

Nutzung der Elektroscheidung zur trockenen Aufbereitung von fein- und feinstdispersen Körnerschwärmen

DISSERTATION

zum Erwerb des akademischen Grades eines
Doktors der montanistischen Wissenschaften



eingereicht am
Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung
der Montanuniversität Leoben

von

Dipl.-Ing. Andreas Oberrauner

1. Begutachter: Univ.-Prof. Dr. Helmut Flachberger
2. Begutachter: o.Univ.-Prof. Dr. Helmut Weiß

Eidesstattliche Erklärung:

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

Leoben, den 20. Februar 2012

Dipl.-Ing. Andreas Oberrauner

Vorwort

Die Arbeiten an der vorliegenden Dissertation wurden von Oktober 2008 bis Februar 2012 größtenteils am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

Meinem wertgeschätzten Doktorvater Prof. Helmut Flachberger bin ich an dieser Stelle zu großem Dank verpflichtet. Er hat nicht nur die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit übernommen, sondern durch großen persönlichen Einsatz das gegenständliche Forschungsprojekt überhaupt erst ermöglicht.

Prof. Helmut Weiß danke ich ebenfalls für die Übernahme der wissenschaftlichen Begutachtung der Dissertation, für die konstruktive und effiziente Zusammenarbeit und die Möglichkeit des Gebrauchs der Infrastruktur am Institut für Elektrotechnik.

Der Belegschaft in Labor und Technikum am Lehrstuhl für Aufbereitung gebührt mein Dank für die ausgezeichnete Qualität der begleitenden Tätigkeiten.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für die wertvolle und selbstlose Unterstützung bedanken, welche ich stets durch sie erfahren darf.

Kurzfassung

Die trockene Aufbereitung von fein- und feinstdispersen Füllstoffprodukten stellt aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen an die Produkte große Herausforderungen an Hersteller bzw. Lieferanten. Der Trend zu stetig feineren, reineren und gleichmäßigeren Produkten bei zugleich fehlender bzw. nur allzu geringer Selektivität der beteiligten Mineralphasen hält ungebrochen an. Neben den energieintensiven Mahlprozessen ist es insbesondere die geforderte stoffliche Reinheit der Endprodukte durch Abtrennung färbender und schleißender mineralischer Anteile, die die Aufbereitung vor große Herausforderungen stellt. Während für gröbere Kornspektren eine Vielzahl an Sortierverfahren etabliert sind und mit großem Erfolg zum Einsatz gelangen, beschränkt sich dies für den Fein- und Feinstkornbereich im Wesentlichen auf das Verfahren der Flotation. Nun gibt es neben der Flotation ein zweites grenzflächengesteuertes Sortierverfahren, nämlich die Elektroscheidung, die sich in der Füllstoffaufbereitung jedoch noch nicht etabliert hat, weil der Dispersitätsbereich $<100\ \mu\text{m}$ von den gängigen Scheidertypen – dem Walzen- und dem Kammerscheider – nicht verarbeitet werden kann.

Die im Rahmen der vorliegenden Dissertationsarbeit vorwiegend experimentell durchgeführten Untersuchungen hatten nun zum Ziel, den Einsatz der Elektroscheidung in diesen für die Füllstoffindustrie so wichtigen Bereich $<100\ \mu\text{m}$ auszuweiten sowie deren Möglichkeiten und Grenzen abzuschätzen.

Als Referenzrohstoff wurde Marmor gewählt, da in Marmorlagerstätten oftmals Begleitminerale auftreten, die sich qualitätsmindernd auf die Anwendungen auswirken, sehr ähnliche Eigenschaften zum Wertmineral (etwa hinsichtlich der Merkmale „Dichte“ und „Magnetisierbarkeit“) aufweisen und daher nur sehr schwierig und aufwändig abgetrennt werden können, vom Einsatz der Flotation abgesehen.

In einem dreijährigen, im Wesentlichen am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben durchgeführten Forschungsprojekt mit einem industriellen Partner der Füllstoffindustrie wurden systematische Basisuntersuchungen und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die zum Ziel hatten, das triboelektrische Aufladeverhalten von Mineralphasen messtechnisch einwandfrei und reproduzierbar zu erfassen.

Hierzu wurde eine triboelektrische Aufladeeinheit entwickelt, mit der es möglich wurde, Reinmineralproben unter kontrollierten atmosphärischen Bedingungen – d.h. in einer begehbaren Klimakammer – triboelektrisch aufzuladen und die entstandene spezifische Kontaktladung zu bestimmen. Die Ergebnisse aus diesen Messungen zeigten, dass für die Abreicherung von unerwünschten Begleitmineralen von Marmor vor allem die relative Luftfeuchte der Umgebung maßgeblich ist. So nimmt etwa mit höher werdender Luftfeuchte die Ladungsdifferenz und damit die Selektivität zwischen Marmor und dessen Begleitmineralen stetig ab. Gute Ergebnisse wurden bei relativen Luftfeuchten von 30-40% und einer Temperatur von ca. $30\ \text{°C}$ erreicht.

Des Weiteren konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden, dass ein angelegtes elektrisches Feld das triboelektrische Aufladeverhalten weitreichend beeinflusst, und zwar werden in der triboelektrischen Aufladeeinheit die entstehenden Ladungen in Richtung der Polarität des Feldes verstärkt, wobei etwa die Beeinflussbarkeit der Aufladung durch ein angelegtes elektrisches Potential bei hydrophilen Begleitmineralen mit steigender relativer Luftfeuchte zunimmt.

Die Untersuchungen wurden mit umfangreichen Tests an chemisch konditionierten Proben abgerundet, die bestätigten, dass der Einsatz von Reagenzien das Aufladeverhalten stark beeinflusst.

Parallel zu den vorgenannten Untersuchungen wurde ein Labor-Elektroscheider konzipiert, entwickelt und gebaut, der nunmehr in Kombination mit der triboelektrischen Aufladeeinheit die Sortierung von feinstdispersen Mehrmineralgemengen im Labormaßstab ermöglichen soll. Erste, vielversprechende Ergebnisse der Untersuchungen mit diesem neuartigen – wegen seiner Bauform auch als Koaxscheider bezeichneten – Elektroscheider werden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt.

Abstract

Due to high demands on the quality of the products, dry beneficiation of fine and finest fillers presents great challenges to both producers and suppliers. The trend continues unabated towards steadily finer, cleaner and more homogeneous products while at the same time there is little or no selectivity of the mineral phases involved. Besides the energy-intensive grinding processes, the greatest challenge is the purity demanded in the final product which is achieved by separation of colouring and abrading mineral parts. While there are several sorting methods which are well established for coarser grain fractions which are being applied with great success, sorting of fine and finest grain sizes is limited to the froth flotation process. But besides froth flotation there is a second interface-controlled separation process, namely electrostatic separation. This method has not yet become established in filler-processing due to the fact that grain sizes $<100\ \mu\text{m}$ cannot be handled by the current separator-types, i.e. the electrostatic roller- and the electrostatic free-fall separator.

Investigations of mainly experimental character for this doctoral thesis were aimed at expanding electrostatic separation for grain sizes $<100\ \mu\text{m}$ to this for filler-producing industry important and estimating the possibilities and borders of the process.

As a reference mineral marble was chosen because in marble deposits accessory minerals often occur which have an adverse effect on the applications' quality. At the same time they have very similar properties to the valuable mineral (e.g. regarding the properties "density" and "magnetic susceptibility") which makes separation difficult and complicated, except with froth flotation.

Systematic basic-research and development activities were done in a three-year research project mainly done at the Chair of Mineral Processing at the Montanuniversitaet Leoben together with a partner from the filler-producing industry. The goal of these activities was to measure the triboelectric charging-behaviour of mineral phases in an untainted and reproducible way.

For this a triboelectric charging unit was developed where it was possible to triboelectrically charge monomineralic samples under controlled atmospheric conditions, in a walk-in climate chamber, and to measure the resulting contact charge. Results from these measurements showed that to remove unwanted accessory-minerals from marble the relative humidity is important. When the relative humidity increases, the charging-difference and with that the selectivity between marble and its accessory-minerals, steadily diminishes. Good results were obtained at a relative humidity of 30-40% and a temperature of approximately 30 °C.

Furthermore it could be impressively proven that an applied electric field greatly influences the charging behaviour. The developing charges are enhanced in the direction of the electric field's polarity in the triboelectric charging unit while the controllability of the charge from an electric potential increases with increasing relative humidity for hydrophilic minerals.

The investigations were topped off with extensive research on chemically conditioned samples which confirmed that the use of reagents highly influences the charging behaviour.

Parallel to the investigations, a laboratory-electrostatic separator was designed, developed and built which, combined with the triboelectric charging unit, from now on should make possible the separation of finest minerals on a laboratory scale. First promising results of investigations with this novel electrostatic separator – due to its shape also called coax – are presented in the thesis.

Inhalt

Vorwort	III
Kurzfassung	IV
Abstract	VI
Inhalt	VIII
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung.....	5
2.1. Ausgangssituation	5
2.2. Arbeitsansatz.....	7
3. Zusammenfassung	8
4. Grundlagen der Elektroscheidung.....	13
4.1. Prinzipien	13
4.2. Physikalische Grundlagen	14
4.3. Ladungserzeugung	17
4.3.1. Kontaktpolarisation.....	20
4.3.1.1. Einfluss der Temperatur	21
4.3.1.2. Einfluss der relativen Luftfeuchte	23
4.3.2. Koronaaufladung	24
4.3.3. Triboelektrische Aufladung	29
4.4. Das Energiebändermodell	30
4.4.1. Triboelektrische Aufladung zweier Metalle	31
4.4.2. Triboelektrische Aufladung von Nicht- und Halbleitern.....	32
4.5. Apparatebeschreibung.....	37
4.5.1. Elektrostatische Walzenscheider	37
4.5.1.1. Zweipuls-Mittelpunktschaltung	39
4.5.1.2. Einsatz von Walzenscheidern.....	40
4.5.2. Kammerscheider	41
4.5.3. Sonderformen und Neuentwicklungen von Elektroscheidern	44
4.5.3.1. Sonderformen nach dem Aushebeprinzip	44
4.5.3.2. Bandscheider	45
5. Untersuchungsvorbereitungen und Erstversuche	48
5.1. Konstruktion einer triboelektrischen Aufladeeinheit.....	48
5.1.1. Rahmenbedingungen für die Konstruktion	48
5.1.2. Konstruktionsidee.....	48
5.1.3. Aufbau der triboelektrischen Aufladeeinheit	49

5.1.4.	Ladungsmessung mittels Faraday-Becher.....	53
5.1.4.1.	Überprüfung des Messaufbaus.....	54
5.2.	Erstversuche zur Überprüfung des Versuchsstandes	55
5.2.1.	Ergebnisse der ersten triboelektrischen Untersuchungen	56
5.2.1.1.	Triboelektrische Ladungs-Remanenz.....	56
5.2.1.2.	Einfluss der Rotordrehzahl	57
5.2.1.3.	Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes auf die Aufladung ..	58
5.2.1.4.	Einfluss der Luftfeuchte der Umgebung.....	59
5.2.1.5.	Einfluss der Prozesstemperatur.....	60
5.2.1.6.	Einfluss der Aufgaberate.....	61
5.2.1.7.	Erstuntersuchungen mit chemisch konditionierten Proben.....	62
5.2.1.8.	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Erstversuchen mit chemischen Reagenzien	63
6.	Versuche zur triboelektrischen Aufladung prozessrelevanter Reinmineralproben	66
6.1.	Probenbeschreibung.....	66
6.1.1.	Marmor.....	66
6.1.1.1.	Korngrößenverteilung.....	68
6.1.1.2.	Spezifische Oberfläche	69
6.1.2.	Quarz	69
6.1.2.1.	Korngrößenverteilung.....	69
6.1.2.2.	Spezifische Oberfläche	70
6.1.3.	Feldspat.....	70
6.1.3.1.	Korngrößenverteilung.....	71
6.1.3.2.	Spezifische Oberfläche	71
6.1.4.	Pyrit.....	71
6.1.4.1.	Korngrößenverteilung.....	72
6.1.4.2.	Spezifische Oberfläche	72
6.1.5.	Grafit.....	72
6.1.5.1.	Korngrößenverteilung.....	72
6.1.6.	Zusammenfassung der Probeneigenschaften	73
6.2.	Systematische Untersuchungen zur Charakterisierung des triboelektrischen Aufladeverhaltens	74
6.2.1.	Ziel der Versuche	74
6.2.2.	Vorgehensweise in der Untersuchung	74

6.2.3.	Versuchsparameter.....	74
6.2.3.1.	Klimatische Umgebungsbedingungen.....	74
6.2.3.2.	Apparateparameter.....	75
6.2.3.2.1.	Rotordrehzahl	75
6.2.3.2.2.	Aufgaberate/Aufgabemenge	75
6.2.3.2.3.	Kontaktwerkstoff	75
6.2.3.2.4.	Statorpotential	75
6.2.4.	Zusammenfassung der Prozessbedingungen – Test-Matrix.....	76
6.2.5.	Ablauf der Messungen	77
6.3.	Triboelektrische Aufladung von Marmor	78
6.3.1.	Messungen an unbehandelten Proben	78
6.3.1.1.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	78
6.3.1.2.	Einfluss der Temperatur	79
6.3.1.3.	Einfluss des angelegten Statorpotentials	80
6.3.2.	Konditionierung mit chemischen Reagenzien	83
6.3.2.1.	Ölsäure	84
6.3.2.2.	Benzoessäure	85
6.3.2.3.	Salicylsäure	86
6.3.2.4.	Kochsalz und Ätznatron	87
6.3.2.5.	Wirkung von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten.....	89
6.3.2.6.	Wirkung von Alkylalkohol auf die triboelektrische Aufladung	89
6.4.	Triboelektrische Aufladung von Quarz.....	91
6.4.1.	Messungen an unbehandelten Proben	91
6.4.1.1.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	91
6.4.1.2.	Einfluss der Temperatur	92
6.4.1.3.	Einfluss des angelegten Statorpotentials	92
6.4.2.	Konditionierung mit chemischen Reagenzien	95
6.4.2.1.	Ölsäure	95
6.4.2.2.	Benzoessäure	96
6.4.2.3.	Salicylsäure	96
6.4.2.4.	Kochsalz	97
6.4.2.5.	Ätznatron	97
6.4.2.6.	Wirkung von kationischen Tensiden auf die triboelektrische Aufladung	98

6.4.2.7.	Wirkung von Alkylalkohol auf die triboelektrische Aufladung	98
6.5.	Triboelektrische Aufladung von Feldspat	100
6.5.1.	Messungen an unbehandelten Proben	100
6.5.1.1.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	100
6.5.1.2.	Einfluss der Temperatur	101
6.5.1.3.	Einfluss des angelegten Statorpotentials	101
6.5.2.	Konditionierung mit chemischen Reagenzien	103
6.5.2.1.	Ölsäure	103
6.5.2.2.	Benzoe- und Salicylsäure.....	104
6.5.2.3.	Kochsalz	104
6.5.2.4.	Ätznatron	105
6.6.	Triboelektrische Aufladung von Pyrit.....	106
6.6.1.	Messungen an unbehandelten Proben	106
6.6.1.1.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	106
6.6.1.2.	Einfluss der Temperatur	107
6.6.1.3.	Einfluss des angelegten Statorpotentials	107
6.7.	Triboelektrische Aufladeversuche mit Grafit.....	109
7.	Auswertung der Versuchsergebnisse	111
7.1.	Methodik der Versuchsauswertung	111
7.2.	Ergebnisse mit Reinmineralproben	111
7.2.1.	Einfluss der relativen Luftfeuchte	111
7.2.2.	Einfluss durch Anlegen eines Statorpotentials	113
7.3.	Ergebnisse mit konditionierten Proben	115
7.3.1.	Einfluss von Ölsäure	115
7.3.2.	Einfluss von Benzoesäure	117
7.3.3.	Salicylsäure	117
7.3.4.	Kochsalz	118
7.3.5.	Ätznatron	119
7.3.6.	Kationische Tenside	119
7.3.7.	Alkylalkohol	120
7.4.	Zusammenfassung der Ladungsmessungen	121
7.5.	Erkenntnisse aus der Auswertung der Versuche	122
8.	Elektroscheider für die Feinstkornsartierung	123
8.1.	Einführung	123
8.2.	Konzept des Feinstkornscheiders	130

8.3.	Konstruktion	131
8.3.1.	Rohrscheider.....	131
8.3.2.	Luftanlage	133
8.3.3.	Luftstromsimulation	134
8.3.4.	Hochspannungsversorgung	135
8.3.4.1.	Funktionsweise der Hochspannungsgeneratoren.....	136
8.4.	Betrieb des Feinstkornscheiders.....	138
8.4.1.	Sortiersversuche mit feinstkörnigen Marmorproben.....	140
8.4.1.1.	Probenbeschreibung.....	140
8.4.1.2.	Luftabhängige Massenverteilung des Aufgabegutes	141
8.4.2.	Systematische Parameterstudie.....	142
8.4.2.1.	Abhängigkeit der Sortierung von der Aufgabetemperatur	142
8.4.2.2.	Abhängigkeit der Sortierung von der angelegten Elektrodenspannung	144
8.4.2.3.	Selektivität der Sortierung	146
8.4.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ersten Sortiersversuchen am Feinstkornscheider.....	147
	Abbildungsverzeichnis	148
	Tabellenverzeichnis.....	155
	Verwendetes Schrifttum	156

1. Einleitung

Die Elektroscheidung ist ein trockenes Verfahren zur stofflichen Sortierung von Körnern nach Unterschieden in ihren elektrischen Eigenschaften.

Mit diesem Verfahren können eine Vielzahl an sich stellenden Sortieraufgaben durch gezielte Einflussnahme auf die Prozessbedingungen und das Aufgabegut bei geringem spezifischem Energieverbrauch und hoher Umweltverträglichkeit gelöst werden.

Die Elektroscheidung nützt Unterschiede in den Oberflächen-Leitfähigkeiten oder den dielektrischen Eigenschaften von Körnern für die Trennung aus. Zunächst erfolgt eine Beladung der Körneroberflächen mit elektrischen Ladungsträgern unterschiedlicher Polarität und/oder Stärke. Hierauf erfolgt die Auffächerung des Körnerschwarmes in einem elektrischen Hochspannungsfeld, welches die geladenen Körner in ihrer Bewegungsbahn oder ihrer Fallrichtung beeinflusst. Abschließend werden die Produkte z.B. durch Teilerbleche mechanisch separiert.

Die Anfänge der Elektroscheidung reichen weit zurück. Der griechische Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler Thales von Milet soll schon im antiken Griechenland erkannt haben, dass Bernstein (*alt-gr. ἤλεκτρον – ēlektron*) durch Reibung bzw. Berührung mit Katzenfell kleine Staubkörner anzieht. Diese Entdeckung wurde schließlich namensgebend für die Elektrizität. Neuzeitliche Quellen der Elektroscheidung reichen zurück bis ins 19. Jahrhundert.^[1] Aus der Fülle des facheinschlägigen Schrifttums seit jener Zeit kann abgeleitet werden, dass die Entwicklung und die wissenschaftliche Beschäftigung mit der Elektroscheidung parallel zur immer besser werdenden Beherrschung der Elektrizität und der Entwicklung von immer leistungsfähigeren Hochspannungserzeugern und verbesserter Hochspannungsbauteile im Allgemeinen einher ging. Besonders Forscher in den USA waren anfänglich an der Entwicklung der Elektroscheidung beteiligt, wobei zuerst lediglich die Trennung gut leitender Minerale von elektrisch isolierenden Mineralen bzw. geringer leitfähigen Phasen – z.B. Erzen von Gangart – im Vordergrund stand. Um auch Körner mit geringen Leitfähigkeitsunterschieden trennen zu können, wurde erstmals von Carpenter (1886) eine einfache Art der Luftkonditionierung vorgeschlagen, um durch unterschiedliche Adsorption von Wasser-

molekülen die Oberflächen-Leitfähigkeiten ändern zu können.^[2] Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Elektroscheidung durch den Siegeszug der Flotation für geraume Zeit in den Hintergrund gedrängt. Erst in den 50er Jahren erfolgten neuerliche Forschungsaktivitäten zur Trennung von Salzmineralen durch elektrostatische Sortierung, diesmal mit Erfolg. Seit den 70er Jahren stellt die Elektroscheidung für die Kalisalzaufbereitung ein Standardverfahren dar, das es mit der Flotation durchaus aufzunehmen vermag. Im Bereich der Aufbereitung anderer Rohgutarten ist die Elektroscheidung gegenwärtig noch nicht in diesem Ausmaß etabliert.

Eine wichtige Motivation für die neuerliche Beschäftigung der Rohstoffindustrie mit elektrostatischen Trennverfahren und die Bemühungen der Anwendung auf andere Rohgutarten ist die trockene und vergleichsweise kostengünstige Betriebsweise. Der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben hat vor etwa 10 Jahren mit Untersuchungen des Einsatzes der Elektroscheidung im Bereich der Aufbereitung von Industriemineralen begonnen. Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertationsarbeit fortgesetzt und dabei auf die Aufbereitung von mineralischen Füllstoffen im Feinstkornbereich ausgeweitet.

Für die umfangreichen experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation wurde Marmor unterschiedlicher Provenienzen als Hauptprobe ausgewählt, weil dieses Mineral einen bedeutenden Vertreter im Bereich mineralischer Füllstoffe darstellt. Marmor wird jährlich in großen Mengen abgebaut und findet Einsatzbereiche in allen Bereichen des täglichen Lebens, angefangen von Bau- und Kunstwerken über landwirtschaftliche Produkte – etwa für die qualitative Verbesserung von Ackerböden oder als Futtermittelzusatz – bis hin zu wichtigen Anwendungen in der Chemie, wie z.B. zur Sodaerzeugung, der pH-Regulierung oder dem Einsatz bei der Rauchgasentschwefelung.

Etwa 0,5% des weltweiten Marmorverbrauchs findet Einsatz als Füllstoff oder Streichpigment.^[3] Füllstoffe sind Zusätze zu Erzeugnissen, welche im einfachsten Fall dazu dienen, das Volumen des Produktes auf kostengünstige Art und Weise zu erhöhen, ohne dabei seine wesentlichen

Eigenschaften zu beeinträchtigen. In diesem Fall spricht man von einem passiven Füllstoff, im Vordergrund des Einsatzes stehen wirtschaftliche Gesichtspunkte (z.B. wird der teure Kunststoff bis zu einem gewissen Anteil durch den billigen Füllstoff ersetzt). Meist jedoch werden an sogenannte aktive Füllstoffe weitaus höhere Funktionalitätsanforderungen gestellt, wie z.B. die Farbe eines Produkts günstig zu beeinflussen, die Oberfläche zu veredeln (Beeinflussung von Glanz bzw. Bedruckbarkeit) oder die Festigkeit und Zähigkeit zu erhöhen (Beeinflussung von E-Modul und/oder Kerbschlagfestigkeit).

Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit eines Füllstoffes ist das Erfüllen einer Reihe von qualitätsrelevanten Parametern, etwa die Reinheit (Gehalt an farbgebenden Mineralphasen), die Feinheit (top cut), die Beschaffenheit (Blättchenförmigkeit) oder die Gleichmäßigkeit. Um die immer spezieller werdenden Anforderungen an die Füllstoffprodukte erfüllen zu können, sind die gestellten Anforderungen an die Aufbereitung hoch.

Marmor wird üblicherweise bergmännisch durch Bohr- und Sprengarbeit oder durch Reißen gewonnen. Die Aufbereitung erfolgt immer mit Blick auf die Produkthanforderung und kann sowohl trocken als auch nass erfolgen. In Trockenaufbereitungsanlagen erfolgt klassischerweise meist eine Zerkleinerung des Rohgutes in Kombination mit Klassiereinrichtungen, z.B. Taumelsieben im Falle gröberer Marmor-Produkte (Putzsande) oder mit Windsichtern für feine und feinste Körnungen (Füllstoffe). Die Qualität des Endproduktes hängt bei Trockenanlagen in überwiegendem Maße von der Qualität des eingesetzten Rohguts ab. Das in die Aufbereitungsanlage aufgegebene Hauwerk muss oft bereits am Ort der Gewinnung einer Qualitätsprüfung im Hinblick auf die Eignung als Ausgangsstoff für die Produktion unterzogen werden. Die Folge daraus ist aufgrund der in dieser Korngröße meist noch stark vorhandenen Verwachsung ein verringertes Lagerstättenausbringen. Durch verstärkten Einsatz geeigneter Sortierverfahren in der Aufbereitungsanlage kann dieser sowohl für Bergbautreibende als auch für die Volkswirtschaft ungünstigen Situation entgegengewirkt werden. So wurden in den vergangenen Jahren optische Sortiersysteme entwickelt und in der Füllstoffindustrie in Betrieb genommen, die aufgrund der hohen möglichen Rechnerleistungen in Verbindung mit den enormen Fortschritten der Digitaltechnik bei guten

Durchsatzleistungen immer feinere Körnungsspektren (k_{\min} derzeit etwa 4 mm) effizient verarbeiten können. Dies gilt jedoch nur, sofern verwertbare Unterschiede zwischen verschiedenen Körnern vorhanden sind und sich diese auch als Qualitätskriterium heranziehen lassen. Andere Sortierverfahren, wie Magnetscheidung oder Dichtesortierung scheiden zumeist aufgrund fehlender oder vernachlässigbarer Merkmalsunterschiede aus.

Die Elektroscheidung wird derzeit für die Sortierung von mineralischen Rohstoffen einer Korngröße von 100 μm bis ca. 2 mm angewendet. Die Haupeinsatzgebiete sind die Aufbereitung von Schwermineralsanden und Kalisalzen. Ein Nachteil der Elektroscheidung ist die beschränkte Anwendbarkeit auf Körnungen $<100 \mu\text{m}$ aufgrund der mit abnehmender Korngröße immer stärker werdenden interpartikulären Haftkräfte einerseits und dem immer ungünstiger werdenden Kräfteverhältnis von Schwerkraft zu den benötigten elektrostatischen Kräften andererseits. Ziel der vorliegenden Dissertationsarbeit ist es, einen Beitrag zur Erweiterung der Elektroscheidung auf eben diesen Korngrößenbereich zu leisten.

Mit der vorliegenden Arbeit ist weiters die Zielsetzung verbunden, Erkenntnisse über das triboelektrische Aufladeverhalten von gemahlenem Marmor und seiner natürlich vorkommenden Begleitminerale zu erhalten. In weiterer Folge sollen auf Basis dieser Erkenntnisse optimierte Prozessparameter (Umgebungsbedingungen, Rohgutbedingungen und -konditionierung, Durchsatzrate, ...) abgeleitet werden, bei denen eine effiziente und wirtschaftliche Abreicherung qualitätsmindernder Begleitminerale aus dem gemahlenden, sehr feinkörnigen Stoffstrom im elektrischen Feld im industriellen Maßstab möglich ist. Der Hauptteil der Dissertationsarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Bau einer triboelektrischen Aufladeinheit zur messtechnischen Erfassung des spezifischen Aufladeverhaltens an diversen Reinmineralproben unter definierten Prozessbedingungen in begehbaren Klimazellen. Darüber hinaus wurde ein als Koaxscheider bezeichneter Labor-Elektroscheider für Trennaufgaben im Korngrößenbereich $<100 \mu\text{m}$ konzipiert, entwickelt und in Betrieb genommen. Erste Versuchsergebnisse mit diesem Scheider sind vielversprechend.

2. Aufgabenstellung

2.1. Ausgangssituation

In der klassischen Mineralaufbereitung wird ein in der Regel bergmännisch gewonnenes Rohgut zu einem oder mehreren Rohstoff-Produkten mit abnahmesichernden Qualitätseigenschaften verarbeitet. Dabei wird das Mineralgemenge zunächst durch Freilegen von Merkmalsunterschieden mit Läuter- und/oder Zerkleinerungsverfahren vorbereitet und hierauf in nachfolgenden Klassier- und Sortierschritten weiterverarbeitet. Der aufbereitungstechnische Grundprozess der Sortierung ist an das Vorhandensein physikalisch verwertbarer Merkmalsunterschiede zwischen den beteiligten Mineralphasen gebunden, was bei karbonatischem Rohgut oftmals gar nicht oder nur unzureichend gegeben ist. Die Möglichkeiten, aus Marmor hochqualitative Calciumcarbonat-Produkte durch trockene Aufbereitung herzustellen, sind daher stark abhängig von den vorliegenden Lagerstättenverhältnissen (Reinheit, Gleichmäßigkeit), der Selektivität der Abbauführung im Rahmen der Gewinnung bzw. den Verwachsungsverhältnissen der beteiligten Mineralphasen. Dabei gilt, je feiner die Wertminerale mit den unerwünschten Begleitmineralen verwachsen sind, desto schwieriger gestaltet sich eine wirtschaftliche Aufbereitung.

Die Aufbereitung von karbonatischen Füllstoffen erfolgt heutzutage in der Regel nassmechanisch durch mehrstufige indirekte Flotation. Dabei werden die unerwünschten Begleitminerale durch oberflächenaktive Reagenzien hydrophobiert und in ein Schaumprodukt ausgetragen. Nachteile dieses Verfahrens sind der dafür benötigte Wasserbedarf und der prozesstechnisch unvermeidliche Reagenzieneinsatz, was zweifelsohne mit einem hohen Aufwand für Umwelt- und Arbeitnehmerschutz einher geht. Letztlich liegt das Calciumcarbonat-Produkt nach der Flotation als Slurry vor, und kann in großen Mengen nicht mehr wirtschaftlich getrocknet werden.

Ähnlich der Flotation macht sich auch die Elektroscheidung unterschiedliche Eigenschaften der Körneroberflächen zunutze. Im Gegensatz zur Flotation ist die Elektroscheidung aber ein trockenes Aufbereitungsverfahren, das bei den derzeit eingesetzten Aggregaten auch eine bedeutend größere

Korngrößenspanne von etwa 0,1 bis 2 mm verarbeiten kann. Die Trennung der Mineralphasen basiert dabei einerseits auf einer Unterscheidung zwischen elektrischem Leiter und elektrischem Nichtleiter, andererseits ist es durch selektive triboelektrostatische Aufladung der beteiligten Minerale möglich, sowohl elektrisch leitende, als auch nichtleitende und halbleitende Minerale jeweils voneinander zu trennen. Die Funktionsweisen dieser Verfahren werden zu einem späteren Zeitpunkt im Detail behandelt.

Wesentliches Motiv für die Beschäftigung mit Verfahren der Elektroscheidung im Zuge dieser Dissertationsarbeit ist aber das Erschließen des Einsatzbereiches der Elektroscheidung auf den Korngrößenbereich $<0,1$ mm. So haben vorhergehende Untersuchungen gezeigt, dass die Sortierung von Calciumcarbonat-Produkten im elektrostatischen Feld unselektiver wird, je höher der Anteil von Körnern <63 μm in der Aufgabe ist.^[4] Mangelberger (2007) etwa sortierte Marmor aus Kanada mit unterschiedlichen Gehalten an Feinkorn <63 μm in einem elektrostatischen Kammerscheider. Im Zuge dieser Versuche wurde gezeigt, dass sich die Selektivität mit zunehmendem Feinkorngehalt verschlechterte.^[5] Der ursächliche Grund für dieses Verhalten liegt in den im Trennraum wirkenden Kräften. Während bei Korngrößen im Millimeter-Bereich noch die gravimetrische Kraft bestimmend für die Fallrichtung eines Kornes ist, und sowohl die elektrostatischen Kräfte als auch die Strömungsverhältnisse untergeordnete Rollen spielen, so nimmt diese bei abnehmender Korngröße ab und die Strömungsverhältnisse und elektrostatischen Kräfte treten in den Vordergrund. Je feiner die Körner, desto mehr sind diese dem Spiel der Kräfte ausgesetzt und desto stärker wirken sich etwa Luftturbulenzen ungünstig auf die Selektivität der Trennung im Feinkornbereich aus.

Vor diesem Hintergrund stellte sich die herausfordernde Aufgabe, den Einsatz der Elektroscheidung um den Feinkornbereich <100 μm am Beispiel der Calciumcarbonataufbereitung zu erweitern. Dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung oblag dabei die systematische Erhebung grundlegender Daten zur Trennbarkeit verschiedener Mineralphasen, die eine Aussage über die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen eines Feinkorn-Elektroscheiders liefern sollten.

2.2. Arbeitsansatz

Nach Voruntersuchungen zur elektrischen Charakterisierung relevanter Mineralproben sollte zunächst eine triboelektrische Aufladeeinheit entwickelt werden, die das messtechnische Erfassen des triboelektrischen Aufladeverhaltens von im Aufbereitungsprozess wichtigen Mineralphasen unter den verschiedensten (Umgebungs-)Bedingungen ermöglichen soll. Neben dem Marmor (Calcit) sollten diese Versuche auch an eisenfrei gemahlenem Quarz sowie an Feldspat, Pyrit und Grafit durchgeführt werden. Nach detaillierten Versuchen mit diesen Reinmineralien sollte anschließend der Einfluss von Reagenzien auf das Aufladeverhalten derselben Minerale getestet werden. Besondere Bedeutung bei der Entwicklung der triboelektrischen Aufladeeinheit wurde dabei den in einem elektrostatischen Bandscheider vorherrschenden Aufladevorgängen beigemessen und es wurde versucht, diese Versuchsanordnung möglichst ähnlich zu gestalten, was schlussendlich in einer Rotor-Stator-Geometrie mit Polyethylen-Auskleidung und der Möglichkeit des Überlagerns eines elektrischen Feldes unter strenger Kontrolle der Umgebungsverhältnisse in einer Klimakammer mündete.

Nach diesen umfangreichen, für etwa 1,5 Jahre anberaumten Tests an Reinmineralen in der triboelektrischen Aufladeeinheit, sollte mit der Entwicklung eines Labor-Feinstkornscheiders begonnen und ein Prototyp in Betrieb genommen werden, in den die triboelektrische Aufladeeinheit integriert wird. Dadurch soll der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung in die Lage versetzt werden, Untersuchungen zur Trennung von Mineralgemengen durchzuführen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsarbeit sollten dazu erste systematische Tests zur Abtrennung silikatischer Verunreinigungen aus Marmor am Feinstkornscheider versucht werden.

3. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertationsarbeit wurde das triboelektrische Aufladeverhalten von Reinmineralproben anhand verschiedener Parameter sowie nach Konditionierung mit chemischen Reagenzien in einer eigens entwickelten triboelektrischen Aufladeinheit (TAE) untersucht und ein Apparat zur Sortierung feinstdisperser Körner geplant und aufgebaut. Für die systematischen triboelektrischen Aufladeversuche wurden Proben folgender Minerale verwendet:

- Marmor
- Quarz
- Feldspat
- Pyrit
- Grafit

Die Mineralproben wurden auf $<200\ \mu\text{m}$ und eine mittlere Korngröße von etwa $35\ \mu\text{m}$ zerkleinert bzw. in dieser Dispersität angeschafft und mittels gängiger Analysenmethoden analysiert.

Die triboelektrische Aufladeinheit besteht aus einem Rotor-Stator-System aus Edelstahl, welches mit Polyethylen ausgekleidet ist. Diese wurde in einer begehbaren Klimakammer positioniert. Das triboelektrische Aufladeverhalten der Proben wurde chargenweise nach einer Konditionierzeit von >6 Stunden im jeweiligen Umgebungsklima untersucht. Die Messung der erzeugten Ladung erfolgte durch Einsatz eines Faraday-Bechers nach dem Influenz-ladungsprinzip. Abbildung 3.1. zeigt die technische Zeichnung der TAE.

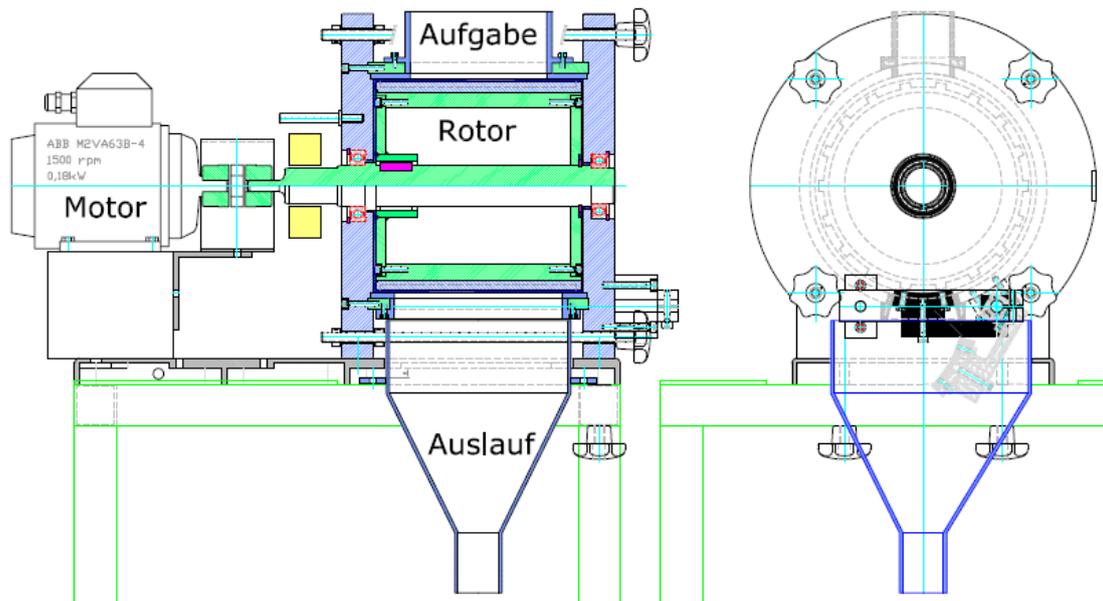


Abb. 3.1. Technische Zeichnung der triboelektrischen Aufladeeinheit

Erste Versuche, durch die u.A. die Reproduzierbarkeit der Messwerte überprüft wurde, zeigten klar, dass für jede Messung in der Aufladeeinheit „frische“ Probe verwendet werden muss. Wird eine Probe mehrfach der triboelektrischen Aufladeeinheit zugeführt, so erhalten die Körner immer wieder zusätzliche Ladungsträger, welche somit die Aufladung erhöhen. Abbildung 3.2. zeigt am Beispiel einer Marmorprobe die gemessenen spezifischen Ladungen, wenn bereits in der triboelektrischen Aufladeeinheit geladenes Material wiederholt innerhalb weniger Minuten wieder aufgegeben wird.

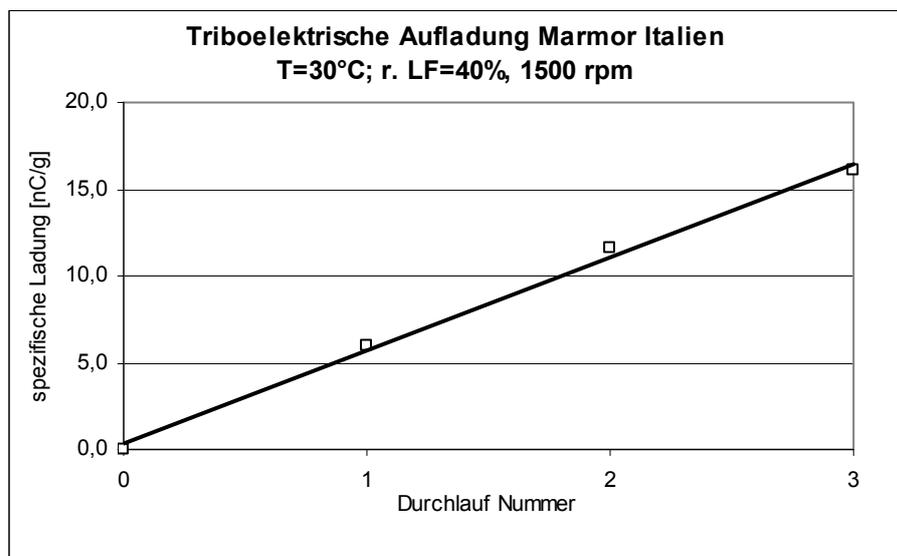


Abb. 3.2.: Triboelektrische Ladungsremanenz (Marmor Italien)

Die Untersuchungen zum triboelektrischen Aufladeverhalten von Reinmineralproben ergaben einen klaren Zusammenhang zwischen der erzeugten Ladung und der herrschenden relativen Luftfeuchte der Umgebung, insbesondere für Marmor und Pyrit. Marmor lud sich in der TAE bei trockenen klimatischen Verhältnissen je nach verwendeter Probe unterschiedlich stark positiv auf, bei höher werdender relativer Luftfeuchte wurde das triboelektrische Aufladeverhalten immer unselektiver. Pyrit lud sich bei trockenen Verhältnissen negativ auf, höhere Luftfeuchte führte zu einer Verringerung der negativen Ladung bis zum Nulldurchgang bei etwa 50% und bei weiterer Steigerung schließlich zu positiver Aufladung auf ca. 10 nC/g.

In Abbildung 3.3. wird das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor (a) und Pyrit (b) dargestellt.

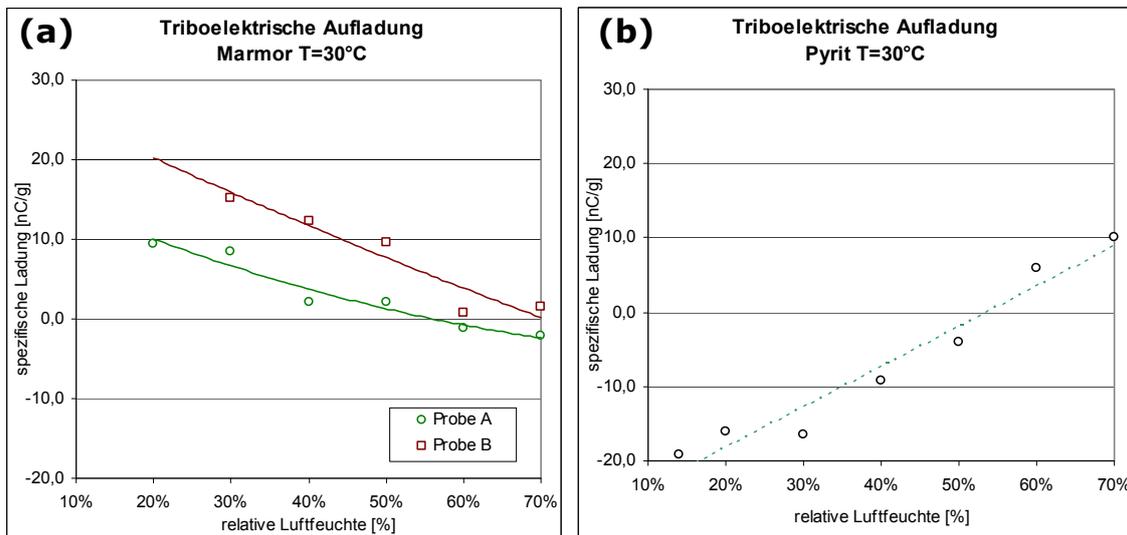


Abb. 3.3.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor (a) und Pyrit (b)

Für die triboelektrische Sortierung dieser Minerale kann der Schluss gezogen werden, dass bei Temperaturen um 30 °C aufgrund des hohen Aufladungsunterschiedes eine Trennung bei 30% bis 40% relativer Luftfeuchte die beste Selektivität liefern wird.

Durch Anlegen einer elektrischen Hochspannung an den Stator der TAE konnte das Aufladeverhalten aller Proben unter der Voraussetzung eines gewissen Luftfeuchtegehalts signifikant beeinflusst werden. Ein positives elektrisches

Potential resultierte dabei in einer stärker positiven, ein negatives elektrisches Potential in einer stärker negativen Aufladung.

Abbildung 3.4. zeigt das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor (Probe A aus Abbildung 3.3.) und den Einfluss durch ein angelegtes elektrisches Potential in Abhängigkeit der Luftfeuchte, ersichtlich durch das Auffächern der Isopotentiallinien.

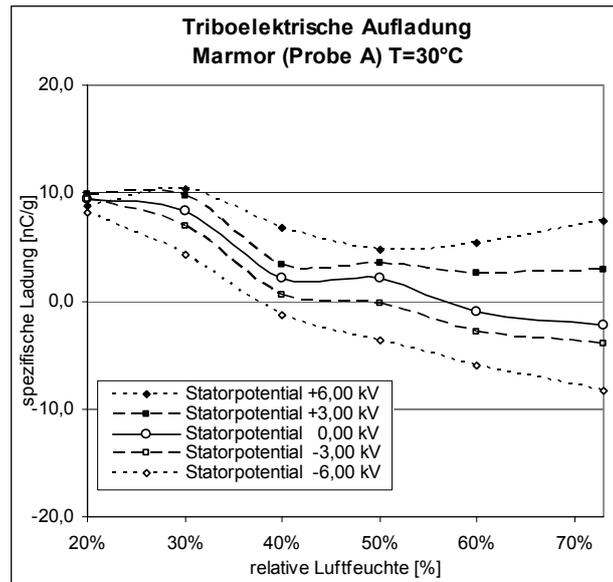


Abb. 3.4.: Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

Die Beeinflussbarkeit des Aufladeverhaltens durch Chemikalien wurde nach nasser Konditionierung der Minerale geprüft. Der signifikante Einfluss von z.B. Ölsäure wurde bereits bei geringsten verwendeten Konzentrationen der jeweiligen Reagenzien in wässriger Lösung von 0,005 mol/Liter insofern festgestellt, als dass sich für alle verwendeten Minerale eine positivere triboelektrische Ladung ergab, wobei die Änderung des Aufladeverhaltens unterschiedlich verlief. Aufgrund dieses Verhaltens konnte eine optimale Chemikalienkonzentration eruiert werden, bei welcher der Ladungsunterschied ein Maximum erreichte. Solche optimale Konzentrationen wurden für folgende Reagenzien mit den angeführten Mineralgemengen ermittelt:

Marmor – Quarz:

- Ölsäure 0,010 mol/Liter
- Salicylsäure 0,010 bis 0,030 mol/Liter je nach Probe

Marmor – Feldspat:

- Ölsäure 0,010 mol/Liter

Der Einsatz eines quarternierten Amins ergab eine Steigerung der positiven Aufladung von Marmor bei gleichzeitig verstärkter negativer Quarzladung, was auf eine Verbesserung der Selektivität im elektrostatischen Feld schließen lässt.

Zur zukünftigen Verifizierung der ermittelten Trends in der Aufladeeinheit wurde ein selbst entwickelter – wegen seiner Bauform als Koaxscheider bezeichneter – Feinstkornelektroscheider in einer begehbaren Klimakammer aufgebaut, welcher aus der triboelektrischen Aufladeeinheit und einer darunter angeordneten, zylindrischen Trennkammer besteht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden erste Versuche zur Charakterisierung des Apparates mit künstlich hergestellten Calciumcarbonat-Quarz-Gemengen durchgeführt. Die Auswertung der Versuche erfolgte durch Analyse des salzsäureunlöslichen Rückstandes der Trennprodukte. Es zeigte sich eine klare Abhängigkeit der Sortierbarkeit von der Rohguttemperatur: Die beste Selektivität der einstufigen Sortierung wurde bei einer Temperatur von 100 °C und Elektrodenspannung von +/-15 kV erreicht.

Die ermittelten Ergebnisse mit dem Feinstkornscheider belegen eindeutig die Verwendbarkeit des Apparates zur Feinstkorntrennung im Labor, die weitere Verbesserung der Selektivität des Apparates bedarf noch weiterführender Untersuchungen.

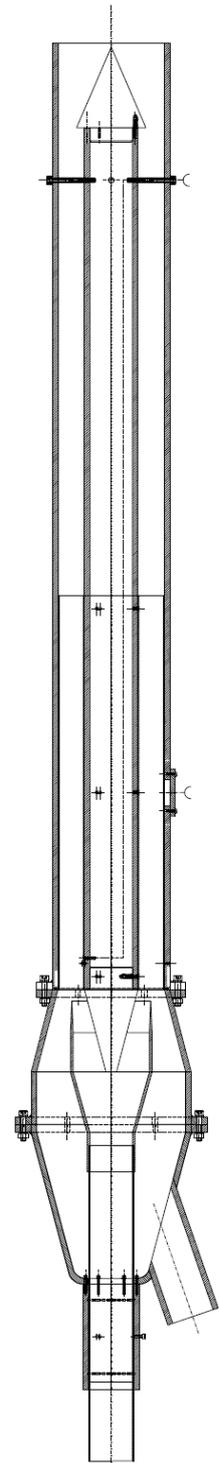


Abb. 3.5.:
Koaxscheider

4. Grundlagen der Elektroscheidung

4.1. Prinzipien

In der Elektroscheidung kommt es darauf an, auf den nach stofflichen Gesichtspunkten zu trennenden Körnern Ladungen unterschiedlicher Größe und vorwiegend auch unterschiedlichen Vorzeichens zu erzeugen, damit diese im Anschluss in einem elektrischen Feld getrennt werden können.^[6]

Die wichtigsten Vertreter dieser Apparate sind der elektrostatische Walzenscheider und der Kammerscheider. In Walzenscheidern werden meist elektrisch besser leitende von elektrisch schlechter leitenden Körnern sortiert, Kammerscheider dienen üblicherweise der Sortierung von elektrischen Nichtleitern und Halbleitern verschiedener Typen (p- oder n-Halbleiter). Es ist hierbei durchaus auch möglich, Nichtleiter von Nichtleiter bzw. Halbleiter von Halbleiter zu trennen. Abbildung 4.1. zeigt den elektrostatischen Walzenscheider und den Kammerscheider im Aufbereitungstechnikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben.

Für die Nichtleiter/Halbleiter-Sortierung wurden auch so genannte elektrostatische Bandscheider in Verwendung gebracht, in denen die Aufladung und Trennung von Mineralgemischen zwischen zwei eng aneinander vorbeilaufenden Kunststoffbändern erfolgt.^[7]

Gemeinsamkeiten aller gebräuchlichen Typen von Apparaten für die Elektroscheidung sind der Einsatz von Hochspannungselektroden zur Erzeugung elektrischer Felder hoher Feldstärken und deren ausschließliche Verwendung als trockenes Aufbereitungsverfahren. Zur Ladungserzeugung sind bei den Scheidertypen unterschiedliche Methoden in Anwendung, welche teilweise sowohl für Kammerscheider als auch für Walzenscheider geeignet sind. Die gängigsten sind die Aufladung durch Kontaktpolarisation, die Koronaaufladung sowie die triboelektrische Aufladung durch Kontakt der beteiligten Körner untereinander oder mit einem als Elektrisor bezeichneten dritten Kontaktpartner.



Abb. 4.1.: Elektrostatischer Kammerscheider (links) und Walzenscheider (rechts) am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung

4.2. Physikalische Grundlagen

Das Ziel in der Elektroscheidung ist es stets, Ladungen Q_p auf Körnern unterschiedlicher Zusammensetzung derart zu erzeugen, dass ein elektrisches Feld es vermag, die stofflich verschiedenen Teilchen selektiv in unterschiedliche Auffangbehälter bzw. Auslass-Schurren zu leiten.

Die Basis für die translatorische Beeinflussung in elektrischen Feldern gibt die Coulomb-Gleichung

$$F_C = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{Glg. 4.1.}$$

mit F_C als Kraftwirkung, resultierend aus den Punktladungen q_1 und q_2 in inverser quadratischer Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand r .

Der Koeffizient $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ergibt sich auf Basis der Grundbeziehungen im elektrostatischen Feld in SI-Größen. ϵ_0 ist die elektrische Feldkonstante oder auch Permittivität des Vakuums. Sie beträgt $\sim 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm und ist direkt ermittelbar aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum, der Lichtgeschwindigkeit c , und über die (magnetische) Permeabilität μ_0 : $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$, herleitbar aus der Lösung der Maxwell-Gleichungen. Die Richtung der Kraftwirkung ist dabei abhängig von der Polarität der Ladungen. Ungleiche Ladungen ziehen einander an, gleiche Ladungen stoßen einander ab.

