



Universität Stuttgart
Institut für Kernenergetik
und Energiesysteme

Experimentelle Untersuchungen zur Separation von Korngemischen in einem Stabmagnetfilter

Dissertation

Martin Kurt Julian Brandauer

Oktober 2017 IKE 2-159





Universität Stuttgart
Institut für Kernenergetik
und Energiesysteme

Experimentelle Untersuchungen zur Separation von Korngemischen in einem Stabmagnetfilter

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Martin Kurt Julian Brandauer

geboren in São Paulo, Brasilien

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Starflinger

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Tag der Einreichung:

07.07.2017

Tag der mündlichen Prüfung:

23.10.2017

ISSN 0173-6892

*„Es ist nicht genug zu wissen - man muss auch anwenden.
Es ist nicht genug zu wollen - man muss auch tun.“*

Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Starflinger bedanken, für die Übernahme des Hauptreferates, die stets entgegengebrachte Unterstützung und für die fachliche und persönliche Betreuung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes, als Korreferent, danke ich ganz herzlich für seine Unterstützung, das entgegengebrachte Vertrauen und die Entfaltungsmöglichkeiten, die er mir schon als wissenschaftlicher Mitarbeiter bot. Diese Zusammenarbeit hat mich sehr geprägt.

Hiermit bedanke ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Kristian Waters der McGill Universität. Der fachliche Austausch, die Möglichkeit, ihn und seine Kollegen vor Ort zu besuchen und sein Wille, mich in meinem Vorhaben zu unterstützen, bedeutet mir sehr viel. Besonders danke ich Herrn Raymond Langlois, für die umfangreiche Hilfe in der Beprobung der Gemische sowie Herrn Dr. Adam Jordens für den fachlichen Austausch.

Meinen herzlichen Dank möchte ich auch Frau Dr. Ingeborg Hagenlocher aussprechen, die mir als Mentorin immer wieder den Rücken gestärkt hat und immer „ganz Ohr“ war. Besonderen Dank auch an Herr Dr. Walter Tromm, der mich stets wohlwollend unterstützt hat und mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein vielfaches Dankeschön geht an die technischen Kollegen, Herrn Torsten Schuler und Herrn Jürgen Hauth, ohne die der Aufbau und die Inbetriebnahme der Separationsanlage nicht möglich gewesen wäre. Herzlichen Dank auch an Herrn Dr. Markus Plaschke und Herrn Dr. Dieter Schild, für die durchgeführten Analysen, wobei ich auch Herrn Prof. Dr. Horst Geckeis für seine Unterstützung erwähnen möchte.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für die gute Arbeitsatmosphäre und die stets entgegengebrachte Hilfsbereitschaft. Besonders erwähnen möchte ich dabei Herrn Dr. Patrick Kern, Herrn Steffen Reinhardt, Frau Kristina Findling und Herrn Dr. Akramullah Aminy. Ein weiterer Dank auch an Marc Dölker, Chung Le, Jumpei Takahashi und an alle studentischen Hilfskräfte.

Schließlich geht mein herzlicher Dank an meine Familie, besonders an meine liebe Lanna, die mir stets den Rücken freigehalten und mich über die gesamte Zeit unterstützt hat.

Meine Arbeit widme ich hiermit meiner lieben Tochter Natalia.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Nomenklatur	XV
Kurzfassung	XXI
Abstract	XXIII
I Einleitung	- 1 -
I.1 Motivation	- 1 -
I.1.1 Hintergrund der Untersuchungen	- 2 -
I.1.1.1 Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidtechnik	- 2 -
I.1.1.2 Problematik des Korngemisches im Rückbau kerntechnischer Anlagen.....	- 5 -
I.1.2 Beschreibung der Problemstellung	- 7 -
I.1.2.1 Untersuchungen zur Separation des Korngemisches aus Abrasiv und Stahlspänen	- 7 -
I.1.2.2 Resultierende Problemstellung.....	- 8 -
I.2 Grundlagen	- 8 -
I.2.1 Definition der Separationsgrundlagen	- 8 -
I.2.1.1 Definition magnetischer Eigenschaften einer Materie	- 9 -
I.2.1.2 Definition magnetischer Eigenschaften von Magneten	- 13 -
I.2.1.3 Kräfteverhältnisse der magnetischen Separation von suspendierten Partikeln	- 16 -
I.2.2 Grundlagen zur Mehrphasenströmungssimulation	- 21 -
I.2.3 Stand der Technik	- 23 -
I.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	- 25 -
II Versuchsaufbauten	- 29 -
II.1 Separationsanlage	- 29 -

