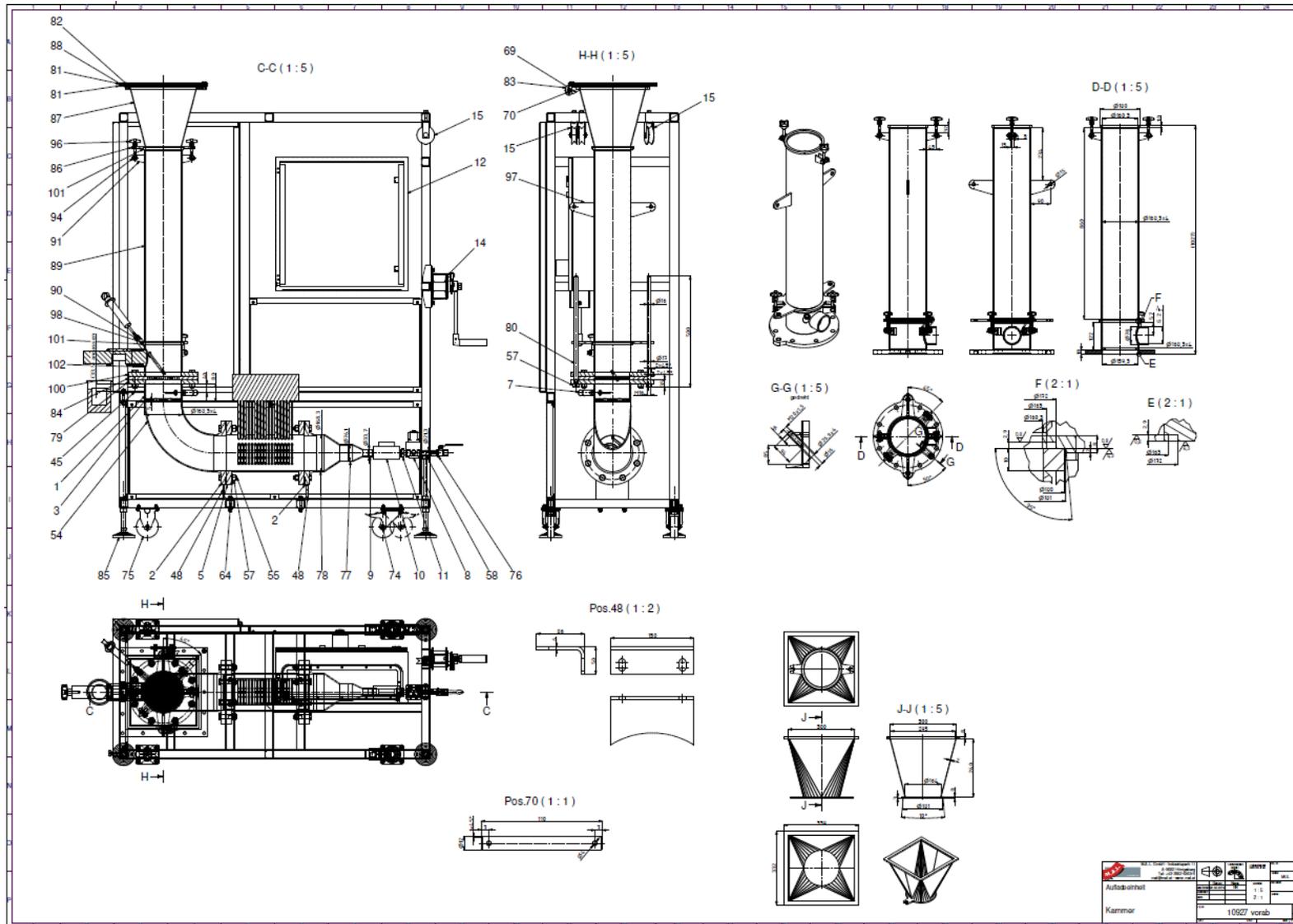


Abbildung 67: Wirbelkammer der triboelektrostatischen Aufladeinheit