Für die Sortierung im elektrischen Feld sind zwei Sonderfälle dieses Gesetzes immens wichtig:

- Fall 1: Eine Punktladung q steht einer unendlich ausgedehnten Fläche gegenüber. Die Fläche trägt auf jedem Flächenstück A die Ladung Q . In diesem Fall beträgt die Kraft F_C dann:

$$F_C = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{Q \cdot q}{A} \quad \text{Glg. 4.2.}$$

wobei F_C in diesem Fall unabhängig vom Abstand Ladung–Fläche ist (siehe Abbildung 4.2.).

- Fall 2: Eine Punktladung q befindet sich zwischen 2 Ebenen, die gleich große, jedoch gegensätzliche Ladungen Q je Flächenstück A tragen. F_C beträgt in diesem Fall:

$$F_C = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q \cdot q}{A} \quad \text{Glg. 4.3.}$$

und ist somit doppelt so groß als in Glg. 4.2., da jeweils eine Platte die Ladung q anzieht, während sie von der anderen mit gleicher Kraft abgestoßen wird. Die Lage der Punktladung q zwischen den Platten ist

wiederum für die Kraft F_C nicht relevant (Siehe Abbildung 4.2.). Beide Fälle gelten in der Realität bei gegenüber der Punktladung genügend großen Platten und hinreichend kleinem Punktladungsabstand.^[8]

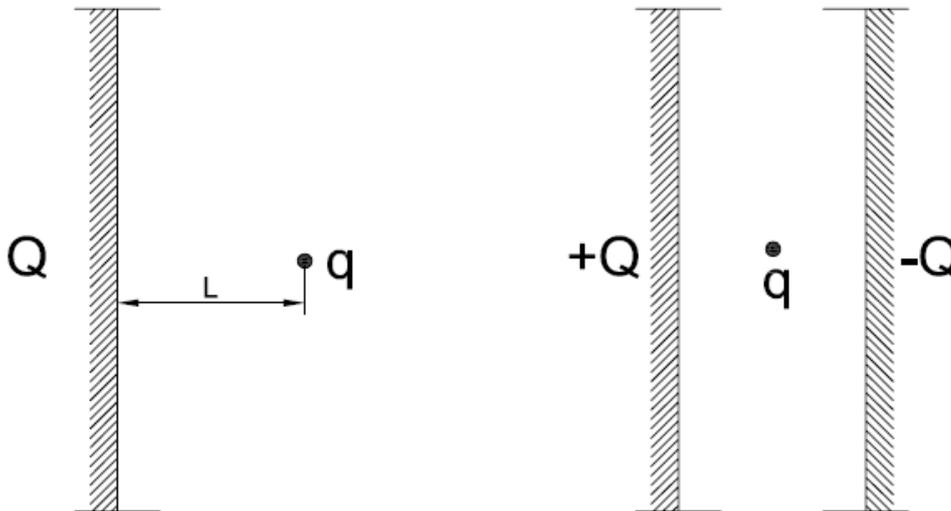


Abb. 4.2.: Punktladung q im Abstand L von einer ausgedehnten, elektrisch geladenen Fläche (links) und Punktladung zwischen zwei elektrisch geladenen Platten (rechts)

In einem Medium wird die Permittivität des Vakuums durch die relative Permittivität des Stoffes ϵ_r (auch als Dielektrizitätskonstante bezeichnet) erweitert zu

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad \text{Glg. 4.4.}$$

ϵ ist die Permittivität, eine Kenngröße, welche die Abschwächung eines angelegten elektrischen Feldes in einer Materie durch Polarisierung und Aufbau eines dem äußeren Feld entgegengesetzten inneren Feldes beschreibt.

Zwischen zwei mit der elektrischen Ladung $\pm Q$ geladenen Platten der Fläche A herrscht im homogenen Feldbereich eine elektrische Feldstärke E von

$$E = \frac{Q}{A\epsilon} = \frac{U}{d} \quad \text{Glg. 4.5.}$$

- U angelegte elektrische Spannung
- d Plattenabstand

Aus den allgemeinen Grundbeziehungen des elektrischen Feldes und hier im Besonderen zusammen mit Glg. 4.3. folgt

$$F_C = q \cdot E$$

Glg. 4.6.

woraus völlig klar zu erkennen ist, dass sowohl die elektrische Feldstärke als auch die Punktladung für das Ausmaß der entstehenden Kraftwirkung in gleichem Maße verantwortlich sind und die zwei maßgeblichen Faktoren für einen Trennerfolg darstellen.

4.3. Ladungserzeugung

Die Methoden der Trennung im elektrischen Feld sind eng mit den angewendeten Techniken zur Ladungserzeugung verknüpft. Die Gestaltung des entsprechenden Trennapparates bzw. der Trennzone im Elektroscheider muss mit dem jeweiligen Verfahren zur Ladungserzeugung abgestimmt werden. Nach Ralston (1961) sind viele Techniken denkbar, um Ladungen auf Körneroberflächen entstehen zu lassen:^[9]

- Aufladung durch Ableitung (der Ladungsträger von der Oberfläche)
- Aufladung durch Induktion
- Aufladung durch dielektrische Hysterese
- Aufladung durch Kontakt und Trennung schlechter Leiter
(Kontaktpotential)
- Aufladung durch Sprühelektroden (Korona) oder andere elektrische Ströme
- Aufladung durch Thermoionenemission von Elektronen oder Ionen
- Aufladung durch photoelektrische Methoden
- Pyroelektrische Polarisierung, piezoelektrische Polarisierung oder Aufladung durch andere in festem Zustand natürlich vorkommende Dipole
- Trennung in einem dielektrischen Medium (benötigt keine Aufladung der Körner, jedoch muss ein elektrisches Feld vorhanden sein)

Alle diese Methoden können in zwei Gruppen geteilt werden:

1. die Ladungserzeugung basiert auf der verschiedenen elektrischen Leitfähigkeit der Körner
2. die Oberflächenladungen werden aufgrund von Unterschieden in der Aufladbarkeit durch Reibung bzw. Kontakt erzeugt

Fraas (1962) unterteilt anwendungsorientiert die elektrostatischen Trenn-Prinzipien wie folgt in:^[10]

- Prozesse abhängig von Unterschieden im Kontaktpotential, entweder zwischen den zu trennenden Phasen oder aber zwischen Körnern und den Oberflächen des Trennapparates
- Prozesse in Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Feststoffen
- Prozesse in Abhängigkeit von pyroelektrischer Polarisation
- Prozesse in Abhängigkeit anderer Effekte, wie z.B. Photoelektrizität und Photoleitfähigkeit

In der technischen Anwendung haben sich jedoch nur wenige Methoden etabliert, da einige aufgrund der benötigten organischen Fluide zu teuer erscheinen (z.B. die Trennung im dielektrischen Medium) und/oder keine hohen Durchsatzraten erlauben. Die Verwendung einiger Methoden wird auch durch die Eigenschaften der Minerale eingeschränkt. Zum Beispiel könnten piezoelektrische Verfahren zur Ladungserzeugung lediglich angewendet werden, wenn die beteiligten Phasen eine solche Eigenschaft aufweisen. Folgende drei Methoden, welche weiter unten genauer beschrieben werden sollen, können derzeit als technisch relevant für die Elektroscheidung angesehen werden:

- die Aufladung durch Kontaktpolarisation
- die Aufladung im Koronafeld
- die triboelektrische Aufladung

Eine anschauliche Übersicht über Elektroscheiderprinzipien, getrennt nach Methoden der Ladungserzeugung, geben Knoll und Taylor (1985):^[11]

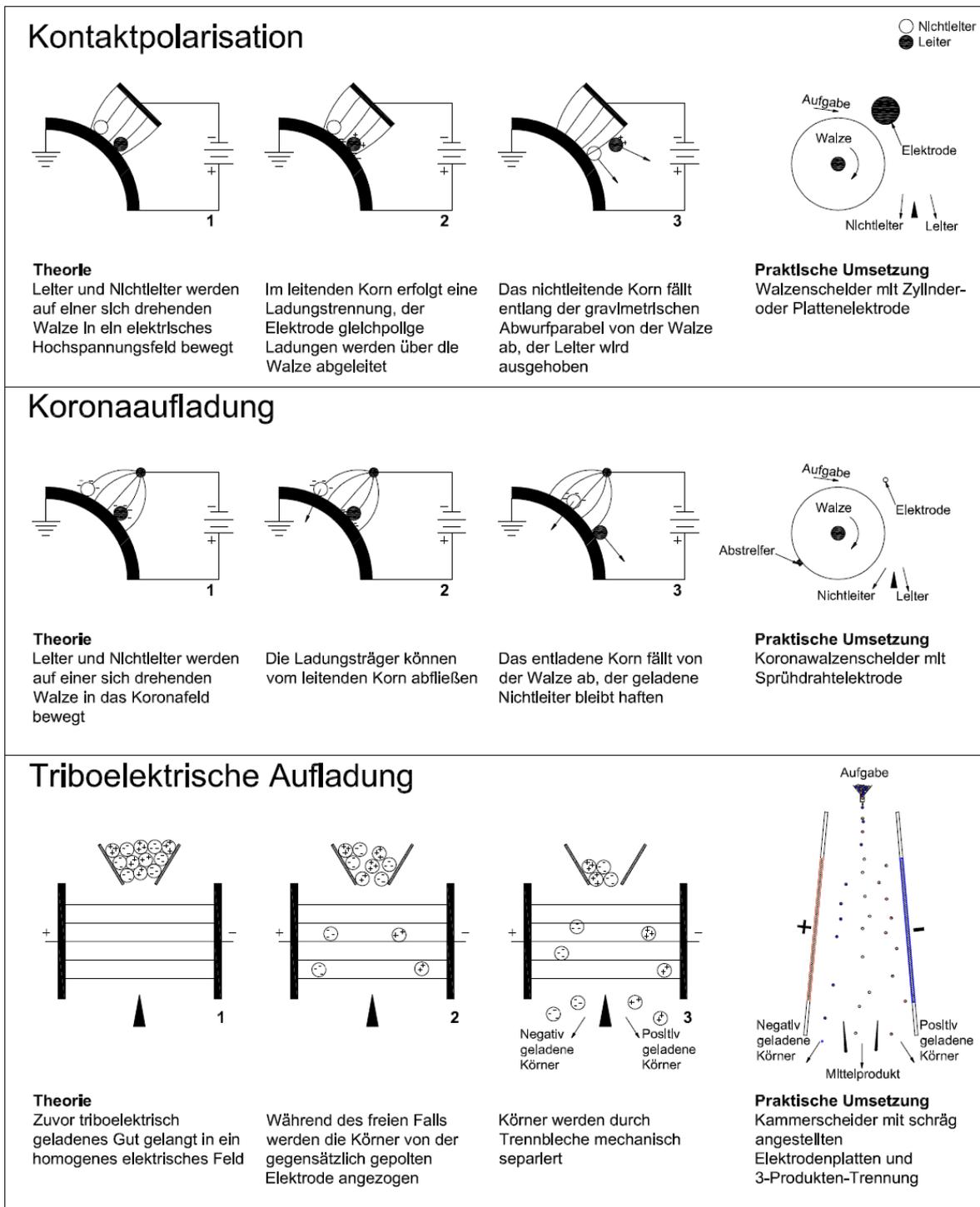


Abb. 4.3.: Übersicht der wichtigsten Elektroscheiderprinzipien

4.3.1. Kontaktpolarisation

Gelangt ein Körper in ein elektrisches Feld, so wird er von diesem in Abhängigkeit seiner elektrischen Eigenschaften beeinflusst. In einem elektrischen Leiter wandern die positiven Ladungsträger in Richtung der negativen Elektrode, negative Ladungen werden in Richtung der positiven Elektrode gedrängt; es kommt zu einer Ladungstrennung innerhalb des Körpers, respektive des elektrisch leitenden Kornes. Durch Berührung der Korn- oder Körperoberfläche mit einem Metall fließen die gegensinnigen Ladungen über dieses ab, und es verbleibt ein Überschuss an Ladungen, welcher dieselbe Polarität wie das Metall besitzt. Die nunmehr vorhandene gleichsinnige Polarität des Körpers und des Metalls verursacht eine translatorische Kraft, welche ein leitendes Korn von einer metallischen Walze abzustoßen vermag und somit aus seiner ursprünglichen Abwurfparabel lenkt. Ist die leitende Walze geerdet, so wird zwar keine gleichsinnige Ladung erzeugt, jedoch wird ein leitendes Korn zumindest von der nun gegensinnig gepolten Hochspannungselektrode angezogen und ausgelenkt. Gelangt ein elektrischer Nichtleiter in ein elektrisches Feld, so wird er zwar aufgrund eines gegebenenfalls entstehenden Dipolmoments ausgerichtet, es kommt jedoch zu keiner Ladungstrennung und in weiterer Folge auch zu keiner Aufladung. Ein elektrisch nichtleitendes Korn wird von einer metallischen Walze nicht abgestoßen und daher auch nicht ausgelenkt.^[12] Nach Kelly/Spottiswood (1989) erhalten Partikel durch Kontaktpolarisation eine Ladung gemäß:

$$Q_p = C_p \cdot V \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\Omega_p C_p}\right) \right] \quad \text{Glg. 4.7.}$$

wobei C_p die Kapazität des Kornes (Anm.: Vermutlich gegen die Walze des Scheiders), V die vorhandene Potentialdifferenz, t die Kontaktdauer und Ω_p einen äquivalenten Gesamtwiderstand darstellt.^[13]

Ein elektrischer Leiter erhält demnach viel schneller seine maximale Ladung als ein elektrischer Nichtleiter und auch der Betrag der erhaltenen Ladung ist weitaus größer (siehe Abbildung 4.4.).^[14] Neben

den in Glg. 4.7. angeführten Parametern stellt auch die Kornform einen Einfluss auf die Aufladung dar, da die Kontaktfläche eines Kornes auf der leitenden Oberfläche wesentlich von diesem Parameter abhängt. Die Aufladung durch Kontaktpolarisation kann somit eingesetzt werden, um in einem elektrischen Feld leitende von nichtleitenden Körnern zu trennen.

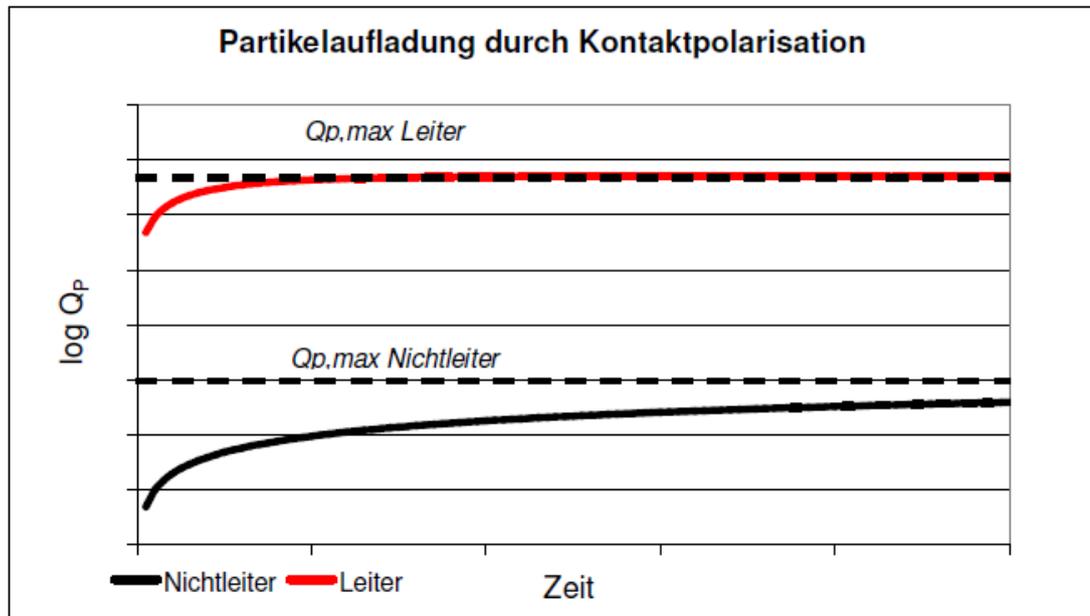


Abb. 4.4.: Aufladungsmodell durch Kontaktpolarisation

Temperatur des Aufgabegutes, Feuchtigkeit sowie Oberflächenbeläge stellen weitere wichtige Faktoren dar, welche die elektrostatische Aufladung beeinflussen bzw. beeinträchtigen. So konnte in einer am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung durchgeführten Versuchsreihe beispielsweise gezeigt werden, dass die Abreicherung von Pyrit (FeS_2) aus einem Talk-Rohgut lediglich nach Erwärmen der Aufgabe durch einen Infrarot-Strahler möglich wurde.^[15]

4.3.1.1. Einfluss der Temperatur

Der Temperatureinfluss kann im Falle der Kontaktpolarisation durch eine Veränderung der Leitfähigkeit erklärt werden. Die elektrische Leitfähigkeit vieler Minerale erhöht sich bei steigender Temperatur in Folge der höheren Elektronenaktivität. Die Leitfähigkeit der elektrischen

Halbleiter kann nach Fraas (1963) in etwa gemäß

$$\kappa = \kappa_0 e^{\frac{-E}{2kT}} \quad \text{Glg. 4.8.}$$

angegeben werden, wobei mit κ die elektrische Leitfähigkeit, T die Absoluttemperatur und E die Energie, um ein Elektron in das Leitungsband zu bringen, bezeichnet werden. κ_0 und k sind Konstanten. Logarithmieren der Gleichung und Ersatz der Leitfähigkeit durch ihr Reziprok, den elektrischen Widerstand R , sowie Überführung der Konstanten in Koeffizienten A und B ergibt:

$$\log R = A + B/T \quad \text{Glg. 4.9.}$$

Fraas (1963) stellte weiters die elektrische Leitfähigkeit verschiedener Minerale nach Einzelkornmessung in einem Diagramm gemäß der Geradengleichung 4.9. dar (Abbildung 4.5.) und es zeigen sich in dem Schaubild unterschiedliche Steigungen der Geraden der Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur, wodurch sich die Abhängigkeit der Sortierbarkeit im elektrischen Feld eines Walzenscheiders bei unterschiedlichen Temperaturen erklären lässt.^[16]

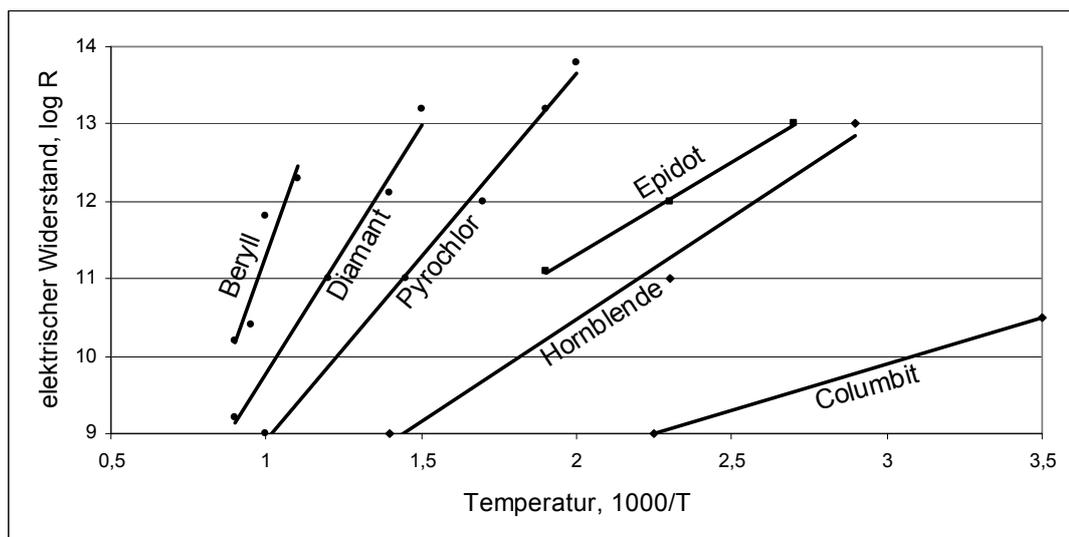


Abb. 4.5.: Widerstandsänderung von Einzelkörnern bei Änderung der Temperatur (nach Fraas) - Ausgleich linear

4.3.1.2. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Nach Kelly (1988) besteht ein Einfluss der Luftfeuchte auf die Leitfähigkeit κ nach:

$$\log \kappa = -K_1 + K_2 H \quad \text{Glg. 4.10.}$$

H relative Luftfeuchte

Die Konstanten K_1 und K_2 sind abhängig vom verwendeten Material bzw. dessen Genese.^[17]

Im Rahmen einer Untersuchung am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung wurden Leitfähigkeiten von Marmor-Körnerpräparaten der Korngrößenklasse 40/160 μm in einer selbst konstruierten Messzelle ermittelt. Wie aus Abbildung 4.7. ersichtlich ist, entsprechen die ermittelten Ergebnisse durchaus den nach Gleichung 4.10. zu erwartenden Trends. Für die Durchführung der Messung wurde ein Messgerät mit besonders hohem Eingangswiderstand und hoher Messspannung (500V bzw. 1kV umschaltbar) verwendet.^[18]



Abb. 4.6.: Messzelle zur Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit eines Körnerpräparates

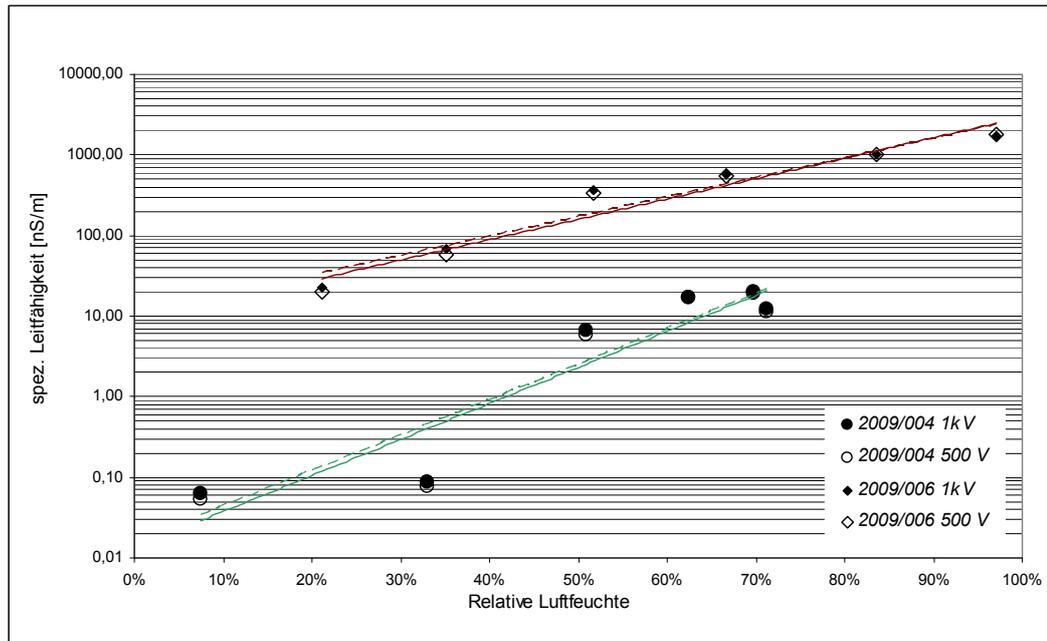


Abb. 4.7.: Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebung – Ausgleich linear

4.3.2. Koronaaufladung

Als Korona bezeichnet man jenes Leuchten um eine Draht- oder Spitzenelektrode, das entsteht, wenn elektrische Ladungen aufgrund der hohen lokalen elektrischen Feldstärke austreten, die Luft bzw. das Gas um den Draht ionisieren und aufgrund der entstehenden Leitfähigkeit des Gases weiter zur Gegenelektrode wandern (Abbildung 4.8.).

Alle Körner, die in ein solches Feld gelangen, werden so zunächst mit Ladungen überzogen, leitende Körner können diese jedoch wieder an eine leitende Oberfläche (die als Gegenelektrode dienende Walze) abgeben und passieren das Koronafeld ohne wesentliche Änderung der Flugbahn.

Nichtleitende bzw. schlechter leitende Partikel können die erhaltene Ladung jedoch gar nicht bzw. nur langsam abgeben, wodurch sie von der gegensinnig geladenen oder geerdeten Walze angezogen werden und somit mit einer Bürste oder einer AC-Reinigungselektrode an der gegenüberliegenden Walzenseite von den leitenden Körnern getrennt werden können.^[19]

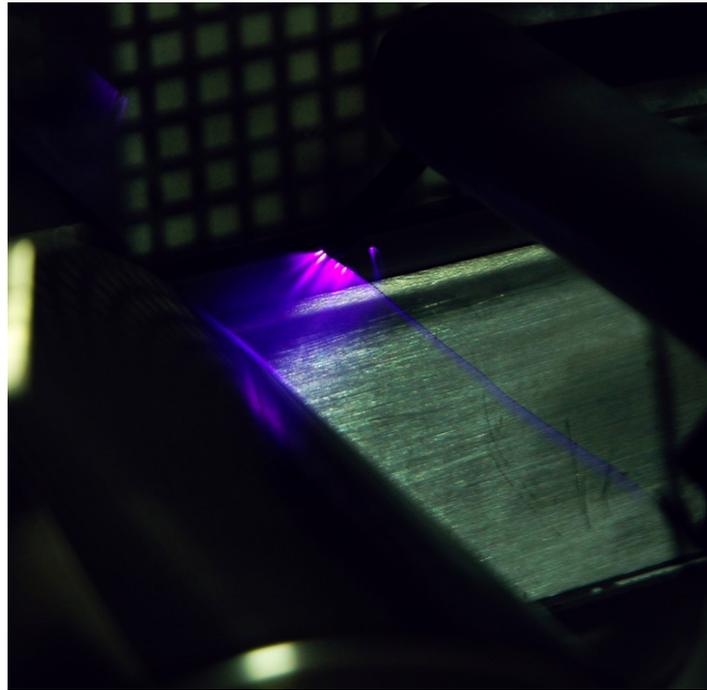


Abb. 4.8.: Koronaleuchten an einem elektrostatischen Labor-Walzenscheider

Die Polarität der Koronaelektrode kann positiv oder negativ gewählt werden, wichtig ist, die Feldstärke so zu wählen, dass eine stabile Gasentladung entsteht und es nicht zu einem Überschlag kommt, da hierdurch der Ionenstrom zusammenbrechen würde.^[20] Sämtliche Körner, die in das Koronafeld gelangen, werden gleichsinnig mit der Polarität der Koronaelektrode aufgeladen. Bei negativer Koronaelektrode entsteht durch Elektronenaustritt aus der Elektrode ein Strom von negativen Ladungen. Gasmoleküle werden durch aus der Sprühelektrode austretende Elektronen ionisiert und wandern in Richtung der zumeist geerdeten Gegenelektrode. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ausreichende Elektronenaffinität des umgebenden Gases, wie sie der Sauerstoff der Luft bietet.

Positive Koronaelektroden ziehen zunächst freie negative Ladungen aus der umgebenden Luft an. Diese erzeugen beim Auftreffen auf Gasmoleküle durch Abspalten negativer Ladungsträger positive Gasionen und weitere freie Elektronen. Die so durch Stoßionisation positiv geladenen Gasionen werden von der positiven Koronaelektrode abgestoßen und wandern somit in Richtung der Gegenelektrode.

In der Praxis wird negativen Koronaelektroden der Vorzug gegeben, da diese höhere Feldstärken vor Auftreten unkontrollierter Durchschläge erlauben und somit höheren Trennerfolg versprechen.^[21] Staubpartikel oder hohe Feuchtigkeit in der Luft verringern die mögliche Feldstärke, da sie zu früheren Überschlügen führen und daher den Trennprozess behindern.

Die erreichbare Aufladung eines Korns im Koronafeld hängt ab von seiner Größe, der Dielektrizitätskonstante, der angelegten Feldstärke, der Konzentration der Ionen im Gas sowie auch von Kornform und der Verweilzeit im elektrischen Feld.^[22] Durch Koronaaufladung können im Vergleich zu den anderen vorgestellten Verfahren recht hohe Ladungsdichten erreicht werden. Pauthenier^[23] und Mora^[24] geben die maximale Ladungsdichte $Q_{P,max}$ an nach:

$$Q_{P,max} = 4 \pi \varepsilon_0 a^2 k E_i \quad \text{Glg. 4.11.}$$

- a Radius des elektrisch äquivalenten Ellipsoids,
- k eine Funktion der Kornform (c/a) und der Dielektrizitätskonstante des Korns
- E_i Ionische Feldstärke

Begründet wird das Erreichen einer maximal möglichen Ladung durch das Auftreten von Abstoßeffekten gleichpoliger Ladungen, sobald eine gewisse Anzahl von Ladungsträgern auf einem Partikel anhaften.

Der Wert k wird für Leiter bzw. Nichtleiter sowie drei unterschiedliche Kornformen (c/a) – abgeplattet bis länglich (5), kugelig (1) und blättchenförmig (0) – angegeben mit:

Kornform: c/a	Kornform-Auflade-Faktor k für:	
	Leiter $K_p = \infty$	Nichtleiter $K_p = 5$
5	36,20	27,15
1	3,01	2,15
0	0,666	0,532

Tab. 4.1.: Kornform-Auflade-Faktor (k) für die Berechnung der maximal erreichbaren Kornladung durch Koronaaufladung

Demnach (siehe Abbildung 4.9.) ist die maximal erreichbare elektrische Ladung für Leiter höher als für Nichtleiter, für blättchenförmige um eine Zehnerpotenz höher als für kugelige Partikel und für abgeplattete etwas geringer als für kugelige Körner, was sehr klar den Kornformeinfluss bei der Aufladung in einem Koronafeld verdeutlicht.

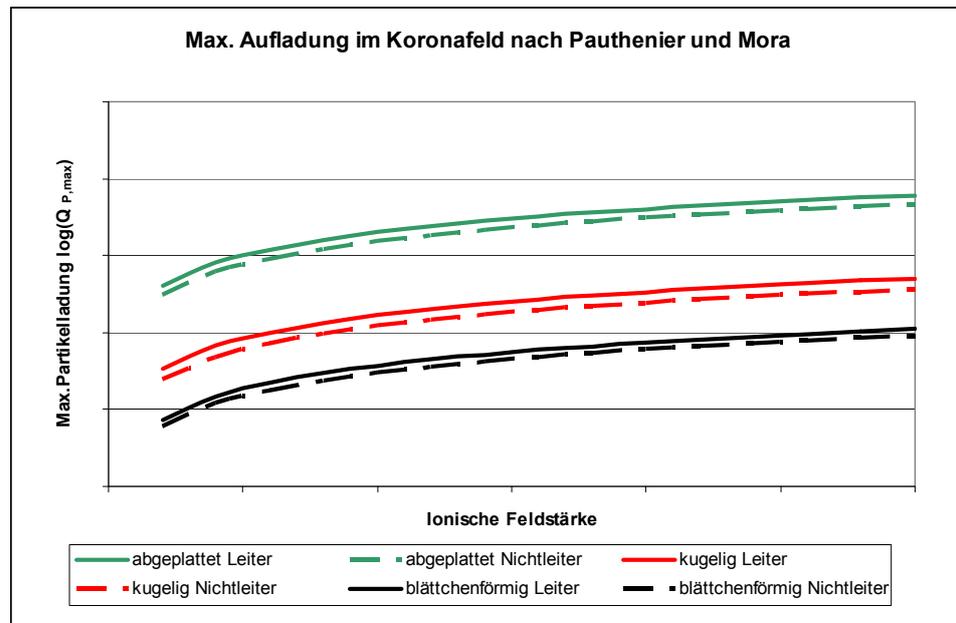


Abb. 4.9.: Maximale Partikelladung im Koronafeld (nach Pauthenier und Mora).

Nach Cross, zitiert von Flachberger (2009), entlädt sich ein Partikel in Abhängigkeit seiner relativen Dielektrizitätskonstante und dem spezifischen Widerstand nach folgender Formel:

$$\tau_R = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot K_P \quad \text{Glg. 4.12.}$$

τ_R	Entladezeitkonstante [s]
ε_0	Elektrische Feldkonstante $8,85 \times 10^{-12}$ [As/Vm]
ε_r	Relative Dielektrizitätskonstante [-]
K_P	Spezifischer Widerstand [Ωm]

Die so bezeichnete Entladezeitkonstante τ_R umfasst einen Zeitraum von nur wenigen Sekundenbruchteilen für Metalle – etwa $\sim 9 \cdot 10^{-10}$ s – bis zu mehreren Minuten für nichtleitende Kunststoffe.^[25]

In der Praxis wird somit eine Gleichgewichtsladung entstehen, da weder ideale Leiter noch perfekte Nichtleiter im Aufgabegut vorhanden sind. Diese Gleichgewichtsladung Q_p , bezeichnet als Verhältnis Q/Q_{\max} , wird nach Barthelemy/Mora wie folgt berechnet:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 1 + \frac{K_i}{B_K} - \sqrt{\left(1 + \frac{K_i}{B_K}\right)^2 - 1} \quad \text{Glg. 4.13.}$$

K_i Größe, die vom Koronafeld abhängt

B_K Entladekonstante des Kornes

Nach Schubert^[26] gilt für das Verhältnis

$$\frac{K_i}{B_K} \approx \frac{10^{14}}{R_K} \quad \text{Glg. 4.14.}$$

wobei R_K den äquivalenten Gesamtwiderstand eines Kornes darstellt. Für einen Leiter gilt somit:

$$\frac{K_i}{B_K} \rightarrow \infty \quad \text{und nach Glg. 4.13.} \quad \frac{Q}{Q_{\max}} \rightarrow 0$$

Ein perfekter Nichtleiter erreichte demnach $Q_p = Q_{\max}$, ein schlechter Leiter mit einem äquivalenten spezifischen Widerstand von z.B. $10^7 \Omega\text{m}$ erhielte in der Praxis etwa 17% der maximal möglichen Ladung.

Nach Kelly/Spottiswood (1989) liegt die maximal durch Koronaaufladung erreichbare Ladungsdichte σ_p auf sphärischen Nichtleitern aufgrund der Beschränkung durch die Überschlagsfeldstärke in Luft von ca. $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ bei $2,66 \mu\text{C/m}^2$.

Die Faktoren, welche die Trennung im Koronafeld beeinflussen sind ähnliche wie bei Einsatz der Kontaktpolarisation, die erreichbare Ladungsdichte ist jedoch höher.

Einen zusätzlichen Parameter bei der Trennung stellt der durch die Ladungsmigration entstehende elektrische Wind dar, welcher Teilchen in

Richtung der geerdeten Walze drückt bzw. die Aufgabe feinerer Partikel auf den Koronascheider behindert.

4.3.3. Triboelektrische Aufladung

Die elektrostatische Aufladung unterschiedlicher Oberflächen durch Berührung miteinander und anschließender rascher Trennung voneinander gehört zu den ältesten bekannten Phänomenen der Elektrizität; doch obwohl vor langer Zeit entdeckt, ist die Erforschung der ihr zugrunde liegenden Mechanismen bis zum heutigen Tag noch nicht abgeschlossen.

Die überwiegende Anzahl von Autoren geht davon aus, dass die elektrostatische Aufladung von Oberflächen ein Resultat von Elektronenübergängen zwischen den sich berührenden Oberflächen darstellt. 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 Φ zum Partner mit der höheren Elektronenaustrittsarbeit erfolgt.^[27]

Die Elektronenaustrittsarbeit ist jene Energie, die benötigt wird, um ein Elektron aus einem Feststoff zu entfernen. Dies kann gleichgesetzt werden mit jener Energie, die notwendig ist, um ein Elektron vom sogenannten Fermi-Niveau E_F , das ist jenes Energieniveau, in dem die Besetzungswahrscheinlichkeit mit Elektronen gleich 50% ist, in einen als Vakuum-Niveau E_V bezeichneten Energiezustand zu befördern (siehe dazu auch nachstehende Erläuterungen zum Energiebändermodell).

Werden die Oberflächen rasch voneinander getrennt, können nicht mehr sämtliche Ladungen zurückfließen und es verbleibt an einem Kontaktpartner ein Überfluss an negativen Ladungen, wodurch sich die Oberfläche negativ auflädt, der andere Kontaktpartner erleidet einen entsprechenden Mangel an negativen Ladungen, wodurch es zu einer positiven Aufladung dieses Stoffes kommt. Dieser Unterschied in den Elektronenaustrittsarbeiten der Kontaktpartner, normiert auf die Elementarladung e , wird als Kontaktpotential V_C bezeichnet.^[28,29,30]

$$V_C = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e} \quad \text{Glg. 4.15.}$$

- Φ_n Elektronenaustrittsarbeit des jeweiligen Kontaktpartners
 e Elementarladung eines Elektrons

Die triboelektrische Aufladung von Stoffen kann prinzipiell als Oberflächenphänomen angesehen werden, tiefer liegende Schichten als wenige nm spielen dabei keine wesentliche Rolle.

4.4. Das Energiebändermodell

Feststoffe werden hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit in 3 Gruppen – Leiter, Halbleiter und Nichtleiter – eingeteilt (Siehe Abbildung 4.10.).

Die Darstellung dieser Eigenschaften kann für Festkörper quantenmechanisch anschaulich im so genannten Energiebändermodell erfolgen, welches die einzelnen diskreten energetischen Zustände der im Stoff vorhandenen Ladungsträger quasikontinuierlich darstellt.

Im vereinfachten Fall wird in einem solchen Modell das Valenzband – dies ist das bei 0 Kelvin höchste noch vollständig mit Elektronen besetzte Energieband – und das nächsthöhere, das sogenannte Leitungsband, dargestellt. Elektronen im Valenzband tragen zur chemischen Bindung des Stoffes bei und stehen nicht für die elektrische Leitung zur Verfügung. Elektronen im Leitungsband sind gleichsam frei beweglich und stellen somit die elektrische Leitfähigkeit des betrachteten Stoffes dar.

In elektrischen Leitern berühren oder überlappen sich Valenz- und Leitungsband; Halbleiter weisen eine energetisch endliche Lücke von ca. 1-2 eV zwischen den Bändern auf, welche von Elektronen durch Energieaufnahme (z.B. Temperaturanstieg) überwunden werden kann. Die Lücke bei elektrischen Nichtleitern (Isolatoren) ist so breit, dass keine Elektronen in das Leitungsband gelangen können und dies somit unbesetzt bleibt.

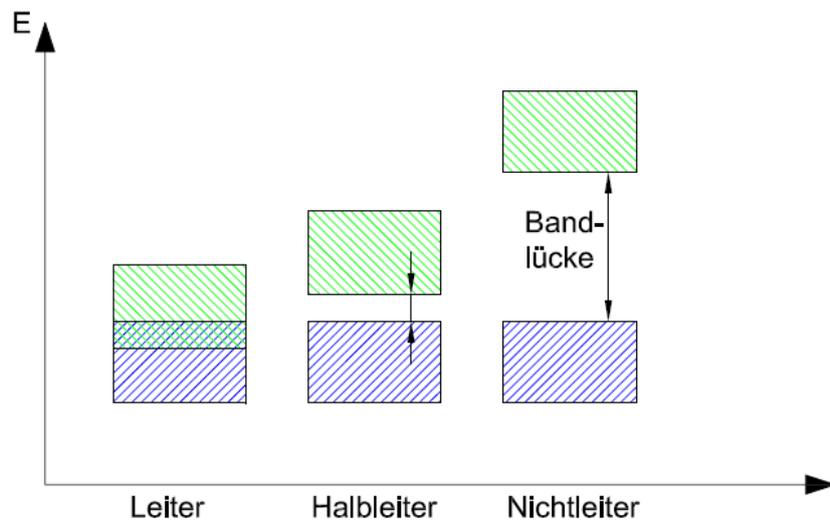


Abb. 4.10.: Relative Lage der Valenz- (blau) und Leitungsbänder (grün) bei elektrischen Leitern, Halbleitern und Nichtleitern

Grundsätzlich können bei der triboelektrischen Aufladung drei Berührungsfälle unterschieden werden:

- Kontakt zweier elektrischer Leiter (Metalle)
- Kontakt eines Leiters mit einem Nicht- oder Halbleiter
- Kontakt zweier Nicht- oder Halbleiter

Im Folgenden werden diese Berührungsfälle im Detail erläutert, wobei mit dem Kontakt zweier Metalle begonnen wird, da dieser Berührungsfall bislang zweifelsfrei erklärt werden kann und die Basis darstellt für Versuche, die Aufladung von Leiter/Nichtleiter bzw. Nichtleiter/Nichtleiter zu erklären.

4.4.1. Triboelektrische Aufladung zweier Metalle

Berühren sich zwei unterschiedliche Metalloberflächen, so befinden sie sich in einem thermodynamischen Gleichgewicht, d.h. ihre Fermi-Niveaus E_F , welche bei Metallen gleichzeitig die obersten mit Elektronen besetzten Energieniveaus darstellen, gleichen sich aus (Siehe Abb. 4.11.).^[31]

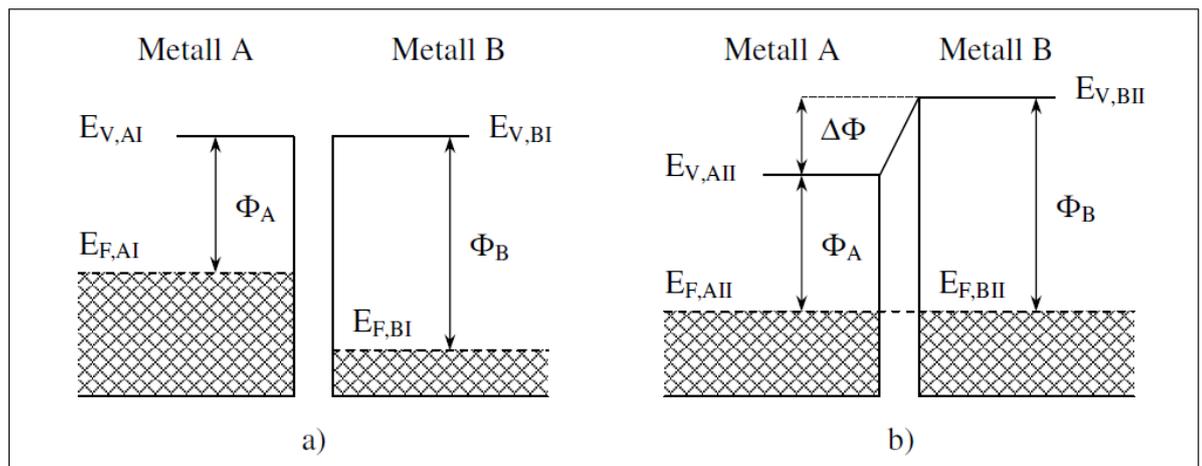


Abb. 4.11.: Energiezustände von Metallen vor (I) und während (II) Kontakt (nach Nemeth)

E_F : Fermi-Niveau, E_V : Vakuumniveau

Das bei Berührung vorhandene Kontaktpotential V_C ergibt sich wiederum aus

$$V_C = \frac{\phi_A - \phi_B}{e} = \frac{\Delta\phi}{e} \quad \text{Glg. 4.16.}$$

Bei der Trennung der beiden Stoffe voneinander fließen die Ladungsträger aufgrund der hohen Leitfähigkeit wieder beinahe vollständig zurück und es verbleibt keine signifikante Aufladung auf den Oberflächen. Metalle laden sich daher gegenseitig nicht signifikant triboelektrisch auf.

Der Rückfluss der Elektronen erfolgt während der Trennung der Metalle durch tunneln, um das Kontaktpotential V_C auch bei nun abnehmender Kapazität zwischen den Oberflächen beizubehalten.

4.4.2. Triboelektrische Aufladung von Nicht- und Halbleitern

Im Energiebändermodell zeichnen sich Nichtleiter durch ihre große Lücke zwischen Valenz- und Leitungsband aus, sie besitzen also keine freien Ladungsträger und eine triboelektrische Aufladung idealer Isolatoren ist daher theoretisch nicht möglich. Real findet jedoch eine

messbare Aufladung statt, welche durch Störstellen, die gewisse Ladungsakzeptor- oder -donatorniveaus bilden, erklärt werden kann.

Mit anderen Worten: Jede triboelektrische Aufladung benötigt eine gewisse Leitfähigkeit der beteiligten Stoffe und die Aufladung von Oberflächen ist möglich, weil real keine perfekten Isolatoren existieren.

Bei Donator- (E_D) bzw. Akzeptorniveaus (E_A) handelt es sich um räumlich vorstellbare Zonen im Feststoff, in welchen Ladungsträger aufgenommen bzw. abgegeben werden können. Gebildet werden diese Niveaus im Allgemeinen durch Fremdatome im Feststoff, die entweder zu viele (Donatoren) oder aber zu wenige (Akzeptoren) Elektronen besitzen. Die überschüssigen Elektronen stehen durch geringe Energiezufuhr für einen Austausch zur Verfügung, umgekehrt können Stellen mit fehlenden Elektronen leicht andere Ladungsträger aufnehmen. Entsprechend der Veränderung der Leitfähigkeit werden die Niveaus im Energiebändermodell im Bereich der Bandlücke nahe dem Valenzband bzw. nahe dem Leitungsband eingeführt. In der Halbleitertechnik wird der Einbau von Fremdatomen mit überschüssigen Elektronen als n-Dotierung bezeichnet, den Einbau von Fremdatomen mit zu wenigen Elektronen nennt man p-Dotierung. Entsprechend werden die dotierten Halbleiter als n- bzw. p-Halbleiter bezeichnet.

Für die triboelektrische Aufladung wesentlich ist, dass die Fermi-Niveaus bei Eigenhalbleitern ca. in der Mitte der Bandlücke liegen, jedoch mit dem Einbau von Fremdatomen in Richtung der Lage des Akzeptor- bzw. Donatorniveaus verschoben werden und im Weiteren sich das „Kontaktpotential“ bei Berührung durch Änderung der Differenz zum Vakuumniveau ändert.

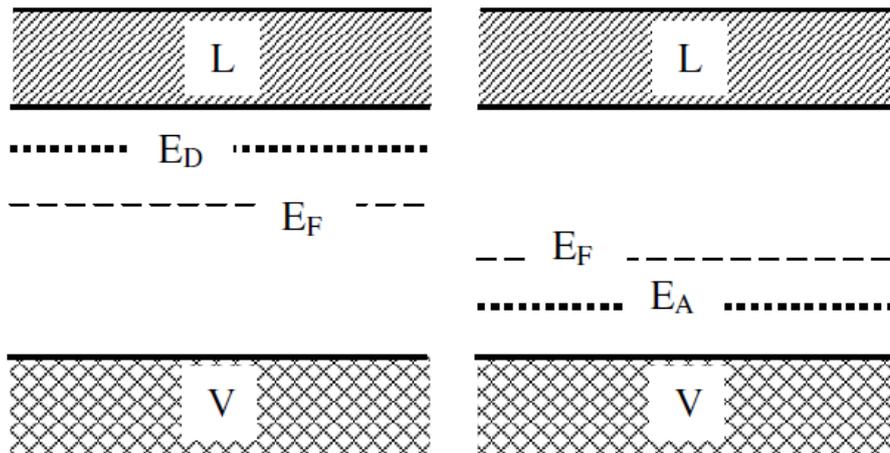


Abb. 4.12.: Energiebändermodell für n-Halbleiter (links) und p-Halbleiter (rechts) – (nach Nemeth)

Die tatsächlich erreichbare Größe der triboelektrischen Aufladung je Flächeneinheit, also die Oberflächenladungsdichte hängt von derart vielen Faktoren ab, dass eine Voraussage selbst durch genaue physikalische Analyse der Vorgänge auf den Oberflächen sehr schwierig sein dürfte. Um dies anschaulich zu untermauern, seien nachfolgend einige Einflussfaktoren auf das Aufladeverhalten ohne Anspruch auf Vollständigkeit angeführt:

- Relative Luftfeuchte
- Stoff-Temperatur
- Ionen in der Umgebungsluft
- Elektrische Felder in der Umgebung
- Adsorption von Schichten auf den Oberflächen
- Mechanische Beanspruchung
- Chemische Alteration
- Oberflächenrauigkeit und damit verursachte Gasentladungserscheinungen
- Intensität und Dauer der Kontaktierung

Ansätze zur Bestimmung der Aufladung werden dennoch von mehreren Autoren gegeben, berücksichtigen jedoch keine oder nur wenige der oben angegebenen Faktoren. Zu erwähnen, weil für die vorliegende Arbeit sehr relevant, ist in diesem Zusammenhang der Einfluss

elektrischer Felder auf das Aufladeverhalten. Die von Schein (1992) und Anderson (2000) erarbeitete und für geringe Dichten an Oberflächenladungszuständen vereinfachte Beziehung zeigt deutlich den linearen Einfluss eines elektrischen Feldes auf die Oberflächenladungsdichte σ .^[32,33]

$$\sigma = \frac{e}{\delta e} (\Phi_1 - \Phi_2 - E\delta e) \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \quad \text{Glg. 4.17.}$$

- σ Oberflächenladungsdichte
- e Elementarladung
- Φ_n Elektronenaustrittsarbeit des jeweiligen Kontaktpartners
- E Elektrische Feldstärke
- δe Abstand der Kontaktpartner während der Trennung
- D_n Dichte der Oberflächenladungszustände auf den beteiligten Stoffen

Anschaulich vorstellbar ist der Einfluss eines elektrostatischen Feldes auf die Aufladung durch Analyse des Elektronenverhaltens auf den Oberflächen. Wird ein positives elektrostatisches Feld angelegt, so regt dies aufgrund der Coulomb-Kraft negativ geladene Elektronen an, die Oberflächen zu verlassen bzw. sich stärker aus dem Stoff an die Oberfläche zu bewegen. Verlassen die Elektronen das Partikel im Zuge eines Kontakts, so verbleibt eine stärker positive Restladung als sich ohne elektrostatisches Feld erwarten ließe. Umgekehrt wird ein negatives elektrostatisches Feld negativ geladene Elektronen eher in die Tiefe eines Partikels drängen und durch die nun verarmte Oberfläche können leichter Elektronen von Kontaktpartnern aufgenommen werden, was zu einer stärker negativen triboelektrischen Aufladung führt (Abbildung 4.13.). Letztlich ergibt sich daraus eine Änderung der effektiven Elektronenaustrittsarbeiten der Partikel. Im Energiebändermodell bewirkt das Anlegen eines elektrostatischen Feldes also eine Bänderverbiegung an der Oberfläche.

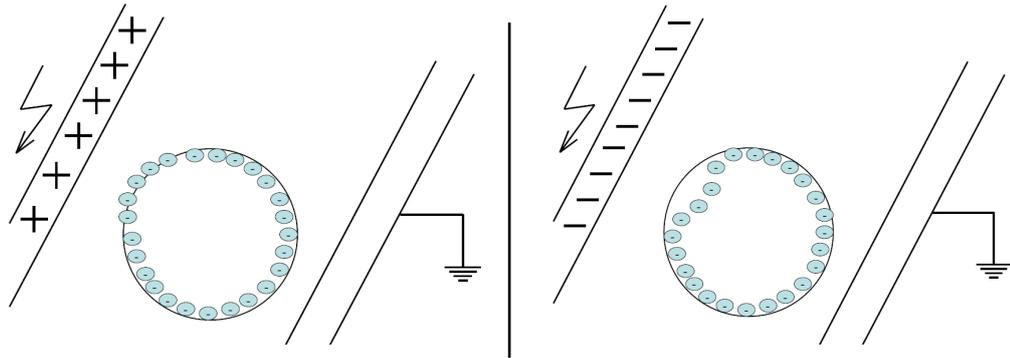


Abb. 4.13.: Einfluss eines elektrostatischen Feldes auf die Elektronenaustrittsarbeit eines Nichtleiters (schematisch)

Wenn man bedenkt, dass die Aufladung von Nichtleitern letztlich von den in der Stoffstruktur vorhandenen Fehlstellen und Fremdatomen abhängt, diese per definitionem zufällig und ungesteuert auftreten und durch diese Fehlstellen sowohl Akzeptor- wie auch Donatorniveaus geschaffen werden können, muss wohl davon ausgegangen werden, dass in der Realität eine Beurteilung der tatsächlichen triboelektrischen Aufladbarkeit von Nichtleitern nur nach eingehenden und detaillierten Untersuchungen bzw. Aufladetests möglich sein kann und Prognosen bestenfalls qualitative Aussagen hinsichtlich der erwarteten Polarität der beteiligten Stoffe liefern können. Auch zur prinzipiellen Funktionsweise der triboelektrischen Aufladung zweier Nichtleiter gibt es mehrere Auffassungen über sowohl die Art der Ladungsentstehung als auch über die relevanten Ladungsträger. Von einer überwiegenden Mehrheit von Autoren (Lowell, 1976; Duke and Fabish, 1978) werden Elektronen für die elementaren Ladungsträger gehalten. An dieser Stelle soll insbesondere ein Verweis auf die Arbeiten von Ernst (1986) gegeben werden, der selbst auf dem Gebiete der Elektroscheidung von Natriumchlorid, also einer ausgeprägten ionogenen Verbindung ohne jegliche elektrische Leitfähigkeit, Elektronen als Träger der Ladung identifizierte.^[34] Begründet wurde dies an jener Stelle mit der immer wieder auftretenden Korrelation zwischen der Höhe und Polarität der erreichten Ladungen und den Elektronenaustrittsarbeiten der Kontaktpartner.