II.1.1	Randbedingungen für die Separationsanlage.....	- 29 -
II.1.2	Verfahrenstechnische Kette der Separationsanlage.....	- 31 -
II.1.3	Der Stabmagnetfilter	- 36 -
II.2	Partikelgrößenmesseinrichtung	- 43 -
II.2.1	Verfahrenstechnische Kette der Partikelmesseinrichtung.....	- 43 -
II.2.2	Der Extinktionszähler	- 45 -
III	Charakterisierung des Korngemisches	- 49 -
III.1	Abrasiv	- 49 -
III.2	Stahlsorte.....	- 53 -
III.3	Untersuchung des Korngemisches.....	- 53 -
III.3.1	Magnetisches Verhalten der Kornfraktionen.....	- 57 -
III.3.2	Partikelgrößenverteilung des Korngemisches	- 64 -
III.3.3	Nutzung der charakteristischen Partikelgrößenverteilung zur Untersuchung des separierten Retentats	- 66 -
III.3.4	Fazit der Untersuchungen	- 71 -
IV	Parameterbereiche und Versuchsplanung	- 73 -
IV.1	Zielgrößen.....	- 73 -
IV.2	Einflussgrößen	- 74 -
IV.3	Faktoren und Faktorstufen der Versuchsanlage	- 77 -
IV.4	Resultierender Versuchsplan	- 78 -
V	Untersuchungen und Ergebnisse	- 83 -
V.1	Experimentelle Untersuchung	- 83 -
V.1.1	Massenbezogene Ergebnisse der Versuchsdurchführungen.....	- 84 -
V.1.1.1	Fazit der Untersuchungen	- 91 -
V.1.2	Partikelgrößenbezogene Ergebnisse der Versuchsdurchführungen.....	- 91 -
V.1.2.1	Fazit der Untersuchungen	- 95 -
V.2	Numerische Untersuchungen	- 95 -
V.2.1	Numerische Untersuchung einer Mehrphasen-Rohrströmung.....	- 96 -
V.2.1.1	Fazit der Untersuchungen	- 100 -
V.2.2	Numerische Untersuchung des Stabmagnetfilters.....	- 101 -

V.2.2.1	Fazit der Untersuchungen	- 109 -
VI	Auswertung und Analyse der Ergebnisse	- 111 -
VI.1	Massenbezogene Bewertung der Versuchsergebnisse	- 111 -
VI.2	Partikelgrößenbezogene Bewertung der Versuchsergebnisse	- 117 -
VI.3	Bewertung der Separationseffizienz	- 124 -
VI.4	Fazit der Untersuchungen	- 131 -
VII	Zusammenfassung und Ausblick.....	- 133 -
VIII	Literatur.....	- 137 -
IX	Abbildungsverzeichnis	- 147 -
X	Tabellenverzeichnis	- 151 -
XI	Anhang A	- 153 -
XII	Anhang B	- 154 -
XIII	Anhang C	- 156 -
XIV	Anhang D	- 163 -
XV	Anhang E	- 168 -
XVI	Anhang F.....	- 169 -
XVII	Anhang G	- 170 -
XVIII	Anhang H	- 171 -
XIX	Anhang I.....	- 172 -
XX	Anhang J.....	- 173 -
XXI	Anhang K	- 174 -
XXII	Anhang L.....	- 175 -

Abkürzungsverzeichnis

Bedeutung	Abkürzung
Rasterelektronenmikroskopie mit Rückstreuielektronenkontrast	BSE-REM
Computer Aided Design	CAD
Design of Experiment	DOE
Fehlerstrom-Schutz-Schaltung	FI-Schaltung
Hochgradienten-Magnetseparatoren	HGMS
High Performance Adirondack Garnet (mit Mesh-80 gesiebt)	HPX80
Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma	ICP-OES
Neodym-Eisen-Bor-Magnete	NdFeB
Particle Tracking Velocimetry	PTV
Reynolds Averaged Navier-Stokes	RANS
Reaktordruckbehälter	RDB
Rasterelektronenmikroskop mit gekoppelter Elementanalyse	REM-EDX
Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik	WASS