Es gibt jedoch auch einige Arbeiten, die einen Beitrag zum Ladungsübergang sowohl durch Ionen als auch Materialübergang dokumentieren.^[35] Überraschenderweise können in einigen speziellen

Fällen sogar alle drei dieser Mechanismen (Elektronenübergang, Ionenübergang und Materialtransfer) gemeinsam auftreten (Castle, 1997), wobei der Übergang von Elektronen überwiegend als der wichtigste Mechanismus für den Ladungstransfer auch zwischen zwei Nichtleitern genannt wird.^[36]

4.5. Apparatebeschreibung

Nachfolgend sollen kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit die wichtigsten in der Elektroscheidung eingesetzten Sortierapparate beschrieben werden, um die Verknüpfung zwischen der bisher erwähnten theoretischen Funktion und der Umsetzung in die Praxis gemäß dem derzeitigen Stand der Technik herstellen zu können.

4.5.1. Elektrostatische Walzenscheider

Walzenscheider bestehen im Wesentlichen aus einer in den meisten Fällen geerdeten Walze, über die das Aufgabegut in ein elektrisches Feld gelangt. Dieses Feld wird von Hochspannungselektroden unterschiedlicher Ausführungen erzeugt, die üblicherweise in etwa in der „2-Uhr“-Position der Walze mit veränderbarem Abstand zu derselben angebracht sind. Das elektrische Feld bewirkt eine Auffächerung der Körner in Abhängigkeit von der (im Moment des Apparatedurchgangs vorhandenen) Oberflächenleitfähigkeit.

Das Elektrodensystem kann einerseits wechselweise als Walzen- oder Feindrahtelektrode, andererseits als Feindrahtelektrode mit zusätzlicher statischer Auslenkelektrode verwendet werden. Somit ist es möglich, Probematerial sowohl mittels des Prinzips der Kontaktpolarisation als auch durch Anwendung der Korona-Sortierung (mit oder ohne zusätzliche Beeinflussung der Ablenkung durch eine statische Ablenkelektrode) auf anwendbare Trennverfahren hin zu untersuchen und sowohl elektrostatische als auch elektrodynamische Sortierverfahren zur Trennung von gut und schlecht leitenden bzw. leitenden und nichtleitenden Mineralen anzuwenden.

Durch den Einsatz mehrerer verstellbarer Trennbleche werden Mehr-Produkt-Trennungen ermöglicht. Üblicherweise werden Sprühdrahtelektroden aus Wolfram verwendet und eine negative Hochspannung angelegt, da sich aufgrund der höheren Durchschlagsspannung bei negativem Potential höhere Ladungen auf den Körnern erzeugen lassen.

Das Schema eines Laborwalzenscheiders mit einer größeren Anzahl von Auffangkästchen für die Produkte ist in Abbildung 4.14. dargestellt. Durch diese Kästchen wird es möglich, einzelne Teile des Produktabwurfes zu untersuchen und eine Unabhängigkeit von gewählten Splittereinstellungen erzielt.^[37]

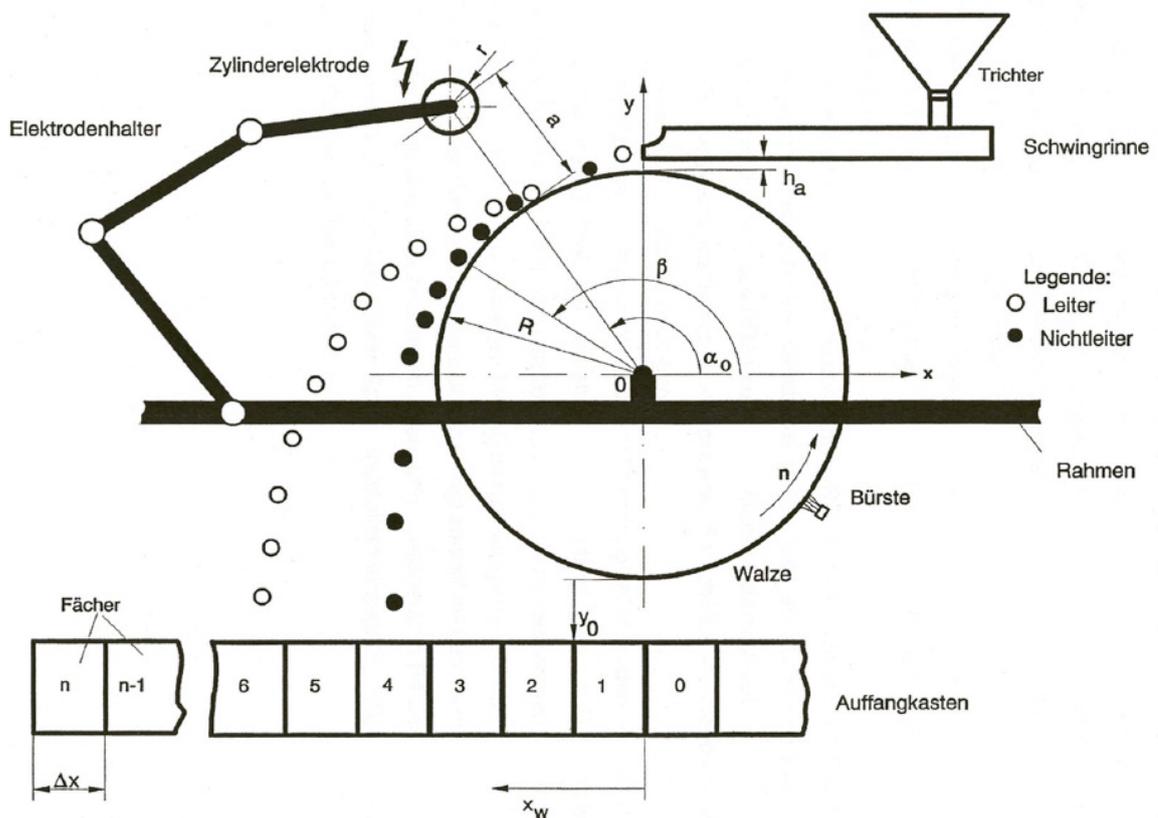


Abb. 4.14.: Schema eines Laborwalzenscheiders mit Auffangkästchen (nach Bergmann)

Die Hochspannungserzeugung erfolgt beispielsweise durch eine Zweipuls-Mittelpunktschaltung gemäß Abbildung 4.15.

Eine Weiterentwicklung eines solchen Laborwalzenscheiders wäre die Ausführung der Auffangkästchen als separate Faraday-Becher. Dadurch

wäre es möglich, auch die erzeugte Ladung in Abhängigkeit des Abwurfes zu bestimmen und weitergehende Forschung zu betreiben.^[38]

4.5.1.1. Zweipuls-Mittelpunktschaltung

Die Vorteile einer solchen Schaltung zur Hochspannungserzeugung liegen im einfachen, mit Labormitteln umsetzbaren Aufbau, der robusten analogen Bauweise sowie der guten Zugänglichkeit mit Oszilloskop bzw. handelsüblichem Multimeter.

Die einstellbare Wechselspannung U_{12} von 0-230 V wird beispielsweise in einem stellbaren Ringkerntransformator erzeugt. Diese Wechselspannung wird gegenphasig an zwei Hochspannungstransformatoren T_1 und T_2 geführt. Der Stelltransformator T_3 dient dem Abgleich der Scheitelwerte. Die Gleichrichtung erfolgt über die Hochspannungsdioden D_1 und D_2 , am Kondensator C_5 erfolgt die Glättung der Halbwellen. Die Widerstandsreihen an den Dioden dienen zur Strombegrenzung im Kurzschlussfall der als Impedanz Z dargestellten Hochspannungselektrode. Die Widerstände R_3 und R_4 teilen die an der Hochspannungselektrode anliegende Spannung zweckmäßig im Verhältnis 1:1.000, sodass die Darstellung der Gleichspannung über ein Oszilloskop (P_1) ermöglicht wird. Die Betrachtung der Wechselspannungen kann nach Spannungsteilung an C_1/C_2 bzw. C_3/C_4 gegen Masse erfolgen.

F_1 und F_2 sind Funkenstrecken, welche den Kondensator bzw. den Oszilloskopeingang vor Überlastung schützen.

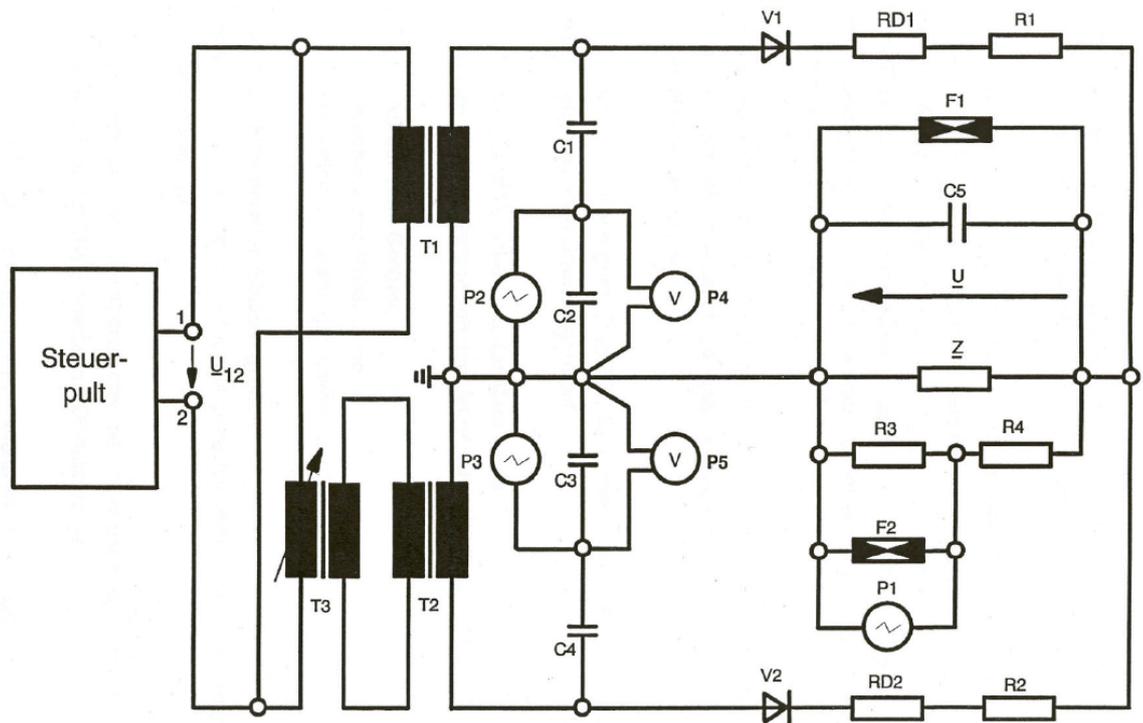


Abb.4.15.: Zweipuls-Mittelpunktschaltung zur Hochspannungserzeugung (nach Bergmann)

4.5.1.2. Einsatz von Walzenscheidern

Um die Trennleistung zu erhöhen, werden Walzenscheider in Betrieben sehr oft in einem Apparat hintereinander geschaltet. Die Produktführung erfolgt in Abhängigkeit der Sortieraufgabe, oftmals erscheinen 3 bis 4 Nachreinigungsstufen als die sinnvollste Lösung.^[39] Ein Beispiel einer Schaltung mehrerer Walzenscheider zur Aufbereitung von Schwermineralsanden zeigt Abbildung 4.16.

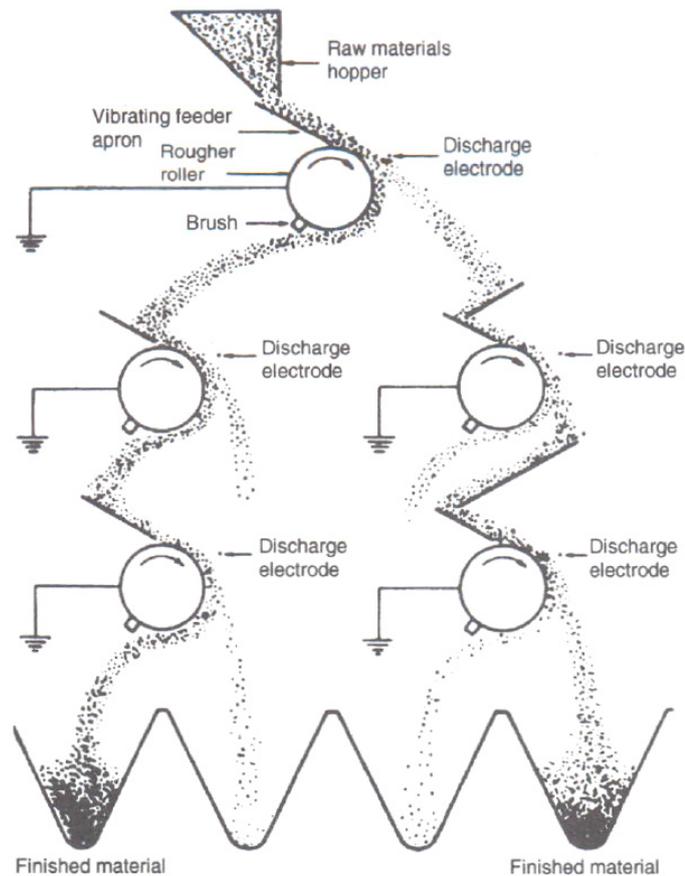


Abb. 4.16.: Mehrstufige Sortierung auf Walzenscheidern (nach Wills)^[40]

4.5.2. Kammerscheider

Kammer- oder Freifallscheider bestehen aus einer vorgeschalteten Aufladeeinheit unterschiedlicher Ausformung sowie einer Trennkammer mit Elektroden, wobei diese ebenfalls verschiedenartig gestaltet sein können. Oftmals erfolgt die elektrostatische Aufladung der Partikel triboelektrisch in einer Wirbelschicht, für die anschließende Sortierung werden Elektrodenplatten verwendet, zwischen denen die Körner hindurchfallen und währenddessen entsprechend der Polarität ihrer Aufladung gemäß

$$F_C = Q_P \cdot E \quad \text{Glg. 4.18.}$$

abgelenkt werden. Die Elektroden können jedoch entsprechend den Erfordernissen angepasst werden. So wurden – als Sonderform für die Kaliindustrie – Elektroden in Form senkrecht stehender Röhren

entwickelt, die im Betrieb gedreht werden können, um eine Abreinigung des daran anhaftenden Feinguts zu ermöglichen.

Eine andere Möglichkeit, dies zu bewerkstelligen, wurde durch umlaufende Gummibänder realisiert, welche an der dem Feld abgewandten Seite abgebürstet werden konnten (siehe Modelle in Abbildung 4.18).^[41] Das Prinzip eines konventionellen Freifallscheiders zeigt Abbildung 4.17.

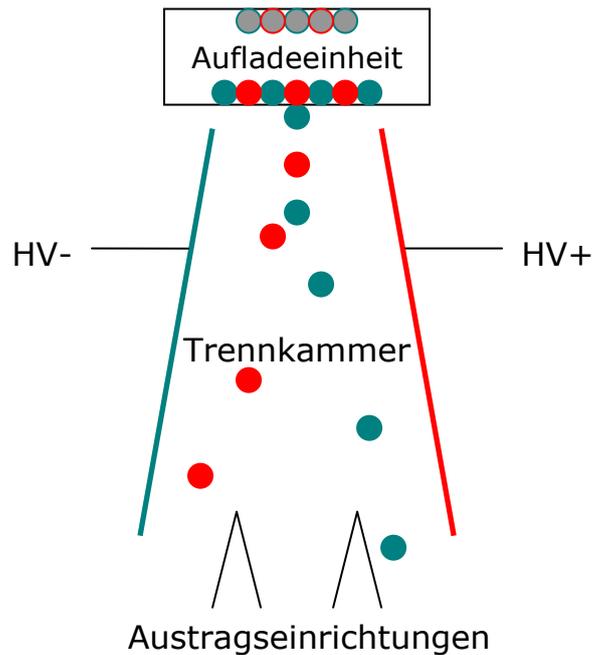


Abb.4.17.: Prinzipskizze eines Freifallscheiders

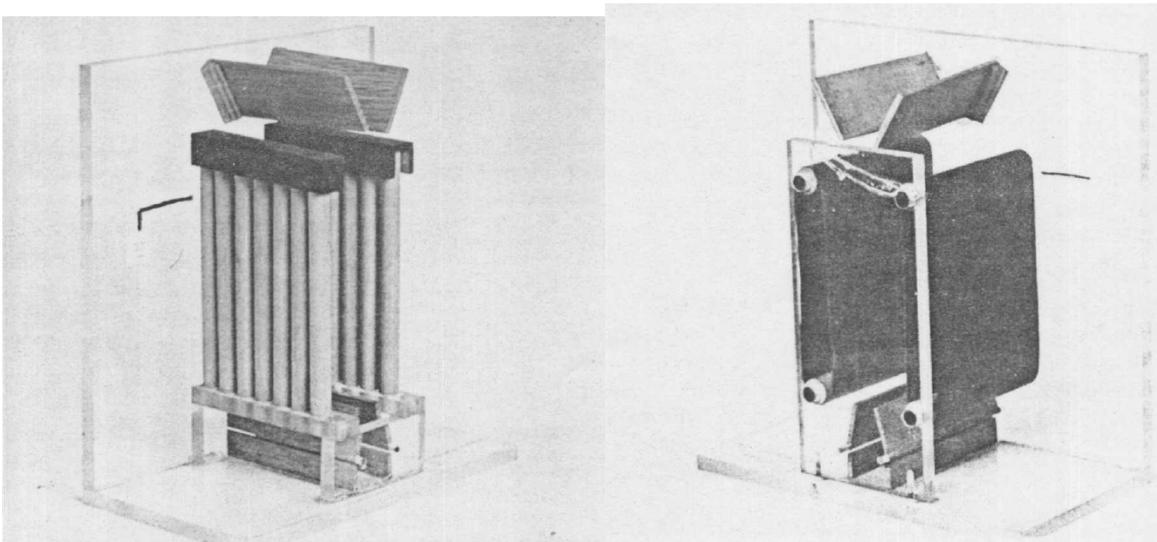


Abb. 4.18.: Modell eines Röhrenfreifallscheiders (links) und eines Bandfreifallscheiders (rechts) – (nach Fricke)

Der Einsatz von Freifallscheidern ist in der Mineralaufbereitung auf Korngrößen von ca. 100 μm bis 3 mm beschränkt. Diese Grenzen sind jedoch nur Erfahrungswerte, welche sich aus dem Einflussverhältnis von Schwerkraft und auftretenden Turbulenzeinflüssen zur Coulombkraft ergeben. Untersuchungen am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an feineren Kornklassen von Flussspat-/Schwerspatgemengen führten zu überraschend guten Trennergebnissen im elektrostatischen Freifallscheider, welche zwar im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden können, unter anderem jedoch in der Dissertation von Stadtschnitzer (2010) detailliert behandelt wurden.^[42]

Die Hochspannungserzeugung in Kammerscheidern erfolgt heutzutage üblicherweise mit pulsweitenmodulierten Hochspannungsgeneratoren. Deren Vorteile liegen vor allem in hoher Kurzschlussfestigkeit, gutem Automatisierungspotential und kompakter Bauform. Nachteilig sind die hohen Anschaffungskosten von mehreren Tausend Euro je Einheit und die geringen Eingriffsmöglichkeiten in die Elektronik. Einen Hochspannungsgenerator vom Typ Elmex KNH64 zeigt Abbildung 4.19.



Abb. 4.19.: Hochspannungsgenerator Eltex KNH64

4.5.3. Sonderformen und Neuentwicklungen von Elektroscheidern

4.5.3.1. Sonderformen nach dem Aushebeprinzip

In Abwandlung der Walzenscheider werden Aushebescheider gebaut, in denen das Aufgabegut nicht auf Walzen, sondern auf Rutschblechen getrennt wird. Das elektrostatische Feld wird von einer oder mehreren Hochspannungselektroden unterschiedlicher Geometrien erzeugt, welche entlang der Rutsche angeordnet sind. Durch die erhöhte Anzahl von Elektroden soll die Trenncharakteristik verbessert und somit die Anzahl der notwendigen Sortierstufen reduziert werden.^[43] Weiters kann bei solchen Elektroscheidern zwischen Ausführungen mit Trennblechen und Sieben unterschieden werden. In beiden Fällen werden die leitenden Körner gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.3.1 ausgehoben, Nichtleiter folgen der Rutsche bzw. fallen durch das Sieb.

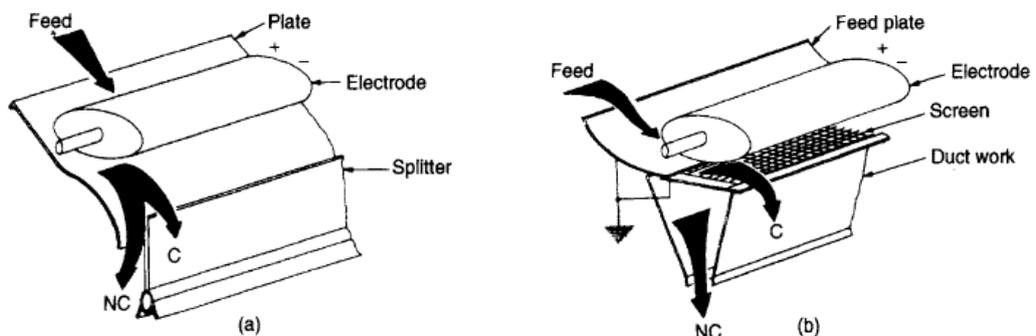


Abb. 4.20.: Elektroscheider mit Rutschblechen, ausgeführt mit Trennblech (a) und Sieb (b) - (nach Wills)^[44]

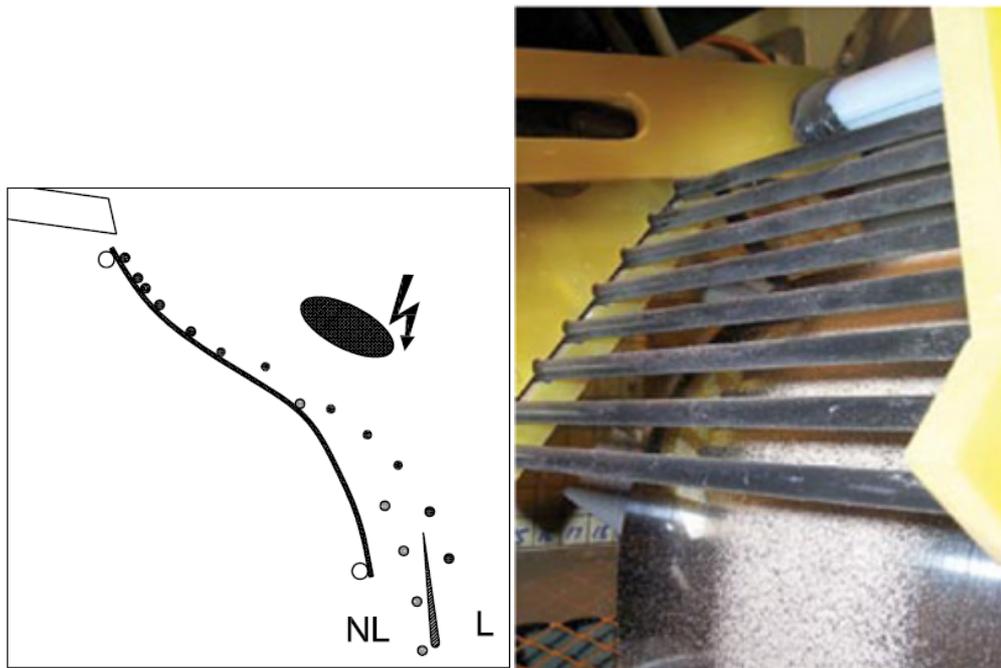


Abb. 4.21.: Aushebescheider (Prinzipskizze und Ausführung)

Foto: Outotec^[45]

4.5.3.2. Bandscheider

In den 80er-Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden Elektroscheider für die Rückgewinnung unverbrannten Kohlenstoffs aus in Kraftwerksprozessen hergestellten Flugaschen entwickelt. Diese Elektroscheider bestehen im Wesentlichen aus einem dünnen, perforierten Kunststoffgurt bzw. -band, der/das in der Trennzone auf einen schmalen Spalt zusammengeführt wird und so einen Prozessraum bildet, in dem Teilchen durch die schnell gegeneinander laufenden Bandteile triboelektrisch aufgeladen werden. Der grundlegende Unterschied zu konventionellen Elektroscheidern besteht bei diesen Systemen darin, dass die triboelektrische Aufladung und die Sortierung im elektrischen Feld in einem gemeinsamen Verfahrensgang erfolgen. Die Besonderheit dieser Scheider stellt die Möglichkeit dar, feinkörnige Mineralgemenge mit Partikelgrößen kleiner $100\ \mu\text{m}$ bei hohen Durchsatzraten zu trennen.

Der Gurt läuft bei solchen elektrostatischen Bandscheidern zwischen zwei parallelen, flächigen Elektroden hindurch.^[46] Körner, die über einen oder mehrere Aufgabevorrichtungen in den Trennraum gelangen,

werden intensiv bewegt, laden sich dabei triboelektrisch gegen das Gurtmaterial auf und wandern aufgrund der entstehenden Ladung in Richtung der gegenpolig geladenen Elektrode. Dort werden sie vom entsprechenden Gurt-Trum in eine Richtung gefördert. An den Enden des Elektroscheiders erfolgt der Produktaustrag. Durch die hohen Scherkräfte wird Agglomerationen entgegengewirkt, zudem erfolgt der Produkttransport im Scheider nicht gravitativ, sodass es möglich wird, im Bandscheider bei hohen spezifischen Durchsätzen auch feinste Körner voneinander zu trennen. Ein Prinzip-Bild dieses Scheidertyps zur Aufbereitung (Pyritabreicherung) von Kohle in vertikaler Ausformung zeigt Abbildung 4.22.,^[47] neuere Apparate werden mit horizontal laufendem Band gebaut, wodurch ein Schwerkrafteinfluss beim Transport der Körner im elektrostatischen Feld gänzlich vermieden, im Gegenzug aber ein Schwerkrafteinfluss bei der Trennung im elektrostatischen Feld in Kauf genommen wird.

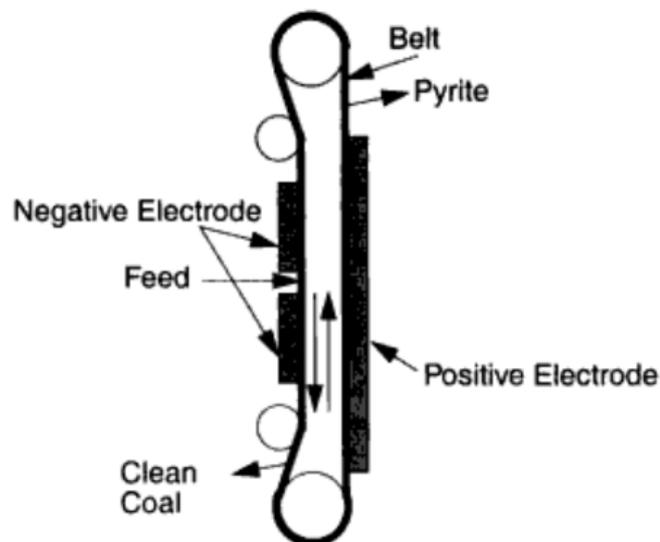


Abb.4.22.: Schema eines elektrostatischen Bandscheiders in vertikaler Bauform (nach Kawatra und Eisele)

Der Vorteil von Bandscheidern liegt klar in den hohen erzielbaren Durchsätzen.^[48] Abbildung 4.23. zeigt eine Prinzipskizze eines solchen Scheiders der Firma Separation Technologies, LLC.^[49]

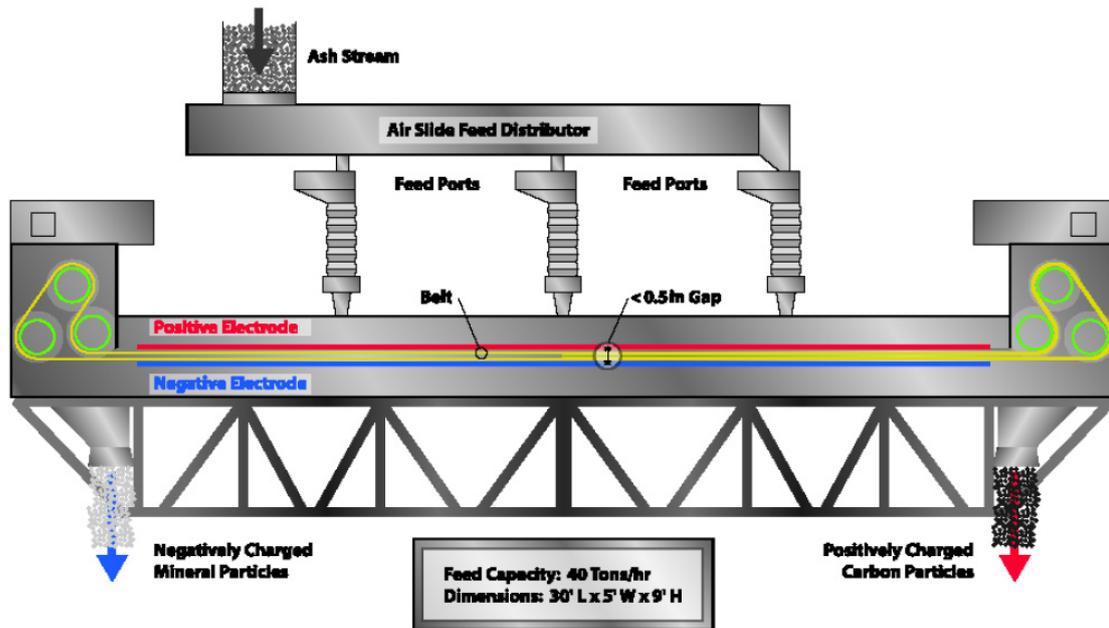


Abb. 4.23.: Prinzipskizze eines Bandscheiders der Firma ST (nach Bittner)

5. Untersuchungsvorbereitungen und Erstversuche

5.1. Konstruktion einer triboelektrischen Aufladeeinheit

5.1.1. Rahmenbedingungen für die Konstruktion

Um die triboelektrische Aufladung relevanter Mineralphasen zu untersuchen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine triboelektrische Aufladeeinheit konzipiert, konstruiert und in Betrieb genommen. Folgende Bedingungen für die triboelektrische Aufladung in der Aufladeeinheit sollten gewährleistet werden:

- Zwei Elektrisatoren (z.B. Polyethylen) bewegen sich in einem geringen Abstand mit einer Relativgeschwindigkeit von bis zu 37 m/s gegeneinander,
- die triboelektrische Aufladung von Körnern erfolgt unter hoher Scherbeanspruchung in einem Spalt zwischen den beiden Kunststoffen,
- der triboelektrischen Aufladung ist ein einstellbares elektrostatisches Hochspannungsfeld überlagert.

5.1.2. Konstruktionsidee

Um das Apparateprinzip einer solchen Aufladeeinheit unter Laborbedingungen nutzen zu können und verlässliche Messergebnisse aus den wissenschaftlichen Testreihen zu bekommen, wurden zusätzlich nachstehende Bedingungen für die Konstruktion formuliert:

- Die Messung der (massespezifischen) triboelektrischen Aufladung soll zeitnah möglich sein, um einen Abfluss der erzeugten Ladung vor der Messung auszuschließen,

- der Versuchsstand soll zur Ermittlung klimatischer Einflussgrößen in einer regelbaren Klimakammer aufgestellt werden können,
- die verwendete Probenmenge je Versuch soll 150 g oder weniger betragen.

Zur Erfüllung der genannten Bedingungen wurde eine Kunststofftrommel, rotierend in einem metallisch ummantelten Kunststoffgehäuse mit einer Luftspaltweite von 3 mm konzipiert. Der Erstentwurf der triboelektrischen Aufladeeinheit ist aus Abbildung 5.1. ersichtlich.

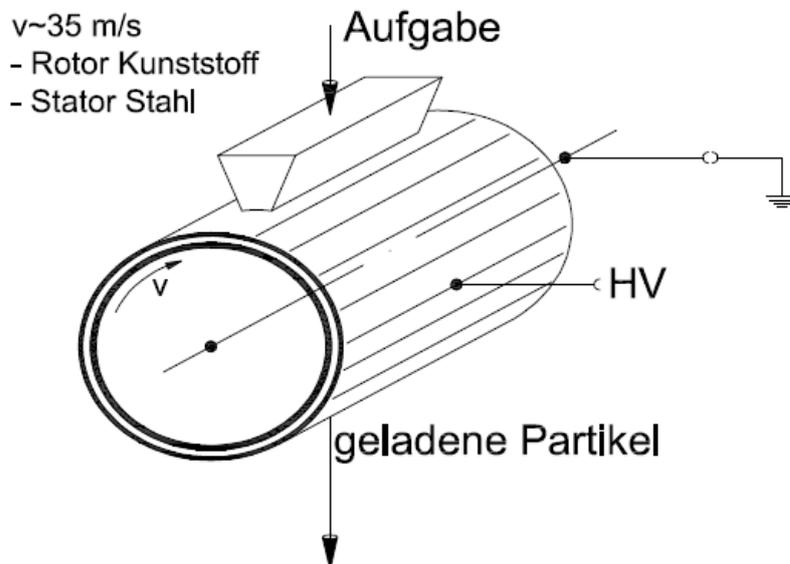


Abb. 5.1.: Konzept für die triboelektrische Aufladeeinheit

5.1.3. Aufbau der triboelektrischen Aufladeeinheit

Zur Untersuchung des triboelektrischen Aufladeverhaltens verschiedener Minerale wurde letztlich eine Aufladeeinheit konstruiert, welche aus einem elektrisch angetriebenen, zylindrischen Rotor in einem ebenfalls zylindrisch ausgeführten Stahlgehäuse besteht. Durch Positionierung eines Faraday-Bechers unterhalb des Auslaufes der Versuchseinrichtung ist es möglich, die erzeugte triboelektrische Gesamtladung von in die Aufladeeinheit eingebrachtem Probematerial zu messen. Durch

Normierung auf die Probemasse bzw. die -oberfläche kann somit das triboelektrische Aufladeverhalten unterschiedlicher Mineralphasen verglichen werden.

Der Antrieb des Rotors erfolgt elektrisch über eine Asynchronmaschine, die zur Einstellung der Drehzahl an einen Frequenzumformer angeschlossen wurde. Sowohl auf die zylindrische Rotoroberfläche als auch auf die Innenwandung des Stahlgehäuses (Stator) wird eine leicht austauschbare Kunststoffhülse aufgeschoben, wodurch der Einfluss unterschiedlicher Kontakt-Werkstoffe hinsichtlich ihrer Aufladewirkung auf die eingesetzten mineralischen Proben untersucht werden kann. Die Oberfläche der rotierenden Kunststoffhülse ist für den Materialtransport profiliert ausgeführt (siehe Abbildung 5.4.).

Das Stahlgehäuse ist zur Umgebung hin elektrisch isoliert aufgebaut. Daher ist es durch Anlegen eines elektrischen Potentials möglich, ein radiales elektrisches Feld aufzubauen, welches der triboelektrischen Aufladung im Luftspalt zwischen geerdetem Rotor und dem Gehäuse überlagert werden kann. Der Außendurchmesser der Kunststoffhülse am Rotor beträgt 200 mm, der Innendurchmesser der Statorhülse 206 mm. Die Rotorlänge beträgt 200 mm.

Die Aufgabe von Probematerial in die Aufladeeinheit erfolgt von oben über eine Vibrorinne und eine sich verengende Stahlschurre.

Die Hochspannung für das elektrische Feld wird durch ein pulsweitenmoduliertes Hochspannungsschaltnetzgerät, Typ „fug HCP 35-6.500“ erzeugt. Die Erdung des Rotors erfolgt durch Kohlebürsten auf der Antriebswelle. Auf- und Kreuzriss der triboelektrischen Aufladeeinheit stellt Abbildung 5.2. dar, Abbildung 5.3. zeigt den einsatzbereiten Versuchsstand in der begehbaren Klimakammer.

Um den Einfluss unterschiedlicher Umgebungsbedingungen untersuchen zu können, wurde die Aufladeeinheit mitsamt den zugehörigen Nebenaggregaten in einer regelbaren Klimakammer aufgebaut. Die regelmäßige Kontrolle der am Frequenzumformer angezeigten Drehzahl erfolgt optisch durch ein Stroboskop.

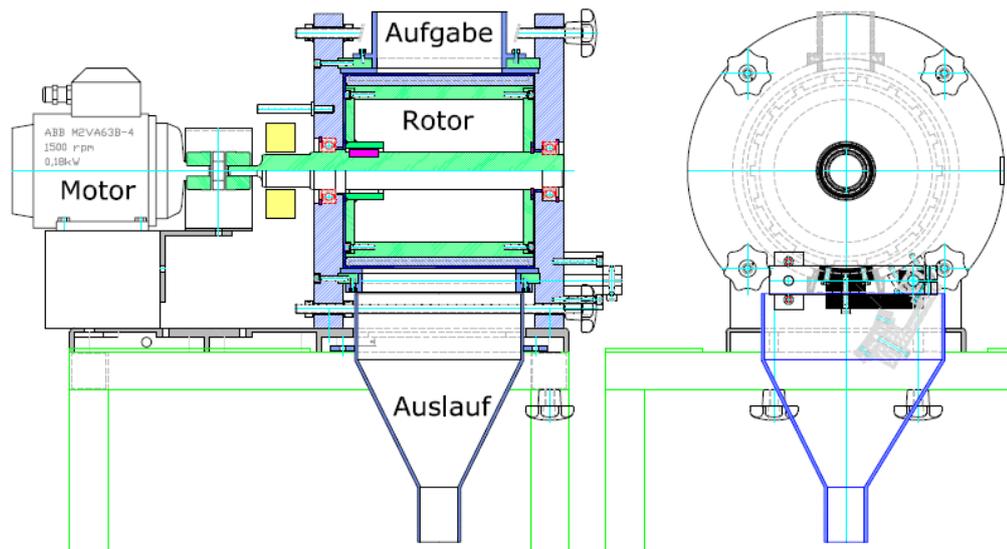


Abb. 5.2.: Technische Zeichnung der konstruierten triboelektrischen Aufladeinheit

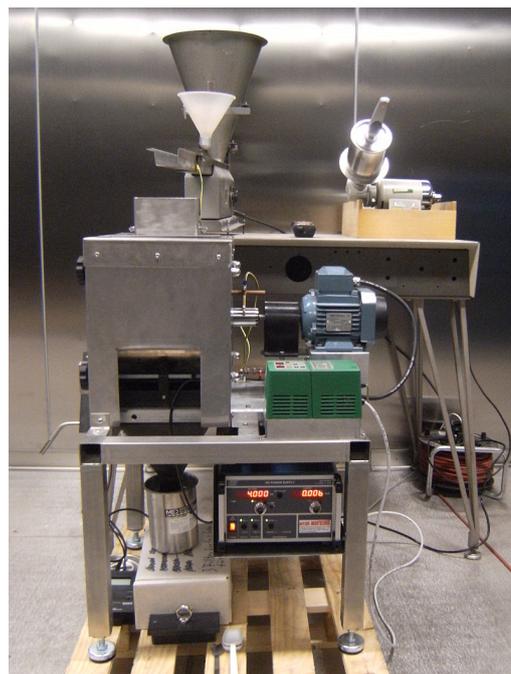


Abb. 5.3.: Versuchsaufbau zur triboelektrischen Ladungsmessung in der Klimakammer

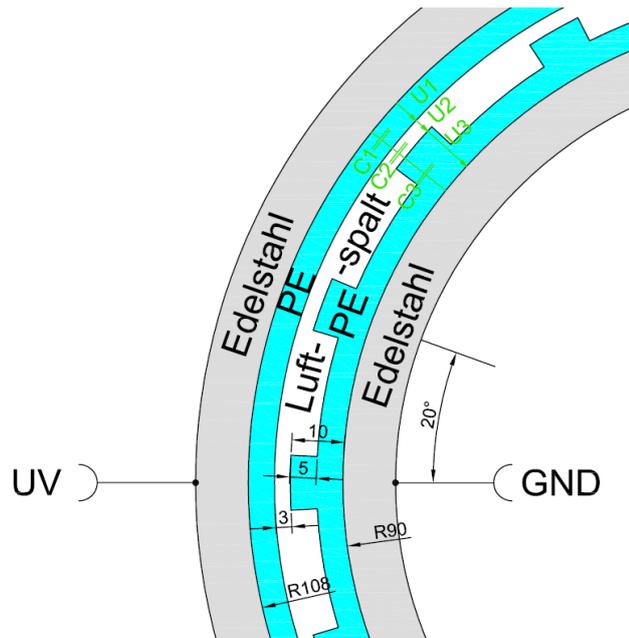


Abb. 5.4.: Aufbau des Rotor-Stator-Systems der triboelektrischen Aufladeeinheit

5.1.4. Ladungsmessung mittels Faraday-Becher

Zur Messung der auf den untersuchten Proben entstandenen elektrischen Ladungsmenge wurde ein Faraday-Becher unterhalb des Austragschachtes der triboelektrischen Aufladeeinheit positioniert.

Der Faraday-Becher besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Metallzylindern mit Boden, welche durch geschäumtes Polyethylen sehr gut elektrisch gegeneinander isoliert sind. Der äußere Zylinder dient zur Abschirmung von externen Störungseinflüssen. Geladene Körner, die nach erfolgtem Durchgang durch die triboelektrische Aufladeeinheit in den Faraday-Becher gelangen, erzeugen gemäß dem Influenzladungsprinzip eine gegensinnige elektrische Ladung auf der Oberfläche des inneren Zylinders, welche über eine abgeschirmte Verbindungsleitung an ein Coulomb-Meter vom Typ „Monroe 284“ gelangt. Der Anschluss an das Coulomb-Meter erfolgt über einen BNC-Steckverbinder.

Der Eingang des Coulomb-Meters besteht aus einem invertierenden Operationsverstärker in Integratorschaltung. Die über einen Vorwiderstand an den Operationsverstärker gelangenden Ladungsträger laden den Kondensator C_M der Gegenkopplung auf eine von der Ladungsmenge abhängige Spannung U_M auf. Bei bekannter Größe des Messkondensators kann über die Beziehung

$$Q_M = U_M \cdot C_M \quad \text{Glg. 5.1.}$$

auf die Gesamtladung der Körner im Faraday-Becher geschlossen werden. Diese wird vorzeichenrichtig am Display des Coulomb-Meters angezeigt.

Nach erfolgter Messung der Gesamtladung wird die im Faraday-Becher aufgefangene Probe gewogen, um die massespezifische Ladung q_M in nC/g bzw. durch Kenntnis der massespezifischen Oberfläche a_M (BET-Messung) die Oberflächenladungsdichte σ_p in nC/m² ermitteln zu können.

$$q_M = Q_M \frac{1}{m_P} \quad \text{Glg. 5.2.}$$

$$\sigma_P = Q_M \frac{1}{m_P a_M} \quad \text{Glg. 5.3.}$$

5.1.4.1. Überprüfung des Messaufbaus

Zur regelmäßigen Überprüfung der Messanordnung wird die in Abbildung 5.5. dargestellte Schaltung verwendet. In einen Kondensator bekannter Kapazität $C_L = 10,0 \text{ nF}$ wird durch eine Gleichspannung U_L (z.B. $10,0 \text{ V}$) eine Ladungsmenge $Q_L = C_L \cdot U_L$ (z.B. 100 nQ) eingebracht. Durch Umlegen des Schalters S_L wird der Kondensator in den Faraday-Becher entladen. Der Wert der vorausberechneten Ladung Q_L muss daraufhin am Display des angeschlossenen Coulomb-Meters innerhalb der Toleranzgrenze von $\pm 2\%$ angezeigt werden. Ist dies nicht der Fall, ist eine neuerliche Kalibrierung des Coulomb-Meters erforderlich. Durch Verwendung eines weiteren Kondensators anderer Kapazität können zwei Messbereiche des Coulomb-Meters überprüft werden.

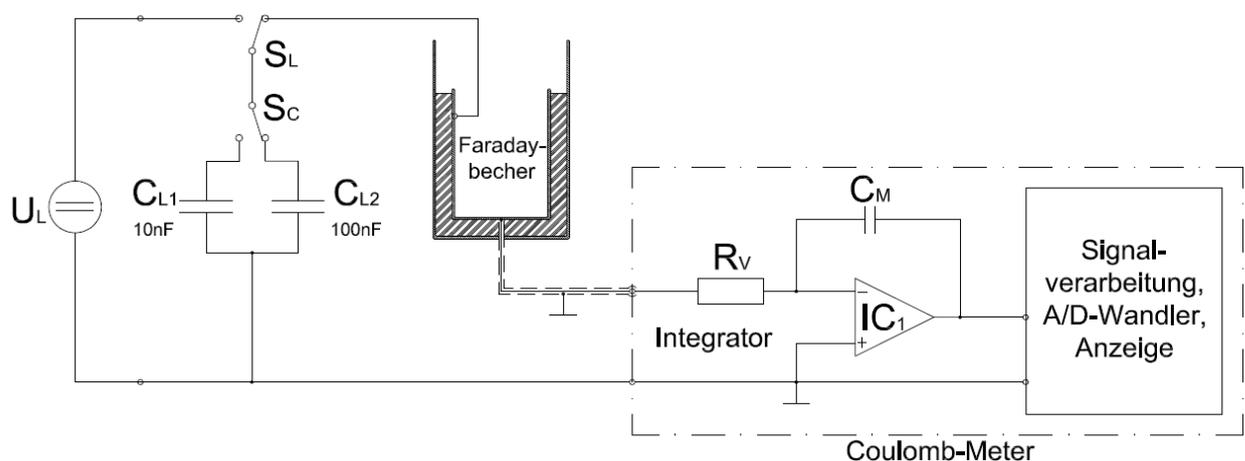


Abb. 5.5.: Schaltung zur Überprüfung des Coulomb-Meters

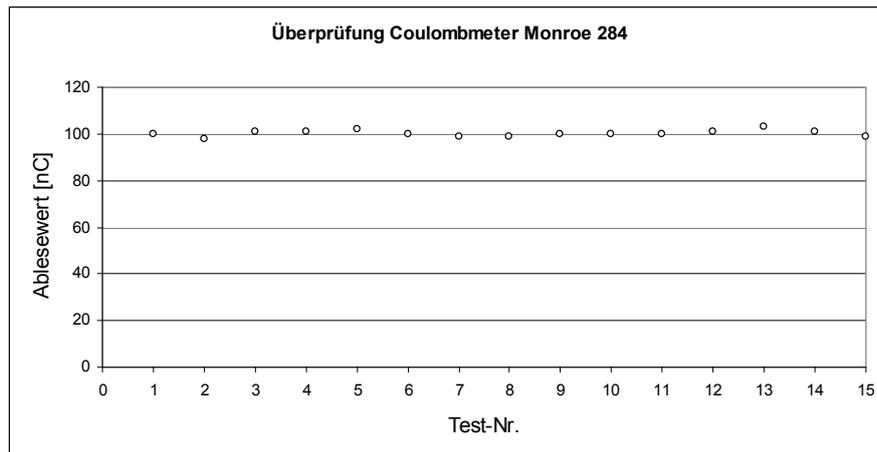


Abb. 5.6.: Ergebnisse einer Überprüfung des zur Ladungsmessung eingesetzten Coulomb-Meters

5.2. Erstversuche zur Überprüfung des Versuchsstandes

Um das triboelektrische Aufladeverhalten von Mineralphasen in einem Rohgut beurteilen zu können, ist es notwendig, Ladungsmessungen an einzelnen Reinmineralproben durchzuführen, da ansonsten lediglich die Summenladung der verwendeten Mineralgemenge ermittelt werden könnte. Somit käme es bei der Ladungsmessung zur Kompensation der gegensätzlichen Ladungen und in weiterer Folge zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen. Übergeordnetes Ziel der Untersuchungen zum Aufladeverhalten ist es jedoch, jene Betriebsbedingungen auszukundschaften, wo möglichst große Ladungsunterschiede zwischen den untersuchten Reinmineralproben vorliegen.

Aus diesem Grund wurden für die durchgeführten Versuche möglichst reine Referenzproben aus unterschiedlichen Mineralen hergestellt.

Eine Auflistung der für die Erstversuche verwendeten Mineralproben gibt Tabelle 5.1.

Bezeichnung	Beschreibung
Marmor Italien	Marmor mit 3% HCl.-unlöslichem Anteil, vorwiegend zur Einarbeitung in die Untersuchungen zu verwenden
Quarz	Quarzsand mit 93% SiO ₂ -Anteil aus der Elektrostatikscheidung einer Feldspat/Quarzaufbereitung; Stabmühlenprodukt
Feldspat	Microclin aus sehr homogenen Handstücken, Stabmühlenprodukt.

Tab. 5.1.: Übersicht der verwendeten Reinmineralproben für die Durchführung der ersten triboelektrischen Aufladeversuche

5.2.1. Ergebnisse der ersten triboelektrischen Untersuchungen

Die Versuche zum triboelektrischen Aufladeverhalten wurden in einer elektronisch regelbaren, begehbaren Klimakammer durchgeführt. Vor Beschickung der triboelektrischen Aufladeeinheit erfolgte eine mehrstündige Konditionierung des jeweiligen Probematerials zur Angleichung an die eingestellten Umgebungsbedingungen. Nach Überprüfung der Aufgaberrate der verwendeten Vibrorinne und einer fünfminütigen Einlaufzeit der triboelektrischen Aufladeeinheit wurden mehrere Ladungsmessungen je eingestelltem Parameter durchgeführt.

5.2.1.1. Triboelektrische Ladungs-Remanenz

Wird ein elektrischer Nichtleiter triboelektrisch geladen, so kann aufgrund der mangelnden Leitfähigkeit diese Ladung nur sehr langsam von seiner Oberfläche abfließen. Wird die Probe erneut der triboelektrischen Aufladeeinheit zugeführt, so erhalten die Körner zusätzliche Ladungsträger, welche somit bis zum Erreichen einer Sättigung die elektrische Ladung erhöhen. Abbildung 5.7. zeigt die gemessenen spezifischen Ladungen, wenn bereits in der triboelektrischen Aufladeeinheit geladenes Material wiederholt innerhalb weniger Minuten wieder aufgegeben wird. Aufgrund dieses Effekts, der hier als triboelektrische Ladungsremanenz bezeichnet wird, zeigt sich

die Notwendigkeit, für jeden durchgeführten Versuch frisches Probematerial zu verwenden.

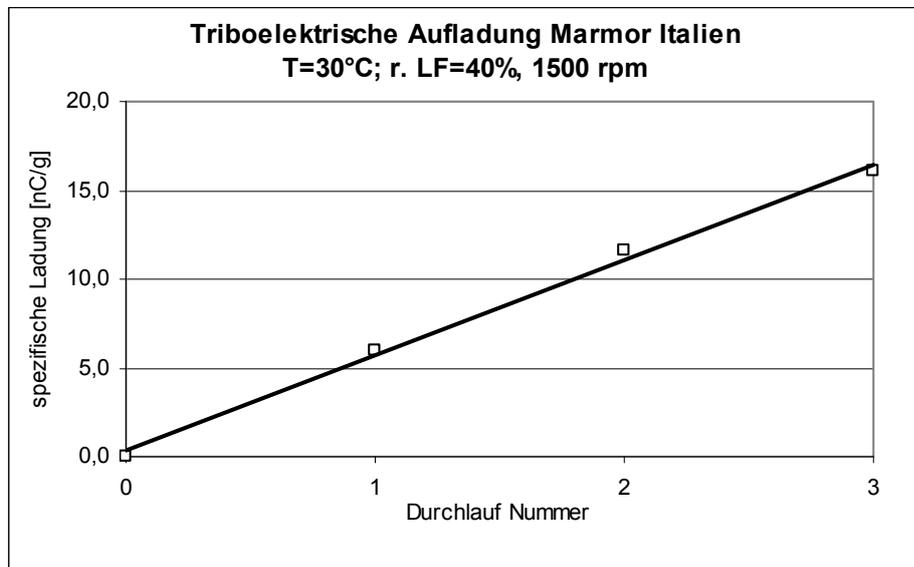


Abb. 5.7.: Triboelektrische Ladungsremanenz (Marmor Italien)

5.2.1.2. Einfluss der Rotordrehzahl

Durch die Erhöhung der Rotordrehzahl werden die auf die eingebrachten Partikel wirkenden Flieh- und Scherkräfte sowie die Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Stator erhöht. Aufgrund des intensiveren Kontakts zwischen Körnern und der Oberfläche von Rotor und Stator wird eine betragsmäßig stärkere triboelektrische Aufladung erwartet. Abbildung 5.8. stellt die Abhängigkeit der Aufladung von der Rotordrehzahl sowie zur besseren Verallgemeinerung der Werte die Abhängigkeit der Aufladung von der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors dar.

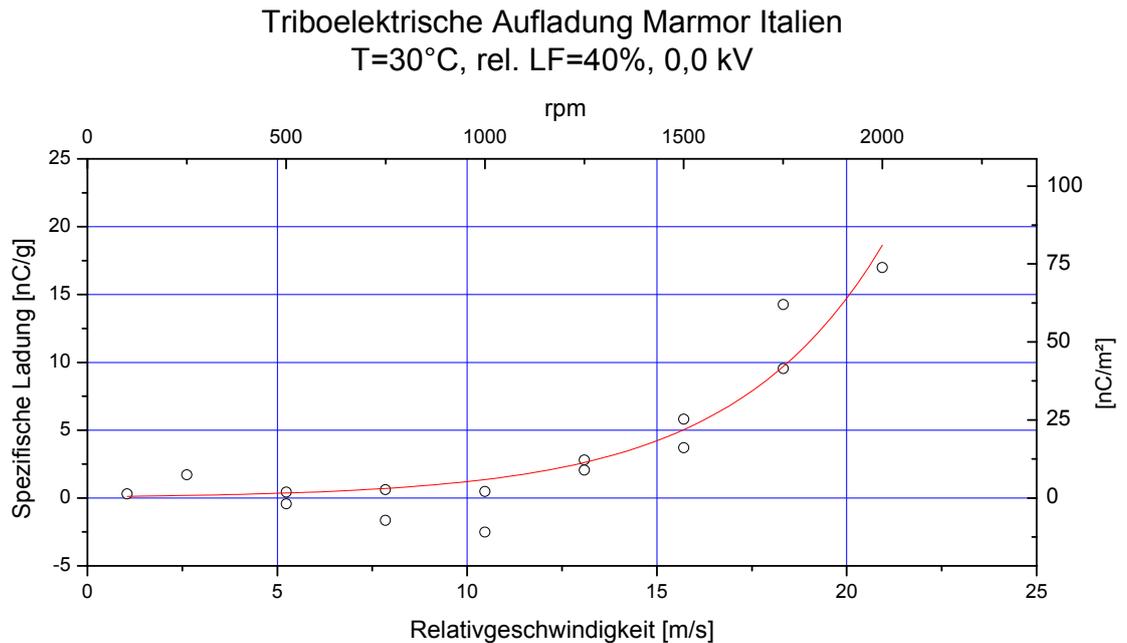


Abb. 5.8.: Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Umfangsgeschwindigkeit bzw. der Rotordrehzahl der triboelektrischen Aufladeeinheit (Marmor Italien)
– Ausgleich exponentiell

Aus den Versuchen ist eine deutliche Abhängigkeit des Aufladeverhaltens von der Rotordrehzahl ersichtlich. Während es unterhalb einer Umfangsgeschwindigkeit von 10 m/s kaum zu einer triboelektrischen Aufladung der Körner kommt, ist bei Umfangsgeschwindigkeiten ab etwa 12 m/s ein deutlicher Anstieg der Aufladung zu messen.

5.2.1.3. Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes auf die Aufladung

Wird während der Versuchsdurchführung ein elektrisches Potential an den Stator der triboelektrischen Aufladeeinheit angelegt, so beeinflusst dieses das Aufladeverhalten der Körner in der Weise, dass ein höheres Potential auch eine höhere spezifische Aufladung bewirkt.

Ein angelegtes positives Potential verstärkt eine positive Kornladung, negatives Potential bewirkt eine stärker negative Aufladung. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl bei Untersuchung von Marmor als auch bei Einsatz von Quarz bzw. Feldspat als Probematerial.

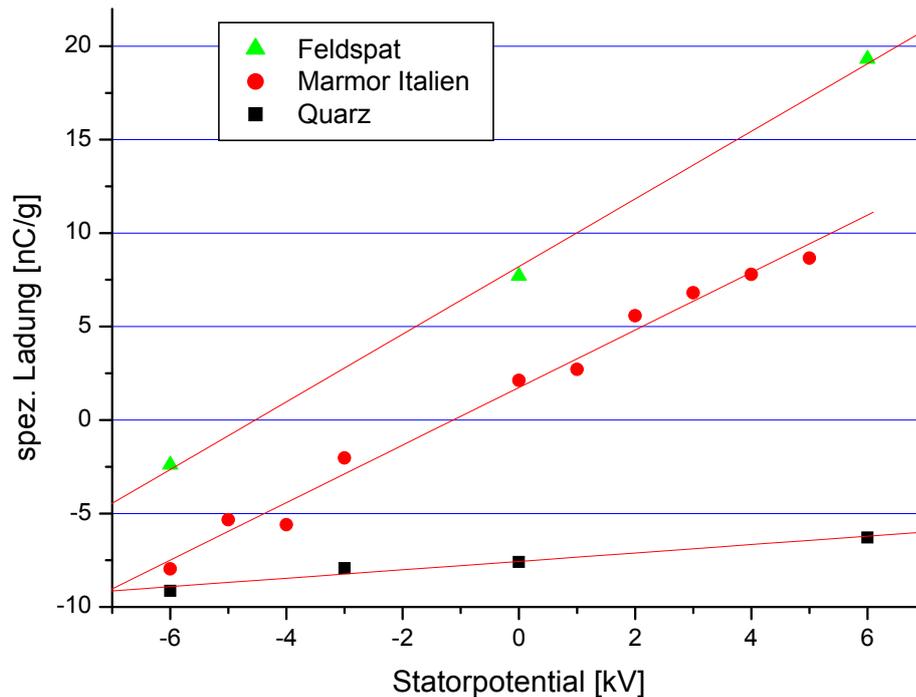


Abb. 5.9.: Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens vom angelegten elektrischen Potential – Ausgleich linear

Die Abhängigkeit der Ladung vom angelegten Potential weist bei vielen Proben einen linearen Zusammenhang auf, der Gradient der Ladungsänderung ist jedoch unterschiedlich. Quarz ändert seine spezifische Aufladung von $-9,14 \text{ nC/g}$ bei einem Statorpotential von $-6,0 \text{ kV}$ auf $-6,28 \text{ nC/g}$ bei $+6,0 \text{ kV}$. Somit beträgt die Änderung der spezifischen Aufladung in etwa $0,28 \text{ nC/g je kV}$. Bei Marmor und Feldspat beträgt diese Änderungsrate ca. $1,35$ bzw. $1,80 \text{ nC/g je kV}$.

5.2.1.4. Einfluss der Luftfeuchte der Umgebung

Die Schichtdicke der an Körneroberflächen anhaftenden Wassermoleküle ist stark von der in der Umgebungsluft vorrätigen Wassermenge und damit von den atmosphärischen Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte und Dampfdruck abhängig.^[50] Wasser bzw. Hydroxydgruppen an Körneroberflächen verändert die elektrischen Eigenschaften der Partikel und führen durch Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit und der Elektronenaustrittsarbeit zu einem geänderten triboelektrischen Aufladeverhalten der Körner. In Abbildung 5.10. wird das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung dargestellt.

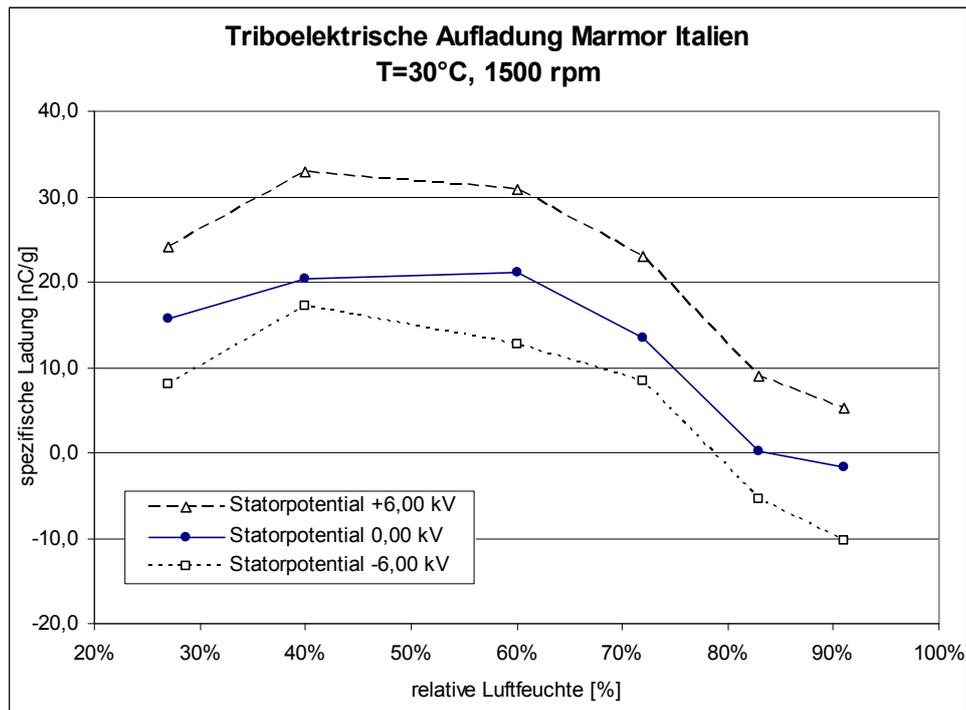


Abb. 5.10.: Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der relativen Luftfeuchte der Umgebung (Marmor Italien)

Wie aus Abbildung 5.10. ersichtlich, kommt es bei sehr niedrigen und sehr hohen Luftfeuchten zu einer geringeren Aufladung der Körner und es zeigt sich für die untersuchte Probe ein Auflademaximum bei 40% relativer Luftfeuchte und positivem Statorpotential.

5.2.1.5. Einfluss der Prozesstemperatur

Höhere Temperaturen der Umgebung und des Aufgabegutes führen in der Elektroscheidung in vielen Fällen zu besseren Trennergebnissen. [51,52,53]

Um den Einfluss der Umgebungs- und Materialtemperatur auf die triboelektrische Aufladung zu untersuchen, wurden Aufladerversuche von Marmor bei einer Umgebungstemperatur zwischen -10 °C und +50 °C nach entsprechender Konditionierzeit in der Klimakammer durchgeführt.

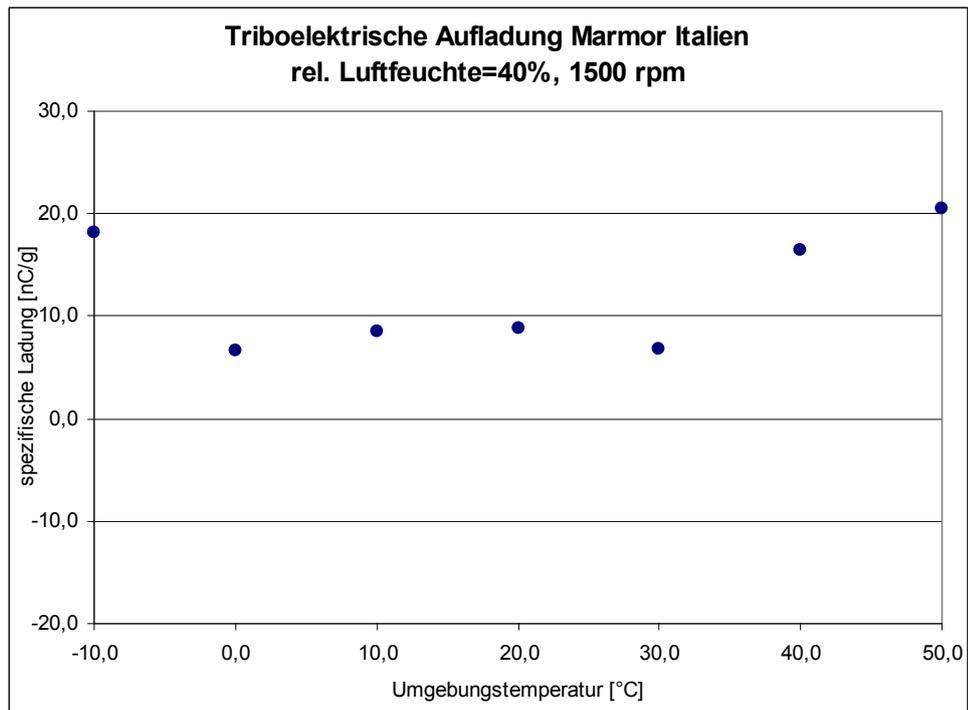


Abb. 5.11.: Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Temperatur (Marmor Italien)

Wie aus Abbildung 5.11. ersichtlich, sinkt die spezifische triboelektrische Aufladung von $-10,0\text{ °C}$ auf $0,0\text{ °C}$ ab, bleibt bis $30,0\text{ °C}$ in etwa gleich und erhöht sich bei Temperaturen ab $30,0\text{ °C}$ signifikant. Die erhöhte Ladung unter $0,0\text{ °C}$ kann vermutlich auf das Frieren der auf den Körnern vorhandenen Wassermoleküle zurückgeführt werden.

5.2.1.6. Einfluss der Aufgaberate

In mehreren Versuchsreihen wurde die Abhängigkeit der triboelektrischen Ladung auf die Aufgaberate untersucht. Es kann bei steigendem Durchsatz sehr deutlich eine degressive spezifische Aufladung erkannt werden, welche durch behinderte Korn-Oberflächenkontakte bei größerer Partikelanzahl in der Aufladeeinheit erklärt werden kann.

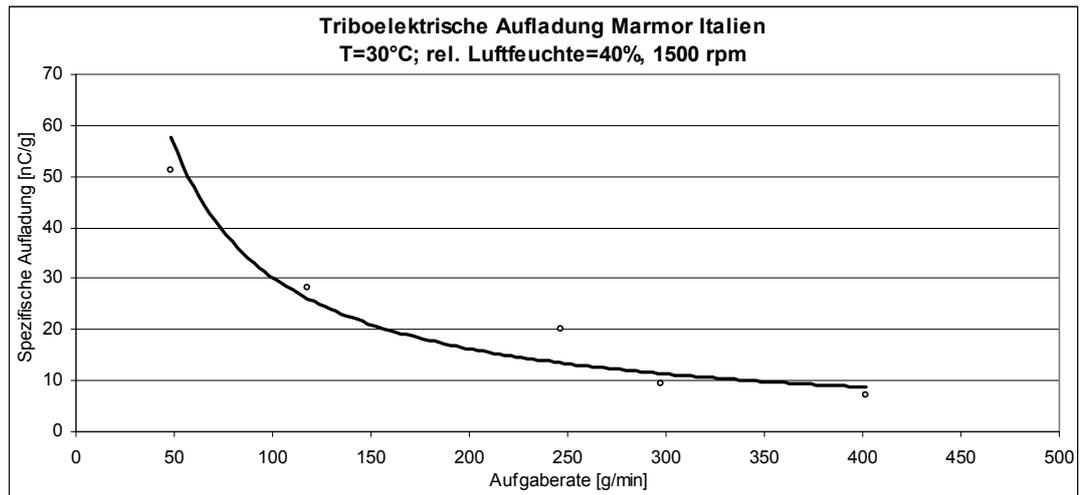


Abb. 5.12.: Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Aufgaberate (Marmor Italien) – Ausgleich potentiell

5.2.1.7. Erstuntersuchungen mit chemisch konditionierten Proben

Der Einfluss von Chemikalien und der Oberflächenmodifikation zur Veränderung des triboelektrischen Aufladeverhaltens wurde bereits mehrfach diskutiert und untersucht.^[54,55,56,57]

Um das Aufladeverhalten von chemisch konditionierten Proben zu untersuchen und daraus eine Möglichkeit zur effektiveren Trennung im elektrischen Feld abzuleiten, wurden systematische Versuchsserien mit unterschiedlichen Reagenzien an den weiter oben bezeichneten Proben durchgeführt. Folgende Reagenzien wurden für diese systematischen Untersuchungen herangezogen:

Bezeichnung	Summenformel	Konzentration in wässriger Lösung [mol/l]
Ölsäure	$C_{18}H_{34}O_2$	0,005 – 0,015
Benzoessäure	$C_7H_6O_2$	0,005 – 0,015
Salicylsäure	$C_7H_6O_3$	0,005 – 0,015
Kochsalz	NaCl	0,100 – 1,000
Natriumhydroxid	NaOH	0,050 – 0,150

Tab. 5.2.: Verwendete Reagenzien zur Untersuchung des Einflusses auf das triboelektrische Aufladeverhalten

Die Konditionierung in Glasgefäßen erfolgte durch Einwaage der für die gewünschte Konzentration entsprechenden Menge an Konditioniermittel in 2,0 l destilliertem Wasser, Homogenisierung durch ein Rührwerk und Zugabe von 2,0 kg Probematerial während des Rührens. Die Konditionierdauer betrug 15 Minuten. Danach wurde die Trübe auf einer Filternutsche entwässert und bei 60 °C getrocknet. Die Desagglomeration erfolgte nach Trocknung im Keramikmörser. Eine graphische Darstellung des Ablaufs der chemischen Konditionierung zeigt Abb. 5.13.

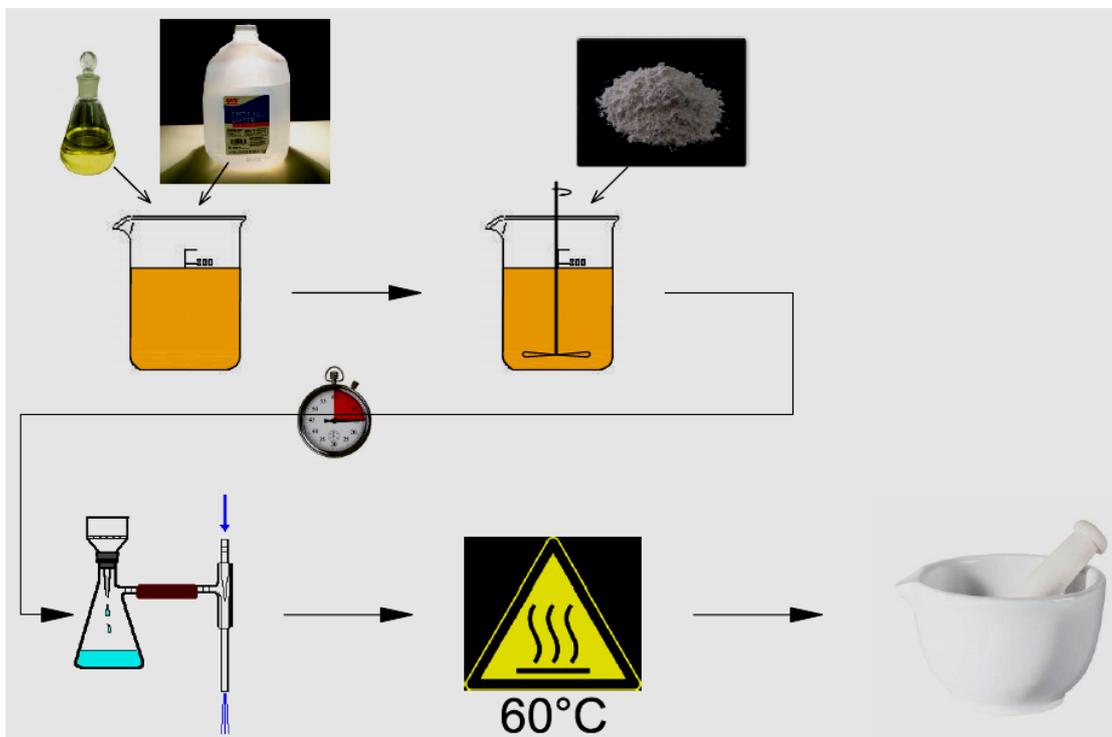


Abb. 5.13.: Schema der durchgeführten chemischen Konditionierung

5.2.1.8. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Erstversuchen mit chemischen Reagenzien

Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen zeigten eine deutliche Zunahme der Partikelladung durch Einsatz von Ölsäure. Die Untersuchungen mit Kochsalz zeigten ebenfalls eine Steigerung der Aufladbarkeit. Auffällig ist, dass sich die Aufladung zwar durch eine geringe Menge an Reagenz sofort ändert, bei Erhöhung der Konzentration jedoch nicht mehr weiter signifikant ansteigt.

Die Steigerung der Ladung zeigt sich durch Verwendung von Ölsäure weit

dramatischer als mit Kochsalz: Während sich die spezifische Ladung nämlich bei Konditionierung mit Kochsalz von etwa 20 nC/g bei unkonditioniertem Probematerial auf 40 nC/g bei 1,0 mol/Liter in etwa verdoppelte, so steigerte sich die Aufladung bei Verwendung von Ölsäure in den Erstversuchen mit maximal 105 nC/g cirka um das 10-fache (Abbildung 5.14. und 5.15.).

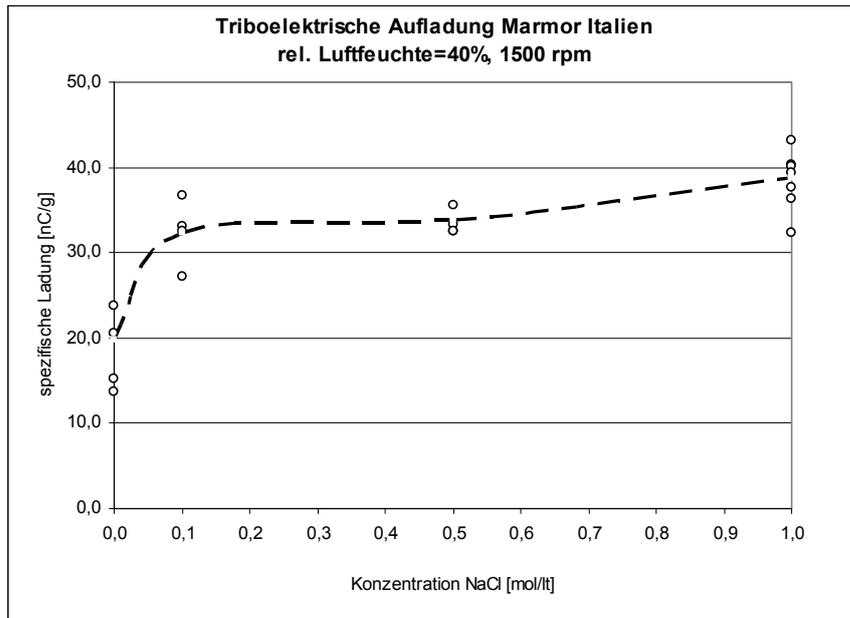


Abb. 5.14.: Triboelektrisches Aufladeverhalten bei Verwendung von Kochsalz (Marmor Italien)

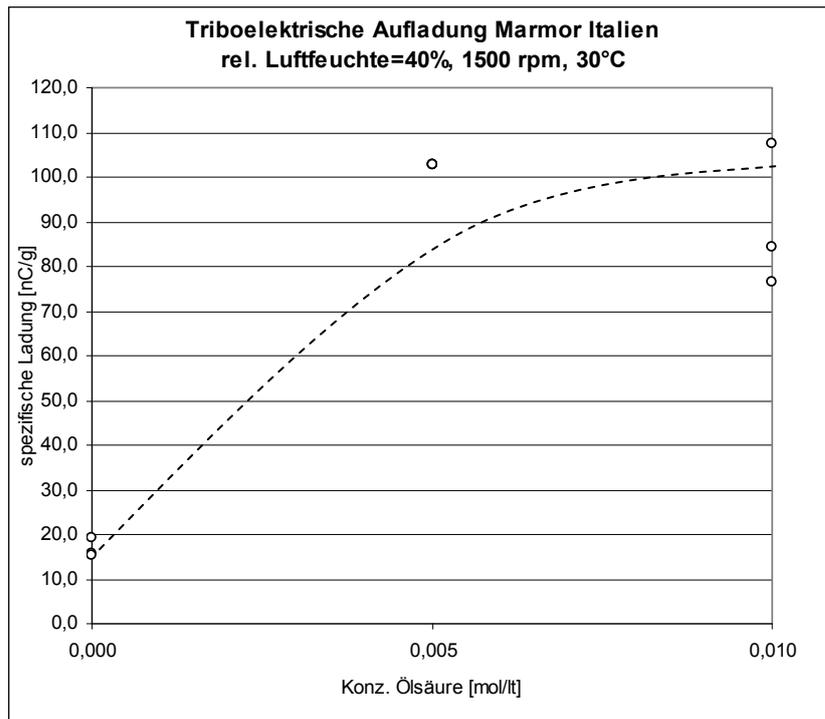


Abb. 5.15.: Triboelektrisches Aufladeverhalten bei Verwendung von Ölsäure (Marmor Italien) – Ausgleich manuell

6. Versuche zur triboelektrischen Aufladung prozessrelevanter Reinmineralproben

6.1. Probenbeschreibung

Als für die Versuche geeignete Korngrößenklasse wurden Proben mit einem d_{50} -Wert von in etwa $35\ \mu\text{m}$ bei $100\% < 200\ \mu\text{m}$ definiert.

Nach Durchführung erster Tastversuche (siehe dazu Abschnitt 5.2.1) wurden die nachfolgend beschriebenen mineralischen Proben für die weiteren systematischen Untersuchungen herangezogen.

6.1.1. Marmor

Um das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor weiter zu untersuchen, wurden händisch zwei möglichst monomineralische Proben aus einem österreichischen Tagebau genommen und zur Überprüfung des Calciumcarbonatgehalts die jeweiligen salzsäureunlöslichen Anteile zu $0,58\%$ (Probe A) bzw. $1,37\%$ (Probe B) bestimmt. Zusätzlich wurden beide Proben sowie deren salzsäureunlöslicher Rückstand röntgendiffraktometrisch untersucht. Die Auswertung dieser Messungen ergaben Gehalte an Glimmermineralen von $0,43\%$ in Probe A und $0,26\%$ in Probe B sowie einen Quarzgehalt von $0,1\%$ bzw. $1,1\%$. Die Röntgendiffraktogramme des salzsäureunlöslichen Rückstandes beider Proben sind in Abbildung 6.1. dargestellt.

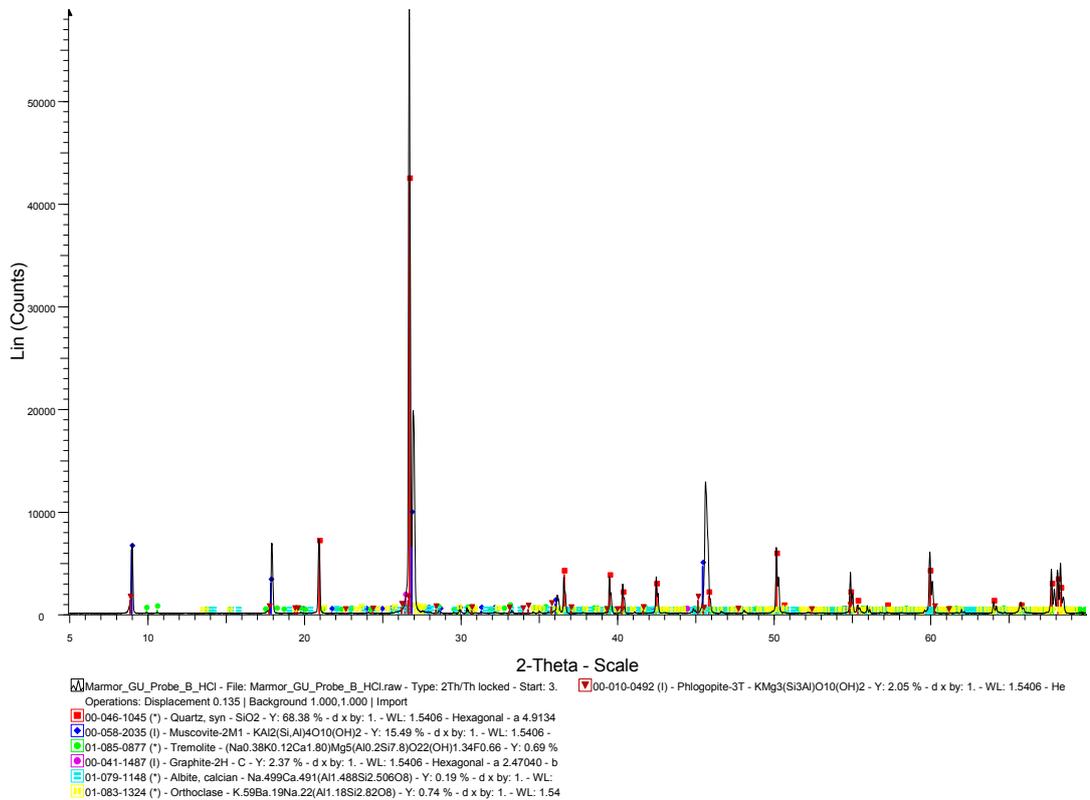
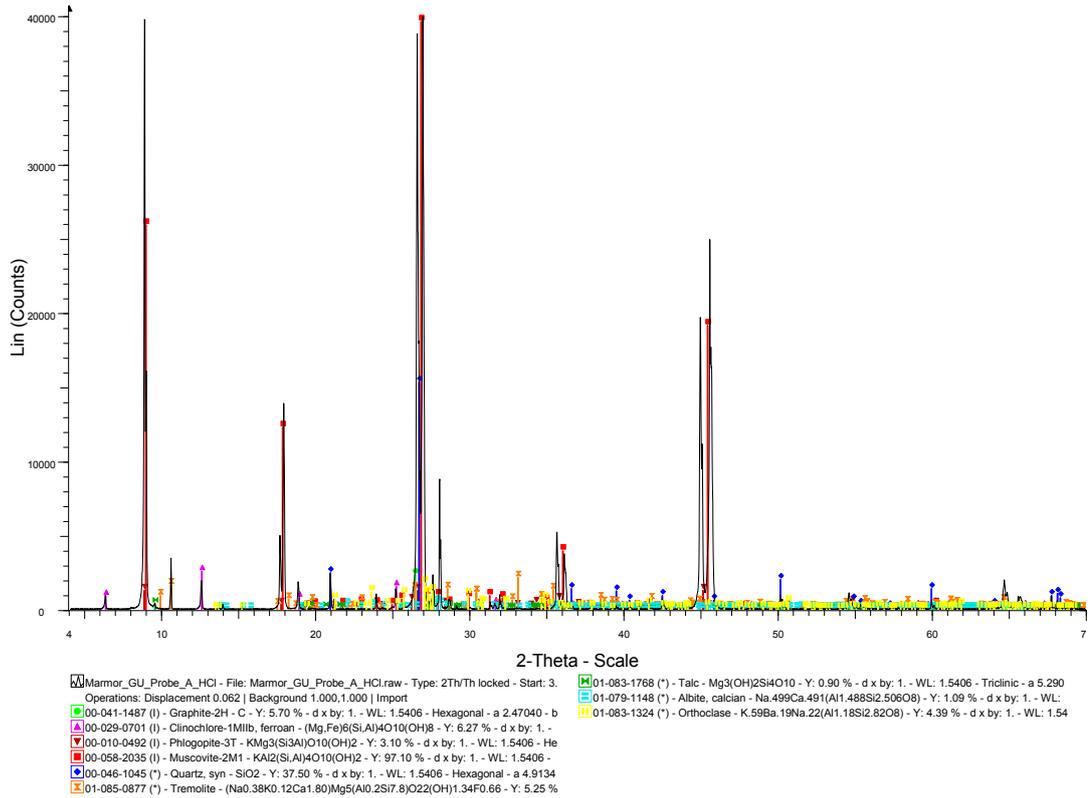


Abb. 6.1.: Röntgendiffraktogramm vom HCl-unlöslichen Rückstand der Marmorproben A (oben) und B (unten)

6.1.1.1. Korngrößenverteilung

Die Zerkleinerung der Handstücke auf die erforderliche Probenfeinheit erfolgte nach Vorzerkleinerung im Laborbackenbrecher in der Laborstiftmühle, die Analyse der Korngrößenverteilung erfolgte im CILAS-Lasergranulometer (Abbildung 6.2.).

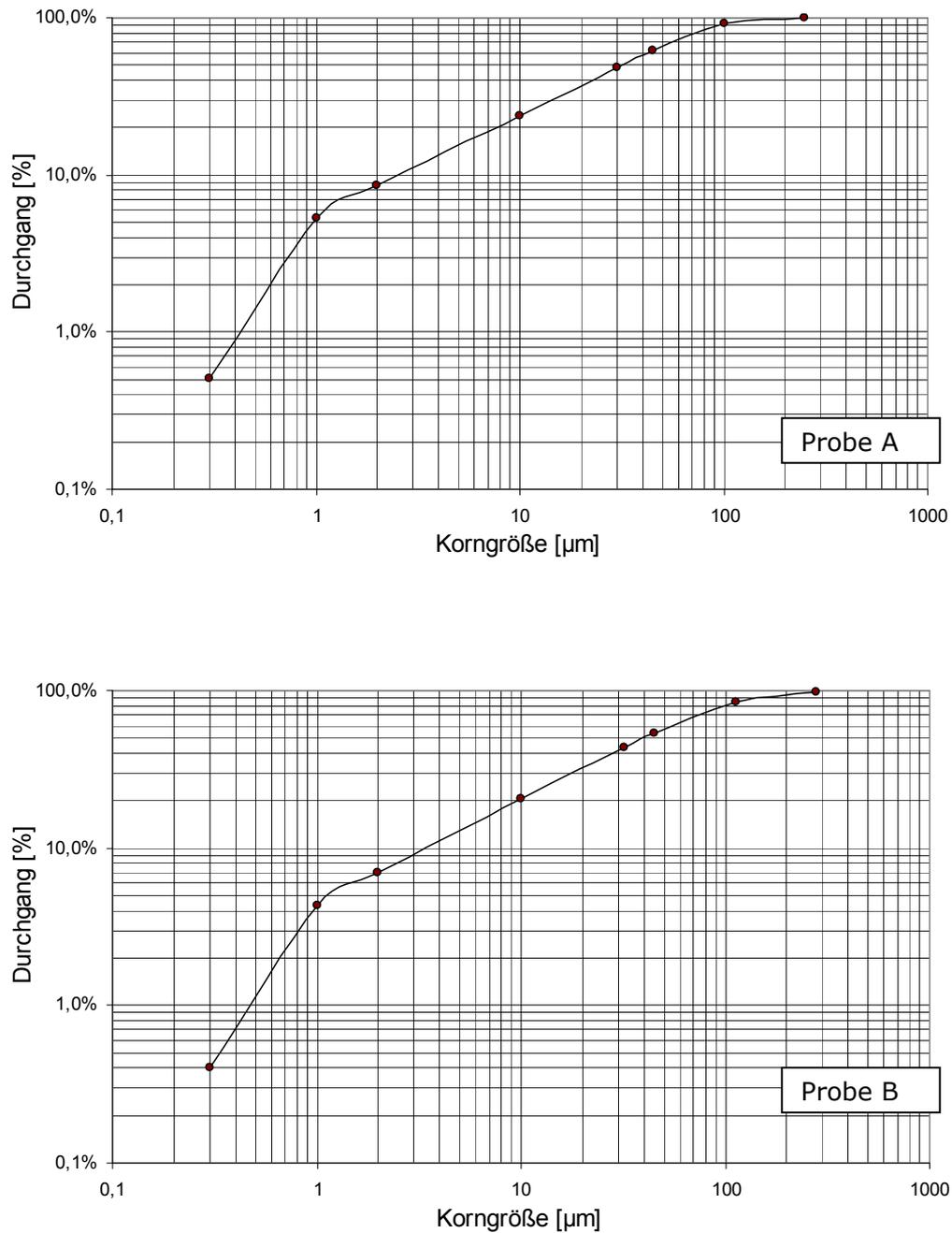


Abb. 6.2.: Korngrößenverteilung Marmor, Probe A (oben) und Probe B (unten)

6.1.1.2. Spezifische Oberfläche

Die spezifischen Oberflächen der Marmorproben A und B wurden nach der BET-Methode ermittelt. Sie betragen $0,59 \text{ m}^2/\text{g}$ bzw. $0,56 \text{ m}^2/\text{g}$.

6.1.2. Quarz

Hochreiner Quarz der entsprechenden Korngrößenklasse wurde als Handelsware erworben. Die Überprüfung auf Fremdbestandteile erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie. Durch diese Untersuchung konnten keinerlei andere Mineralanteile detektiert werden. Der Quarz wurde laut Angabe in der Produktspezifikation nicht chemisch behandelt und eisenfrei vermahlen.

6.1.2.1. Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Quarzprobe wurde im CILAS-Lasergranulometer ermittelt (siehe Abbildung 6.3.).

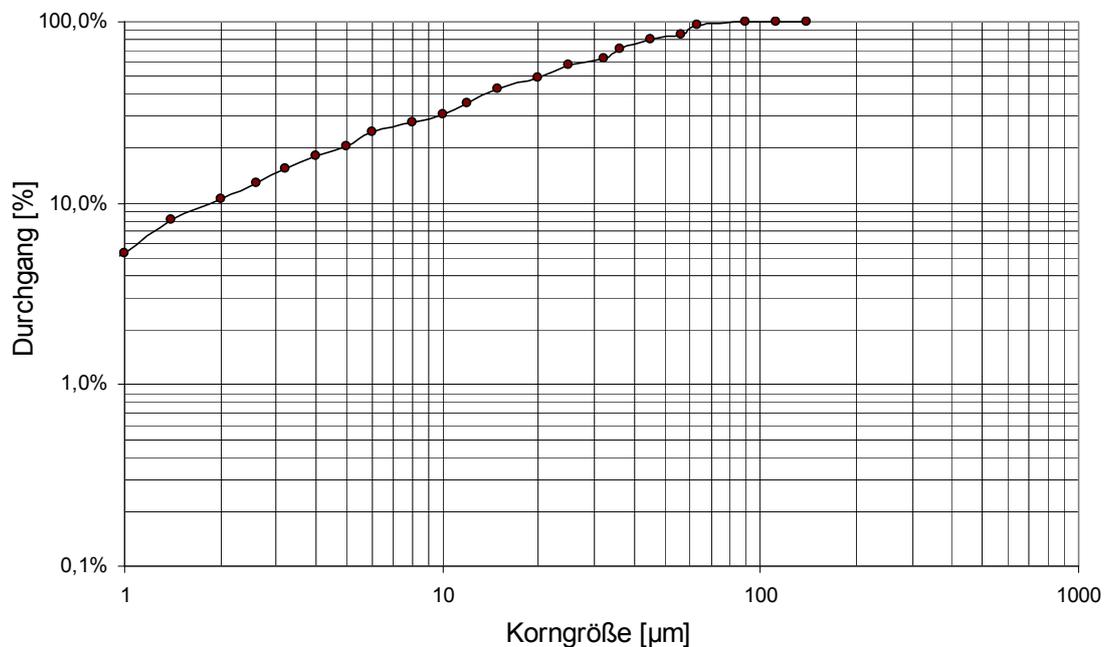


Abb. 6.3.: Korngrößenverteilung Quarz

6.1.2.2. Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche des Quarzproduktes wurde nach der BET-Methode ermittelt und beträgt 0,60 m²/g.

6.1.3. Feldspat

Um möglichst monomineralische, chemisch unbehandelte Feldspatprodukte für die triboelektrischen Aufladeversuche zu gewährleisten, wurden die systematischen Untersuchungen zum triboelektrischen Aufladeverhalten mit einem elektrostatisch sortierten und anschließend gemahlene Produkt durchgeführt. Das in Abbildung 6.4. dargestellte Diffraktogramm weist einen Quarz-Gehalt von 8,0% aus, die Feldspatminerale Mikroklin und Orthoklas haben einen Anteil von 85,4% bzw. 6,6% an der Gesamtprobe.

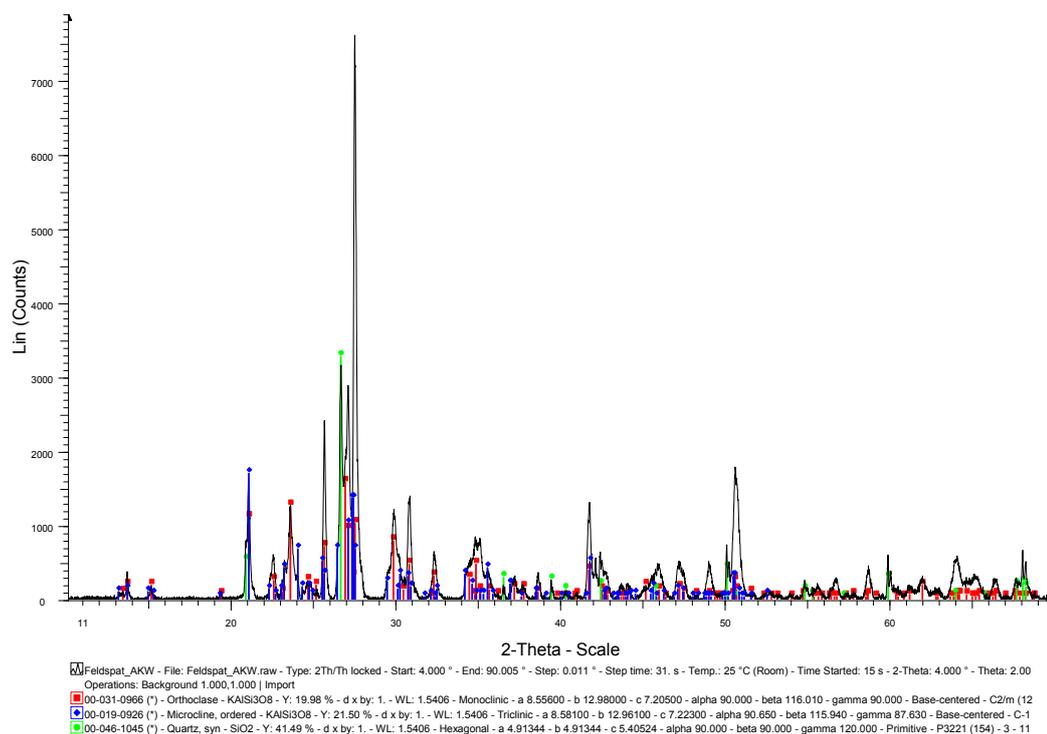


Abb. 6.4.: Röntgendiffraktogramm Feldspat, Produkt aus der Elektroscheidung

6.1.3.1. Korngrößenverteilung

Die Ermittlung der in Abbildung 6.5. dargestellten Korngrößenverteilung erfolgte im CILAS-Lasergranulometer.

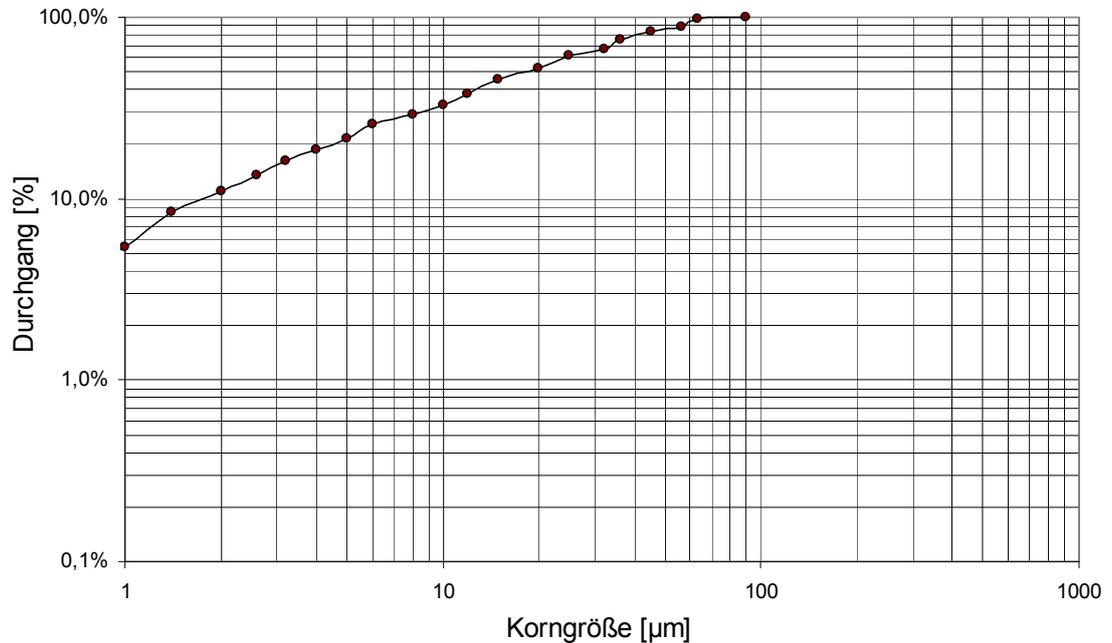


Abb. 6.5.: Korngrößenverteilung Feldspat

6.1.3.2. Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche der Feldspatprobe wurde nach der BET-Methode ermittelt. Sie beträgt 1,16 m²/g.

6.1.4. Pyrit

Zur Charakterisierung des triboelektrischen Aufladeverhaltens eines Minerals aus der Gruppe der Sulfide wurde Pyrit aufgrund seiner Häufigkeit als Begleitmineral bei Kalkgestein für die Untersuchungen gewählt. Die monomineralisch vorliegende Probe wurde als Handelsware bezogen. Die röntgendiffraktometrische Untersuchung zeigte keinerlei detektierbare Nebenbestandteile in der Pyritprobe.

6.1.4.1. Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Pyritprobe wurde im CILAS-Lasergranulometer ermittelt (siehe Abbildung 6.6.).

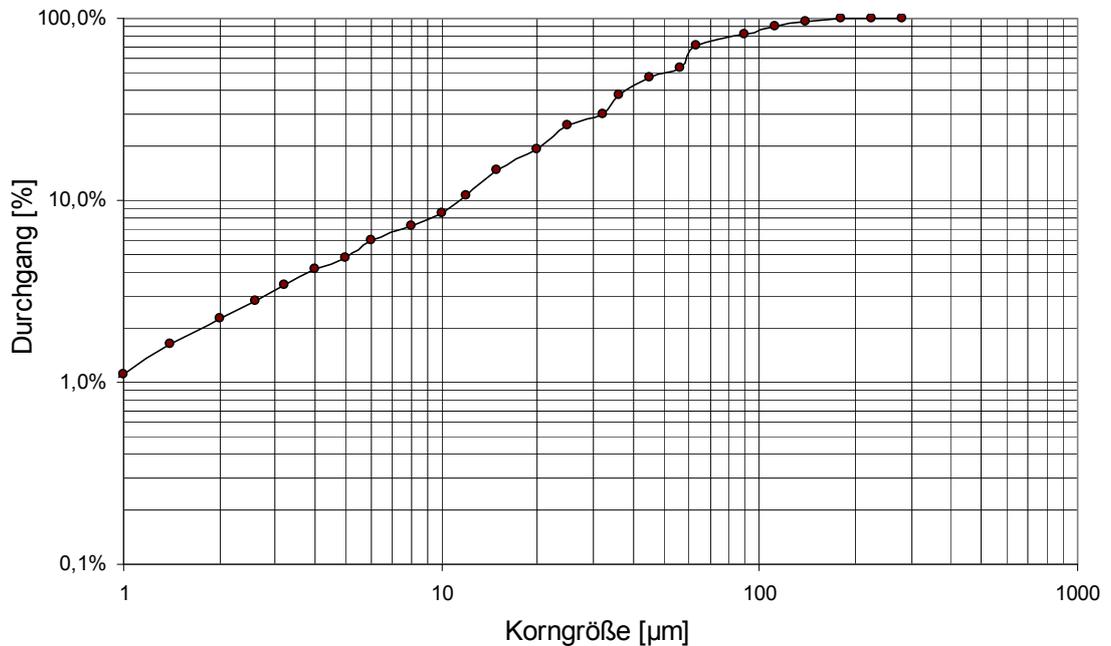


Abb. 6.6.: Korngrößenverteilung Pyrit

6.1.4.2. Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche des Pyrits wurde nach der BET-Methode ermittelt. Sie beträgt $0,68 \text{ m}^2/\text{g}$.

6.1.5. Grafit

Die für die triboelektrischen Aufladerversuche verwendete Grafitprobe mit $>96\%$ Kohlenstoffgehalt wurde als Handelsware bezogen.

6.1.5.1. Korngrößenverteilung

Die Grafitprobe liegt gemäß Produktspezifikation im Korngrößenbereich $90\% < 74 \text{ µm}$ vor.

6.1.6. Zusammenfassung der Probeneigenschaften

		Marmor Probe A	Marmor Probe B	Quarz	Feldspat	Pyrit	Grafit
BET-Oberfläche	m ² /g	0,59	0,56	0,60	1,16	0,68	nicht bestimmt
d₁₀	µm	2,4	3,1	2,4	2,3	14,1	
d₅₀	µm	32,0	39,6	25,4	23,2	59,2	
d₉₀	µm	107,8	148,6	73,4	68,4	136,9	74
HCl-unlöslicher Rückstand	%	0,58	1,37				
Glimmergehalt	%	0,43	0,26				
Quarzgehalt	%	0,1	1,1	100	8,0		

Tab. 6.1.: Übersicht über die Eigenschaften der in der Untersuchung zum triboelektrischen Aufladeverhalten verwendeten mineralischen Proben

6.2. Systematische Untersuchungen zur Charakterisierung des triboelektrischen Aufladeverhaltens

6.2.1. Ziel der Versuche

Durch triboelektrische Aufladung von Mineralen in der bereits beschriebenen triboelektrischen Aufladeeinheit (TAE) soll die Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens der Proben auf die in Kapitel 6.2.3. näher eingegangenen Versuchsparameter bestimmt werden. Aus den erhaltenen Aufladeparametern sollen später jene Prozessparameter in Abhängigkeit von den einzelnen Rohgutarten eruiert werden können, welche die elektrostatische Sortierbarkeit von Mineralgemengen begünstigen.