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
a_{t+1-j}	Shapiro-Wilk-Test Konstante	[]
A	Durchströmte Fläche	[m^2]
A_{ges}	Gesamtabscheidemenge nach 120 <i>min</i>	[<i>Massen</i> – %]
A_i	Messpunkt	[<i>Massen</i> – %]
A_m	Projektionsfläche der Materie in Anströmungsrichtung	[m^2]
b	Konstante	[]
B	Magnetische Flussdichte	[T]
B_0	Magnetische Flussdichte von Vakuum	[T]
B_m	Magnetische Flussdichte der Materie	[T]
c_0	Anfangspartikelkonzentration	[<i>Volumen</i> – %]
c_1	Partikelkonzentration nach der Separation	[<i>Volumen</i> – %]
c_M	Partikelkonzentration in Suspension	[<i>Massen</i> – %]
c_W	Widerstandzahl	[]
d_{50}	Mittlerer Durchmesser	[m]
d_j	Partikeldurchmesser	[m]
D	Rohrdurchmesser	[m]
e_n	Einheitsvektor	[]
E	Abscheideeffizienz	[<i>Volumen</i> – %]
\vec{F}_G	Schwerkraft	[N]

Zeichen	Bedeutung	Einheit
\vec{F}_i	Auf Partikel wirkende Kräfte	[N]
\vec{F}_M	Magnetische Kraft	[N]
\vec{F}_{NM}	Konkurrierende Kräfte	[N]
\vec{F}_T	Trägheitskraft	[N]
\vec{F}_W	Widerstandskraft	[N]
\vec{g}	Erdbeschleunigung	[m ² /s]
H	Magnetische Feldstärke	[A/m]
H_C	Koerzitivfeldstärke	[A/m]
I	Stromstärke	[A]
J_S	Polarisationssättigungswert	[A/m]
k	Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
m_0	Feststoffmasse	[kg]
m_{ges}	Gesamtmasse	[kg]
m_i	Menge an Retentat	[kg]
\dot{m}_M	Magnetisch sortierbarer Massenstrom	[kg/s]
\dot{m}'_M	Magnetisch sortierbarer Massenstrom an Zwischengut	[kg/s]
\dot{m}_{NM}	Magnetisch nicht sortierbarer Massenstrom	[kg/s]
\dot{m}'_{NM}	Magnetisch nicht sortierbarer Massenstrom an Zwischengut	[kg/s]
m_S	Masse an Stahl	[kg]
M	Magnetisierung	[A/m]
M_f	Magnetisierung des Trägermediums	[A/m]
M_m	Magnetisierung des Feststoffs	[A/m]

Zeichen	Bedeutung	Einheit
M_r	Remanenzflussdichte	[T]
n	Laufkonstante	[]
p	Druck	[N/m ²]
q_2	Dichteverteilung mittels Extinktionsmessung	[Vol.-%/μm]
Q_2	Summenverteilung mittels Extinktionsmessung	[Vol.-%/μm]
r	Partikelradius	[m]
r'	Abstand vom Dipolzentrum zum Betrachtungspunkt	[m]
r''	Abstand vom Dipolzentrum zum Beobachtungspunkt	[m]
R	Rohrradius	[m]
Re	Reynolds-Zahl	[]
R_S	Reinheit des Retentats	[Massen-%]
s	Standardabweichung	[]
S	Oberfläche des Magnets	[m ²]
St	Stokes-Zahl	[]
Δt	Filterzykluszeit	[min]
u_i	Geschwindigkeit der jeweiligen Phase i	[m ² /s]
u_{max}	Höchste Geschwindigkeit im Rohrzentrum	[m ² /s]
U	Umfang	[m]
$ v $	Anströmgeschwindigkeit	[m ² /s]
\vec{v}	Relativgeschwindigkeit zwischen Trägermedium und Feststoff	[m ² /s]
V_0	Suspensionsgeschwindigkeit	[m ² /s]
V	Volumen des Partikels	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[l/min]

Zeichen	Bedeutung	Einheit
\tilde{V}	Pulsation	$[m^2/s]$
\bar{x}	Mittelwert der Messwerte	[]
x_i	Anzahl an Messwerte	[]
W	Teststatistik	[]

Griechische Buchstaben:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
α	Verdrängungskonstante	[]
α_i	Phasenanteil	[]
ε	Dissipationsrate	$[m^2/s^3]$
θ_1	Neigungswinkel	$[^\circ]$
θ_2	Neigungswinkel	$[^\circ]$
κ	Massenbezogene Suszeptibilität	$[kg/m^3]$
μ	Viskosität	$[kg/m\ s]$
μ_m	Permeabilität der Materie	$[V\ m/A\ s]$
μ_r	Permeabilitätszahl	$[V\ m/A\ s]$
$\mu_{r,0}$	Permeabilität von Vakuum	$[V\ m/A\ s]$
ρ_f	Dichte des Trägermediums	$[kg/m^3]$
ρ_m	Dichte des Feststoffs	$[kg/m^3]$
τ_i	Reynolds-Spannungstensor	$[m^2/s^2]$
Φ	Polstärke	$[T]$
χ	Magnetische Suszeptibilität	[]

Zeichen	Bedeutung	Einheit
χ_d	Diamagnetische Suszeptibilität	[]
χ_f	Ferromagnetische Suszeptibilität	[]
χ_m	Magnetische Suszeptibilität des Feststoffs	[]
χ_p	Paramagnetische Suszeptibilität	[]

Kurzfassung

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen stellt eine große Herausforderung dar; zum einen wegen ihrer Komplexität, zum anderen wegen des Umfangs der zu planenden Ausführungsschritte. Bei der Vielzahl an Anlagen ist ein Hauptkriterium der sichere und nachhaltige Rückbau der Schutz von Mensch und Umwelt. Dazu gehört auch die Reduzierung von radioaktivem Abfall, um eine sichere und kostengünstige Entsorgung zu gewährleisten.

Bei der Zerlegung von hochaktiven Stahlbauteilen mittels Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidtechnik entstehen signifikante Sekundärabfälle. Mit der hier vorgestellten Entwicklung einer Separationsanlage mittels magnetischer Sortierung der entstehenden Korngemische wird ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung des radioaktiven Abfalls geleistet.

Die hierzu entwickelte Separationsanlage trennt dabei die Stahlspäne (aktivierter Anteil) aus dem Korngemisch, wobei ein Stabmagnetfilter zur Anwendung kommt. Diese Art von Filter wird konventionell nicht für die Aufgabenstellung der magnetischen Sortierung von Korngemischen verwendet, verfügt jedoch über maßgebliche Vorteile für die Anwendung mit radioaktiven Korngemischen. Versuche mit dem entwickelten Separationsverfahren zeigen, dass je nach Parametereinstellung signifikante Unterschiede bei der Separation der Fraktionen aus dem Korngemisch entstehen. Fehlende Kenntnisse über diese Art von Magnetfilter machen daher eine genauere Untersuchung des Stabmagnetfilters zur Sortierung von Korngemischen unabdingbar, was Thema dieser Arbeit ist.

Um eine Bewertung der Separationsmöglichkeiten sowie deren Versuchsergebnisse vorzunehmen, wurde eine detaillierte Charakterisierung des Korngemisches aus der Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidtechnik durchgeführt. Neben der Gewinnung von wertvollen Erkenntnissen über die Zusammensetzung des Korngemisches werden auch Partikelabrasion, Partikelformen und Eigenschaften der beinhalteten Elemente im Abrasiv betrachtet. Mithilfe eines Extinktionszählers konnte eine Messeinrichtung zur Partikelgrößenanalyse realisiert werden. Diese erlaubt eine schnelle und unkomplizierte qualitative Aussage über die Zusammensetzung des magnetisch abgeschiedenen Materials, womit eine Bewertung der Separation ermöglicht wird. Ergänzt werden die experimentellen Untersuchungen durch eine numerische Mehrphasenströmungssimulation des Stabmagnetfilters, um Rückschlüsse auf die Strömungsverhältnisse und ihre Auswirkung auf die Separation im Filter zu ermöglichen.

Das hierbei entwickelte Separationsverfahren ermöglicht eine Separation des überwiegenden Stahlanteils im Korngemisch, wobei eine Effizienzrate von ca. 90 Massen-% erreicht wird. Bezogen auf die Problematik der radioaktiven Abfallreduzierung wird somit eine maßgebliche Reduk-

tion des radiologischen Inventars im Korngemisch erreicht. Dies erleichtert signifikant die nachfolgende Handhabung, Konditionierung und Entsorgung. Gleichzeitig liefert die Arbeit die Grundlagen zu einer vertiefenden Verbesserung des Separationsverfahrens zur Fest/Fest-Sortierung von Korngemischen durch einen Stabmagnetfilter.

Abstract

Today and in the decades to come, the decommissioning of nuclear facilities poses a great challenge. This is true for its immense complexity as well as for the vast number of execution steps involved. Considering the large number of plants, a main criterion for the safe and sustainable decommissioning is the protection of people and the environment. This requires the reduction of radioactive waste in order to allow safe and cost-effective disposal.