6.2.2. Vorgehensweise in der Untersuchung

Die Versuche wurden zuerst mit unbehandelten Proben durchgeführt, um deren natürliches Aufladeverhalten darzustellen. In einem nächsten Untersuchungsschritt erfolgte eine Nasskonditionierung der Proben mit verschiedenen oberflächenaktiven Reagenzien.

6.2.3. Versuchsparameter

6.2.3.1. Klimatische Umgebungsbedingungen

Um die Abhängigkeiten des triboelektrischen Aufladeverhaltens feststellen zu können, aber auch um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten, wurden sämtliche Aufladerversuche in einem klimageregelten Prüfraum bei definierten Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die jeweiligen Proben wurden vor dem Versuch mehr als 6 Stunden in der klimatisierten Prüfkammer gelagert, um vor der Messung in der TAE einen klimatischen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung erreichen zu können. Die klimatischen Bedingungen wurden von 13% (minimal erreichter Wert) bis maximal 80% relative Luftfeuchte sowie von minimal -10,0 °C bis maximal +50,0 °C variiert. Für einen Teil der Untersuchungen wurden aufgrund der gewonnenen

Erkenntnisse eine relative Luftfeuchte von 30% bei einer Temperatur von +30,0 °C als klimatische Standardbedingungen definiert.

6.2.3.2. Apparateparameter

6.2.3.2.1. Rotordrehzahl

Alle Untersuchungen in der TAE wurden bei einer Rotordrehzahl von 1.500 1/min durchgeführt. Diese Drehzahl wurde aufgrund der vorausgehenden Untersuchungen zur Abhängigkeit der triboelektrischen Aufladung von der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors gewählt (siehe dazu Abschnitt 5.2.1.2).

6.2.3.2.2. Aufgaberate/Aufgabemenge

Aufgrund zuvor durchgeführter Tastversuche wurde die Aufgaberate in die TAE mit 150 g/min festgelegt (siehe dazu Abschnitt 5.2.1.6). Um dies zu erreichen, wurden je Messung 50 g Probe in die TAE aufgegeben und die Versuchsdauer mit 20 Sekunden festgelegt.

6.2.3.2.3. Kontaktwerkstoff

Als Kontaktpartner für die Aufladeversuche wurde (High Density) Polyethylen für die Statorauskleidung und die Rotorhülse der triboelektrischen Aufladeeinheit verwendet.

6.2.3.2.4. Statorpotential

Um die Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von einem angelegten äußeren elektrischen Feld bestimmen zu können, wurde der stählerne Statorzylinder der triboelektrischen Aufladeeinheit an einen DC-Hochspannungsgenerator angeschlossen und der Rotor mittels an die Antriebswelle angepresste Grafitbürsten geerdet. Die Versuche wurden bei Potentialen von -6,00 kV, -3,00 kV, 0 kV, +3,00 kV und +6,00 kV durchgeführt.

6.2.4. Zusammenfassung der Prozessbedingungen – Test-Matrix

Eine Zusammenfassung der verwendeten Versuchsparameter sowie eine Aufstellung der untersuchten Proben werden in Tabelle 6.2. dargestellt.

Bezeichnung	-	Marmor (Probe A & Probe B)	Quarz	Feldspat	Pyrit	Grafit			
Korngröße	µm	0-200 d ₅₀ ca. 35							
Rotor-Drehzahl	rpm	1500							
Aufgabe-Rate	g/min	150							
Kontaktwerkstoff	-	Polyethylen							
Temperatur	°C	(-10)	(0)	10	20	30	40	(50)	
Relative Luftfeuchte	%	13	20	30	40	50	60	70	(80)
Spannung	kV	-6,00	-3,00	0,00		+3,00	+6,00		
Probe-Parameter	Apparate-Parameter		Prozess-Parameter						

Tab. 6.2.: Übersicht über die Versuchsparameter bei den Untersuchungen zur Charakterisierung der triboelektrischen Aufladung. Fett: Standardbedingungen, in Klammer: vereinzelt durchgeführte Messungen.

6.2.5. Ablauf der Messungen

Um später die Beeinflussbarkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens durch chemische Reagenzien erkennbar zu machen, wurde es im ersten Versuchsschritt notwendig, das als „natürlich“ bezeichnete Aufladeverhalten der Minerale im Rahmen der erstellten Versuchsmatrix (Tabelle 6.2.) zu bestimmen. Nach der Ermittlung dieser Grunddaten erfolgten die Auswahl der Reagenzien zur Beeinflussung des Aufladeverhaltens, die Konditionierung der Proben und die abermalige Messung nach identem Versuchsschema. Ziel der Untersuchungen mit Reagenzieneinsatz ist die Klärung der Frage, ob die Reagenzien zu einer Vergrößerung des spezifischen triboelektrischen Ladungsunterschiedes zwischen verschiedenen Mineralen beitragen können. So wird dieser Effekt in der Salzmineralaufbereitung schon seit Jahrzehnten mit Erfolg genutzt.^[56,71]

Durch das Erreichen eines maximalen Unterschiedes der Elektronenaustrittsarbeiten der verwendeten Minerale bzw. des Systems Reagenzien – Minerale soll eine möglichst hohe triboelektrische Ladungsdifferenz unterschiedlicher Polarität auf den Körnern aufgebaut werden,^[58] um eine selektivere Trennung unterschiedlicher Mineralphasen im elektrostatischen Feld zu begünstigen.

6.3. Triboelektrische Aufladung von Marmor

Die Ermittlung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Marmor erfolgte an beiden Marmor-Proben „A“ und „B“ aus einem österreichischen Marmortagebau, welche sich mit 0,58% bzw. 1,37% geringfügig im Anteil des salzsäureunlöslichen Rückstandes sowie im Quarzgehalt (Probe A 0,1%, Probe B 1,1%) unterschieden.

Aufgrund der geringeren Elektronenaustrittsarbeit von Calcit (ca. 3,20 eV) gegenüber PE (4,25 eV) wird eine positive Aufladung des Marmors erwartet, da dieser Ladungsträger an das Polyethylen abgibt und ein Überschuss positiver Ladungsträger an der Mineraloberfläche verbleibt.

6.3.1. Messungen an unbehandelten Proben

6.3.1.1. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Wie aus Abbildung 6.7. ersichtlich ist, führt eine Zunahme der relativen Luftfeuchte der Umgebung zu einer Abnahme der spezifischen triboelektrischen Aufladung. Dies ist auf die höhere Belegung der hydrophilen Körneroberflächen mit Wassermolekülen zurückzuführen, welche zu einer erhöhten Leitfähigkeit der Probe bei höherer relativer Luftfeuchte der Umgebung führt.^[59] Durch diese erhöhte Oberflächenleitfähigkeit kann die beim Kontakt mit der Auskleidung der TAE erhaltene Ladung rascher wieder ausgeglichen werden, was in diesem Falle mit einer Verringerung der triboelektrischen Aufladung einhergeht.

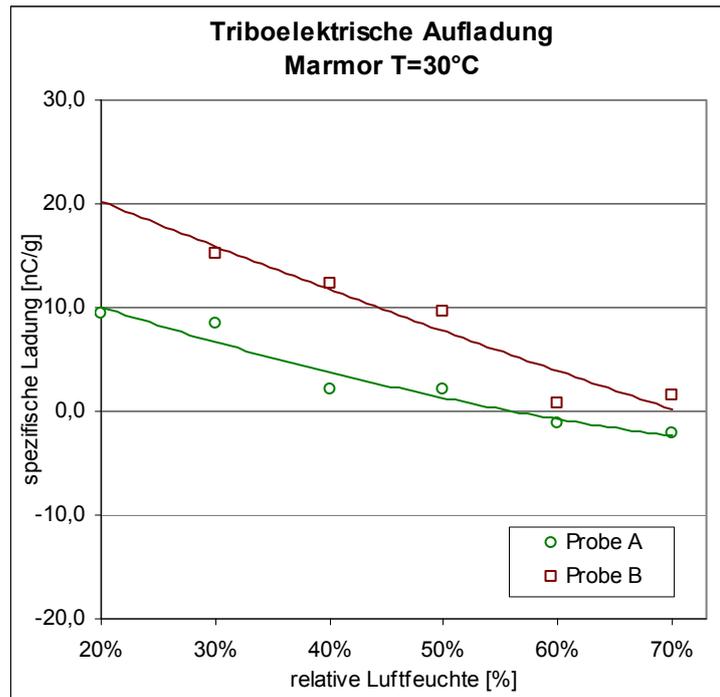


Abb. 6.7.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

6.3.1.2. Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor erscheint, wie in Abbildung 6.8. dargestellt, im untersuchten Temperaturbereich von -10 bis +40 °C vergleichsweise gering. Carta (1973) postulierte eine signifikante Änderung des Aufladeverhaltens erst bei höheren Temperaturen, was nicht zuletzt von den signifikanten Veränderungen des Erfolges elektrostatischer Sortierprozesse bei unterschiedlichen Rohgut-Temperaturen abgeleitet werden kann.^[60] Aufgrund des etwas signifikanteren Temperatureinflusses der Versuche mit italienischem Marmor (siehe dazu Abschnitt 5.2.1.5) kann abgeleitet werden, dass diese Einflussgröße – wie das bei Naturprodukten zu erwarten ist – bei Proben unterschiedlicher Herkunft variiert.

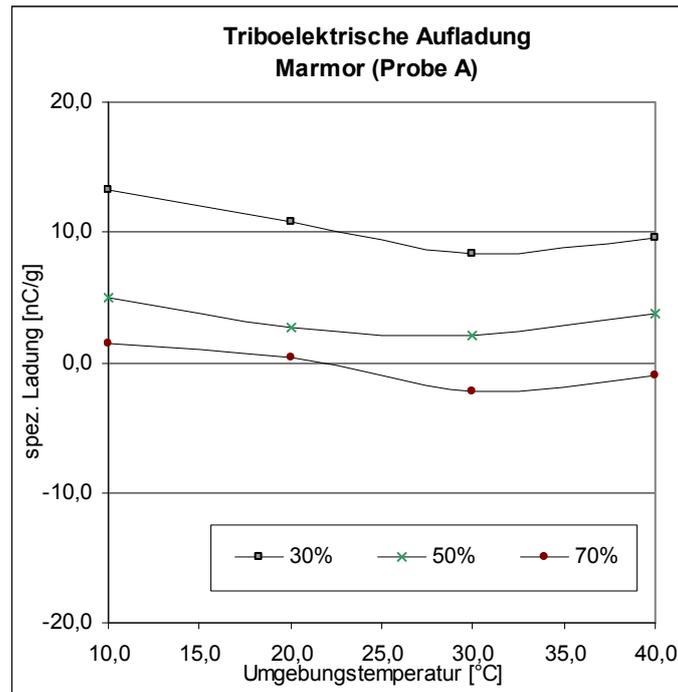


Abb. 6.8.: Einfluss der Temperatur auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor bei 30%, 50% und 70% relativer Luftfeuchte der Umgebung

6.3.1.3. Einfluss des angelegten Statorpotentials

Der Einfluss eines externen elektrischen Feldes auf die triboelektrische Aufladung von Körnern wurde schon von mehreren Autoren evaluiert und versucht, allgemein gültige Erklärungen für diese Änderung zu finden, welche üblicherweise auf den Halbleiter-Eigenschaften der verwendeten Minerale basieren.^[61]

Wie bereits in Kapitel 6.2.3.2.4 beschrieben, wurde die TAE derart konzipiert, dass es möglich ist, ein elektrostatisches Feld im Arbeitsraum aufzubauen, von welchem sowohl die Feldstärke als auch die Polung variiert werden kann. Die Ergebnisse der Versuche mit Marmor bei unterschiedlichen Statorpotentialen sind in Abbildung 6.9. dargestellt.

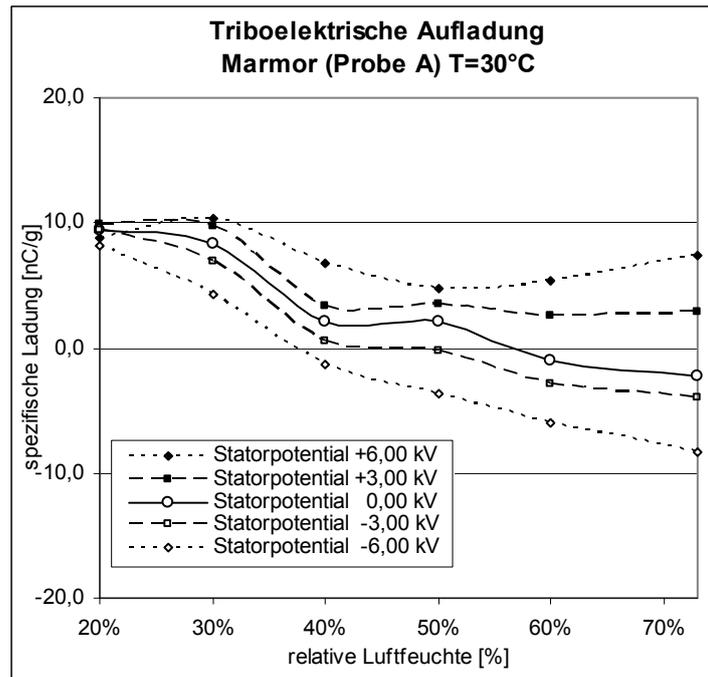


Abb. 6.9.: Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

Der Einfluss der Stärke und Polarität des vorhandenen Potentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten der Probe ist bei relativen Luftfeuchten ab 30% eindrucksvoll zu erkennen. Die spezifische Ladung verhält sich demzufolge proportional zum angelegten äußeren Potential, wobei der Grad der Beeinflussbarkeit in Verbindung mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung steht. Je höher die relative Luftfeuchte, desto stärker kann die Aufladung der Körner durch das angelegte elektrostatische Potential verändert werden. Durch das Anlegen von positivem Statorpotential kann somit der mit steigender Luftfeuchte sinkenden spezifischen Ladung entgegengewirkt werden.

Abbildung 6.10. zeigt den Einfluss der Luftfeuchte auf die Änderung der triboelektrischen Aufladung in Form eines Schaubildes mit dargestellten spezifischen Ladungswerten bei unterschiedlich hohen angelegten Statorpotentialen. Deutlich erkennbar ist ein linearer Zusammenhang der triboelektrischen Ladungsänderung.

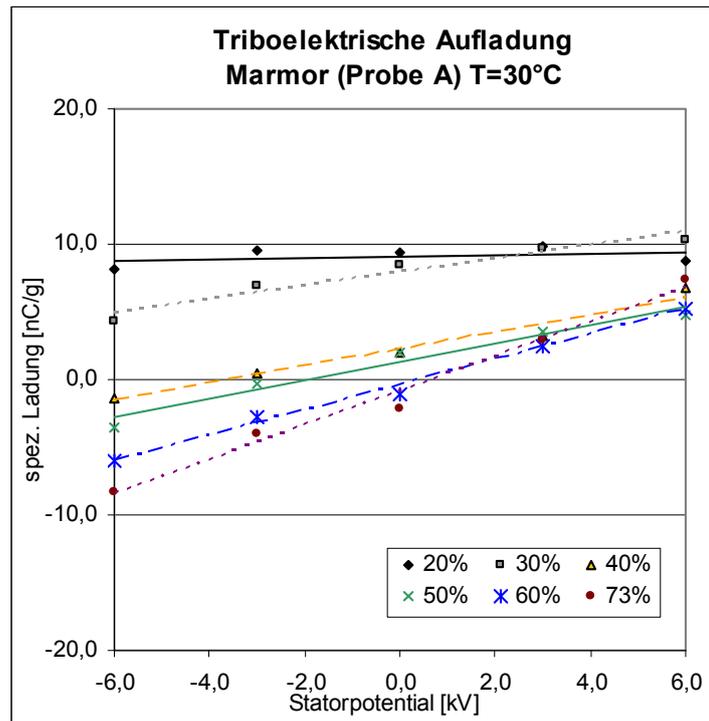


Abbildung 6.10.: Veränderung des Aufladeverhaltens von Marmor durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung

In Abbildung 6.11. ist die Abhängigkeit der Steigungen der Regressionsgeraden aus Abbildung 6.10. bei verschiedenen Luftfeuchten auf der Ordinate und die relative Luftfeuchte der Umgebung auf der Abszisse dargestellt. Aufgrund dieses interessanten Zusammenhanges ist der Schluss zulässig, dass das aufgebaute elektrostatische Feld die immer mehr werdenden Wassermoleküle auf den Oberflächen der Körner stark beeinflusst. Dem Abfluss der triboelektrischen Ladungen aufgrund höher werdender Feuchte kann somit durch Anlegen eines positiven Potentials entgegengewirkt werden.

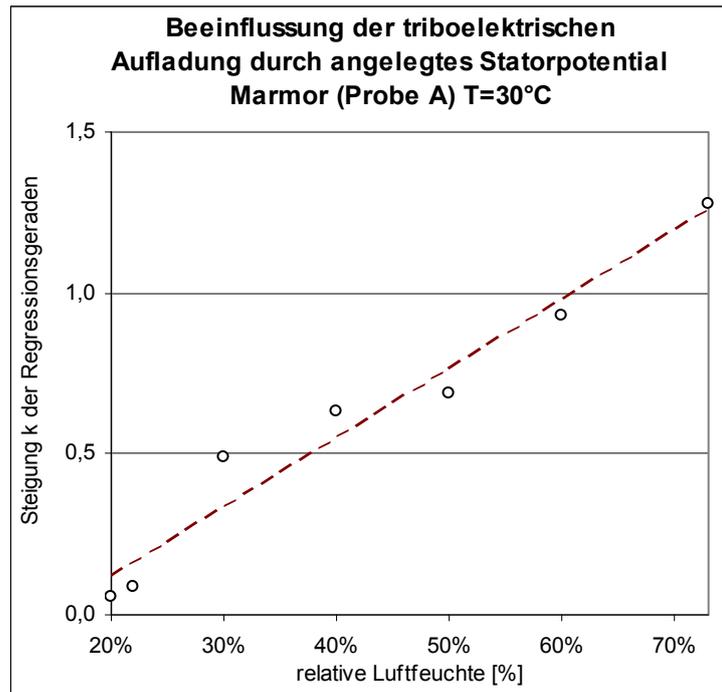


Abb. 6.11.: Beeinflussbarkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens durch ein elektrostatisches Feld (Steigung der Geraden aus Abbildung 6.10.) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung – Ausgleich linear

6.3.2. Konditionierung mit chemischen Reagenzien

Die Konditionierung der Proben für die Messungen in der TAE erfolgte üblicherweise in einem 3 Liter fassenden Becherglas durch Einwaage der für die gewünschte Konzentration entsprechenden Menge an Konditioniermittel, bezogen auf die Wassermenge in 2,0 l destilliertem Wasser, Homogenisierung durch ein Rührwerk und Zugabe von 2,0 kg Probematerial (wenn nicht anders angegeben). Die Konditionierdauer betrug 15 Minuten. Danach wurde die Trübe auf einer Filternutsche entwässert und bei 60 °C im Trockenschrank getrocknet. Die Desagglomeration erfolgte nach Trocknung im Keramikmörser. Bei Verwendung von schwer wasserlöslichen, trocken vorliegenden Reagenzien - wie zum Beispiel Salicylsäure oder Benzoesäure - wurde das Wasser erwärmt und die Auflösung derselben vor Zugabe der Probe in das Becherglas abgewartet. Der Konditioniervorgang ist schematisch

nochmals in Abbildung 6.12. dargestellt und ist identisch mit der in Kapitel 5.2.1.7 beschriebenen Vorgehensweise.

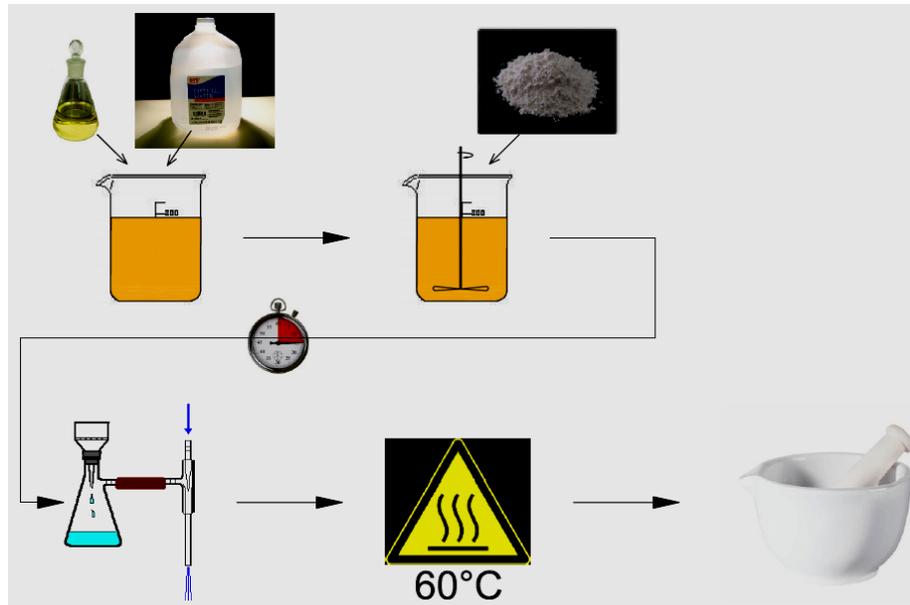


Abb. 6.12.: Schema der Vorgehensweise zur Konditionierung von mineralischen Proben als Vorbereitung zur Messung in der TAE

6.3.2.1. Ölsäure

Die Konditionierung von Marmor mit Ölsäure nach dem dargestellten Schema führte zu einer starken Erhöhung der spezifischen Aufladung der Marmorproben. Ergaben die Messungen an unkonditioniertem Marmor Werte von in etwa $10 \pm 6,0$ nC/g, so stieg die spezifische Aufladung der Probe bei einer Ölsäurekonzentration von 0,005 mol/l in der wässrigen Phase bereits auf 43 nC/g bei Probe A bzw. 33 nC/g bei Probe B an. Die weitere Erhöhung der Ölsäurekonzentration erbrachte teilweise eine noch weitere Steigerung der Ladung auf Werte bis über 40 nC/g. Dabei nähert sich die triboelektrische Aufladung bei beiden Proben augenscheinlich einem Maximum- bzw. Sättigungswert an, welcher – bedingt durch die maximale monomolekulare Bedeckung – auch bei weiterer Erhöhung der Chemikalienkonzentration nicht mehr gesteigert werden kann. Dieser Effekt kann plausibel mit der durch die Reagenzien maximal erreichbaren Belegungsdichte der Körneroberflächen erklärt werden, welche dazu führt, dass eine

Erhöhung der Konzentration in der Trübe während des Konditioniervorganges lediglich zum Auswaschen der Reagenzien im Zuge des Filtrationsvorganges führt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 6.13. dargestellt.

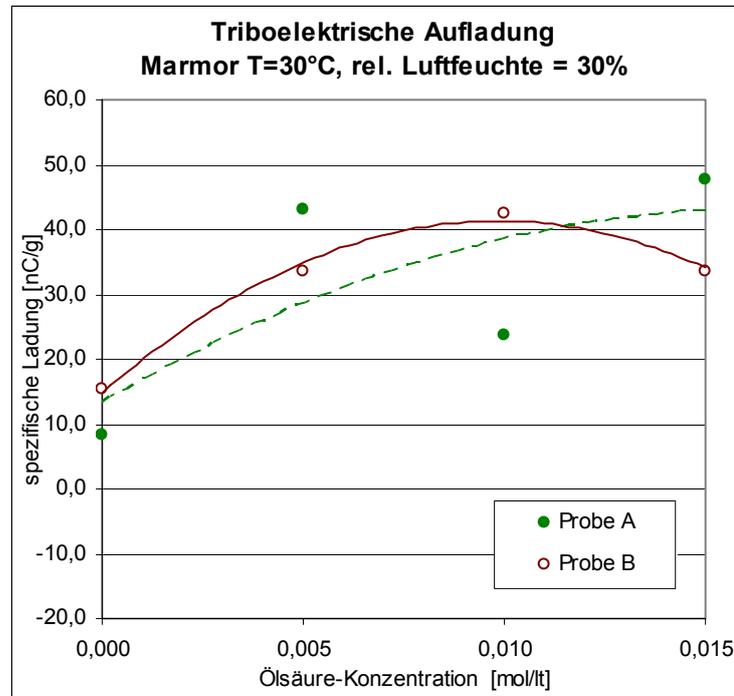


Abb. 6.13.: Einfluss der Ölsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

Nachteilig bei der Verwendung von Ölsäure ist, dass sich die Fließigenschaften des Probegutes drastisch verschlechtern.

6.3.2.2. Benzoesäure

Um die in festem Zustand vorliegende Benzoesäure in Wasser auflösen zu können, wurde die Trübe während des Konditioniervorganges wiederum erwärmt und vor Zugabe des Marmorpulvers abgewartet, bis sich das Reagens vollständig aufgelöst hatte. Die Messungen in der TAE wurden bei Ölsäurekonzentrationen von 0,005, 0,01 und 0,015 mol/l Wasser durchgeführt. Wie aus Abbildung 6.14. ersichtlich ist, verringerte sich die spezifische triboelektrische Aufladung von Probe A mit

zunehmender Reagenzienkonzentration von 8,4 nC/g bei der unkonditionierten Probe auf 0,35 nC/g bei einer Benzoesäurekonzentration von 0,015 mol/l. Auch die Beeinflussbarkeit durch ein angelegtes Statorpotential nahm durch den Reagenzienzusatz stark ab, was im Schaubild durch die Bündelung der Isopotentialkurven zu höherer Konzentration hin ersichtlich wird.

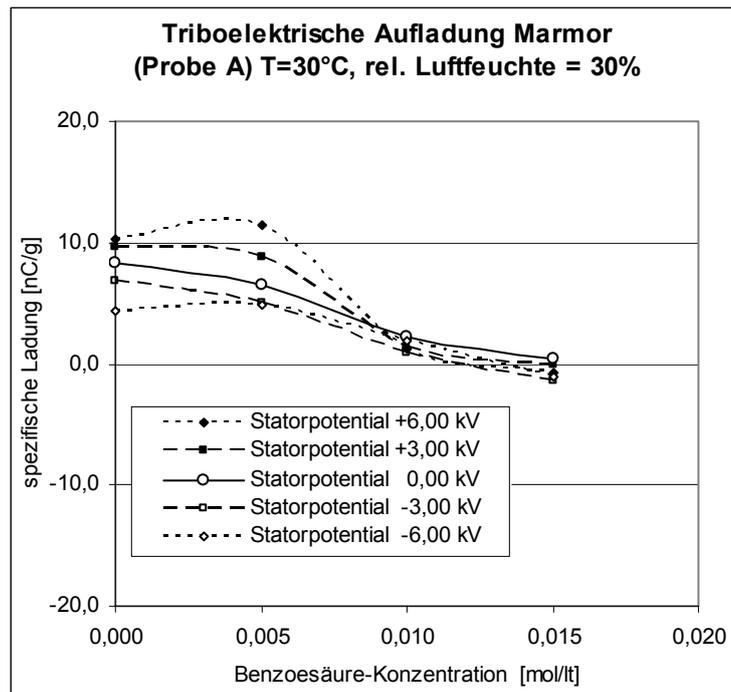


Abb. 6.14.: Einfluss der Benzoesäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

6.3.2.3. Salicylsäure

Die Messungen mit Salicylsäure wurden bei Konzentrationen von 0,01, 0,03 und 0,05 mol/l durchgeführt. Die behandelten Proben zeigten bei einer bestimmten Konzentration eine Verstärkung der spezifischen Ladung. Wurde die Reagenzienkonzentration weiter erhöht, so stellte sich wieder eine geringere Aufladung ein. Probe A zeigte ein Ladungsmaximum von 19,8 nC/g bei 0,03 mol/l, Probe B wies ein Maximum von 19,6 nC/g bei einer Konzentration von 0,01 mol/l auf. Die entsprechenden Ladungskurven sind in Abbildung 6.15. dargestellt.

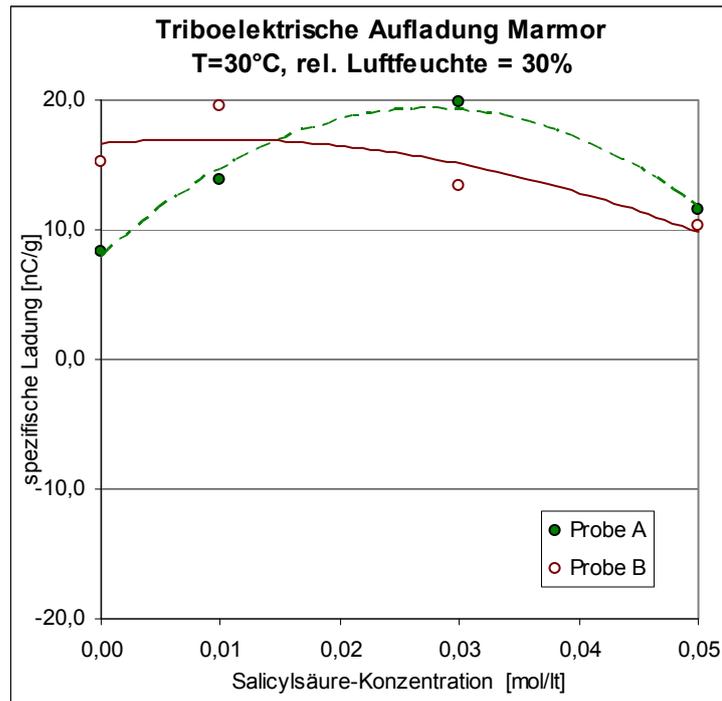


Abb. 6.15.: Einfluss der Salicylsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor - Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

6.3.2.4. Kochsalz und Ätznatron

Sowohl Kochsalz (NaCl) als auch Ätznatron (NaOH) führten generell zu einer Verringerung der spezifischen triboelektrischen Aufladung in der TAE, was sich bereits bei Verwendung geringer Dosierungen der jeweiligen Reagenzien zeigte. Nach weiterer Erhöhung der Konzentration bis auf 0,15 mol/l pendelten die Messwerte um den Ladungsnullpunkt. Die Verläufe der gemessenen spezifischen triboelektrischen Aufladungen sind für Kochsalz in Abbildung 6.16, für Ätznatron in Abbildung 6.17. dargestellt.

Durch Kochsalz bzw. Ätznatron als Reagenzien wurde ebenfalls der Einfluss eines angelegten Statorpotentials auf die Aufladung über den gesamten betrachteten Konzentrationsbereich hinweg gegenüber unbehandeltem Probematerial erheblich verringert, was im Schaubild durch eng aneinander liegende Isopotentialkurven verdeutlicht wird.

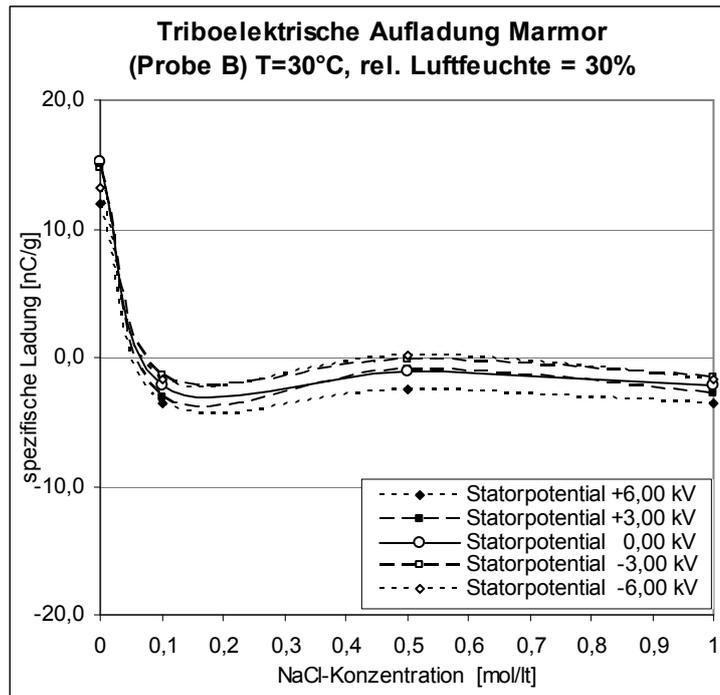


Abb. 6.16.: Einfluss der Kochsalzkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

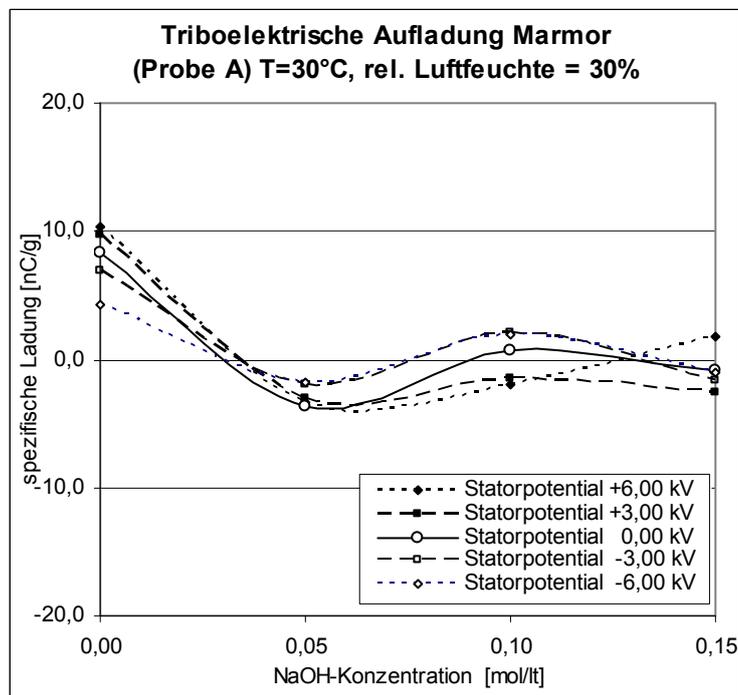


Abb. 6.17.: Einfluss der Ätznatronkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

6.3.2.5. Wirkung von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten

Kationische Tenside werden in der Mineralaufbereitung unter anderem zur selektiven Abtrennung silikatischer Mineralphasen durch Flotation eingesetzt, daher kann auch für das triboelektrische Aufladeverhalten eine Beeinflussung durch diese Reagenzien erwartet werden.

Der Einfluss kationischer Tenside auf Marmor wurde anhand der Probe „A“ ermittelt. Zum Einsatz gelangten ein modifiziertes Esterquat sowie ein quartiniertes Amin.

Die Tenside wurden der Konditioniertrübe in einer Konzentration von 200 ppm, bezogen auf die Feststoffmasse, beigegeben. Die Messungen bei 30 °C und 30% relativer Luftfeuchte in der TAE ergaben für Marmor eine in etwa 3-fach höhere, positive spezifische Aufladung für beide Reagenzien. Mit dem modifizierten Esterquat wurde eine spezifische triboelektrische Aufladung von 24,6 nC/g, mit quartiniertem Amin von 24,5 nC/g erreicht (Die Aufladung ohne Konditioniermittel betrug 8,4 nC/g). Die Ergebnisse der Messungen für Marmor sind in Tabelle 6.3. zusammengefasst.

<i>30 °C, 30% rel. Luftfeuchte 200ppm, [nC/g]</i>	<i>Nicht Konditioniert</i>	<i>Modifiziertes Esterquat</i>	<i>Quartiniertes Amin</i>
Marmor (Probe A)	8,4	24,6	24,5

Tab. 6.3.: Einfluss von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

6.3.2.6. Wirkung von Alkylalkohol auf die triboelektrische Aufladung

Die Konditionierung mit dem Alkylalkohol Triethanolamin wurde unter anderem durchgeführt, weil in technischen Prozessen oftmals mit dem Einsatz solcher Reagenzien gerechnet werden muss. Die Versuche wurden mit einem Gehalt an Triethanolamin von 900 und 1.200 ppm durchgeführt. Die Messungen in der TAE zeigten bei 1.200 ppm einen Anstieg der spezifischen Ladung von 8,4 nC/g auf 24,3 nC/g. Dies

entspricht in etwa einer Verdreifachung der Aufladung. Auch die Beeinflussbarkeit durch ein angelegtes Statorpotential stieg bei höherer Dosierung etwas an, was in Abbildung 6.18. durch die Auffächerung der Isopotentialkurven zu höheren Konzentrationen hin ersichtlich ist.

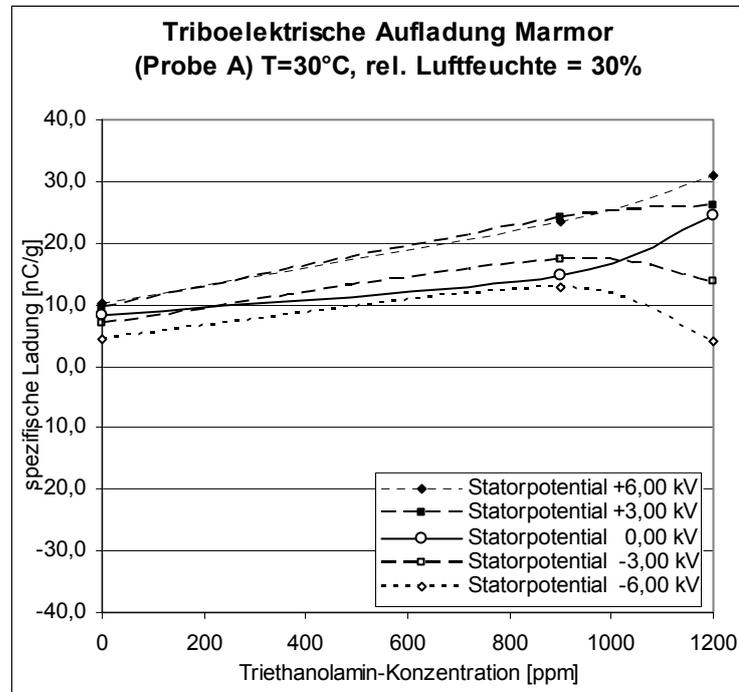


Abb. 6.18.: Einfluss von Triethanolamin auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor

6.4. Triboelektrische Aufladung von Quarz

Die Messungen zur Bestimmung des Aufladeverhaltens von Quarz erfolgte an einem hochreinen, eisenfrei vermahlenem Produkt. Aufgrund der gegenüber Polyethylen höheren Elektronenaustrittsarbeit von etwa 4,4 eV (PE: 4,25 eV) wird unbehandelt eine negative Aufladung von Quarz erwartet. Hangsubcharoen (1999) ermittelte die Aufladung von Quarz und verschiedenen Kohlenproben in einem sogenannten triboelektrischen Turbocharger, der im Wesentlichen aus radial angeordneten Plexiglas-Paddeln besteht, und erreichte spezifische Aufladungen von -0,6 nC/g bei ähnlichen Versuchsbedingungen.^[62]

6.4.1. Messungen an unbehandelten Proben

6.4.1.1. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Auch das Aufladeverhalten von Quarz stellte sich in den Messungen als von der relativen Luftfeuchte der Umgebung abhängig dar. Im Gegensatz zu Marmor lädt sich Quarz jedoch negativ auf, und verringert seine Fähigkeiten zum Erhalt der triboelektrischen Ladung erst bei einer relativen Luftfeuchte von über 60%. Von trockener Luft bis hin zu einer relativen Luftfeuchte von 50% erhöhte sich die Aufladung bei den Messungen sogar leicht, beispielsweise bei 30 °C von -3,5 auf -6,5 nC/g. Bei einer Umgebungstemperatur von 10 °C konnte ausnahmsweise sogar eine Abnahme der Aufladung bis 40% rel. Luftfeuchte und bei feuchter werdenden Bedingungen eine stetige Zunahme der spezifischen Ladung gemessen werden. Das Aufladeverhalten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit der eingestellten relativen Luftfeuchte ist aus Abbildung 6.19. ersichtlich.

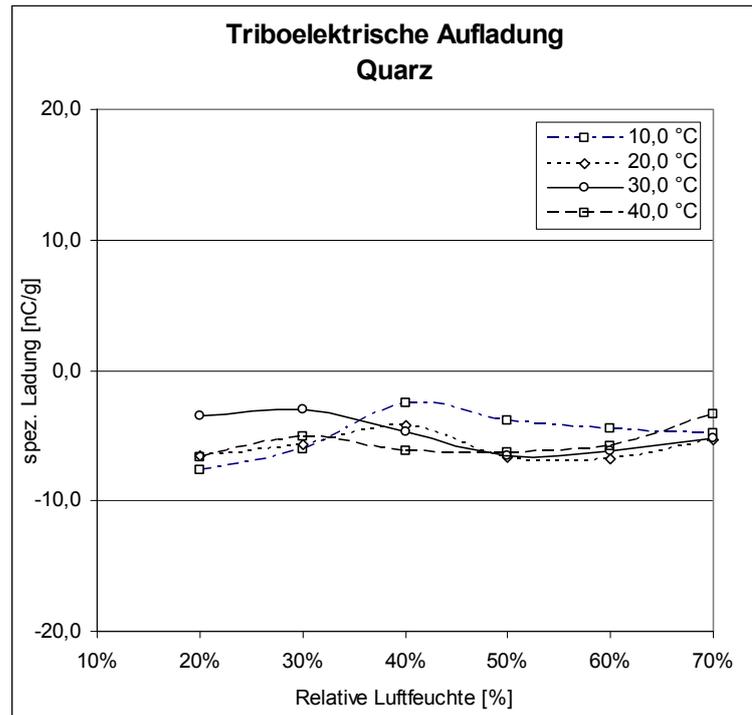


Abb. 6.19.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.4.1.2. Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz ist, wie auch der Einfluss auf Marmor, im betrachteten Temperaturbereich gering. Siehe dazu auch Kapitel 6.3.1.2 bzw. Abbildung 6.19. Wie in Kapitel 5.2.1.5 beschrieben, ändert sich das Aufladeverhalten erst ab Temperaturen $>40\text{ °C}$ signifikant.

6.4.1.3. Einfluss des angelegten Statorpotentials

Eine einleitende Beschreibung zum Einfluss des angelegten Statorpotentials auf die triboelektrische Aufladung von Körnern wurde bereits in Kapitel 6.3.1.3 gegeben. Daher werden hier und auch in den nachfolgenden Kapiteln lediglich die Ergebnisse aus den Untersuchungen dargelegt:

Generell konnte auch bei Quarz eine gute Beeinflussbarkeit der Aufladung durch eine äußere elektrische Spannung nachgewiesen werden. Im Unterschied zur Aufladung von Marmor, wo die

Beeinflussbarkeit von trockener zu feuchter Umgebung stetig anstieg, zeigte Quarz bis zu einem gewissen Wert der relativen Luftfeuchte keine bis wenig Beeinflussbarkeit. Ab einer gewissen relativen Luftfeuchte der Umgebung stieg die Beeinflussbarkeit jedoch stark an, was aus den nachfolgenden Abbildungen 6.20. bis 6.22. ersichtlich wird.

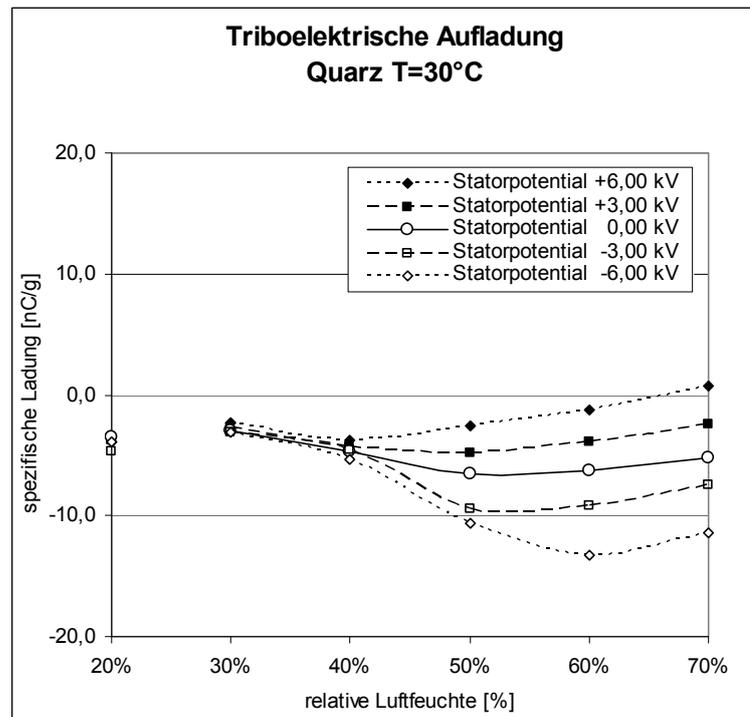


Abb. 6.20.: Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

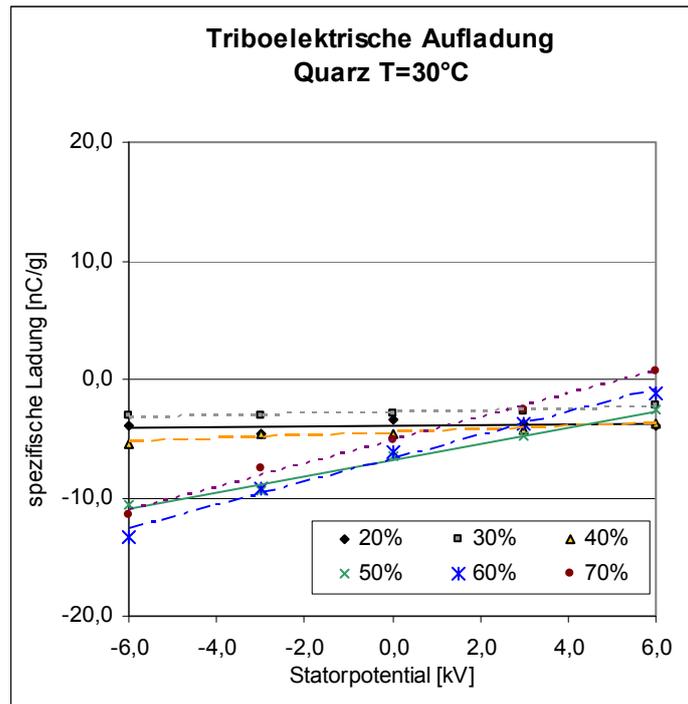


Abb. 6.21.: Veränderung des Aufladeverhaltens von Quarz durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung – Ausgleich linear

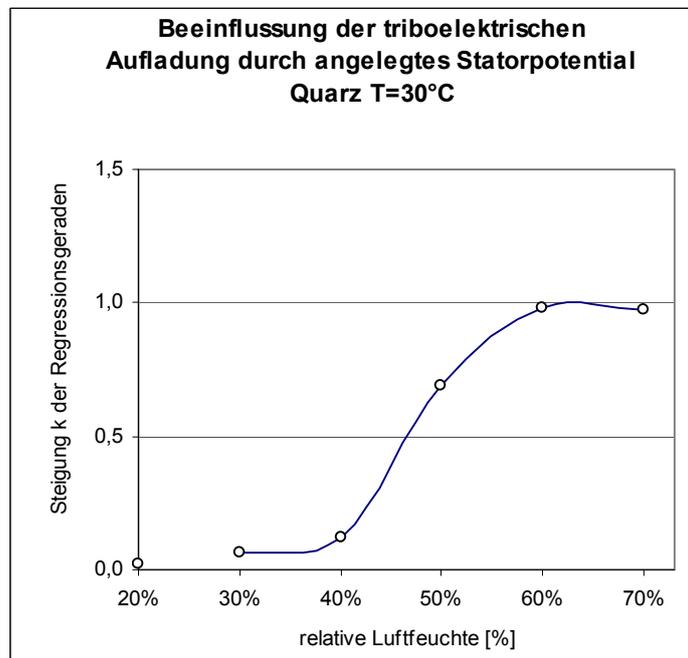


Abb. 6.22.: Zusammenhang der Beeinflussbarkeit der triboelektrischen Aufladung durch ein elektrostatisches Feld (=Steigung der Geraden aus Abb. 6.21.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung

6.4.2. Konditionierung mit chemischen Reagenzien

Die Konditionierung von Quarz erfolgte gemäß Beschreibung in Kapitel 6.3.2.

6.4.2.1. Ölsäure

Die Verwendung von Ölsäure zur Konditionierung von Quarz führte zu einer Umkehrung der erhaltenen Ladung. Erfuhr das unbehandelte Probematerial in Kontakt mit dem Polyethylen der TAE stets eine negative Aufladung, so lud sich der mit Ölsäure behandelte Quarz positiv auf. Die spezifische Ladung änderte sich bei Standardbedingungen (30 °C, 30% rel. Luftfeuchte) von -3,0 nC/g auf +3,1 nC/g bei 0,005 mol/l bzw. +4,8 nC/g bei einer Konzentration von 0,01 mol/l in der Konditioniertrübe (siehe Abbildung 6.23.). Eine weitere Steigerung der Konzentration führte – wie schon bei Marmor – nicht zu einem weiteren Anstieg der Aufladung, sondern es wurde sogar wieder eine Ladungsreduktion beobachtet.

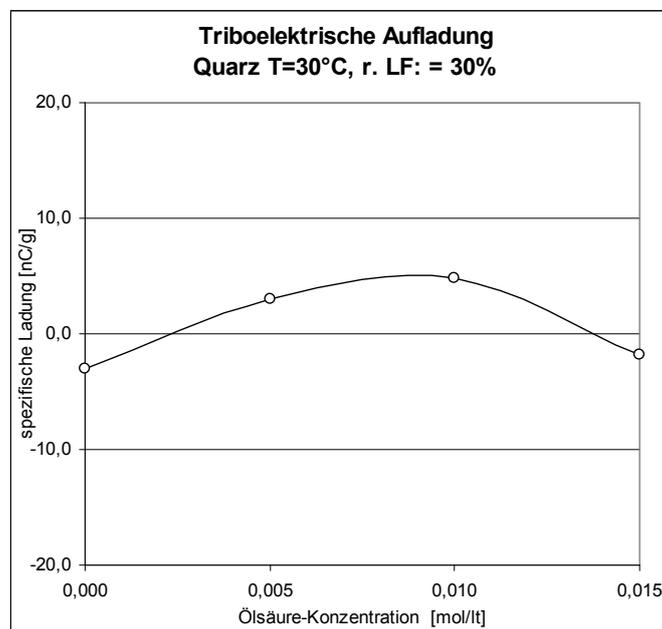


Abb. 6.23.: Einfluss der Ölsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.4.2.2. Benzoesäure

Die Konditionierung von Quarz mit Benzoesäure führte zu einer nur geringen Änderung des Aufladeverhaltens von Quarz in der TAE in Richtung einer stärker negativen Aufladung von $-5,6 \text{ nC/g}$ bei $0,02 \text{ mol/l}$ Reagenz in der Trübe gegenüber $-3,0 \text{ nC/g}$ bei der unbehandelten Probe.

6.4.2.3. Salicylsäure

Salicylsäure führte zu einer Ladungsumkehr und der Ausbildung eines Maximums der Aufladung von $+6,0 \text{ nC/g}$ bei $0,01 \text{ mol/l}$ Reagenz in der Konditioniertrübe. Bei höher werdendem Salicylsäureanteil sank die Aufladbarkeit wiederum bis auf einen Wert von $+2,8 \text{ nC/g}$ bei $0,05 \text{ mol/l}$. Auch die Beeinflussbarkeit durch ein externes elektrisches Feld zeigte sich in dieser Weise von der Reagenzienkonzentration abhängig. Die Abhängigkeit des Aufladeverhaltens von der Salicylsäuremenge stellt Abbildung 6.24. dar.