The dismantling of highly activated steel components by means of water-abrasive-suspension-cutting technology results in a significant amount of secondary waste. The development of a separation system to magnetically sort the resulting grain mixtures significantly contributes to the reduction of radioactive waste.

This thesis describes the development of a system allowing the separation of steel chips (activated fraction) from the grain mixture, using a magnetic rod filter. Conventionally, this kind of filter is not used for magnetic sorting, however, it has decisive advantages for this application within a radioactive environment. Experimental analysis of the separation process showed significant differences in the separation process depending on the system parameter settings. The novel application of this type of magnetic filter for the sorting of grain mixtures requires an in-depth analysis of the magnetic rod filter which is the objective of this work.

In order to evaluate the separation possibilities as well as obtained results, a detailed characterization of the grain mixture from the water-abrasive-suspension-cutting technique has been carried out. In addition to valuable findings as to the grain mixture composition, particle cut abrasion, resulting particle shapes, and element properties included in the abrasive are also examined. The results of the particle size analysis were further developed with the help of a particle counter measuring system. This allows a quick and simple qualitative evaluation about the composition of the magnetically sorted material and thus of the separated fraction. The experimental investigations are accompanied by a numerical multi-phase flow simulation of the magnetic rod filter for the evaluation of the flow conditions within the filter and their effect on the separation process.

The separation process developed in this study enables a significant separation of steel particles within the mixture, achieving an efficiency rate of approximately 90% of the mass fraction. Therefore, a decisive reduction of the radiological inventory can be achieved and the subsequent handling, conditioning, and disposal of the remaining mixture can significantly be improved. At the same time, this work provides the basis for a comprehensive usage of the magnetic rod filter for the sorting of grain mixtures.

I Einleitung

Das Erdbeben am 11. März 2011 vor der Küste Japans und der nachfolgende Tsunami führten zu einem der bedeutendsten Unfälle einer kerntechnischen Anlage in der Geschichte der Menschheit. Die Folgen der resultierenden Kernschmelzen von drei Blöcken auf dem Gelände der Anlage „Fukushima Daiichi“ führten zu Konsequenzen, die nicht nur die Umgebung der Anlage und das Land Japan beeinflussten. Eine Ausbreitung der Katastrophe auf drei weitere Anlagen auf dem Gelände konnte durch erfolgreiche, zum Teil heroische Lösversuche verhindert werden.

Als globalisierte Technologie führte dieser Vorfall weltweit zu einer kritischen Auseinandersetzung mit der Kerntechnik als einer Form der Energiegewinnung und in Deutschland zum unmittelbaren Entschluss des Atomausstiegs. Damit wurde der Fokus aktueller Forschungsaktivitäten verstärkt auf den Bereich „Rückbau von kerntechnischen Anlagen“ gelegt, was sich auch in dieser Arbeit widerspiegelt, in der die Problematik der Behandlung von Korngemischen mittels Magnetseparation zur Reduktion von radioaktiven Abfällen untersucht wird.

I.1 Motivation

Die Stilllegung aller aktiven deutschen Kernkraftwerke wird bis 2022 vollzogen. Dies bedeutet aber nicht das Aus für die Kerntechnik in Deutschland. Die eigentliche Herausforderung ist der zeitnahe Rückbau der 17 Kernkraftwerke, die zwischen 2011 und 2022 stillgelegt wurden bzw. noch werden. Die Stilllegung von kerntechnischen Anlagen beschränkt sich nicht nur auf den in Deutschland getroffenen Entschluss, sondern umfasst auch wegen technischer, wirtschaftlicher

und sozio-politischer Gründe alle bestehenden Anlagen weltweit. Derzeit sind weltweit 444 kommerzielle Kernkraftwerke in Betrieb [1], [2]. 157 Anlagen sind bereits stillgelegt [3], wobei bisher aber nur ca. 15 bis 20 Anlagen vollständig zurückgebaut wurden [4].

Der Umfang, die Komplexität, das Alleinstellungsmerkmal jeder einzelnen Anlage (Bauart, Bauzeit, Historie etc.) führen trotz technischer Machbarkeit des Rückbaus zu einem sehr langen Rückbauprozess, der hohe Kosten mit sich bringt. Allein in Europa werden für den Rückbau der bestehenden Kraftwerke ca. 140 Milliarden Euro veranschlagt [5]. Ein substanzieller Anteil dieser Kosten macht die Entsorgung von radioaktiven Abfällen aus. Mit dieser Arbeit kann somit ein Beitrag zur Reduzierung von Kosten durch die Minimierung von Abfällen geleistet werden. Ferner wird eine Basis für die Entwicklung von weitergehenden Verfahren geschaffen.

I.1.1 Hintergrund der Untersuchungen

Eine große Herausforderung beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage stellt die Umgebung unmittelbar um den Reaktorkern dar. Insbesondere gilt dies für die Zerlegung des stark aktivierten Reaktordruckbehälters (RDB) sowie dessen Einbauten [6]. Durch die jahrzehntelange Aussetzung dieser Komponenten der ionisierenden Strahlung ist die Handhabung und anschließende Zerlegung dieser Komponenten nur fernhantierbar möglich. Hierfür gibt es bereits eine Vielzahl an bewährten mechanischen sowie thermischen Schneidtechniken, die Vorteile, aber auch Nachteile aufweisen [7]–[9]. Zu den mechanischen Schneidtechniken zählt auch das Wasserstrahlschneiden, das, je nach Anlagentechnik und Schnittanforderung, in verschiedenen Formen zur Anwendung kommt [10]. Um eine Verbesserung der Schnittleistung erreichen zu können, wurden spezielle Formen dieser Schneidtechnologie optimiert und weiterentwickelt. Eines dieser Verfahren stellt die Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik (WASS) dar, bei der dem Wasser Abrasivpartikel beigemischt werden und dadurch die Schnittleistung erhöht wird [11]. Nach dem Schnitt entsteht jedoch ein Gemisch, das sowohl Anteile von Abrasivpartikeln als auch Späne des zerschnittenen Materials enthält. Dieses Gemisch wird im Folgenden als Korngemisch bezeichnet und ihre Separationsmöglichkeiten sind die Grundlage dieser Arbeit. Im Folgenden wird die WASS-Technik näher erläutert.

I.1.1.1 Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidtechnik

Die WASS-Technik nutzt die kinetische Energie des Wassers nach der Entspannung in einer Düse. Durch die Beimischung von Abrasivmaterial entsteht ein Strahl, der in der Lage ist, nahezu alle Materialien zu zerschneiden. Durch geringe Rückstellkräfte und die kompakte Baugröße der Schneiddüse kann diese leicht an einem Manipulatorsystem angebracht werden. Dies erlaubt die Anwendung der Schneidtechnik innerhalb von komplexen Strukturen, was insbesondere bei den

Kerneinbauten der Fall ist. Weitere Vorteile sind der berührungslose Schnitt und damit die Unempfindlichkeit der Technik gegenüber thermischen Spannungen im geschnittenen Material, wodurch keine Verklemmungsgefahr des Werkzeugs und keine wesentliche induzierte Vibration in der Schnittstruktur bestehen. Damit besitzt die Technik, verglichen mit anderen mechanischen Systemen wie z. B. einer Bandsäge, beträchtliche Vorteile, besonders was die Zerlegung von dünnwandigen geschweißten Einbauten angeht. Die Anwendbarkeit unter Wasser und die Vermeidung von Aerosolen durch die kalte Schnitttechnik (keine Thermik) führte dazu, dass die Technik beim Rückbau von Versuchsreaktoren und kommerziellen Kernkraftwerken bereits erfolgreich eingesetzt wurde [7] [12] [13]. Die folgende Abbildung I.1 skizziert die Funktionsweise der WASS-Technik.