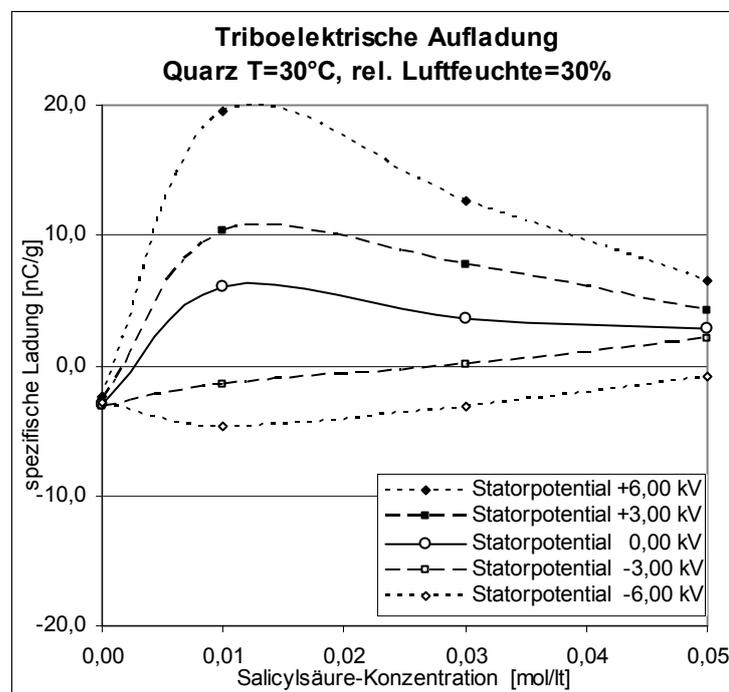


Abb. 6.24.: Einfluss der Salicylsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.4.2.4. Kochsalz

Wird Kochsalz als Reagenz eingesetzt, so kommt es bei Konzentrationen $>0,50$ mol/l Wasser in der Trübe zu einer Verstärkung der negativen Aufladung von Quarz (siehe Abbildung 6.25.). Anzumerken gilt es, dass durch den Trocknungsvorgang nach der Konditionierung die Rekristallisation von Salzkristallen aus der Solelösung als wahrscheinlich erachtet wird – $0,50$ mol/l NaCl entspricht immerhin $58,4$ g/l – wodurch beim anschließenden Messvorgang keine monomineralische Probe mehr vorgelegen sein dürfte.

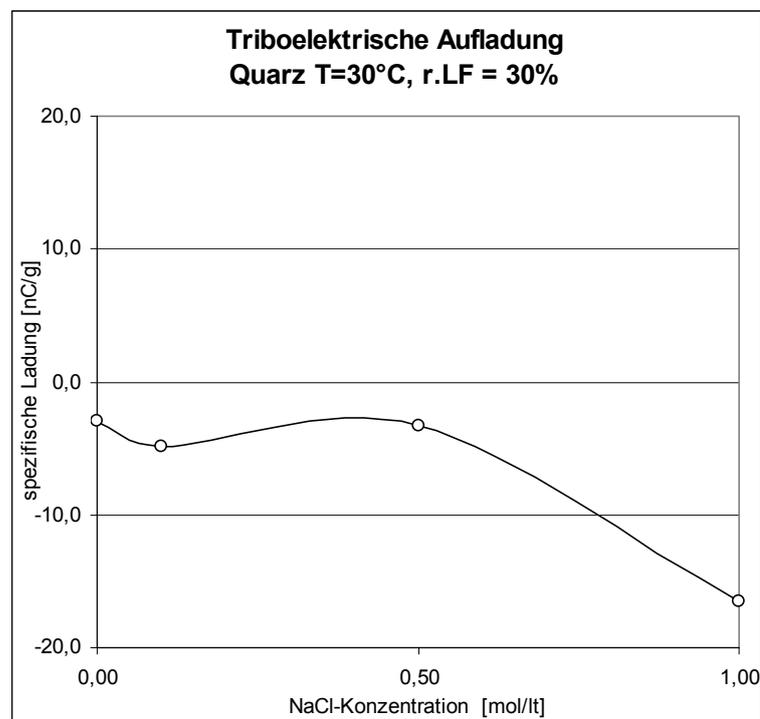


Abb. 6.25.: Einfluss der Kochsalzkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.4.2.5. Ätznatron

Die Konditionierung von Quarz mit NaOH führte zu keiner signifikanten Änderung des Aufladeverhaltens von Quarz in der TAE.

6.4.2.6. Wirkung von kationischen Tensiden auf die triboelektrische Aufladung

Durch den Einsatz der in Kapitel 6.3.2.5 bereits näher beschriebenen Tenside konnte nur eine geringe Beeinflussung des Aufladeverhaltens von Quarz erreicht werden. Modifiziertes Esterquat beeinflusste das Aufladeverhalten nicht nachweisbar, durch quartiniertes Amin wurde die negative Aufladung von Quarz etwa um den Faktor 1,6 verstärkt (siehe Tabelle 6.4.).

Interessant erscheint die durch quartiniertem Amin erreichte Steigerung der Beeinflussbarkeit durch ein externes elektrostatisches Feld, die zu einer Streuung der spezifischen Aufladung von +0,7 nC/g bei +6,0 kV bis -11,2 nC/g bei -6,0 kV gegenüber den -4,7 nC/g ohne Spannung führte.

<i>30°C, 30% rel. Luftfeuchte 200ppm, [nC/g]</i>	<i>Nicht Konditioniert</i>	<i>Modifiziertes Esterquat</i>	<i>Quartiniertes Amin</i>
Quarz	-2,95	-0,72	-4,69

Tab. 6.4.: Einfluss von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.4.2.7. Wirkung von Alkylalkohol auf die triboelektrische Aufladung

Triethanolamin führte bei Quarz zu einer Ladungsumkehr und einer stark positiven Aufladung von -3,0 nC/g auf +12,8 nC/g bei 900 ppm bzw. 13,3 nC/g bei 1.200 ppm (siehe Abbildung 6.26.).

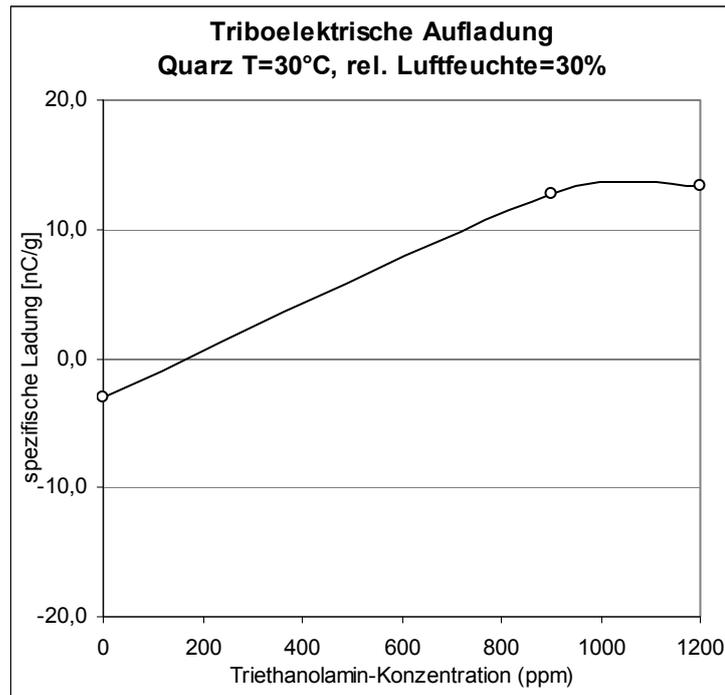


Abb. 6.26.: Einfluss von Triethanolamin auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz

6.5. Triboelektrische Aufladung von Feldspat

Die Untersuchungen zum triboelektrischen Aufladeverhalten von Feldspat wurden an einer gemahlene Probe aus der Elektrostatik-scheidung vorgenommen. Der Gehalt an Feldspat-Mineralen (Mikroklin und Orthoklas) wurde röntgendiffraktometrisch bestimmt. Er beträgt 92% (vgl. Kapitel 6.1.3).

6.5.1. Messungen an unbehandelten Proben

6.5.1.1. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Das Aufladeverhalten von Feldspat in der TAE erwies sich gegenüber einer Veränderung der Umgebungsfeuchte als sehr unabhängig. Im gesamten Untersuchungsbereich von <20% bis 70% relativer Luftfeuchte änderte sich die erreichte Ladung nur unwesentlich und pendelte geringfügig um einen Mittelwert von -2,8 nC/g (siehe Abbildung 6.27.).

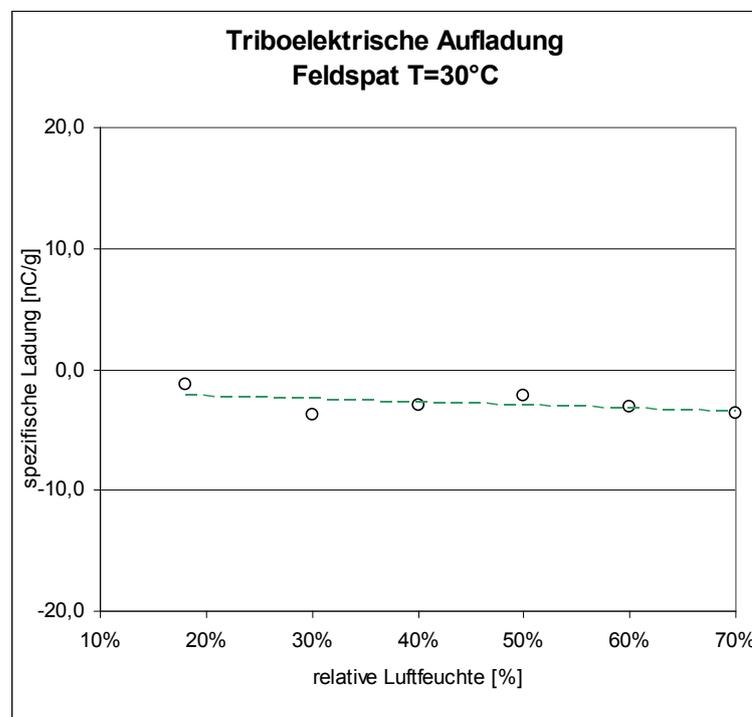


Abb. 6.27.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat
– Ausgleich linear

6.5.1.2. Einfluss der Temperatur

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnis, dass die Temperatur im betrachteten Bereich einen lediglich geringfügigen Einfluss auf das Aufladeverhalten der Marmor- bzw. Quarzproben ausübte, wurde von Versuchen mit Feldspat bei geänderten Umgebungstemperaturen abgesehen.

6.5.1.3. Einfluss des angelegten Statorpotentials

Wenn auch das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat durch die Variation der Luftfeuchte kaum beeinflusst werden konnte, so zeigten die Untersuchungen mit einem externen elektrischen Feld doch, dass auch die Aufladbarkeit von Feldspat durch ein Potential bei hohen relativen Luftfeuchten deutlich verändert werden kann. Abbildung 6.28. bis 6.30. zeigt das Aufladeverhalten von Feldspat sowie die Veränderung der selbigen mit sich verändernder Luftfeuchte.

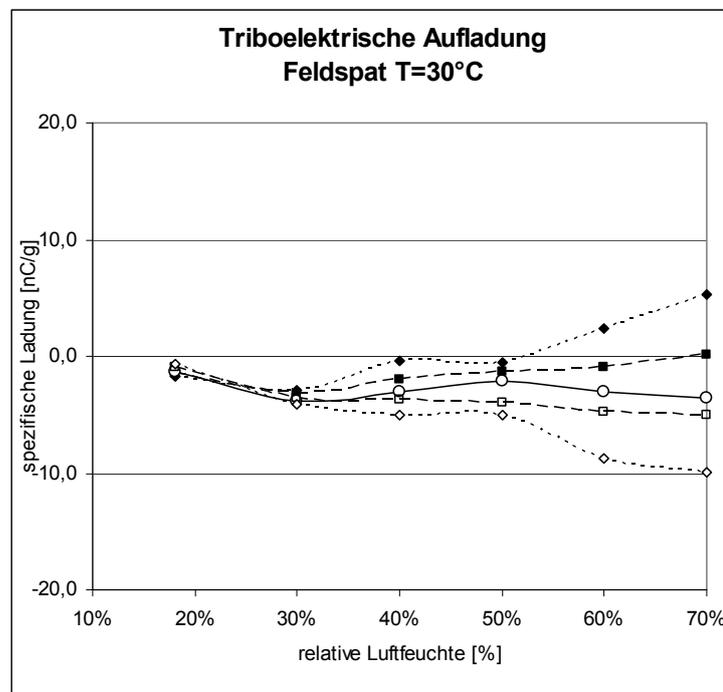


Abb. 6.28.: Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat

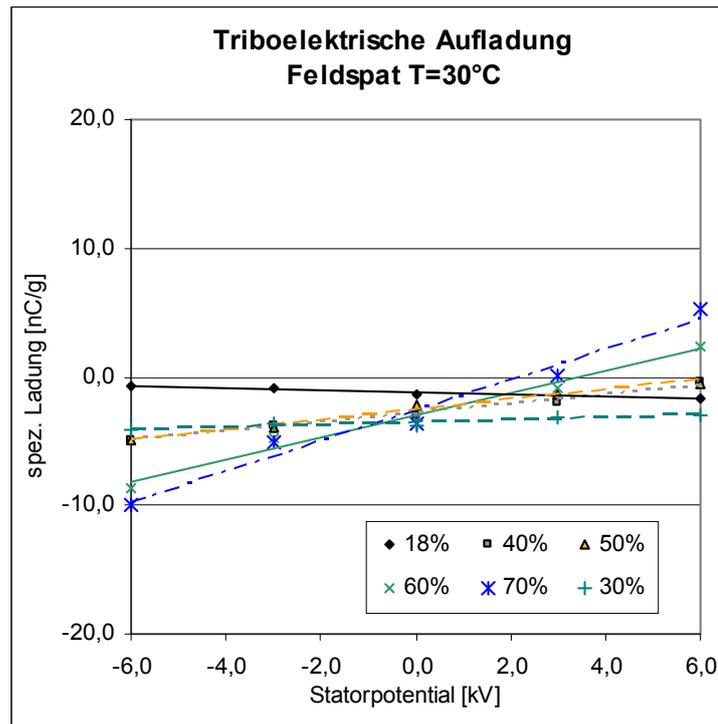


Abb. 6.29.: Veränderung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Feldspat durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Feld bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung – Ausgleich linear

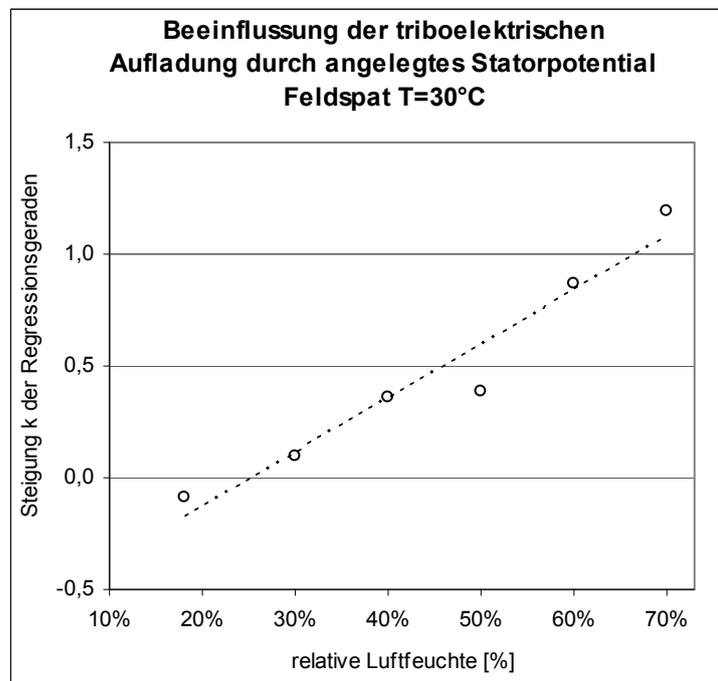


Abb. 6.30.: Zusammenhang der Beeinflussbarkeit der triboelektrischen Aufladung durch ein elektrostatisches Feld (=Steigung der Geraden aus Abbildung 6.29.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung – Ausgleich linear

6.5.2. Konditionierung mit chemischen Reagenzien

Die Konditionierung von Feldspat wurde wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben durchgeführt.

6.5.2.1. Ölsäure

Die Konditionierung mit Ölsäure führte zu einer Ladungsumkehr und zu einer positiven spezifischen Aufladung bis zu einer Konzentration von 0,01 mol/l, wo eine Ladung von +8,9 nC/g gemessen werden konnte. Eine darüber hinausgehende Menge an Ölsäure führte, wie schon des Öfteren beobachtet, wieder zu einem Abnehmen der Ladung. Wie schon bei vorhergehenden Versuchen mit Ölsäure festgestellt werden musste, führt die Verwendung selbiger zu einer Verschlechterung der Fließeigenschaften. Der Verlauf der Aufladung bei unterschiedlichen Ölsäurekonzentrationen ist in Abbildung 6.31. dargestellt.

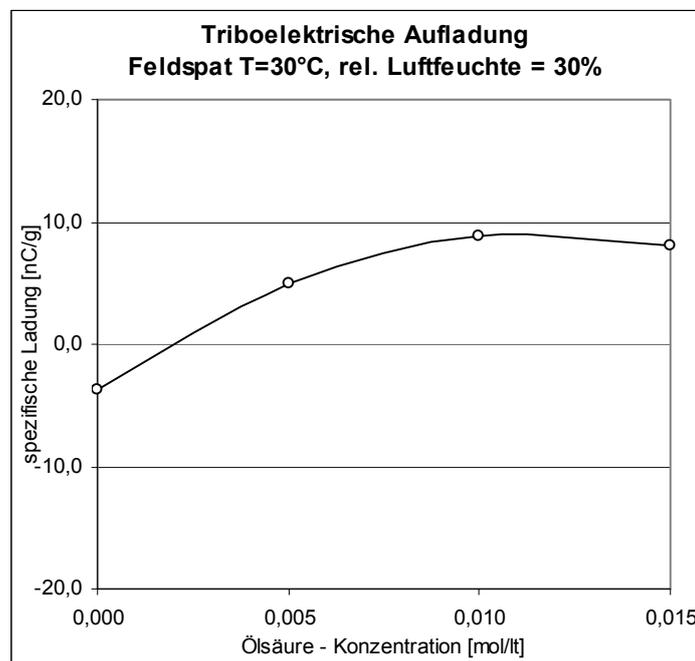


Abb. 6.31.: Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Feldspat

6.5.2.2. Benzoe- und Salicylsäure

Benzoe- und Salicylsäure beeinflussten das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat nur sehr geringfügig. Mit Benzoesäure konnte überhaupt kein Einfluss festgestellt werden, Salicylsäure verringerte bei höherer Konzentration die negative Ladung von $-3,8 \text{ nC/g}$ mit unbehandeltem Material auf $-0,5 \text{ nC/g}$ bei einer Konzentration von $0,05 \text{ mol/l}$.

6.5.2.3. Kochsalz

Mit NaCl konnte die triboelektrische Aufladbarkeit bei hoher Konzentration von $1,0 \text{ mol/l}$ geringfügig negativ verstärkt und die Beeinflussbarkeit der Aufladung durch ein äußeres elektrostatisches Feld bei geringer Kochsalzkonzentration in gutem Maße ermöglicht werden, was durch die Auffächerung der Isopotentialkurven in Abbildung 6.32. ersichtlich ist.

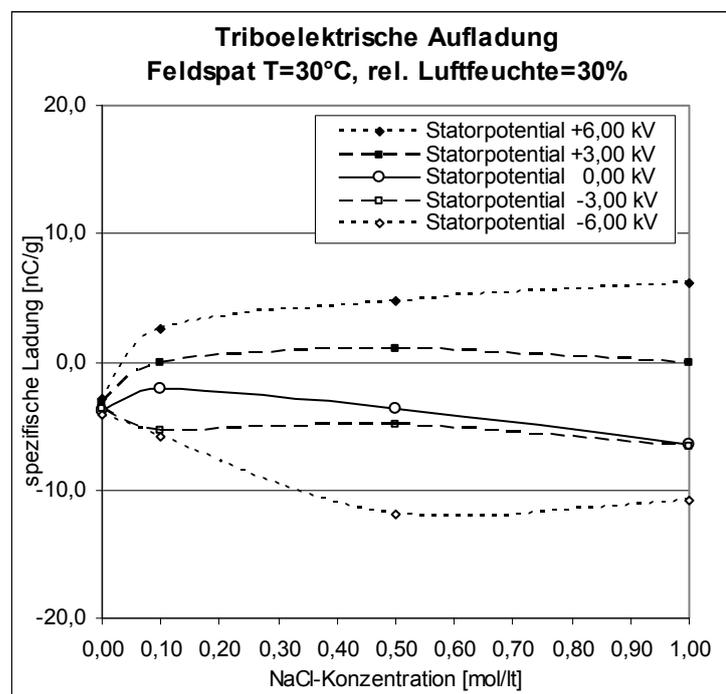


Abb. 6.32.: Einfluss der Kochsalzkonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Feldspat

6.5.2.4. Ätznatron

Durch die Verwendung von NaOH als Konditioniermittel wurde im betrachteten Konzentrationsbereich bis zu 0,15 mol/l eine lediglich geringfügige Beeinflussung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Feldspat erreicht.

6.6. Triboelektrische Aufladung von Pyrit

Die Ermittlung der triboelektrischen Aufladepolarität von Pyrit wurde an einem rein physikalisch sortierten Zerkleinerungsprodukt ohne Chemikalienzusätze durchgeführt. Röntgendiffraktometrisch konnten keine Nebengemengteile im Probematerial festgestellt werden.

6.6.1. Messungen an unbehandelten Proben

6.6.1.1. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Wie in Abbildung 6.33. dargestellt wurden bei Pyrit je nach Luftfeuchtebereich unterschiedliche Ladungspolaritäten gemessen. Bei trockenen Verhältnissen lud sich Pyrit auf $-19,1$ nC/g auf. Je feuchter die Umgebungsluft wurde, desto mehr änderte sich die Aufladung linear in positive Richtung. Bei 70% relativer Luftfeuchte der Umgebung wurde eine spezifische Ladung von $+10,0$ nC/g gemessen.

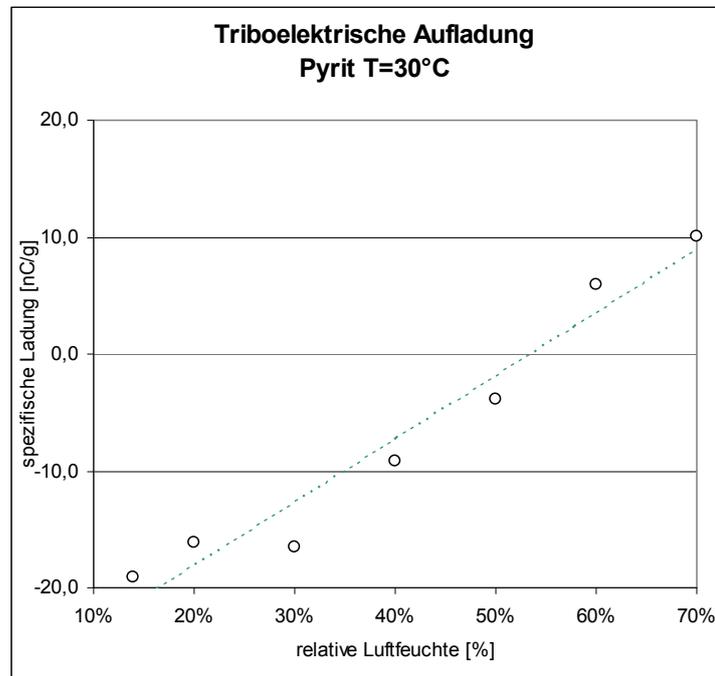


Abb. 6.33.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Pyrit – Ausgleich linear

6.6.1.2. Einfluss der Temperatur

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnis, dass die Temperatur im betrachteten Bereich einen lediglich geringfügigen Einfluss auf das Aufladeverhalten von Marmor- bzw. Quarzproben ausübte, wurde von Versuchen mit Pyrit bei geänderten Umgebungstemperaturen abgesehen.

6.6.1.3. Einfluss des angelegten Statorpotentials

Auch bei Pyrit zeigte sich die Beeinflussbarkeit durch ein externes elektrisches Feld von der relativen Luftfeuchte der Umgebung abhängig, wobei eine Erhöhung des Potentials zu einer elektrostatischen Aufladung proportional zur angelegten Spannung führte (siehe Abbildungen 6.34. bis 6.36.).

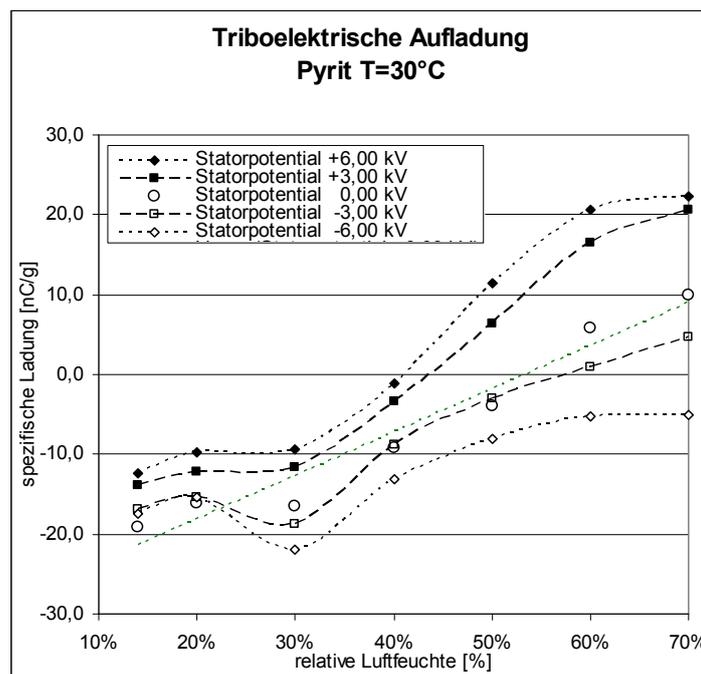


Abb. 6.34.: Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Pyrit

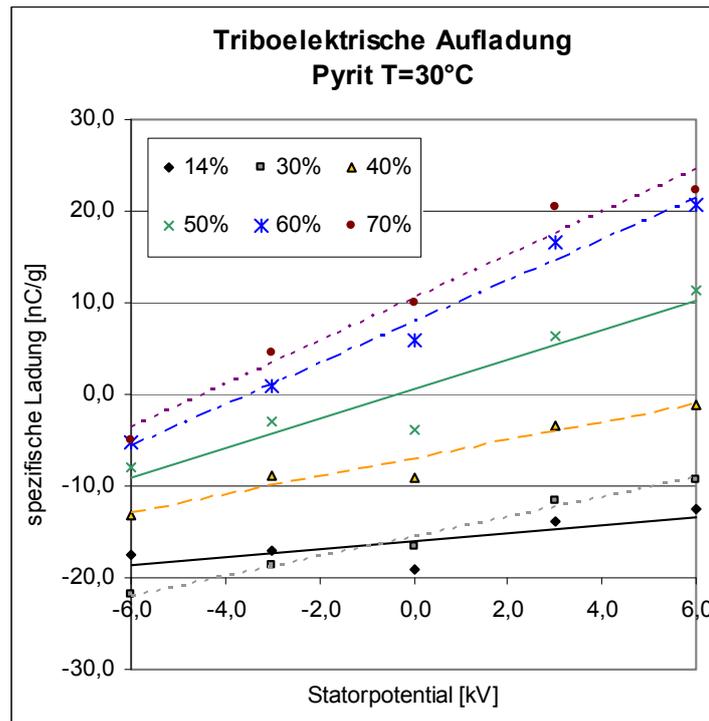


Abb. 6.35.: Veränderung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Pyrit durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Feld bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung – Ausgleich linear

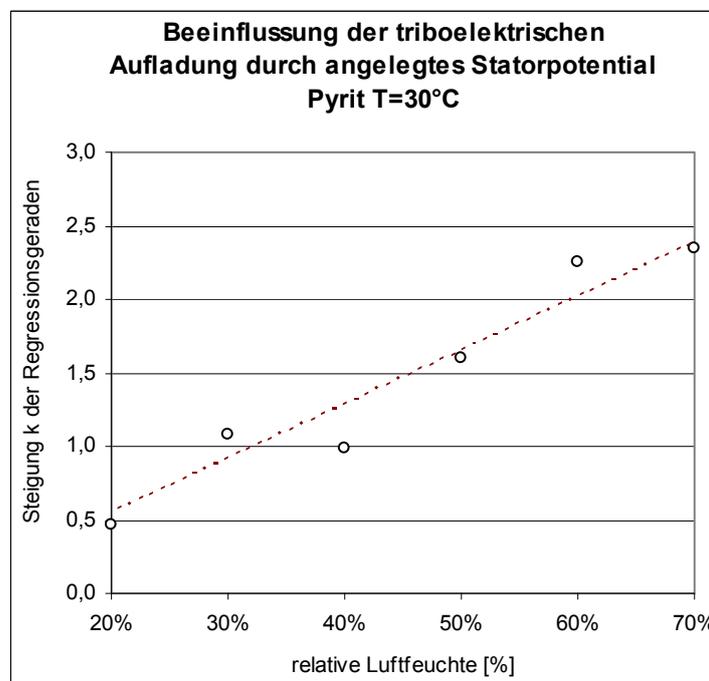


Abb. 6.36.: Zusammenhang der Beeinflussbarkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens durch ein elektrostatisches Feld (Steigung der Geraden aus Abbildung 6.35.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung

6.7. Triboelektrische Aufladeversuche mit Grafit

Die Untersuchungen zum triboelektrischen Aufladeverhalten von Grafit wurden anhand eines Produktes der Firma Grafitbergbau Kaisersberg GmbH durchgeführt.

Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit von Grafit und den sich daraus ergebenden Kurzschlüssen in der TAE war es nicht möglich, Versuche zum Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes durchzuführen. Unkonditionierter Grafit lud sich beinahe unabhängig von der relativen Luftfeuchte der Umgebung im Mittel auf $-3,1 \text{ nC/g}$. Im Gegensatz zu allen anderen betrachteten Mineralen konnte tendenziell eine Zunahme der spezifischen negativen Aufladung erkannt werden. Diese Konstanz im triboelektrischen Aufladeverhalten mit hydrophobem Grafit bestätigt den in den anderen Versuchsreihen erkannten Einfluss der anhaftenden Wassermoleküle bzw. Hydroxidionen auf das triboelektrische Aufladeverhalten bei hydrophilen Proben. Der Verlauf der Aufladeparakteristik ist aus Abbildung 6.38. ersichtlich.

Chemische Konditionierung von Grafit wurde mit Triethanolamin bei Gehalten von 900 bzw. 1.200 ppm durchgeführt. Das Aufladeverhalten änderte sich durch die Konditionierung sowohl bei 30 °C als auch bei 40 °C nicht signifikant.

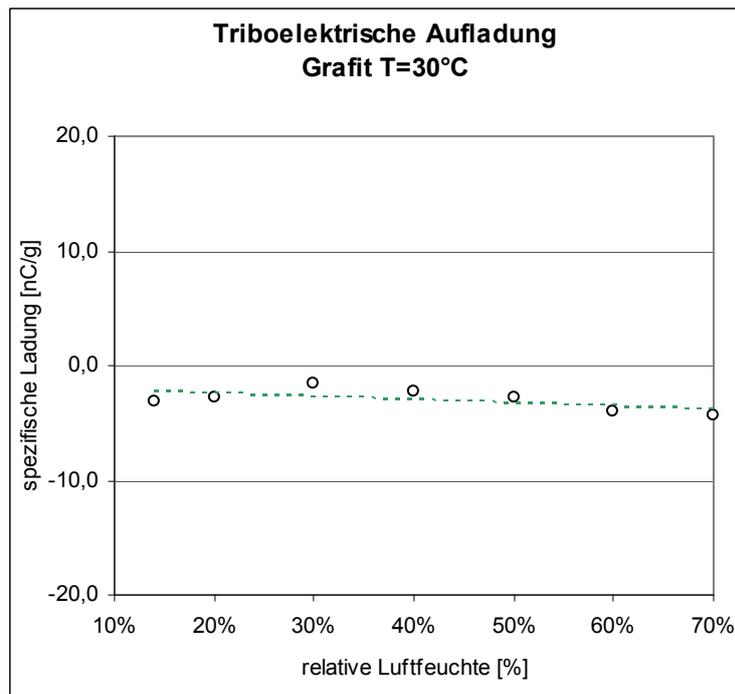


Abb. 6.37.: Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Grafit – Ausgleich linear

7. Auswertung der Versuchsergebnisse

Während das vorherige Kapitel der vorliegenden Dissertationsarbeit beinahe ausschließlich der Veranschaulichung der Messergebnisse diente, so soll im Folgenden durch Verknüpfung der gewonnenen Erkenntnisse deren Bedeutung für das Aufladeverhalten und den möglichen Einfluss auf die Sortierbarkeit von Mineralgemengen aus den untersuchten Reinmineralproben herausgearbeitet werden.

7.1. Methodik der Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung erfolgt durch Kombination der wichtigsten, in Kapitel 6 veranschaulichten Messergebnisse. Es wird davon ausgegangen, dass die Selektivität des elektrostatischen Trennprozesses umso besser ist, je höher die erzielte triboelektrische Ladungsdifferenz zwischen den Reinmineralen ist. In diesem Sinne werden in den folgenden Kapiteln die Messergebnisse der triboelektrischen Aufladeversuche bei unterschiedlichen Einflussparametern diskutiert, miteinander verglichen und bewertet, wobei zuerst die Messungen un behandelter Minerale, und anschließend Tests mit chemischen Reagenzien zur Auswertung gelangen.

7.2. Ergebnisse mit Reinmineralproben

7.2.1. Einfluss der relativen Luftfeuchte

Abbildung 7.1. stellt das Aufladeverhalten für Marmor und Quarz sowie die Veränderung der Ladungsdifferenz der spezifischen triboelektrischen Aufladung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebung bei 30 °C dar. Die Ladungsunterschiede nehmen mit zunehmender Feuchte stetig ab, woraus abgeleitet wird, dass bei triboelektrostatischer Sortierung der beiden Minerale in trockener Umgebung die beste Selektivität erzielt werden kann.

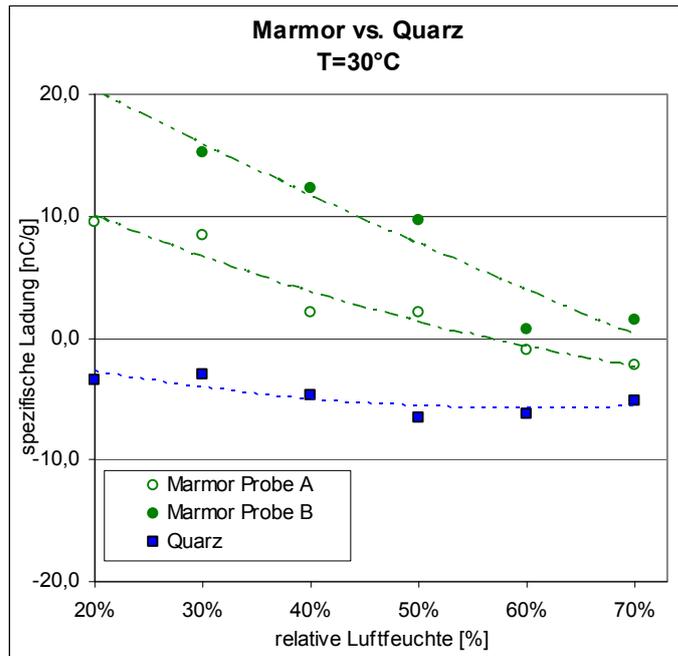


Abb. 7.1.: Triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

Aufgrund des zum Quarz ähnlichen Aufladeverhaltens von Feldspat und auch von Grafit kann für deren Trennung von Marmor dieselbe Folgerung getroffen werden. Der Vergleich von Marmor mit Pyrit ist in Abbildung 7.2. dargestellt.

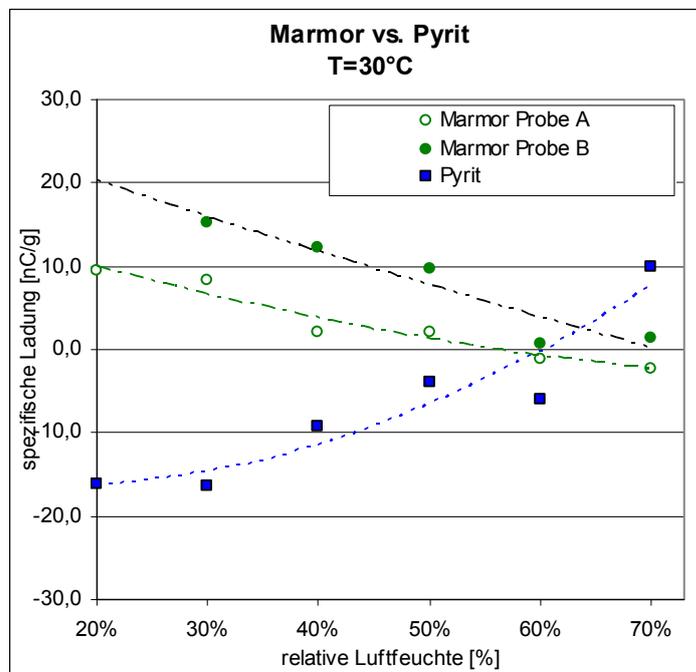


Abb. 7.2.: Triboelektrische Aufladung von Marmor und Pyrit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

Wie aus der Abbildung ersichtlich, bildet die Ladungsdifferenz aufgrund der Ladungsverringerng beider Minerale mit steigender Luftfeuchte ein Maximum in trockener Umgebung (bei 30% relativer Luftfeuchte beträgt die Differenz für Probe B etwa 40 nC/g) und nimmt bei höheren Luftfeuchten stark ab. Da Pyrit in feuchter Umgebung eine Umpolung seiner Aufladeverhaltens erfährt und die Ladung stärker positiv als jene von Marmor in feuchter Umgebung wird, muss davon ausgegangen werden, dass sich im Falle der Anwendung einer triboelektrostatischen Sortierung von Marmor und Pyrit die Selektivität mit steigender relativer Luftfeuchte wesentlich verschlechtert.

7.2.2. Einfluss durch Anlegen eines Statorpotentials

Wird die Aufladecharakteristik von Marmor und Quarz unter Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes gegenübergestellt, so zeigen sich ähnliche Differenzwerte zwischen positivem und negativem Potential. Eine positive angelegte Spannung führt zu wenn auch nur geringfügig höheren Ladungsdifferenzen und bietet dadurch bessere Voraussetzungen für die Verbesserung der Selektivität der Trennung, insbesondere in trockener Umgebung. Hohe Luftfeuchten verringern die Ladungsunterschiede (siehe Abbildung 7.3.). Ein ähnliches Bild zeigt der Vergleich von Marmor mit Feldspat (Abbildung 7.4.).

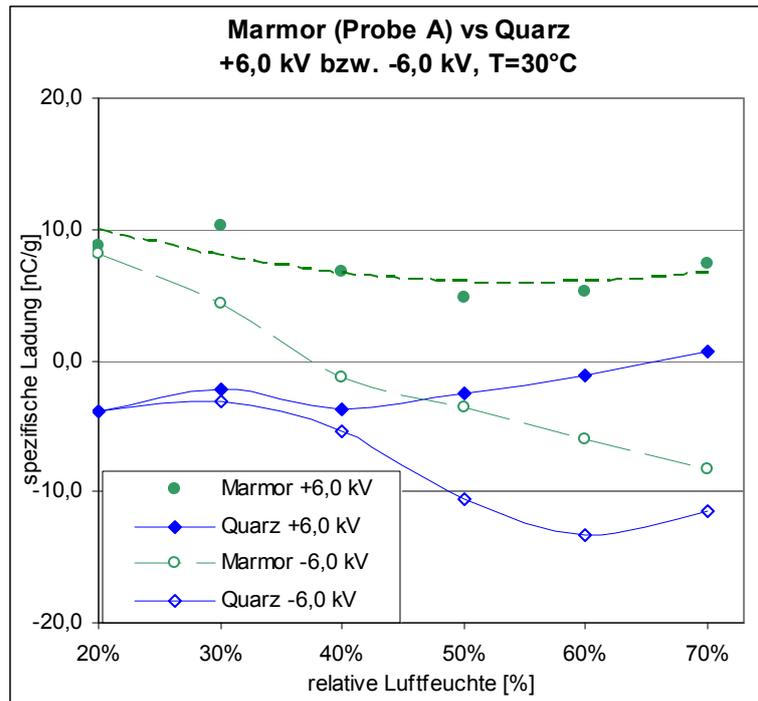


Abb. 7.3.: Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf das Aufladeverhalten von Marmor und Quarz

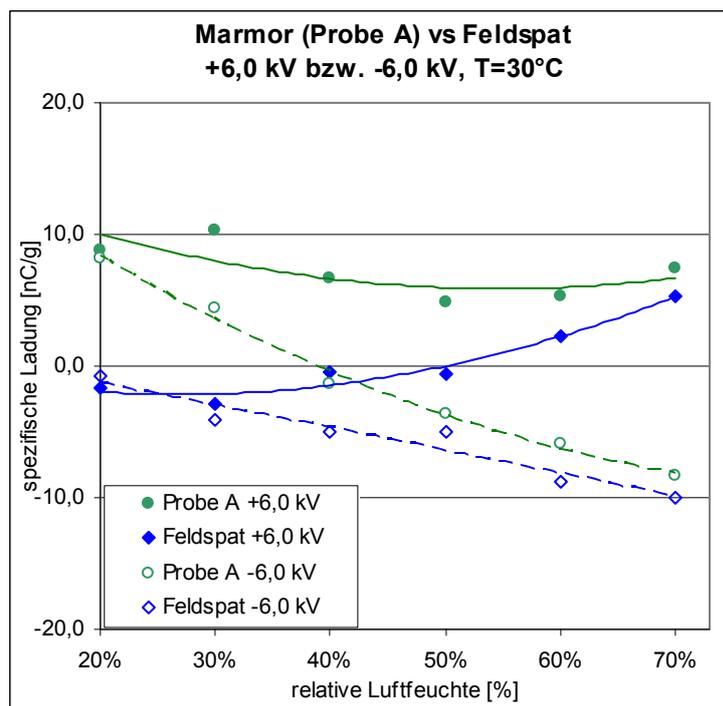


Abb. 7.4.: Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf das Aufladeverhalten von Marmor und Feldspat – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

Für Pyrit ergibt sich aus dieser Betrachtung eine höhere Ladungsdifferenz in trockener Umgebung bei negativem äußerem Feld. Mit zunehmender Luftfeuchte erscheint ein positives äußeres Feld

vorteilhafter. Generell ergeben sich jedoch in trockener Umgebung günstigere Ladungsverhältnisse als bei höherer relativer Luftfeuchte. Die bereits erwähnte Umpolung der beteiligten Mineralphasen wird aus der Überschneidung der jeweiligen Isopotentialkurven (blaue und grüne Linien) ersichtlich. Die entsprechende Darstellung dieser Verhältnisse zeigt Abbildung 7.5.

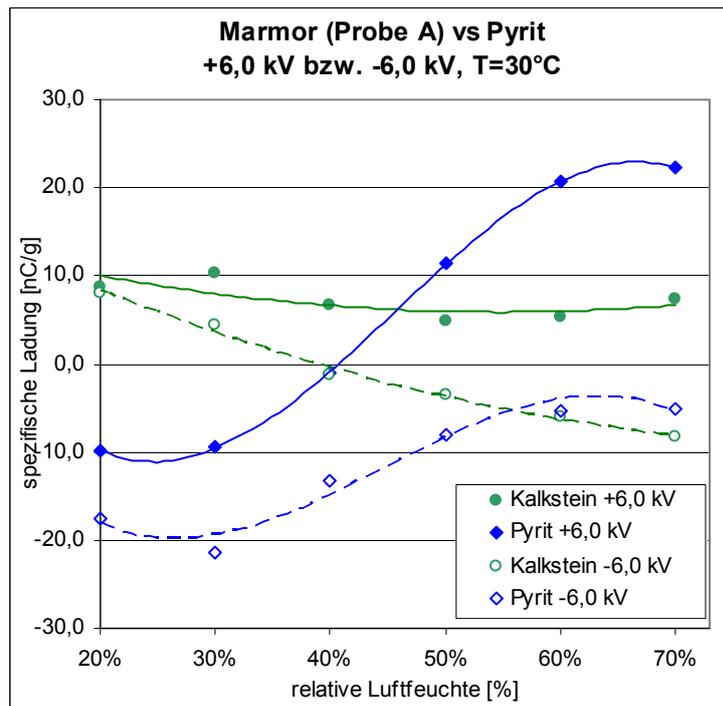


Abb. 7.5.: Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf die Aufladung von Marmor und Pyrit – Ausgleich polynomisch

7.3. Ergebnisse mit konditionierten Proben

7.3.1. Einfluss von Ölsäure

In Abbildung 7.6. und 7.7. werden die Differenzen der Ladungsunterschiede zwischen Marmor und Quarz bzw. Marmor und Feldspat in Abhängigkeit von der Ölsäurekonzentration dargestellt. Beide Kombinationen weisen zwar eine sehr hohe maximale Ladungsdifferenz von 37,8 bzw. 51,5 nC/g bei einer Ölsäurekonzentration von 0,01 mol/l auf, jedoch werden beide Mineralphasen positiv geladen, wodurch keine Trennung im elektrischen Feld erfolgt. Problematisch beim Einsatz von Ölsäure sind die bereits in Kapitel 6.3.2.1 beschriebenen dramatisch schlechteren Fließeigenschaften des mit Ölsäure versetzten Rohgutes.

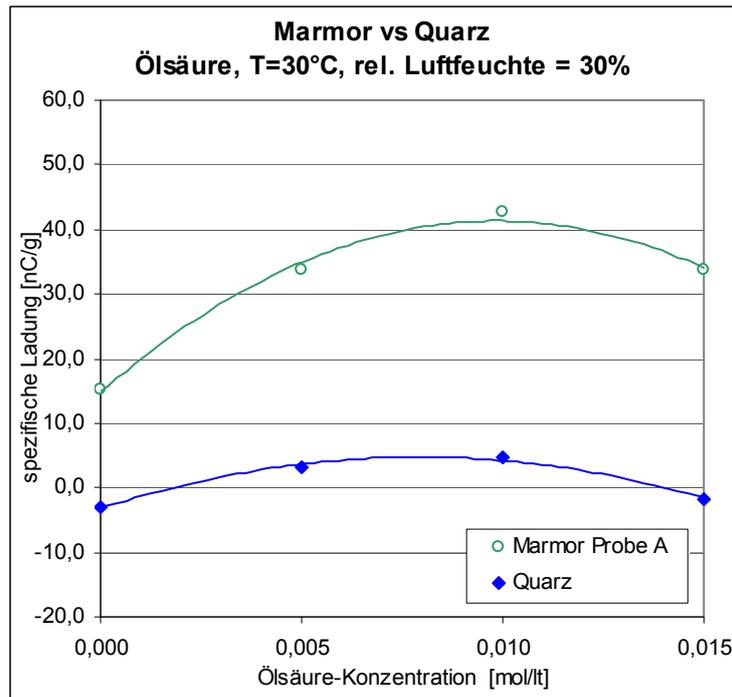


Abb. 7.6.: Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz
– Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

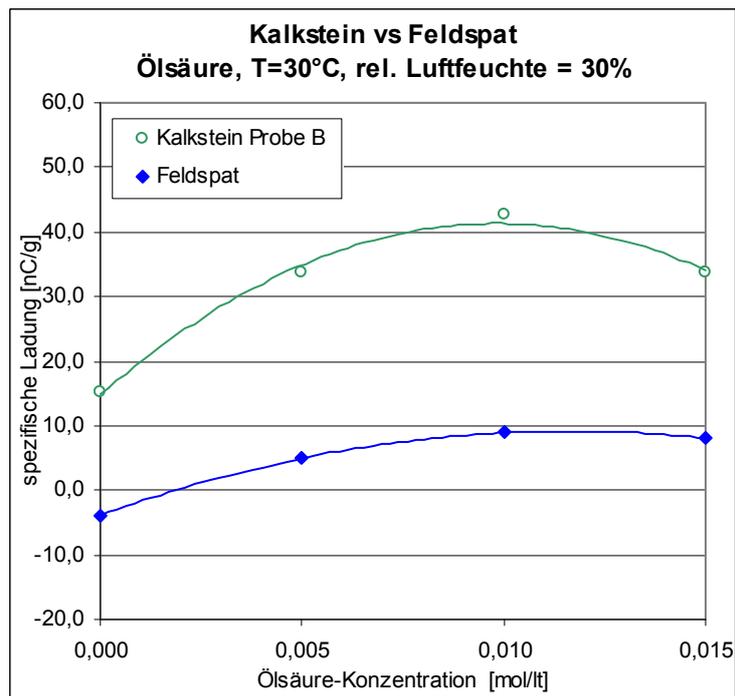


Abb. 7.7.: Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Feldspat
– Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

7.3.2. Einfluss von Benzoesäure

Durch die Konditionierung mit Benzoesäure nimmt die spezifische Aufladbarkeit von Marmor mit höher werdender Konzentration immer mehr ab (vgl. Kapitel 6.3.2.2). Auf die weiteren, mit Benzoesäure konditionierten Minerale Quarz und Feldspat konnte kein bedeutender Einfluss festgestellt werden. Die Folge daraus ist eine Verringerung der Ladungsdifferenz zwischen Marmor und Quarz bzw. Feldspat und damit eine mutmaßliche Verschlechterung des Sortierergebnisses bei Einsatz von Benzoesäure gegenüber unkonditionierten Mineralen.

7.3.3. Salicylsäure

Salicylsäure zeigte in den durchgeführten triboelektrischen Aufladeversuchen auf Marmor wie auch auf Quarz ein positives Maximum der Aufladbarkeit bei bestimmten Konzentrationswerten. Für die Marmorproben A und B betrachtet bedeutet dies sehr unterschiedliche Erkenntnisse, abhängig von der Reagenzienkonzentration, bei welcher sich dieses Maximum ausbildet. Im konkreten Beispiel führt der Vergleich der Marmorprobe A mit Quarz zu einem Maximum der Ladungsdifferenz von 16,3 nC/g bei 0,03 mol/l, der Vergleich von Marmorprobe B mit Quarz führt im Gegensatz dazu zu einer mit ab 0,01 mol/l zunehmender Salicylsäurekonzentration abnehmenden Differenz. Die graphische Darstellung dieser Situation ist in Abbildung 7.8. dargestellt. Da sich jedoch beide Mineralphasen nach Konditionierung mit Salicylsäure positiv aufladen, ist die Trennung im elektrischen Feld nicht möglich.

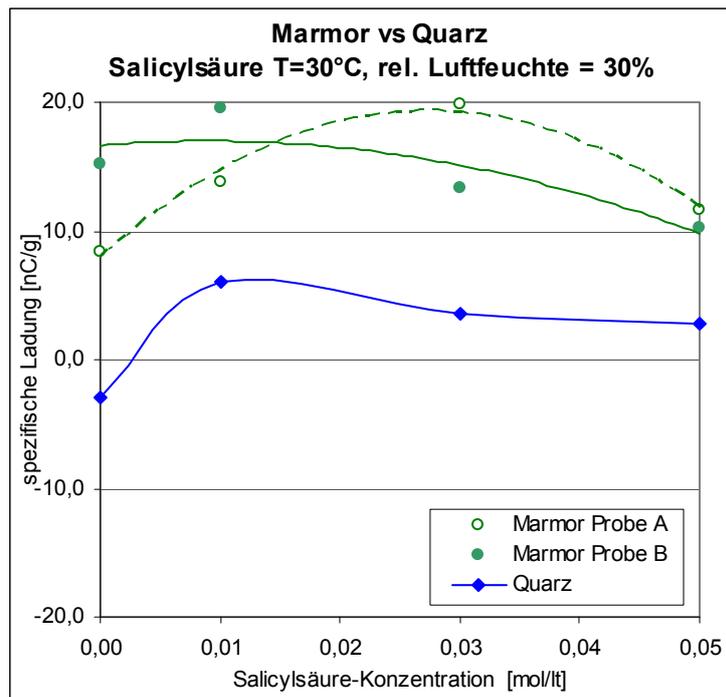


Abb. 7.8.: Vergleich des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Marmor und Quarz nach Konditionierung mit Salicylsäure – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

7.3.4. Kochsalz

Zugabe von Kochsalz in geringen Mengen führt aufgrund der Ladungsverringerung bei Marmor zu einer Verringerung der Ladungsdifferenz gegenüber nicht konditionierten Mineralen. Bei sehr hoher Salzdosierung steigt die Ladungsdifferenz an und konnte bei Marmor Probe A bei 1 mol/l auf 29,6 nC/g gegenüber 18,2 nC/g bei unbehandeltem Material erhöht werden. Marmor Probe B verlor durch Konditionierung mit NaCl seine Aufladbarkeit, wodurch die Ladungsdifferenz gegenüber Quarz über den gesamten Dosierbereich unter dem Wert ohne Kochsalzbeigabe blieb (siehe Abbildung 7.9.).