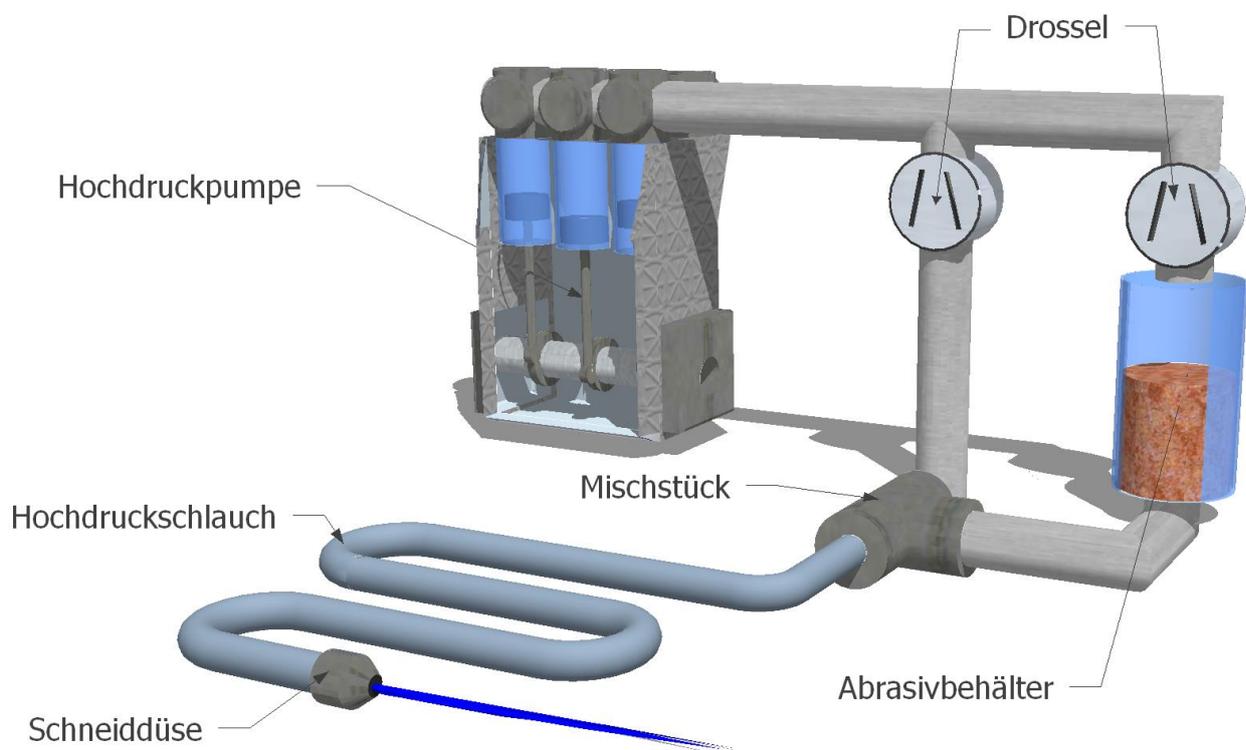


Abbildung I.1: Funktionsskizze der WASS-Schneidtechnik

Bei der WASS-Technik erfolgt die Mischung des Abrasivs bereits innerhalb des Hochdruckbereichs in der Maschinenteknik und somit außerhalb der Einsatzzone. Durch gezielte Steuerung der Drosseln wird die Zugabe an Abrasivmittel in der Suspension geregelt, das im Mischstück dem Hauptwasserstrom zugeführt wird. Dadurch wird eine luftfreie Suspension aus Wasser und Abrasivpartikeln über Hochdruckrohre an die WASS-Düse geführt, was die kompakte Bauform des Schneidkopfes erlaubt. Gleichzeitig erhöht die luftfreie Suspension die Schnittleistung, was zu einer Reduktion des Schnittdrucks führt und damit eine Reduktion der benötigten Abrasivmenge ermöglicht [14].

An der WASS-Düse wird die Suspension entspannt und erzeugt die benötigte kinetische Energie,

die Schnitte an Stahlkomponenten unter Wasser von bis zu 300 mm Wandstärke erlaubt [8]. Dabei abradieren die Abrasivpartikel das Bauteil, wodurch kleine Spanpartikel aus der entstehenden Schnittkerbe herausgetragen werden, wie die folgende Abbildung I.2 veranschaulicht.