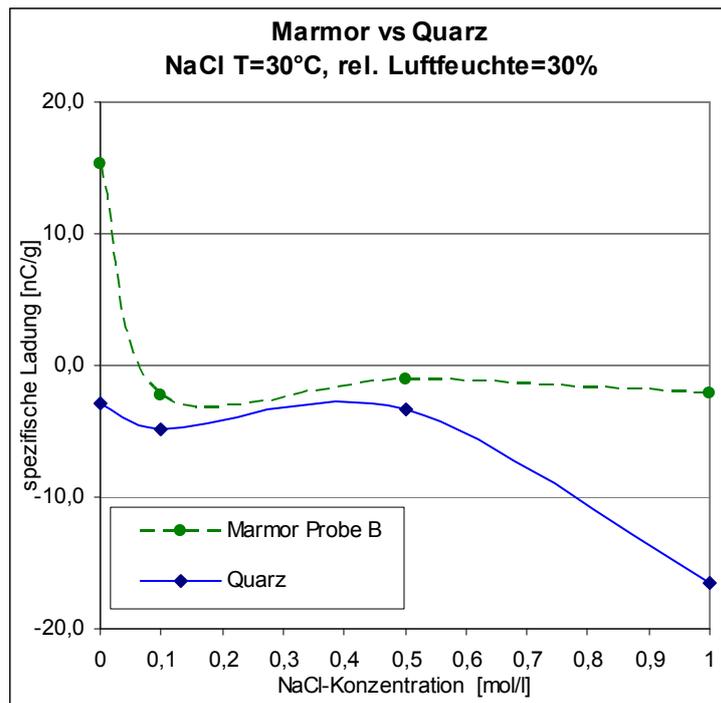


Abb. 7.9.: Einfluss der Kochsalzkonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz

7.3.5. Ätznatron

Durch die Konditionierung mit NaOH nimmt die spezifische Aufladbarkeit der untersuchten Minerale mit höher werdender Konzentration immer mehr ab bzw. ist kein Einfluss auf das triboelektrische Aufladeverhalten nachweisbar (vgl. Kapitel 6.3.2.4, 6.4.2.5 und 6.5.2.4). Die Folgen daraus sind eine Verringerung der Ladungsdifferenz zwischen den Mineralen, wobei mit einer Verschlechterung des Sortierergebnisses zu rechnen wäre.

7.3.6. Kationische Tenside

Modifiziertes Esterquat und quartiniertes Amin wurden auf Marmor und Quarz eingesetzt. Beide führten zu einer stärker positiven Aufladung von Marmor, quartiniertes Amin bewirkte außerdem eine stärker negative Aufladung von Quarz. Der Ladungsunterschied zwischen den Mineralphasen wurde mit modifiziertem Esterquat von 11,3 auf 25,3 nC/g verstärkt, das quartinierte Amin verstärkte auch die negative Aufladung von Quarz, wodurch der Ladungsunterschied mit einer Steigerung von 11,3 auf 29,2 nC/g auf das etwa 2,6-fache – bezogen

auf das unkonditionierte Mineral – gehoben werden konnte. Aufgrund dieses Verhaltens kann von einer Verbesserung des Trennverhaltens insbesondere bei Verwendung von quartiniertem Amin geschlossen werden.

30°C, 30% rel. Luftfeuchte 200ppm, [nC/g]	Nicht Konditioniert	Modifiziertes Esterquat	Quartiniertes Amin
Marmor	8,38	24,6	24,5
Quarz	-2,95	-0,72	-4,69
Differenz	11,33	25,32	29,19

Tab. 7.1.: Veränderung des Aufladeverhaltens von Marmor und Quarz durch Zugabe kationischer Tenside

7.3.7. Alkylalkohol

Durch die Konditionierung mit Triethanolamin erhöhte sich im Zuge der Ladungsmessungen mit zunehmender Konzentration die positive Ladung auf Marmor. Quarz wurde umgeladen und ebenfalls positiv. Daher ist eine Trennung dieser Minerale im elektrischen Feld nicht mehr möglich. (siehe Abbildung 7.10.).

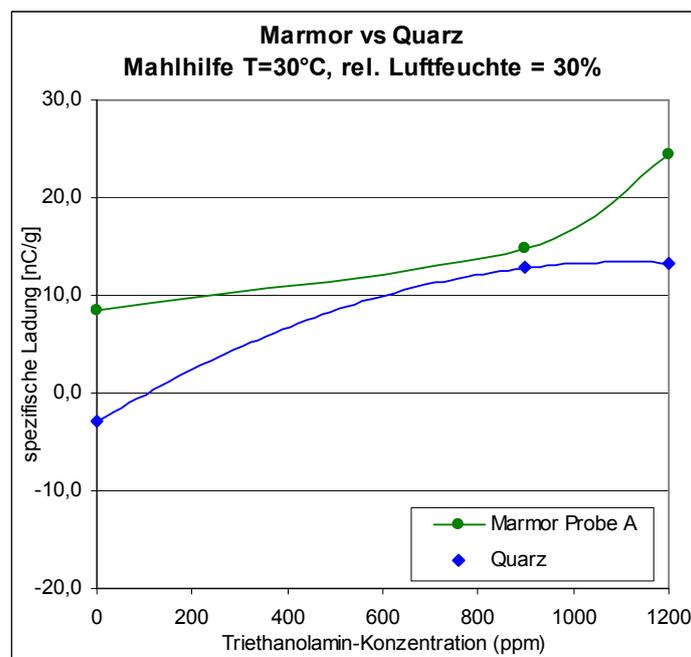


Abb. 7.10.: Einfluss von Triethanolamin auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz

7.4. Zusammenfassung der Ladungsmessungen

Eine grobe zusammenfassende Ergebnisdarstellung mit den Tendenzen bzw. Veränderung durch Parametervariationen sowie der Trends durch Zusatz von chemischen Reagenzien gibt Tabelle 7.2.

Parameter/Mineral	Marmor	Quarz	Feldspat	Pyrit	Grafit
Relative Luftfeuchte (r.LF)	Bei höherer r.LF Abnahme der Ladung	Kaum Einfluss, neg. Ladung von ca. -3 nC/g	Kaum Einfluss, neg. Ladung -2,8 nC/g	Trocken: Negativ; Feucht: positivierend	Kaum Einfluss erkennbar
Temperatur	Kaum Einfluss	Kaum Einfluss	n.b.	n.b.	n.b.
Angelegtes Potential	Gute Beeinflussung bei höherer r.LF	Ab 40% r.LF beeinflussbar	Ab 50% r.LF beeinflussbar	Bei zunehmender r.LF immer besser beeinflussbar	n.b.
Ölsäure	Stark positivierend	Positivierend	Positivierend	n.b.	n.b.
Benzoessäure	Verringerung der Ladung	Kaum Einfluss	Kaum Einfluss	n.b.	n.b.
Salicylsäure	Positivierend	Positivierend	Kaum Einfluss	n.b.	n.b.
Kochsalz	Verringerung der Ladung	In höherer Konzentration negativierend	Kaum Einfluss erkennbar	n.b.	n.b.
Ätznatron	Verringerung der Ladung	Kein Einfluss	Kein Einfluss	n.b.	n.b.
Kationische Tenside	Positivierend	Quart. Amin negativierend	n.b.	n.b.	n.b.
Triethanolamin	Positivierend	Positivierend	n.b.	n.b.	Kein Einfluss
	Unbehandelte Proben	Konditionierte Versuche			

Tab. 7.2.: Zusammenfassung der Trends und Veränderungen im Rahmen der systematischen Untersuchung zur Charakterisierung des triboelektrischen Aufladeverhaltens mineralischer Proben; n.b. ... nicht bestimmt

7.5. Erkenntnisse aus der Auswertung der Versuche

Aus der Betrachtung der in Kapitel 7.2. ermittelten Differenzwerte von Reinmineralproben folgt die in der elektrostatischen Aufbereitung bekannte Aussage, dass trockene Umgebungsbedingungen eine bessere Trennung mineralischer Rohstoffe mit sich bringen. Bei sämtlichen Messungen traten nämlich die höchsten triboelektrischen Ladungsdifferenzen bei möglichst geringen relativen Luftfeuchten auf.

Der Einsatz von Ölsäure als Reagenz kann aus Sicht des Trennergebnisses vorteilhaft sein, wenn sich die andere beteiligte Mineralphase nicht positiv aufladen würde. Ölsäure führt jedoch zum Nachteil verschlechterter Fließeigenschaften.

Eine mutmaßliche Verbesserung der Trennergebnisse ohne diese „Nebenwirkungen“ wird mit den getesteten kationischen Tensiden erreicht, da diese einerseits eine positivierende Wirkung auf Marmor, jedoch keinen Einfluss oder sogar eine Verstärkung der negativen Aufladung auf Quarz zeigten.

Salicyl- und Benzoessäure zeigten keine Beeinflussung des Aufladeverhaltens, daher dürften diese Reagenzien auch keinen Einfluss auf das Trennergebnis haben.

Kochsalz führte erst bei sehr hohen Dosierungen zu einer geringfügig höheren Ladungsdifferenz und würde daher das Produkt zu sehr kontaminieren.

Triethanolamin bewirkt bei hoher Konzentration eine in etwa gleiche Ladungsdifferenz wie unkonditionierte Marmor/Quarzproben. Interessant scheint die weitere Untersuchung mit Triethanolamin von Marmor und Quarz bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen.

Aus den Messungen kann geschlossen werden, dass organische Seitenketten generell positivierend auf die triboelektrische Aufladung wirken. Starke Anionen haben generell einen negativierenden Effekt.

8. Elektroscheider für die Feinstkornsartierung

8.1. Einführung

Die wesentlichen auf ein Korn im elektrischen Feld wirkenden Kräfte wurden bereits in Kapitel 4 detailliert behandelt. Darüber hinaus gibt es bei der Fein- und Feinstkornsartierung noch eine Reihe weiterer, die Selektivität des Trennprozesses maßgeblich beeinflussende Prozessbedingungen. Dies sind im Wesentlichen die bei der Fallbewegung durch Luft auftretenden Turbulenzen sowie interpartikuläre Haftkräfte, welche eine Agglomeration gegenseitig geladener Körner bewirken. Diese Haftkräfte werden nach Rumpf in folgende Systematik eingeteilt (Tabelle 8.1).^[63]

Festkörperbrücken	Sinterung, Aushärten von Bindemitteln, Chemische Reaktionen, Rekristallisation bei Trocknung, Schmelzhaftung
Grenzflächenkräfte und Kapillardruck an frei beweglichen Flüssigkeitsoberflächen	Kapillarkräfte, Oberflächenspannungen
Adhäsion und Kohäsion in nicht frei beweglichen Bindemittelbrücken	Zähflüssige Bindemittel, erhärtende Bindemittel, Adsorptionsschichten
Anziehungskräfte zwischen den Feststoffteilchen	Van der Waals-Kräfte, Valenzkräfte, Elektrostatische Aufladung
Formschlüssige Bindung	Fasern, eingefaltete Plättchen

Tab. 8.1.: Systematik der Haftkräfte (nach Rumpf)

Für die vorliegende Arbeit relevant sind Agglomerationen, welche sich aus Kombinationen von van der Waals- und elektrostatischen Haftkräften ergeben. Van der Waals-Kräfte sind Einwirkungen auf molekularer Ebene, welche entstehen, wenn der Schwerpunkt der Elektronenhülle von Molekülen oder Atomen nicht im Mittelpunkt des Atomkerns liegt.^[64] Die Wirkung des einen oder anderen Agglomerationsmechanismus' hängt im Wesentlichen von der Korngröße und der elektrostatischen Ladung der

Teilchen ab. Van der Waals-Kräfte entstehen durch Wechselwirkungen auf atomarer Ebene, und sind somit für sehr kleine Partikel in sehr geringem Abstand von nur wenigen Å maßgeblich, wobei für die Beurteilung der Maßgeblichkeit das Verhältnis zwischen Gewichtskraft des Teilchens und van der Waals-Kraft betrachtet wird. Nach Lifshitz, zitiert von Eichas (1993), beträgt die van der Waals Kraft zwischen 2 Kugeln unterhalb eines Abstandes $z < 500 \text{ \AA}$:

$$F_{vdW, Kugeln} = \left(\frac{\bar{h}\bar{w}}{16\pi z^2} \right) \left(\frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \right) \quad \text{Glg. 8.1.}$$

hw: Lifshitz-van der Waals-Konstanten

x_1, x_2 : Kugeldurchmesser

Wird die van der Waals-Anziehung zwischen zwei Kugeln gleich großen Durchmessers betrachtet, vereinfacht sich Glg. 8.1. zu

$$F_{vdW, Kugeln} = \frac{\bar{h}\bar{w}x}{32\pi z^2} \quad \text{Glg. 8.2.}$$

und es kann nach Eichas ein Verhältnis zwischen van der Waals- und Gewichtskraft F_g gebildet werden:

$$F_{g, Kugel} = \frac{g\rho\pi x^3}{6} \quad \text{Glg. 8.3.}$$

$$\frac{F_{vdW, Kugeln}}{F_{g, Kugel}} = \frac{3\bar{h}\bar{w}}{16g\rho\pi^2 x^2 z^2} \quad \text{Glg. 8.4.}$$

ρ Stoffdichte der Teilchen

Ist dieses Verhältnis >1 , so kommt es zu Agglomeration, bei Werten <1 kommt es zu keiner Agglomeration aufgrund von van der Waals-Kräften.

Die Lifshitz – van der Waals-Konstante hw leitet sich aus der Hamaker-Konstante A_H ab, welche für feste Stoffe im Vakuum etwa 10^{-20} bis 10^{-18} Joule beträgt. Die Ermittlung der Hamaker-Konstante kann über das

Ionisierungspotential und die Dielektrizitätskonstante des jeweiligen Materials erfolgen.^[65]

„Der makroskopische Ansatz nach Lifshitz beschreibt die Wechselwirkungen zwischen makroskopischen Körpern auf der Grundlage von deren spektroskopischen Eigenschaften.^[66,67] Die Lifshitz – van der Waals-Konstante kann aus dem komplexen Anteil der frequenzabhängigen Dielektrizitätskonstanten des jeweiligen Materials berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen dieser Konstanten und der Stoffkonstante A_H nach Hamaker wird mit nachstehender Gleichung beschrieben.“^[68,69]

$$\bar{h}\bar{w} = \frac{4}{3} \pi * A_H \quad \text{Glg. 8.5.}$$

Es zeigt sich aus Glg. 8.4., dass für mineralische Körner das oben beschriebene Verhältnis bei z.B. einem Abstand von ca. 30 Å und einem Durchmesser (Korngröße) von 100 µm in etwa bei 1 liegt.

Oberflächenrauigkeiten tragen in diesem Modell jedoch zu einer Erhöhung des Abstandes bei, wodurch der Einfluss der van der Waals-Kräfte auf noch kleinere Partikel beschränkt wird und davon ausgegangen werden kann, dass die Agglomerationen bei Korngrößen von unterhalb ca. 20 µm und realen Abständen mehrerer hundert Å voneinander relevant sind.

Der für die vorliegende Arbeit wichtige Vergleich von van der Waals- zu interpartikulärer elektrostatischer Anziehung wurde bereits detailliert von Eichas (1993) durchgeführt. Während der Einfluss der van der Waals-Kräfte entscheidend vom Partikelabstand zueinander abhängt, ist dieser Abstand für die elektrostatische Agglomeration praktisch nicht relevant. Die elektrostatische Anziehungskraft (verschiedenpolar) geladener Teilchen übertrifft die van der Waals-Kraft gemäß dieser Betrachtungen im Allgemeinen bei Korngrößen oberhalb von 10 µm.^[70] Letztlich stellen sich Anforderungen an die Desagglomeration in der trockenen Aufbereitung von Feinstkorn also sowohl auf Basis der van der Waals-Kräfte wie auch durch elektrostatische Anziehung.

Agglomerationen aufgrund von Feuchtigkeitsbrücken bzw. Kapillarkräften sind erst bei höheren Gutfeuchten zu erwarten.

Die maßgebliche Schwierigkeit bei der Trennung von Feinstkorn ca. $<63 \mu\text{m}$ im elektrostatischen Feld besteht also einerseits durch die ungünstigen Verhältnisse zwischen den beteiligten Kräften in Kombination mit den entstehenden Turbulenzen durch das Fallen in Luft, andererseits ergeben sich Sortierprobleme aufgrund von Agglomerationen, die sowohl durch van der Waals-Kräfte als auch durch elektrostatische Aufladung zusätzlich gebildet werden. Es wurden in der Vergangenheit bereits einige Ansätze erarbeitet, welche zum Ziel hatten, die Feinkornverwirbelungen zu verringern und dadurch die Selektivität der Trennung im Feinkorn zu erhalten. Fricke (1986) beschreibt Versuche in der deutschen Kaliindustrie, in deren Zuge gerichtete Luftströme mit ca. $0,5 \text{ m/s}$ von oben nach unten durch die eingesetzten Freifallscheider geleitet wurden, um den Verwirbelungen bzw. der daraus folgenden Staubentwicklung entgegenwirken zu können.^[71] In Kanada wurde Ende der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts ein Elektroscheider („Dilute Phase Electrostatic Loop“) zur Kohlenaufbereitung konstruiert, welcher geeignet sein sollte, die verschiedenen Macerale, d.h. die organischen gesteinsbildenden Komponenten von Kohle, voneinander zu trennen sowie Pyrit in ein eigenes Produkt ausbringen zu können. Ein Aufschluss der Macerale wurde bei Korngrößen unterhalb von $70 \mu\text{m}$ erwartet. Der dafür konstruierte Elektroscheider bestand im Wesentlichen aus einer rechteckigen Trennkammer sowie einem Kupferrohr zur triboelektrischen Aufladung der in einem zyklischen Gasstrom geführten Kohleteilchen. Der Produktaustrag erfolgte in der Trennkammer durch je vier seitliche Absaugöffnungen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass in der Trennkammer quasilaminare Verhältnisse herrschten. Es gelang, den Pyritgehalt der Aufgabe von $2,8\%$ auf $7,0\%$ bei hohem Ausbringen von 89% im Positivprodukt anzureichern. Das Kohleprodukt konnte entsprechend verbessert werden, jedoch mussten aufgrund der unterschiedlichen Aufladung der diversen Macerale leider auch hohe Kohleverluste im Bergeprodukt in Kauf genommen werden. Eine schematische Darstellung des genannten Feinkorn-Elektroscheiders ist aus Abbildung 8.1. ersichtlich.^[72]

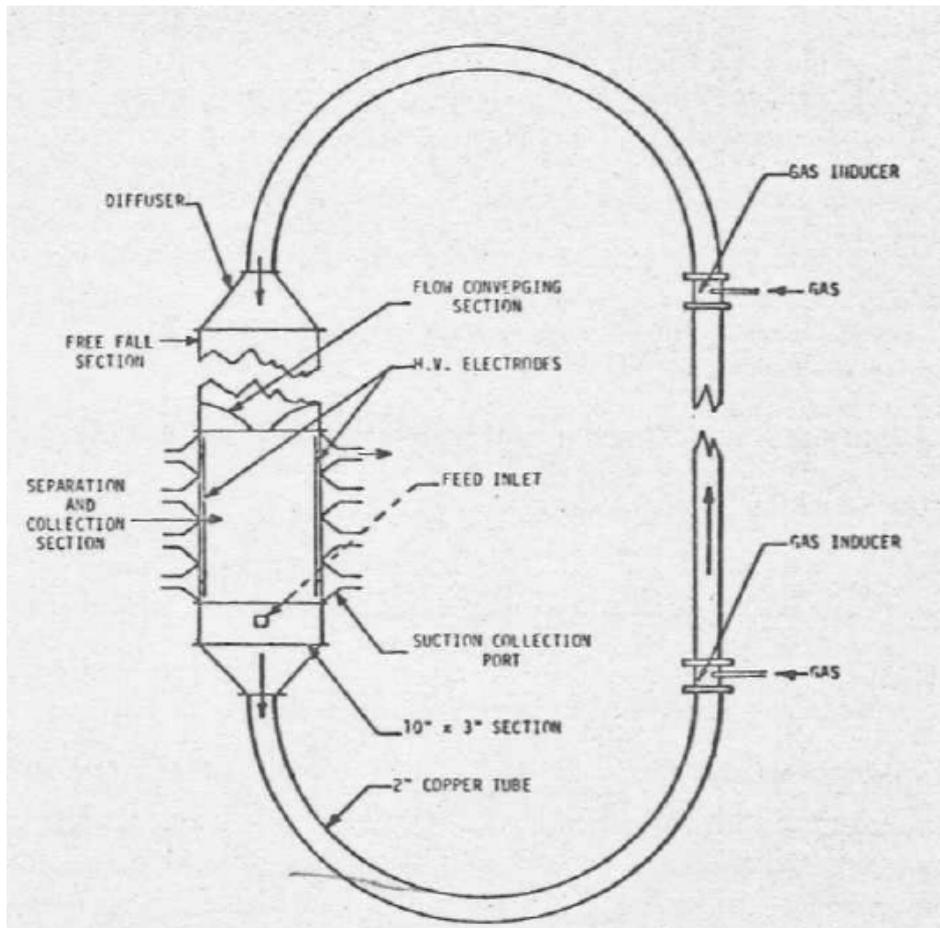


Abb. 8.1.: „Dilute Phase Electrostatic Loop“ (nach Anderson e.a.)

Ein weiterer beachtenswerter Versuch zur Feinstkorn-trennung im Laborkleinversuch wurde im Rahmen der Dissertation von Eichas (1993) dokumentiert.

Die entworfene Konstruktion bestand aus einer triboelektrischen Aufladeeinheit sowie einer Trennkammer mit zwei Walzen aus Polycarbonat, in denen feststehende Hochspannungselektroden montiert sind (siehe Abbildung 8.2.).

Die triboelektrische Aufladung erfolgt dabei durch eine sich drehende Bürste (4), welche das feindisperse Aufgabegut (2) über den gesamten Querschnitt eines zylindrischen Feststoffbehälters (1) kontinuierlich abträgt, entlang einer Bürstenkammerwand mitführt und durch die Kontaktierung der Partikel untereinander sowie mit der Wand die Triboaufladung bewirkt. Der Nachschub des Aufgabegutes auf die rotierende Bürste erfolgt durch einen Kolben (3). Auf der Gegenseite der Bürstenkammer erfolgt eine Vermengung der geladenen Partikel mit einem Druckluftstrom (5), wodurch ein Staubstrom entsteht, der über eine

Schlitzdüse (6) zwischen die Trennelektroden (7) eingeblasen wird (siehe dazu auch: von Szantho^[73]). Die feinen Partikel lagern sich anschließend auf den angetriebenen Walzen (9) ab und werden aus der Trennzone heraus in den Bereich der jeweils diametral zu den Hochspannungselektroden angebrachten Abstoßelektroden (10) geführt. Die Abstoßelektroden sind gegenpolig zu den Trennelektroden, d.h. gleichpolig zum Trenngut geladen, wodurch dieses von der Walzenoberfläche abgestoßen wird. Restliche anhaftende Partikel werden durch Kohlefaserbürsten (11) entfernt. Der separierte Feststoff wird in Auffangbehältern (12) gesammelt, nicht abgelenktes Mittelgut wird an einer Metallfritte (13) von der austretenden Trägerluft abgeschieden.^[74]

Die Trennergebnisse aus den Versuchsreihen zeigen eine gute Trennbarkeit aller eingesetzten binären Mischungen (Kombinationen aus Quarz, Calcit, Schwerspat, Flussspat, Anthrazit). Gehalte und Ausbringen lagen teilweise über 95%.^[75]

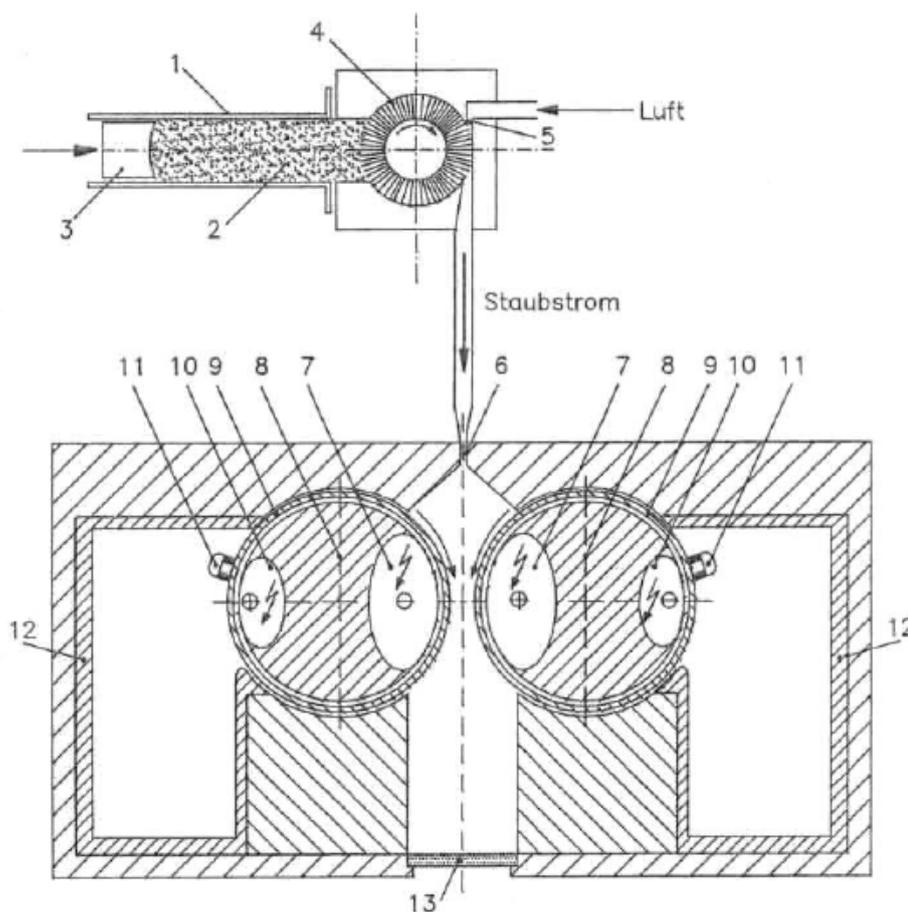


Abb.8.2.: Elektrostatischer Walzenscheider zur Feinstkorn-trennung (nach Eichas)

Mangelberger (2007) konstruierte einen Feinstkornelektroscheider mit davor geschaltetem Sichter zur Triboaufladung, welcher vollständig in transparentem PVC gebaut wurde. Durch Unterdruck wurde in dieser Trennkammer eine Führung des Feinstkornstromes gewährleistet. Das Konzept zeigte zwar durch quer zu den Elektrodenplatten auftretende Luftströmungen, welche die Trennprodukte verwirbelten, konstruktions-technische Probleme auf,^[76] es konnten jedoch erstmals auch größere Mengen als nur wenige Gramm/Minute sortiert werden.

Im Zuge der oben beschriebenen Arbeiten konnte jedenfalls eindeutig nachgewiesen werden, dass geführte Luftströme einen praktikablen Lösungsweg für die Feinstkornsartierung darstellen können. Entstandene Agglomerate müssen durch Energieeinwirkung geeigneter Art vor der Trennung aufgelöst werden.

8.2. Konzept des Feinstkornscheiders

Die oben angegebenen früheren Erkenntnisse führten zu einem Lösungsansatz, welcher aus der Konstruktion eines strömungsmechanisch angepassten, zylindrischen Elektroscheiders bestand. Die triboelektrische Aufladung der Körner erfolgt in der bestehenden triboelektrischen Aufladeeinheit, die zu diesem Zwecke oberhalb des Trennapparates situiert wird und durch die schnelle Rotation im Apparat nicht nur die triboelektrische Aufladung, sondern auch das Auflösen von Agglomeraten bewirkt. Die geladenen Teilchen fallen aus der Aufladeeinheit in den Trennraum des Scheiders, wo sie in einem beruhigten Luftstrom nach unten geführt werden und zwischen die, im unteren Teil des Trennraumes koaxial angebrachten Hochspannungselektroden gelangen. Dort erfolgt die elektrostatische Sortierung. Danach werden die Körner durch eine kreisförmige Trennschneide unterhalb der Trennkammer in Produktströme geteilt, pneumatisch aus dem Scheider ausgefördert und in Aerozyklonen vom Luftstrom abgeschieden. Das Konzeptfließbild des Trennapparates zeigt Abbildung 8.3.

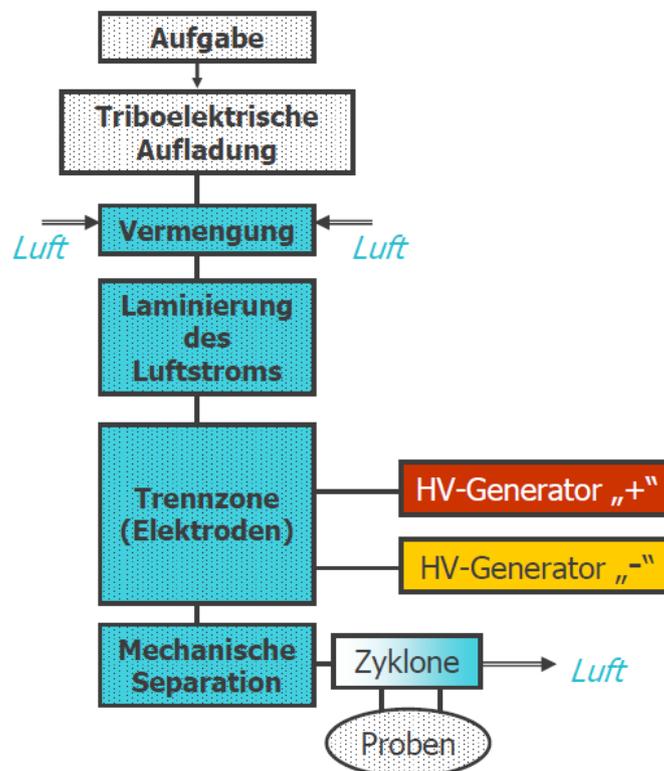


Abb. 8.3.: Konzeptfließbild des Feinstkornscheiders

8.3. Konstruktion

8.3.1. Rohrscheider

Das Kernstück des Feinstkornelektroscheiders (siehe Abbildung 8.4.) besteht neben der in Kapitel 5.1 detailliert beschriebenen triboelektrischen Aufladeeinheit aus zwei lotrechten, koaxial angebrachten, transparenten Kunststoff-Rohren (3 und 5). Der etwa 50 mm breite Ringraum zwischen den Rohren bildet die 1.800 mm lange Trennkammer. Am Kopfende des Innenrohres befindet sich ein aufgesetzter Drehkegel (1) aus PTFE zur radialen Verteilung des aus der triboelektrischen Aufladeeinheit austretenden Aufgabegutes in den Scheider. Von hier gelangt es zuerst in den Luftmischbereich, wo die Dispergierung mit der Trägerluft erfolgt. Nach Durchquerung der Beruhigungszone in der oberen Hälfte der Trennkammer werden die Körner in der Trennzone zwischen den Elektrodenrohren (4 und 6) durch das elektrische Feld geführt, wo die Separation nach der Polarität der triboelektrischen Kornladung erfolgt. Die Hochspannungsversorgung für die Innenelektrode erfolgt durch ihre Aufhängung (13-16) hindurch, der Anschluss der Außenelektrode kann durch die Anschlussöffnung (23) erfolgen.

Unterhalb der Trennkammer befindet sich ein Austragsbehälter (7 und 8), in dem eine kreisrunde Trennschneide (10) die Produktströme mechanisch in ein Innen- und Außenprodukt teilt. Der Durchmesser dieser Trennschneide ist in der ersten Ausführung derart gewählt, dass die mechanische Teilung in der Mitte des Ringraumes erfolgt. Die Körner gelangen durch die Austragsöffnungen (11 und 17) aus dem Rohrscheider und werden an Edelstahl-Aerozyklonen von der Trägerluft abgeschieden.

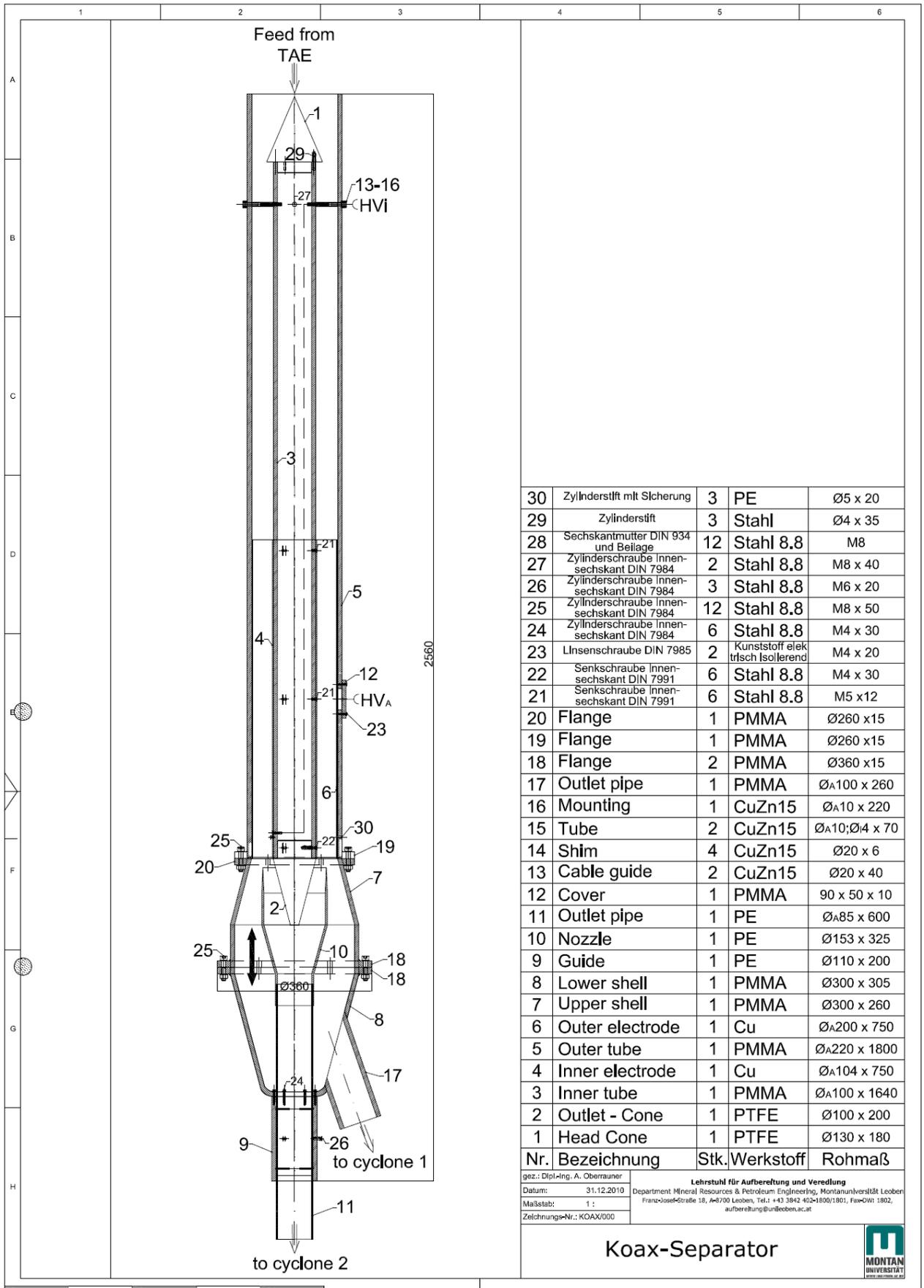


Abb. 8.4.: Technische Zeichnung des Feinstkornscheiders

8.3.2. Luftanlage

Der Trägerluftstrom im Scheider wird von einem Radiallüfter in Form eines handelsüblichen Kesselstaubsaugers erzeugt. Die Einstellung des Volumenstromes erfolgt vor jedem Versuch über eine Fremdluftöffnung.

Nach der elektrostatischen Trennung des Aufgabegutes erfolgt eine pneumatische Förderung der Produkte in jeweils einen Edelstahl-Aerozyklon, wo der Feststoff von der Luft abgeschieden wird. Der Volumenstrom V_{Prod} der aus den Zyklonen austretenden Luft wird je Produkt durch Luftgeschwindigkeitsmessung (v_{Prod}) in einem definierten Rohrmessquerschnitt mittels Heizdrahtanemometer gemäß

$$K \cdot 0,25 d^2 \pi v_{\text{Prod}} = V_{\text{Prod}} \quad \text{Glg. 8.6.}$$

errechnet. Der Koeffizient K wird benötigt, um aus der Maximalgeschwindigkeit im Messquerschnitt praktikabel auf die mittlere Luftgeschwindigkeit v_{Prod} umzurechnen. Bei Rohrdurchmessern >65 mm beträgt $K=0,85$.^[77]

Der Gesamtvolumenstrom im Feinkornscheider ergibt sich aus der Addition der beiden Produktvolumenströme. Aus diesem kann wiederum die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Ringraum berechnet werden. Der Rohrdurchmesser d im Messbereich beträgt 69,8 mm (siehe Abbildung 8.5.).

Das Einstellen der Luftmenge je Produkt erfolgt über Quetschblenden. Nach der Lufteinstellung befinden sich die Luftzusammenführung und der Staubsauger mit Filter zum Rückhalten von Feinstpartikeln. Die Reinigung des Scheiders und der Rohrleitungen erfolgt im Versuchsbetrieb pneumatisch mit Druckluft durch Kanülen nach jedem Einzelversuch.

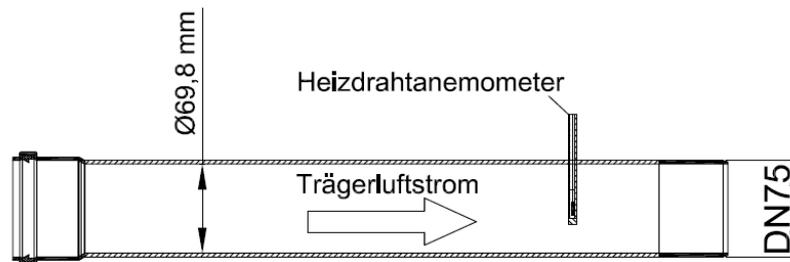


Abb. 8.5.: Luftmengenmessung Koaxscheider

8.3.3. Luftstromsimulation

Die Simulation der Strömungsverhältnisse wurde mit der Software „Flow“ zwei- und dreidimensional am Lehrstuhl für Modellierung und Simulation metallurgischer Prozesse an der MUL durchgeführt. Abbildung 8.6. stellt das Rechenmodell für die Simulation dar. Die grüne Fläche bezeichnet eine Hälfte des rotationssymmetrischen Trennraumes. Der untere Rand der Abbildung stellt die Mittelachse des Scheiders dar, die Luft strömt von links nach rechts.



Abb. 8.6.: Rechenmodell für die Strömungssimulation in „Flow“

Für die Strömungssimulation wurde ein Gesamtluftdurchsatz von $100 \text{ m}^3/\text{Std}$ angenommen. Aufgrund des zur Umgebung offenen Einlasses beträgt der Druckunterschied an dieser Stelle 0 Pa , die errechnete durchschnittliche Luftgeschwindigkeit beträgt an dieser Stelle $0,88 \text{ m/s}$.

Die Simulation ergibt von oben nach unten Ablösungen im Bereich des Einlaufkegels, die aufgrund der in die Trennraummitte hineinragenden Aufgabekante entstehen. Bis etwa zur Hälfte des Scheiders, der Dispergier- und Beruhigungszone (Luftmischzone), klingen diese anfänglichen Turbulenzen ab, es bildet sich eine zunehmend laminarer werdende Strömung aus. Im Bereich der Elektroden (Trennzone) ist eine deutlich laminare Strömung zu erkennen. Abbildung 8.7. stellt die beschriebenen Simulationsergebnisse farblich dar. Rote Bereiche deuten auf turbulente Strömungen hin, gelbe und grüne Zonen stellen

beruhigte Luftströmungen dar.

Im Auslassbereich wird die Strömung zweigeteilt. Die Steuerung der Luftmenge in die beiden Produktbereiche erfolgt durch die Blenden im Ansaugsystem.

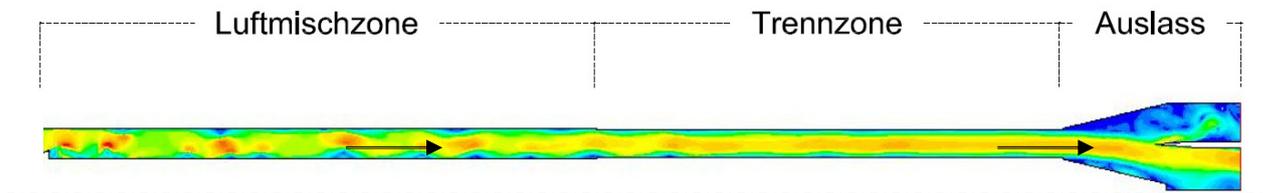


Abb. 8.7.: Flow-Simulationsergebnis Feinstkornscheider

Wird die Simulation über mehrere Sekunden hinweg fortgeführt, so ist in der 2D-Simulation eine Art dauernde Phasenverschiebung in der Beruhigungszone erkennbar. Aufgrund dieser Simulationsdaten konnte davon ausgegangen werden, dass es zu keinen nennenswerten Verwirbelungen und/oder Querströmungen in der Trennkammer kommt. Die 3D-Simulation ließ auf noch günstigere Verhältnisse schließen und eine langsame Schraubenbewegung der Luftströmung in der Trennkammer erwarten.

Insgesamt konnten aufgrund der Ergebnisse der Simulation strömungstechnisch günstige Verhältnisse für die Elektroscheidung eruiert werden. Die Verifizierung der Strömungsverhältnisse erfolgte nach Aufbau des Scheiders durch Rauchversuche.

8.3.4. Hochspannungsversorgung

Die Hochspannung – positive und negative Polarität – wird von zwei HCE-Hochspannungskassetten der Fa. fug erzeugt. Die externe Ansteuerung dieser beiden Hochspannungsgeneratoren erfolgt von einem zentralen Schaltpult aus. Die maximale Spannung beträgt +/-35 kV. Es können prinzipiell Feldstärken größer als die Überschlagsfeldstärke der Umgebungsluft von etwa bei $3 \cdot 10^6$ V/m erzeugt werden. Abbildung 8.8. zeigt die Hochspannungskassetten mit dem dazu entwickelten und mit tatkräftiger Unterstützung am Institut für Elektrotechnik an der Montanuniversität gefertigten Schaltpult.

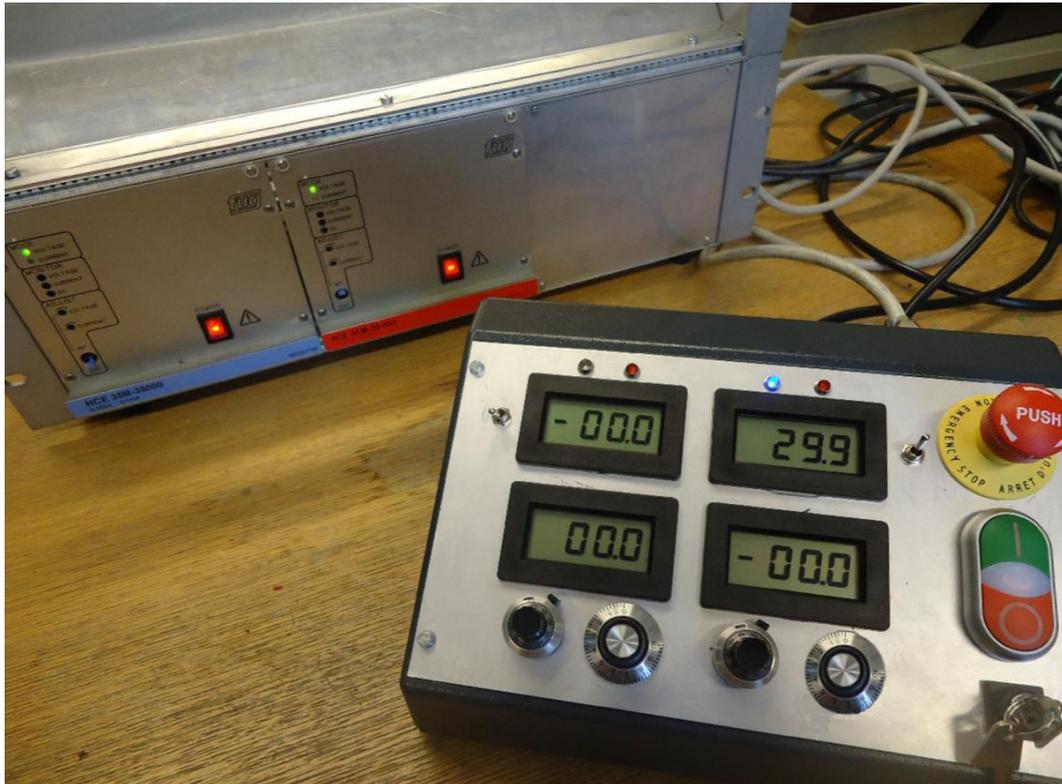


Abb. 8.8.: Hochspannungsversorgung für den Koaxscheider

8.3.4.1. Funktionsweise der Hochspannungsgeneratoren

Die verwendeten Hochspannungsgeneratoren bestehen im Wesentlichen aus drei Funktionsgruppen:

- Netzversorgung und Schwingeinheit
- HF-Resonanz-Übertrager, Hochspannungsgleichrichtung mit Siebung
- Hochspannungsteiler und Strommesswiderstand
- Regelteil mit Mess- und Regelverstärker,
Referenzspannungserzeugung, Pulsbreitenmodulator zur
Ansteuerung der Schwingeinheit, Versorgung der Regeleinheit über
Netztrafo und +/- 15 V Festspannungsregler

Die gleichgerichtete Netzspannung versorgt die Gegentakt-Rechteckschwingstufe. Zur Einstellung bzw. Regelung wird die Rechteckspannung pulsbreitenmoduliert. Diese Rechteckspannung wird anschließend mit einem HF-Übertrager hochtransformiert und anschließend gleichgerichtet. Die so entstehende gleichgerichtete Hochspannung wird über

einen RC-Filter gesiebt und gelangt über einen Schutzwiderstand zum Ausgang.

Ein Präzisions-Hochspannungsteiler liefert die Messspannung für die Regelung. Diesem Wert wird zur Verbesserung der Dynamik noch ein Anteil eines kapazitiven Teilers am Ausgang der HV-Gleichrichtung addiert. Die geteilte Spannung wird über einen integrierten Verstärker auf $+10\text{ V} = U_{\text{nenn}}$ normiert.

Die normierte Spannung bildet den Istwert für den Spannungsregelverstärker und dient der Versorgung des Spannungs-Monitors. Der Spannungsregelverstärker vergleicht diese Spannung mit dem Sollwert (die durch das Spannungseinstellpotentiometer geteilte Referenzspannung bzw. eine externe Programmierspannung). Die Differenz daraus wird verstärkt und gelangt als Regelsignal an den Eingang des Pulsbreitenmodulators, welcher die Schwingeinheit ansteuert. Der Strom der Hochspannungsgleichrichtung fließt über den sehr kleinen Strommesswiderstand. Der daraus an diesem Widerstand resultierende Spannungsabfall wird ebenfalls über integrierte Verstärker auf $+10\text{ V} = U_{\text{Inenn}}$ normiert.

Diese normierte Spannung dient als Istwert für die Strombegrenzung und wird auch an den Strommonitor geführt. Der Regelverstärker für die Ausgangsstromregelung vergleicht diese Spannung mit dem Sollwert. Die Differenz wird verstärkt und gelangt ebenfalls an den Eingang des Pulsbreitenmodulators.

Die $\pm 15\text{ V}$ -Versorgung der Regelelektronik wird überwacht. Unterschreitet sie einen Minimalwert, wird der Eingang des integrierten Pulsbreitenmodulators gesperrt, um einen unkontrollierten Betrieb des Hochspannungsgenerators auszuschließen.

8.4. Betrieb des Feinstkornscheiders

Der Apparat wurde nach mehrmonatiger Fertigungszeit durch die Fa. ABC in Treffen bei Villach am 6.10.2011 erstmals im Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung in Betrieb genommen. Abbildung 8.9. zeigt den Feinstkornscheider noch in der Fertigstellungsphase, Abbildung 8.10. stellt den Versuchsstand dar.



Abb. 8.9.: Feinstkornscheider während der Fertigung
(noch ohne Elektrodensystem)



Abb. 8.10.: Versuchsstand „Feinstkornscheider“ am Lehrstuhl für
Aufbereitung und Veredlung

8.4.1. Sortierversuche mit feinstkörnigen Marmorproben

Die Versuche zur Inbetriebnahme des Scheiders umfassten sowohl Tests, um die Masseverteilung in Abhängigkeit der Luftmenge je Produktstrang festzustellen, wie auch Untersuchungen zur Trennbarkeit eines Marmor/Quarz-Gemenges.

8.4.1.1. Probenbeschreibung

Für die Erstversuche am Feinstkornscheider wurden artifizielle mineralische Gemenge aus Marmor aus einer Füllstoffaufbereitung mit eisenfrei vermahlenem Quarz verwendet. Der HCl-unlösliche Anteil des Marmors betrug 1,00%. Die Herstellung der unterschiedlichen Mischungen erfolgte durch 15-minütige Vergleichmäßigung im „Eirich“-Intensivmischer. (Abb. 8.11). Verwendet wurde eine Mischung mit 10% Quarzanteil. Nach Herstellen der Mischung erfolgte die Konditionierung in der Klimakammer bei 25 °C und 30% relativer Luftfeuchte über eine Zeitdauer von >6 Stunden. Die Aufgabemenge je Versuch betrug 500 g.



Abb. 8.11.: Eirich-Intensivmischer am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung

8.4.1.2. Luftabhängige Massenverteilung des Aufgabegutes

Um die Abhängigkeit des Masseausbringens von der Luftverteilung im Innen- und Außenprodukt des Scheiders zu ermitteln, wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Luftmengen je Produktstrang ohne Hochspannung durchgeführt. Die Einstellung der Luftmengen erfolgte durch Verengung der Luftleitungen im Ansaugteil.

Es zeigte sich, dass bei gleicher Luftmenge etwa 2/3 des Aufgabegutes in das Außenprodukt gelangt, 50% Masseausbringen wird erst bei völliger Unterbrechung des Luftstromes im Außenprodukt erreicht (Abbildung 8.12.). Die Abhängigkeit des Masseausbringens von der Luftmenge ist nahezu linear.

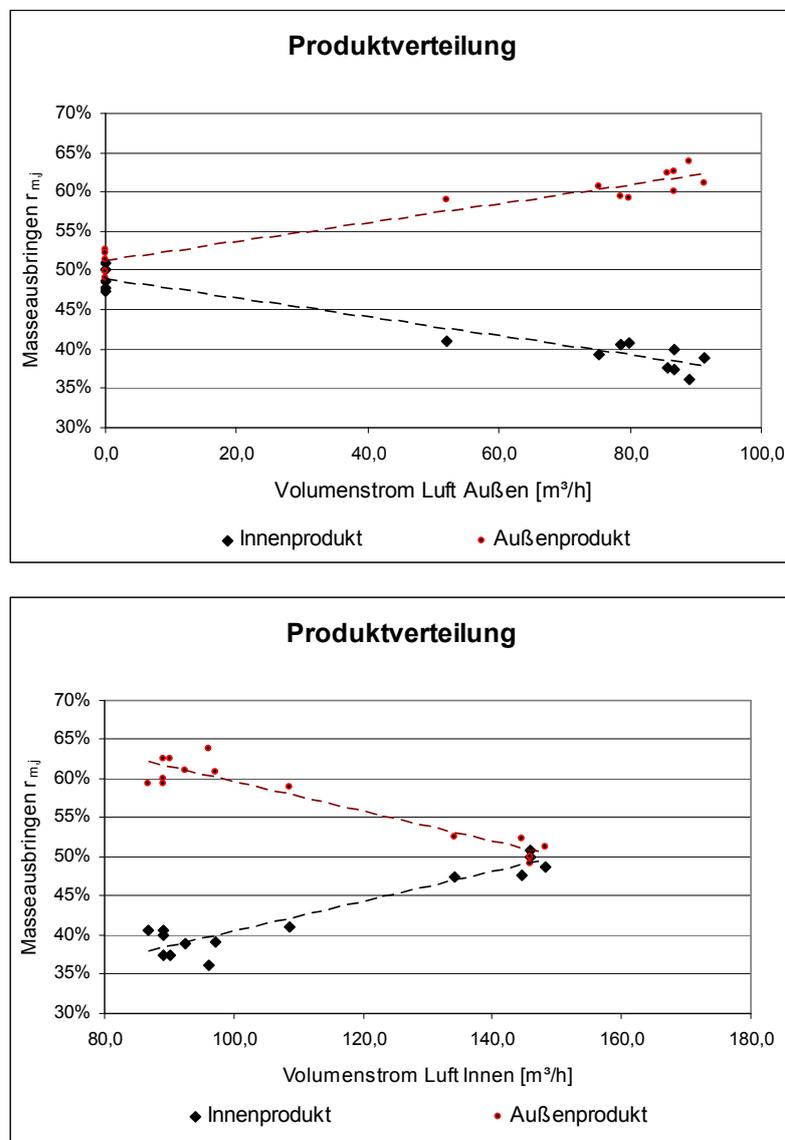


Abb. 8.12.: Masseausbringen Feinstkornscheider in Abhängigkeit von der Luftmenge – Ausgleich linear

8.4.2. Systematische Parameterstudie

Ziel der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen am Feinstkornscheider ist die Ermittlung von apparatespezifischen Kennzahlen zur Beurteilung des Trennerfolges mit dem Marmor-Quarz-Gemenge.

Dazu wurden neben der Änderung der Rohgut-Aufgabetemperatur auch Versuche mit unterschiedlichen Elektrodenspannungen und diversen Mischungsverhältnissen von Marmor und Quarz durchgeführt.

8.4.2.1. Abhängigkeit der Sortierung von der Aufgabetemperatur

Wie bereits mehrfach erwähnt, hängt das triboelektrische Aufladeverhalten von Oberflächen unter anderem von der Temperatur des Aufgabegutes ab und es empfiehlt sich daher, vor Variation anderer Parameter immer zuerst Versuche bei unterschiedlichen, in der Praxis wirtschaftlich umsetzbaren, Temperaturen durchzuführen. Die Versuche am Koaxscheider wurden mit Aufgabetemperaturen von 25 °C bis 160 °C durchgeführt. Die Spannung an den Elektroden betrug +/- 10 kV und es konnte sowohl gehalts- als auch ausbringensbezogen eine klare Abhängigkeit festgestellt werden. Bis zu einer Aufgabetemperatur von 100 °C nahm die Selektivität der Trennung stets zu, was sich anhand sinkender Gehalte und sinkendem Inhaltsausbringen an HCl-unlöslichen Bestandteilen im Marmorprodukt („A“) zeigte. Darüber hinausgehende Temperaturen verschlechterten das Trennergebnis wiederum leicht. Das beste Inhaltsausbringen wurde bei 100 °C erreicht und verringerte sich erst danach wieder etwas.

Die Analysen der Produkte aus den Chargenversuchen im Feinstkornscheider entstammten jeweils aus den in den Aerozyklonen abgeschiedenen zwei Trennprodukten („A“ für Außenelektrode und „I“ für Innenelektrode, jeweils mit der entsprechenden Polarität „+“ oder „-“) und dem im Feinstkornscheider anhaftenden Elektrodenrückstand, wobei beobachtet werden konnte, dass nahezu sämtliches anhaftende Material sich an der positiv geladenen Innenelektrode ablagerte. Dieser

Rückstand wurde – basierend auf der prinzipiellen Möglichkeit einer industriell umsetzbaren Elektrodenabreinigung – bilanztechnisch dem Innenprodukt hinzugerechnet. Abbildung 8.13. stellt die Abhängigkeit des HCl-unlöslichen Rückstands bzw. des Inhaltsausbringens an HCl-unlöslichem Rückstand der Trennprodukte von der Aufgabetemperatur dar.

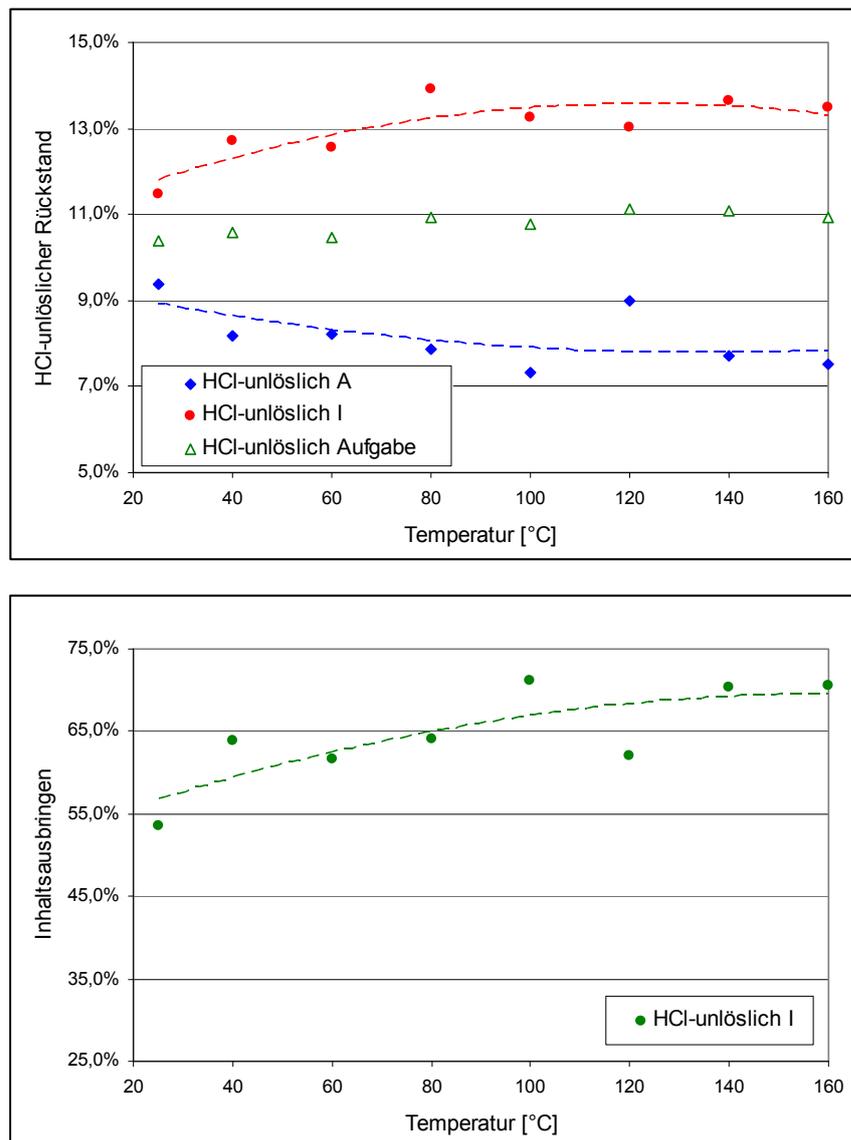


Abb. 8.13.: Sortierergebnisse der Versuche am Feinstkornscheider –
Temperaturreihe – Ausgleich polynomisch 2. Ordnung

Aus den erhaltenen Ergebnissen der Temperaturreihe wurde der für die Sortierung beste Arbeitsbereich mit 100 °C Aufgabetemperatur ermittelt

und in weiterer Folge die Abhängigkeit der Trennbarkeit von der eingestellten Elektrodenspannung bei dieser Temperatur untersucht.

8.4.2.2. Abhängigkeit der Sortierung von der angelegten Elektrodenspannung

Sowohl Intensität als auch Polarität der an die Elektroden angelegten Hochspannung beeinflussen die Sortierung im elektrischen Feld. Für die Untersuchungen wurde jeweils eine Elektrode konstant belassen und die jeweils andere in ihrer Spannung variiert. Es zeigt sich sowohl hinsichtlich des Gehaltes wie auch des Inhaltsausbringens an HCl-unlöslichem Rückstand eine Abhängigkeit. Das Inhaltsausbringen an HCl-unlöslichen Bestandteilen im Quarzprodukt verschlechtert sich massiv bei sinkender Spannung an einer der Elektroden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 8.2. bzw. Abbildung 8.14. dargestellt.

Eine Umpolung der Elektroden wurde ebenfalls durchgeführt, die Ergebnisse dieser Versuche zeigten eindeutig, dass die Polung mit Innen positiver und Außen negativer Spannung die weitaus selektivere Trennung hervorruft.

Spannung Innen- elektrode [+kV]	Spannung Außenelektrode [-kV]	Gehalt HCl- unlöslich Aufgabe	Außenelektrode (A)			Innenelektrode (I)		
			Masse ausbringen	Gehalt HCl- unlöslich	Inhalts- ausbringen	Masse ausbringen	Gehalt HCl- unlöslich	Inhalts- ausbringen
10,0	5,0	10,93%	52,2%	9,14%	43,7%	47,8%	12,89%	56,3%
10,0	10,0	10,76%	42,3%	7,34%	28,9%	57,7%	13,26%	71,1%
10,0	15,0	10,35%	42,8%	7,31%	30,3%	57,2%	12,62%	69,7%
5,0	10,0	10,93%	58,3%	8,95%	47,8%	41,7%	13,70%	52,2%
10,0	10,0	10,76%	42,2%	7,34%	28,8%	57,8%	13,26%	71,2%
15,0	10,0	10,27%	41,7%	7,82%	31,7%	58,3%	12,02%	68,3%

Tab.8.2.: Bilanztafel zur Sortierung im Feinstkornscheider
- Spannungsreihe

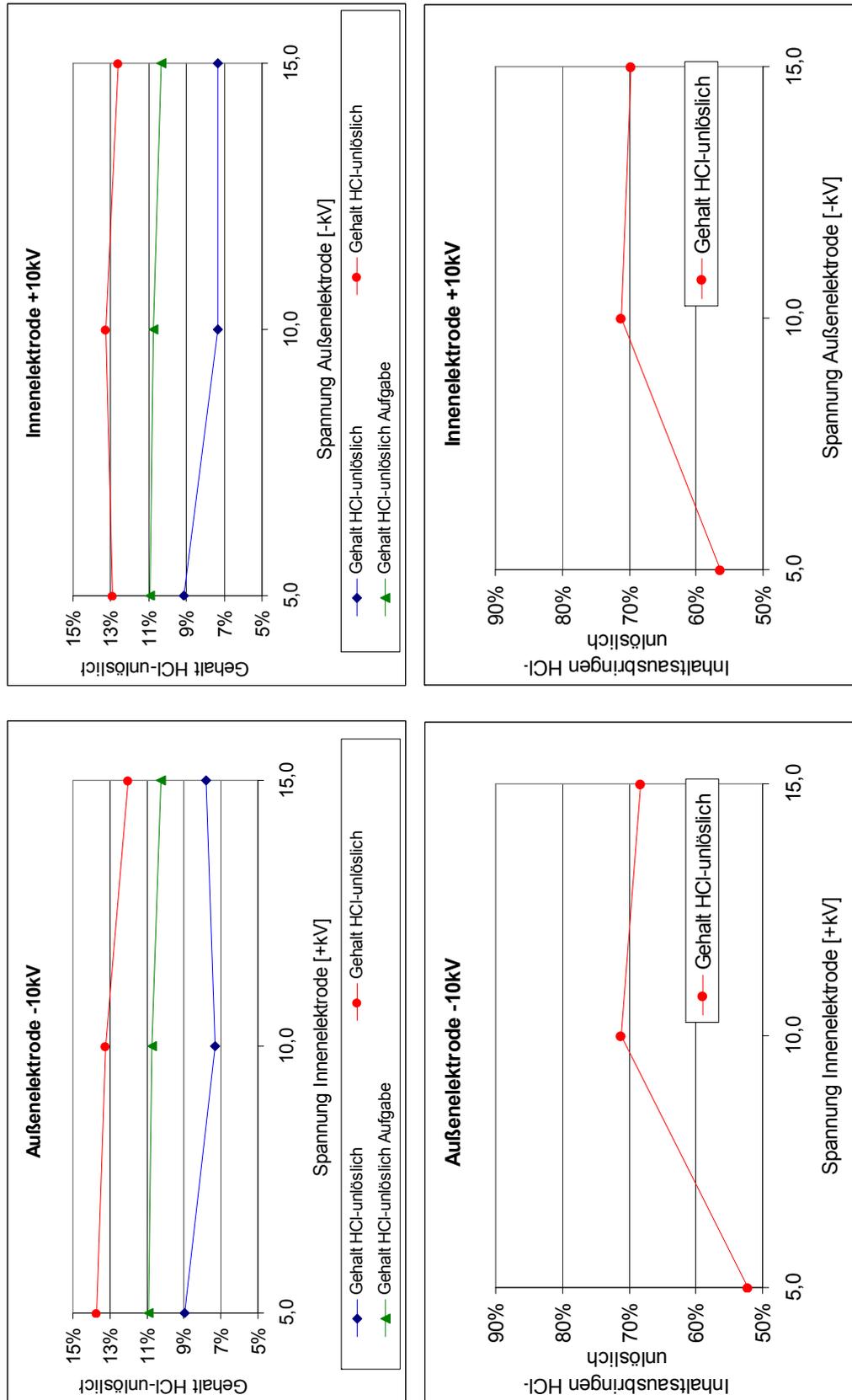


Abb. 8.14.: Sortierergebnisse der Versuche am Feinstkornscheider – Spannungsreihen

8.4.2.3. Selektivität der Sortierung

Die Darstellung im modifizierten Kappa-Netz nach Steiner führt zu einer anschaulichen Bewertbarkeit eines Aufbereitungsverfahrens. Im Fall der Marmorauflage werden zweckmäßig die HCl-löslichen Gehalte im Calcitprodukt auf der Ordinate gegen das Inhaltsausbringen auf der Abszisse aufgetragen. Je „höher“ und gleichzeitig weiter „rechts“ sich sodann ein Wertepaar befindet, desto selektiver ist der Trennprozess. Werden die bisherigen Testserien derart miteinander verglichen, so zeigt sich einerseits eindeutig die Wichtigkeit der korrekten Polung der Elektroden sowie die Höhe der verwendeten Spannung, andererseits wird der Einfluss der Aufgabeguttemperatur noch deutlicher ersichtlich. Demzufolge liegen, vorausgesetzt, eine bestmögliche Anreicherung soll erzielt werden, die optimalen Betriebsparameter für die gewählte Aufgabezusammensetzung und die einstufige Sortierung bei 100 °C und 15 kV für beide Elektroden, sowie positiver Spannung an der Innenelektrode und negativer Spannung an der Außenelektrode.

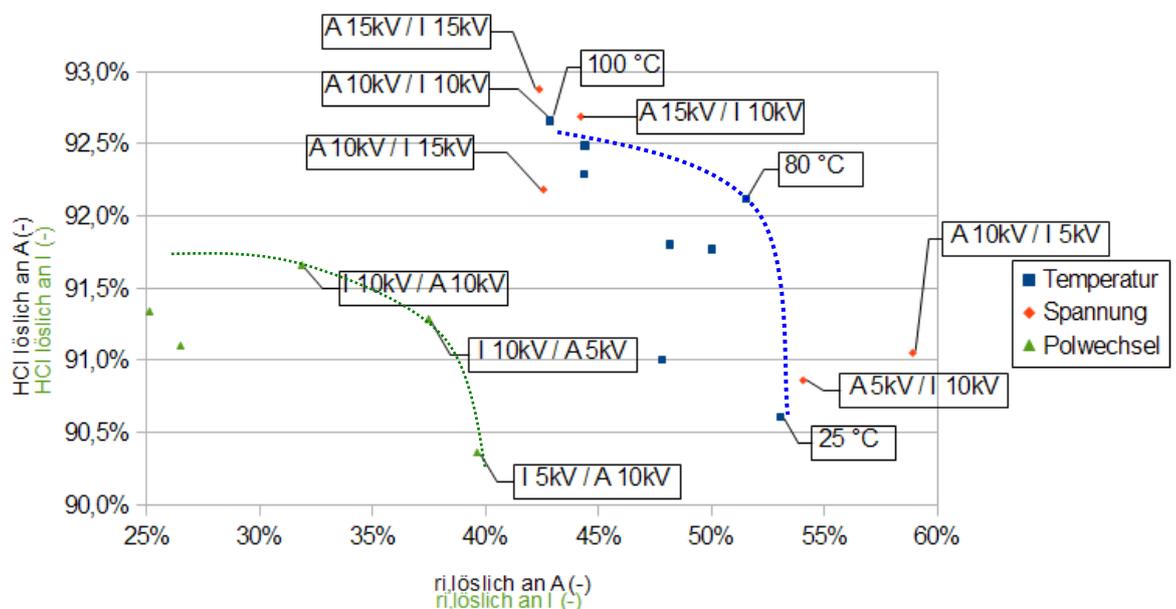


Abb. 8.15.: Darstellung der Selektivität der einstufigen Sortierung am Feinstkornscheider ^[78]

8.4.3. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den ersten Sortierversuchen am Feinstkornscheider

Die Sortierversuche mit Marmor-/Quarz-Gemengen zeigten eindeutig die Abhängigkeit der Selektivität von der Aufgabeguttemperatur und der angelegten Spannung. Alle Versuche wurden bei einer Drehzahl der triboelektrischen Aufladeeinheit von 1.500 rpm durchgeführt. Die besten Verhältnisse für die Sortierung des Aufgabegutes bildet die Kombination von Aufgabetemperaturen um die 100 °C sowie eine an die Elektroden angelegte Spannung von höher oder gleich +/- 15 kV. Die erlangten Ergebnisse belegen die Funktion des Koaxscheiders im Sinne eines Trennapparates, die Qualität der ersten Ergebnisse entsprechen jedoch noch bei weitem nicht jenen Selektivitäten, die beispielsweise durch Flotation erreicht werden können. Es werden daher noch Anstrengungen notwendig sein, um einerseits die Charakterisierung des Feinstkornscheiders abzuschließen und somit jene Versuchsparameter zu finden, bei welchen die elektrostatische Sortierung im Feinstkornscheider den hohen Ansprüchen an die Produkte genügt. Ein Ansatz dazu besteht in der Nachreinigung der Trennprodukte, was zu Zeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung untersucht wird. Andererseits werden noch apparatetechnische Verbesserungen notwendig werden. Die wichtigsten sind derzeit:

- Abreinigungsvorrichtungen für an den Elektroden anhaftendes Feingut
- Mess- und Regelkreise zur online-Erfassung von Strom und Spannungsverhältnissen an den Elektroden
- Optimierung des Trenndüsen-Durchmessers zur Erlangung günstigerer Masseausbringensverhältnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Nr.	Bezeichnung	Seite
Kapitel 3: Zusammenfassung		
3.1.	Technische Zeichnung der triboelektrischen Aufladeinheit	9
3.2.	Triboelektrische Ladungsremanenz (Marmor Italien)	9
3.3.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor (a) und Pyrit (b)	10
3.4.	Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	11
3.5.	Koaxscheider	12
Kapitel 4: Grundlagen der Elektroscheidung		
4.1.	Elektrostatischer Kammerscheider (links) und Walzenscheider (rechts) am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung	14
4.2.	Punktladung q im Abstand L von einer ausgedehnten, elektrisch geladenen Fläche (links) und Punktladung zwischen zwei elektrisch geladenen Platten (rechts)	16
4.3.	Übersicht der wichtigsten Elektroscheiderprinzipien	19
4.4.	Aufladungsmodell durch Kontaktpolarisation	21
4.5.	Widerstandsänderung von Einzelkörnern bei Änderung der Temperatur (nach Fraas)	22
4.6.	Messzelle zur Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit eines Körnerpräparates	23
4.7.	Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebung	24
4.8.	Koronaleuchten an einem elektrostatischen Laborwalzenscheider	25

4.9.	Maximale Partikelladung im Koronafeld (nach Pauthenier und Mora)	27
4.10.	Relative Lage der Valenz- (blau) und Leitungsbänder (grün) bei elektrischen Leitern, Halbleitern und Nichtleitern	31
4.11.	Energiezustände von Metallen vor und während Kontakt (nach Nemeth)	32
4.12.	Energiebändermodell für n-Halbleiter (links) und p-Halbleiter (rechts) – (nach Nemeth)	34
4.13.	Einfluss eines elektrostatischen Feldes auf die Elektronenaustrittsarbeit eines Nichtleiters (schematisch)	36
4.14.	Schema eines Laborwalzenscheiders mit Auffangkästchen (nach Bergmann)	38
4.15.	Zweipuls-Mittelschaltung zur Hochspannungserzeugung (nach Bergmann)	40
4.16.	Mehrstufige Sortierung auf Walzenscheidern (nach Wills)	41
4.17.	Prinzipskizze eines Freifallscheiders	42
4.18.	Modell eines Röhrenfreifallscheiders (links) und eines Bandfreifallscheiders (rechts) – (nach Fricke)	42
4.19.	Hochspannungsgenerator Eltex KNH64	43
4.20.	Elektroscheider mit Rutschblechen, ausgeführt mit Trennblech (a) und Sieb (b) – (nach Wills)	44
4.21.	Aushebescheider (Prinzipskizze und Ausführung) Foto: Outotec	45
4.22.	Schema eines elektrostatischen Bandscheiders in vertikaler Bauform (nach Kawatra und Eisele)	46
4.23.	Prinzipskizze eines Bandscheiders der Firma ST (nach Bittner)	47
Kapitel 5: Untersuchungsvorbereitungen und Erstversuche		
5.1.	Konzept für die triboelektrische Aufladeeinheit	49
5.2.	Technische Zeichnung der konstruierten triboelektrischen Aufladeeinheit	51

5.3.	Versuchsaufbau zur triboelektrischen Ladungsmessung in der Klimakammer	51
5.4.	Aufbau des Rotor-Stator-Systems der triboelektrischen Aufladeeinheit	52
5.5.	Schaltung zur Überprüfung des Coulomb-Meters	54
5.6.	Ergebnisse einer Überprüfung des zur Ladungsmessung eingesetzten Coulomb-Meters	55
5.7.	Triboelektrische Ladungsremanenz (Marmor Italien)	57
5.8.	Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Umfangsgeschwindigkeit bzw. den Umdrehungen des Rotors der triboelektrischen Aufladeeinheit (Marmor Italien)	58
5.9.	Abhängigkeit der triboelektrischen Aufladung vom angelegten elektrischen Potential	59
5.10.	Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der relativen Luftfeuchte der Umgebung (Marmor Italien)	60
5.11.	Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Temperatur (Marmor Italien)	61
5.12.	Abhängigkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens von der Aufgaberate (Marmor Italien)	62
5.13.	Schema der durchgeführten chemischen Konditionierung	63
5.14.	Triboelektrisches Aufladeverhalten bei Verwendung von Kochsalz (Marmor Italien)	64
5.15.	Triboelektrisches Aufladeverhalten bei Verwendung von Ölsäure (Marmor Italien)	65
Kapitel 6: Versuche zur triboelektrischen Aufladung prozessrelevanter Reinmineralproben		
6.1.	Röntgendiffraktogramm vom HCl-unlöslichen Rückstand der Marmorproben A (oben) und B (unten)	67
6.2.	Korngrößenverteilung Marmor, Probe A (oben) und Probe B (unten)	68
6.3.	Korngrößenverteilung Quarz	69

6.4.	Röntgendiffraktogramm Feldspat, Produkt aus der Elektroscheidung	70
6.5.	Korngrößenverteilung Feldspat	71
6.6.	Korngrößenverteilung Pyrit	72
6.7.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	79
6.8.	Einfluss der Temperatur auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor bei 30%, 50% und 70% relativer Luftfeuchte der Umgebung	80
6.9.	Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	81
6.10.	Veränderung des Aufladeverhaltens von Marmor durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung	82
6.11.	Beeinflussbarkeit des triboelektrischen Aufladeverhaltens durch ein elektrostatisches Feld (Steigung der Geraden aus Abbildung 6.10.) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	83
6.12.	Schema der Vorgehensweise zur Konditionierung von mineralischen Proben als Vorbereitung zur Messung in der TAE	84
6.13.	Einfluss der Ölsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	85
6.14.	Einfluss der Benzoesäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	86
6.15.	Einfluss der Salicylsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	87
6.16.	Einfluss der Kochsalzkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	88
6.17.	Einfluss der Ätznatronkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	88
6.18.	Einfluss von Triethanolamin auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	90
6.19.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	92

6.20.	Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	93
6.21.	Veränderung des Aufladeverhaltens von Quarz durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung	94
6.22.	Zusammenhang der Beeinflussbarkeit der triboelektrischen Aufladung durch ein elektrostatisches Feld (=Steigung der geraden aus Abb. 6.21.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	94
6.23.	Einfluss der Ölsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	95
6.24.	Einfluss der Salicylsäurekonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	96
6.25.	Einfluss der Kochsalzkonzentration auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	97
6.26.	Einfluss von Triethanolamin auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	99
6.27.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat	100
6.28.	Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Feldspat	101
6.29.	Veränderung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Feldspat durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung	102
6.30.	Zusammenhang der Beeinflussbarkeit der triboelektrischen Aufladung durch ein elektrostatisches Feld (=Steigung der geraden aus Abb. 6.29.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	102
6.31.	Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Feldspat	103
6.32.	Einfluss der Kochsalzkonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Feldspat	104
6.33.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Pyrit	106

6.34.	Einfluss der relativen Luftfeuchte und des Statorpotentials auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Pyrit	107
6.35.	Veränderung des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Pyrit durch ein angelegtes äußeres elektrostatisches Potential bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten der Umgebung	108
6.36.	Zusammenhang der Beeinflussbarkeit der triboelektrischen Aufladung durch ein elektrostatisches Feld (=Steigung der geraden aus Abb. 6.35.) mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	108
6.37.	Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Grafit	110
Kapitel 7: Auswertung der Versuchsergebnisse		
7.1.	Triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	112
7.2.	Triboelektrische Aufladung von Marmor und Pyrit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung	112
7.3.	Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf das Aufladeverhalten von Marmor und Quarz	114
7.4.	Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf das Aufladeverhalten von Marmor und Feldspat	114
7.5.	Einfluss des Statorpotentials und der relativen Luftfeuchte der Umgebung auf das Aufladeverhalten von Marmor und Pyrit	115
7.6.	Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz	116
7.7.	Einfluss der Ölsäurekonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Feldspat	116
7.8.	Vergleich des triboelektrischen Aufladeverhaltens von Marmor und Quarz nach Konditionierung mit Salicylsäure	118
7.9.	Einfluss der Kochsalzkonzentration auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Feldspat	119

7.10.	Einfluss von Triethanolamin auf die triboelektrische Aufladung von Marmor und Quarz	120
Kapitel 8: Elektroscheider für die Feinstkornsartierung		
8.1.	„Dilute Phase Electrostatic Loop“ (nach Anderson e.a.)	127
8.2.	Elektrostatischer Walzenscheider zur Feinstkornentrennung (nach Eichas)	128
8.3.	Konzeptfließbild des Feinstkornscheiders	130
8.4.	Technische Zeichnung des Feinstkornscheiders	132
8.5.	Luftmengenmessung Koaxscheider	134
8.6.	Rechenmodell für die Strömungssimulation in „Flow“	134
8.7.	Flow-Simulationsergebnis Feinstkornscheider	135
8.8.	Hochspannungsversorgung für den Koaxscheider	136
8.9.	Feinstkornscheider während der Fertigung (noch ohne Elektrodensystem)	138
8.10.	Versuchsstand „Feinstkornscheider“ am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung	139
8.11.	Eirich-Intensivmischer am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung	140
8.12.	Masseausbringen Feinstkornscheider in Abhängigkeit von der Luftmenge	141
8.13.	Sortierergebnisse der Versuche am Feinstkornscheider - Temperaturreihe	143
8.14.	Sortierergebnisse der Versuche am Feinstkornscheider - Spannungsreihen	145
8.15.	Darstellung der Selektivität der einstufigen Sortierung am Feinstkornscheider	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle Nr.	Bezeichnung	Seite
4.1.	Kornform-Auflade-Faktor (k) für die Berechnung der maximal erreichbaren Kornladung durch Koronaaufladung	26
5.1.	Übersicht der verwendeten Reinmineralproben für die Durchführung der ersten triboelektrischen Aufladeversuche	56
5.2.	Verwendete Reagenzien zur Untersuchung des Einflusses auf das triboelektrische Aufladeverhalten	62
6.1.	Übersicht über die Eigenschaften der in der Untersuchung zum triboelektrischen Aufladeverhalten verwendeten mineralischen Proben	73
6.2.	Übersicht über die Versuchsparameter bei den Untersuchungen zur Charakterisierung der triboelektrischen Aufladung	76
6.3.	Einfluss von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Marmor	89
6.4.	Einfluss von kationischen Tensiden auf das triboelektrische Aufladeverhalten von Quarz	98
7.1.	Veränderung des Aufladeverhaltens von Marmor und Quarz durch Zugabe kationischer Tenside	120
7.2.	Zusammenfassung der Trends und Veränderungen im Rahmen der systematischen Untersuchung zur Charakterisierung des triboelektrischen Aufladeverhaltens mineralischer Proben	121
8.1.	Systematik der Haftkräfte (nach Rumpf)	123
8.2.	Bilanztafel zur Sortierung im Feinstkornscheider - Spannungsreihe	144

Verwendetes Schrifttum

- ¹ Bullock H.L.: Electrostatic units – still the promise. Engineering & Mining Journal, Nov. 1967, S. 113
- ² Fricke G.: Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen. Kali- und Steinsalz, Bd. 9, Heft 9 (Nov. 1986), S. 287.
- ³ Tegethoff F.W. (Hrsg.): Calciumcarbonat. Von der Kreidezeit ins 21. Jahrhundert. Birkhäuser Verlag, 2001. S. 16 ff.
- ⁴ Reisinger M.: Monitoring Process Parameters affecting the Triboelectrostatic Separation of Industrial Minerals. Graduation Thesis, University of Leoben, 2007.
- ⁵ Mangelberger T.: „Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten der Aufbereitung von Calciumcarbonat für den Einsatz in der Füllstoffindustrie“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2003. S.7.
- ⁶ Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band II. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. 2. Auflage 1977. S. 197.
- ⁷ Advanced Energy Dynamics: Final Report Advanced Physical Fine Coal Cleaning, 1987. Zitiert in: ^[36]
- ⁸ Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band II. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. 2. Auflage 1977. S. 198f.
- ⁹ Ralston O. C.: „Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids“, Elsevier Publishing Company, 1961.
- ¹⁰ Fraas F.: Electrostatic separation of granular materials. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin Nr. 603, Washington D.C., 1962. S. 4.
- ¹¹ Knoll F.S., Taylor J.B.: Advances in Electrostatic Separation. Minerals and Metallurgical Processing, Mai 1985, S. 106.
- ¹² Kirchberg H., Schickel A.: Ein Beitrag zum quantitativen Verständnis der Scheidung in elektrostatischen Feldern. VIII Internationaler Kongress für Erzaufbereitung. Leningrad 1968.
- ¹³ Kelly E.G., Spottiswood D.J.: The Theory of Electrostatic Separations: A Review. Part II. Particle Charging. Minerals Engineering, Vol. 2, Nr. 2. Pergamon press 1989, S. 199.
- ¹⁴ Barthelemy R.E., Mora R.G.: Electrical High Tension Minerals Beneficiation: Principals and Technical Aspects. 5th Int. Min. Proc. Congress, pp 757-773, IMM, London (1960)
- ¹⁵ Oberrauner A., Flachberger H.: Aufbereitungstechnische Untersuchungen zum möglichen Einsatz der Elektrostatischescheidung an Talkproben aus der Lagerstätte Gemerska-Poloma. Forschungsbericht, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben, 2010, S. 3.
- ¹⁶ Fraas F.: Effect of temperature on the electrostatic separation of minerals. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Report of Investigations Nr. 5213, Washington D.C., 1963. S. 2-4.

-
- ¹⁷ Kelly E.G., Spottiswood D.J. (1988): "The theory of electrostatic separations: A review Part III. The separation of particles", Minerals Engineering Vol. 2, Nr. 3 (1989), S. 343.
- ¹⁸ Oberrauner A., Flachberger H.: Leitfähigkeitsmessungen an mineralischen Körnerpräparaten. Forschungsbericht Montanuniversität Leoben, 2009.
- ¹⁹ Kelly E.G., Spottiswood D.J.: Introduction to Mineral Processing. The Australian Mineral Foundation. 1995. S. 292.
- ²⁰ Wills B.A., Napier-Munn T.J.: Wills' Mineral Processing Technology. Elsevier Science and Technology books. 7. Auflage 2006 S. 366.
- ²¹ Kelly E.G., Spottiswood D.J.: The Theory of Electrostatic Separations: A Review. Part II. Particle Charging. Minerals Engineering, Vol. 2, Nr. 2. Pergamon press 1989, S. 195.
- ²² Kelly E.G., Spottiswood D.J.: The Theory of Electrostatic Separations: A Review. Part II. Particle Charging. Minerals Engineering, Vol. 2, Nr. 2. Pergamon press 1989, S. 197.
- ²³ Pauthenier M.M.: La théorie de la charge électrique de poussières. Rev. Gén. Elect., 45, May 6 1939, S. 583-595.
- ²⁴ Mora R.G.: Study of electrical concentration of minerals. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 1958.
- ²⁵ Flachberger H., Köhnlechner R.: Unter Hochspannung sauber trennen. Müllmagazin, Nr. 1, 2009, S. 37.
- ²⁶ Schubert H.: Zu den Grundlagen stofflicher Trennungen in elektrischen Feldern. Verfahrenstechnik 1 (1967), S. 33.
- ²⁷ Carta M. e.a.: Progrés dans la théorie et l'application de la séparation triboélectrique des minerais. Revue de l'Industrie Minerale, Mai 1969. S. 482.
- ²⁸ Pohl R.W.: Physical Principles of Electricity and Magnetism. London, Blackie and Son, 1930.
- ²⁹ Fraas F., Ralston O.C.: Electrostatic separation of solids. Proceedings of the 6th Chemical Engineering Symposium, Michigan, May 1940, S. 601.
- ³⁰ Carta M. e.a.: The influence of the surface energy structure of minerals on electric separation and flotation. Cagliari 1970. S. 50.
- ³¹ Nemeth E.: Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen. Dissertation, Bergakademie Freiberg 2003, S. 13.
- ³² Anderson J.H.: The effect of additives on the charging of electrophotographic toners. Journal of Electrostatics, Vol. 37 (1996), Elsevier Science Publishers B.V. S. 197 - 209.
- ³³ Schein L.B.: Electric field theorie of toner charging. Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 44, No. 6 (2000), IS&T- The Society for Imaging Science and Technolgy. S. 475 - 483.

-
- ³⁴ Ernst L.: Zur Ursache und zum Mechanismus der Kontaktaufladung von NaCl- und KCl-Kristallen bei der elektrostatischen Rohsalztrennung. Kali und Steinsalz, Bd. 9, Heft 9 (1986). S.276f.
- ³⁵ Ciccu R. e.a.: Selective Tribocharging of Particles for Separation. KONA Nr. 11 (1993). S. 6.
- ³⁶ Hangsubcharoen M.: A Study of triboelectrification mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1999, Dissertation. S. 78
- ³⁷ Bergmann H.: Grundlagen der Trennung von festen Rohstoffen im quasielektrostatischen Feld eines Walzenabscheiders. Dissertation Universität Essen, 2003. S. 35.
- ³⁸ Lawver J.E., Wright J.L.: The design and calibration of a Faraday pail for measuring charge density of mineral grains. Transactions Society of Mining Engineers, AIME, Vol. 241 (Dec. 1948). S. 241-248.
- ³⁹ Bullock H.L.: Electrostatic units – still the promise. Energy and Mining Journal. o.O., Nov. 1967. S. 115.
- ⁴⁰ Wills B.A., Napier-Munn T.J.: Wills' Mineral Processing Technology. Elsevier Science and Technology books. 7. Auflage 2006 S. 367.
- ⁴¹ Fricke G.: Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen. Kali und Steinsalz, Bd.9 (1986) S. 286.
- ⁴² Stadtschnitzer A.: Optimierung des Schwerspat-/Flußspatausbringens in der Aufbereitungsanlage Wolfach der Sachtleben Bergbau GmbH. Dissertation Montanuniversität Leoben, 2010.
- ⁴³ Oberrauner A.: Apparatetechnologien in der Elektroscheidung. Vortrag im Rahmen des Österreichischen Bergbautages am 27.05.2009, Leoben.
- ⁴⁴ Wills B.A., Napier-Munn T.J.: Wills' Mineral Processing Technology. Elsevier Science and Technology books. 7. Auflage 2006 S. 368.
- ⁴⁵ Outotec: eForce high tension electrostatic roll separator. Firmenprospekt. 2011.
- ⁴⁶ Bittner J.D., Gasiorowski S.A.: STI's Commercial Beneficiation of High LOI Fly Ash. Needham, USA, o.J.
- ⁴⁷ Kawatra S.K. , Eisele T.C.: Coal desulfurization: high-efficiency preparation methods. Taylor & Francis, New York, 2001, S. 268.
- ⁴⁸ Bittner J.D., Gasiorowski S.A.: Triboelectrostatic Fly Ash Beneficiation: An Update on Separation Technologies' Internal Operations. Needham, USA, o.J.
- ⁴⁹ Bittner J.D., Gasiorowski S.A.: Fly Ash Carbon Separation and Ammonia Removal at Tampa Electric Big Bend. Needham, USA, 2008.
- ⁵⁰ Oberrauner A.: Über den theoretischen Zusammenhang zwischen Feuchte, Temperatur, Druck und die Möglichkeit, feindisperses mineralisches Rohgut mit definierter Oberflächenfeuchte zu erhalten sowie Wassergehalte in Schüttgütern zu messen. Forschungsbericht Montanuniversität Leoben, 2009.

-
- ⁵¹ Carta M., Ciccu R., DeFá C., Ferrara G., Ghiani M., Massacci P. (1973): „Improvement in electric separation and flotation by modification of energy levels in surface layers“, Proceedings of the X International Mineral Processing Congress, London, April 1973, Paper 3, S. 11.
- ⁵² Mangelberger T. (2003): „Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten der Aufbereitung von Calciumcarbonat für den Einsatz in der Füllstoffindustrie“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, S.80.
- ⁵³ Fraas F. (1963): “Effect of temperature on the electrostatic separation of minerals“, Report of Investigations 5213, United States Department of The Interior - Bureau of Mines, Washington, 1963.
- ⁵⁴ Manouchehri H.R. (2000): “Triboelectric Charge Characteristics and Electrical Separation of Industrial Minerals“, Dissertation, Technische Universität Luleå.
- ⁵⁵ Nemeth E. (2003): „Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen“, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg
- ⁵⁶ Singewald A. (1980): „Trennen von Kalium- und Magnesiummineralen im elektrischen Hochspannungsfeld“, Kali u. Steinsalz, Bd. 8, Heft 8 (1982), S. 252-260.
- ⁵⁷ Carta M. e.a. (1970): “The Influence of the surface energy structure of minerals on electric separation and flotation“, o.O.
- ⁵⁸ Dwari R. K. e.a.: Characterisation of particle tribo-charging and electron transfer with reference to electrostatic dry coal cleaning. Int. J. Miner. Process. 91 (2009), S. 105.
- ⁵⁹ Oberrauner A.: Leitfähigkeitsmessungen an Körnerpräparaten. In: WerWasWo. Forschung@MUL, November 2009. S.93.
- ⁶⁰ Carta M. e.a.: Improvement in electric separation and flotation by modification of energy levels in surface layers. Proceedings of the X International Mineral Processing Congress, London, April 1973, Paper 3, S. 10.
- ⁶¹ Mangelberger T.: Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten der Aufbereitung von Calciumcarbonat für den Einsatz in der Füllstoffindustrie. Dissertation, eingereicht am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben, 2007. S. 95f
- ⁶² Hangsubcharoen M.: A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Dissertation, eingereicht am Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999. S. 221.
- ⁶³ Rumpf H.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chemie-Ing.-Techn., 30. Jg. Nr. 3. (1958). S. 145 ff.
- ⁶⁴ Horton H.R. e.a.: Biochemie. Pearson Studium, München, 2008. S. 50.
- ⁶⁵ Tabor, D.; Winterton, F. R. S.: The direct measurement of normal and retarded van der Waals forces. Proceedings of the Royal Society, Series A, Mathematical and Physical Science, Vol. 312 (1969), No. 1511, S. 435-450.
- ⁶⁶ Lifshitz, E. M.: The theory of molecular attractive forces between solids. Soviet Physics JETP, Vol. 2 (1956), S. 73-83.

⁶⁷ Prieve, D. C.; Russel, W. B.: Simplified predictions of Hamaker constants from Lifshitz theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 125 (1987), No. 1, S. 1-13.

⁶⁸ Visser, J.: Van der Waals and other cohesive forces affecting powder fluidization. *Powder Technology*, Vol. 58 (1989), No. 1, S. 1-10.

⁶⁹ Englert M.: Einfluss mechanischer Dispergiervverfahren auf Struktur und Eigenschaften duroplastischer Nanoverbundwerkstoffe. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2008. S. 6.

⁷⁰ Eichas K.: Triboelektrische Sortierung im Feinstkornbereich. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993. S. 18.

⁷¹ Fricke G.: Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen. *Kali und Steinsalz*, Bd. 9 Heft 9 (Nov. 1986). S. 291.

⁷² Anderson J.M. e.a.: Electrostatic Separation of Coal Macerals. *IEEE transactions in industry applications*, Vol. IA-15, Nr. 3 (Mai/Juni 1979) S. 291ff.

⁷³ von Szanthe E.: Elektrostatische Aufbereitung in der Industrie der Steine und Erden. *Tonindustrie-Zeitung und keramische Rundschau*, Bd. 77, Heft 56 (1953). S. 84.

⁷⁴ Eichas K.: Triboelektrische Sortierung im Feinstkornbereich. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993. S. 39ff.

⁷⁵ Eichas K.: Triboelektrische Sortierung im Feinstkornbereich. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993. S. 141.

⁷⁶ Mangelberger T.: Grenzen und Optimierungsmöglichkeiten der Aufbereitung von Calciumcarbonat für den Einsatz in der Füllstoffindustrie. Dissertation, eingereicht am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben, 2007. S. 148f

⁷⁷ Industrie Automation Graz: Firmenunterlage, 2011

⁷⁸ Geißler T.: o.T. Untersuchungen im Rahmen der aufbereitungstechnischen Bakkalaureatsarbeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Leoben, Feb. 2012.

Weiters verwendetes Schrifttum ohne Zitat:

⁷⁹ Alfano G., Carbini P., Ciccu R., Ghiani M., Peretti R., Zucca A.: La séparation tribo-électrique des minerais phosphates. *Industrie Minérale – Mines et Carrières – Les techniques* (Jan/Feb. 1989), S.137-143.

⁸⁰ Balint A., Fleming M. G.: Selective Conditioning of Minerals in Gaseous Suspensions with the Aid of Electrostatic Forces. [keine weiteren Angaben], 1964, S. 279-292.

⁸¹ Bafrnec M., Beňa, J.: Quantitative data on the lowering of electrostatic charge in a fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, Vol. 22 (1972), Pergamon Press, UK, S. 1177-1181.

⁸² Bergougnou M. A., Inculet I. I., Anderson J., Parobek L.: Electrostatic Beneficiation of Coal in a fluidized state. *Journal of Powder & Bulk Solids Technology*, (1977). S. 22-26.

⁸³ Bock R.: Elektrostatische Trennung der Komponenten von Kali-Rohsalzen. *Chemie Ingenieur Technik* 53, Nr. 12 (1981), Verlag Chemie GmbH, Weinheim, S. 916-924.

-
- ⁸⁴ Carta, M.: De quelques contributions la separation électrique des mineraïs. Revue de l'Industrie Minerale (Juni 1967), S. 409-430.
- ⁸⁵ Carta M., Ferrara G. F., DelFá C., Alfano G.: Contribution to the Electrostatic Separation of Minerals. [keine weiteren Angaben], S. 427-446.
- ⁸⁶ Carta M., Ferrara, G., DelFá C., Ciccu R.: La separation electrique des mineraïs en suspension en milieux gazeux etendue aux fines granulometries avec charge ionique ou triboelectrique. Proceedings of the VIIIe Congres International de Preparation des Mineraïs, Leningrad, 1968, Band 1, S. 1-12.
- ⁸⁷ Carta M., Alfano G., Carbini P., Ciccu R., DelFá C.: Triboelectric Phenomena in Mineral Processing. Theoretic Fundamentals and Applications. Journal of Electrostatics, 10 (1981), Elsevier Scientific Publishing Company, S. 177-182.
- ⁸⁸ Chowdry A., Westgate C. R.: The role of bulk traps in metal-insulator contact charging. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 7 (1974), S. 713-725.
- ⁸⁹ Coelho R.: The electrostatic characterization of insulating materials. Journal of Electrostatics, 17 (1985), Elsevier Science Publishers B.V., S. 13-27.
- ⁹⁰ Coehn A.: Ueber ein Gesetz der Electricitätserregung. Annalen der Physik, Vol. 300, Auflage 2 (1898), S. 217-232.
- ⁹¹ Davies D. K.: Charge generation on dielectric surfaces. British Journal of Applied Physics (J. Phys. D), Ser. 2, Vol., 2 (1969), S. 1533-1537.
- ⁹² Davies D. K.: Progress in Measuring Techniques for Industrial and Scientific Investigations. [keine weiteren Angaben], 1973, S. 45-51.
- ⁹³ Elsdon, R.: Vibrated Bed Electrostatic Separation. Powder Technology, 23 (1979), Elsevier Sequoia S.A., Lausanne, S. 121-129.
- ⁹⁴ Esser, F.: Elektrostatische Aufbereitung. Zeitschrift für die gesamte Hüttenkunde, Heft 17 (1907), S. 592-598.
- ⁹⁵ Elsdon R., Mitchell F. R. G.: Contact electrification of polymers. J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9 (1976), S. 1445-1460.
- ⁹⁶ Fraas F., Ralston O. C.: Dielectric constant in air-ambient electrostatic separation. Report of Investigations 4278, United States Departement of The Interior - Bureau of Mines, Washington, Apr. 1948.
- ⁹⁷ Fraas F.: Irreversible changes in response of minerals to electrostatic separation after heating. Report of Investigations 5542, United States Departement of The Interior - Bureau of Mines, Washington, 1959.
- ⁹⁸ Fricke G.: Die elektrostatische Aufbereitung von Kalirohsalzen. Vortrag bei GDMB am 21./22. 2. 1979.

-
- ⁹⁹ Gillespie T., Langstroth G. O.: An instrument for determining the electric charge distribution in aerosols. *Canadian Journal of Chemistry*, Vol. 30, o.J., S. 1056-1068.
- ¹⁰⁰ Güntherschulze A.: Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Dipolmomentes. *Handbuch der Physik*, XVI, Kap. 20, o.O., o.J., S. 540-550.
- ¹⁰¹ Grumbrecht A.: Der derzeitige Stand und die Aussichten der elektrostatischen Aufbereitung, *Metall und Erz*, 37. Jg., Heft 18 (1940), S. 357-367.
- ¹⁰² Harper W. R.: Contact electrification of semiconductors. *British Journal of Applied Physics*, Vol. 11. (Aug. 1960), S. 324-331.
- ¹⁰³ Harper W. R.: Electrification Following the Contact of Solids. [keine weiteren Angaben], 1961. S. 345-359.
- ¹⁰⁴ Kornfeld M. I.: Frictional electrification. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 9 (1976), S. 1183-1192.
- ¹⁰⁵ Kornfeld M. I.: Contact electrification of solid insulators. *Sov. Phys. Solid State* (Jan. 1978), S. 120-121.
- ¹⁰⁶ Kühlwein F. L. : Versuche zur elektrostatischen Aufbereitung von Kohlenstaub. *Glückauf*, 77. Jg., Heft 5 (Feb. 1941), S. 69-79.
- ¹⁰⁷ Langer, F.: Über die Möglichkeit, durch Reibung aufgeladenen Kohlenstaub elektrostatisch aufzubereiten. [keine weiteren Angaben], 1952. S. 122-137.
- ¹⁰⁸ Langer G., Radnik J. L.: Development and Preliminary Testing of a Device for Electrostatic Classification of Submicron Airborne Particles. *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 5 (Mai 1961), S. 955-957.
- ¹⁰⁹ Lawver J. E., Taylor J. B., Knoll F. S.: Laboratory testing for electrostatic concentration circuit design. In: *Design and installation of concentration and dewatering circuits: Symposium*, 1986, S. 454-469.
- ¹¹⁰ LeBaron M., Knopf W. C.: Application of electrostatics to potash beneficiation. *Mining Engineering* (Oct. 1958), S. 1081-1083.
- ¹¹¹ Lawver J. E., Wright J. L.: The design and calibration of a Faraday pail for measuring charge density of mineral grains. *Transactions Society of Mining Engineers, AIME*, Vol. 241 (Dez. 1968), S. 445-449.
- ¹¹² Lawver J. E., Wright J. L.: A cell for measuring the electrical conductivities of granular material. *Transactions Society of Mining Engineers, AIME*, Vol. 244 (Mär. 1969), S. 78-82.
- ¹¹³ Pearse M. J., Pope M. I.: The Triboelectric Separation of Quartz-Calcite and Quartz-Apatite Powders After Chemical Conditioning. *Powder Technology*, 17 (1977), Elsevier Sequoia S. A., Lausanne, S. 83-89.
- ¹¹⁴ Plaksine I. N., Olofinsky N. F.: Neue Wege der Forschung über die Trennung von Feinkohle in einem elektrischen Feld. *Proceedings Inichar. – Dritter internationaler Kongress für Steinkohlenaufbereitung*, Lüttich, 1975, S. 453-460.
- ¹¹⁵ Schickel A.: Theorie und Erprobung eines elektrischen Sortierverfahrens für hohen spezifischen Durchsatz“, *Hornická Příbram ve vědě a technice* 1972, S. 423-452.

¹¹⁶ Plaksin J. N., Olofinski N. F.: Review of electrical separation methods in mineral technology. [keine weiteren Angaben], S. 57-64.

¹¹⁷ Singewald A.: Elektrostatik – neue umweltfreundliche Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumrohstoffen. Erzmetall 33, Nr. 1 (1980), Verlag Chemie, Weinheim, S. 19-27.

¹¹⁸ Szantho E.: Elektrostatische Aufbereitung in der Industrie der Steine und Erden. Tonindustrie-Zeitung und keramische Rundschau, 77. Jg., Heft 5/6 (1953), S. 83-88.

¹¹⁹ Yoon R.-H. e.a.: POC-Scale Testing of a dry triboelectrostatic separator for fine coal cleaning. Technical Report, Center for Coal and Minerals Processing, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia, 2001.