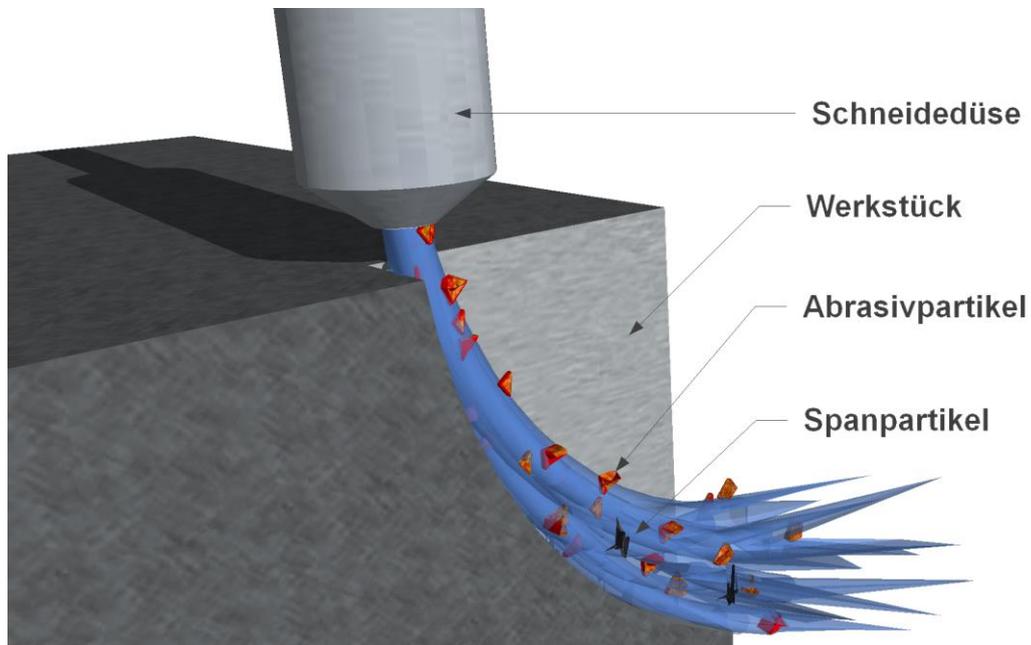


Abbildung I.2: Schnitterzeugung durch die WASS-Technik

Am Austritt der Schnittfuge entsteht aufgrund des Schnittvorgangs eine Mischung aus abradertem Abrasiv und Spänen des bearbeiteten Werkstücks. Da das Abrasiv den größten Kostenanteil mit über 50 % bei dieser Schneidtechnik darstellt [11], wird oft eine Rezyklierung des Materials angestrebt. Durch die hohe Geschwindigkeit der Abrasivpartikel am Düsenaustritt werden die Partikel aufgrund der Wucht des Aufpralls scherbenhaft fragmentiert, wie die folgende Abbildung I.3 zeigt.

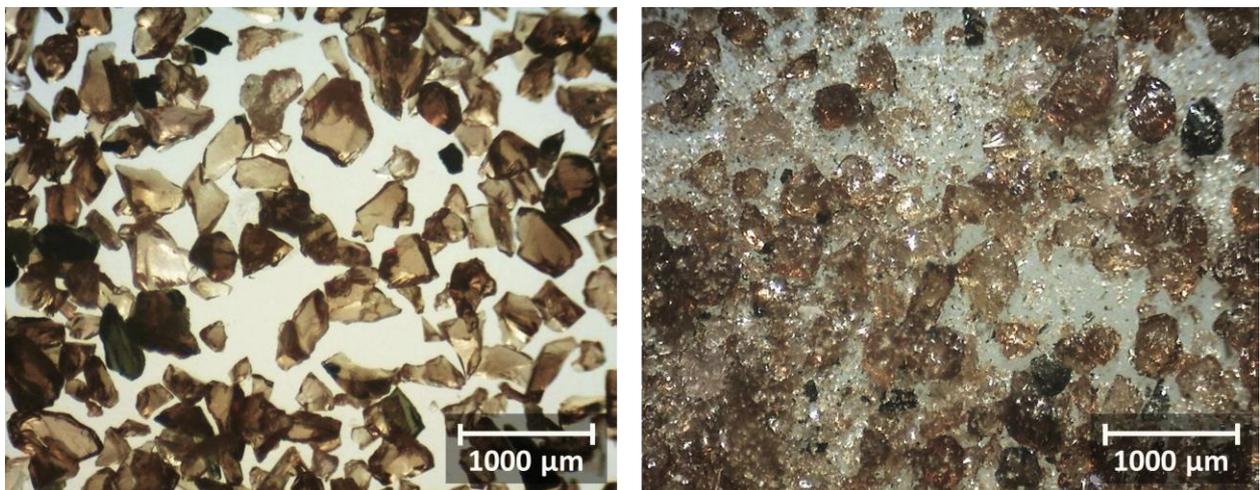


Abbildung I.3: Abrasivpartikel vor und nach dem Einsatz in der WASS-Technik

Durch nachträgliches Sieben der resultierenden Mischung aus Spänen und abradierem Abrasiv sind zum Teil Recyclingraten von bis zu 80 % möglich [15], wobei mit dem rezyklierten Material teilweise sogar eine Erhöhung der Schnittleistung möglich ist [11]. Eine Rezyklierung ist jedoch aufgrund immer kleiner werdender Partikel nur begrenzt anwendbar. Es verbleibt dabei ein Abfall, der aus einem Korngemisch aus Abrasivpartikeln und Stahlspänen aus der Schnittfuge besteht. Die Mischung dieser unterschiedlichen Stoffe muss gezielt entsorgt werden, wodurch eine Behandlung in Form einer Separation zur sortenreinen Entsorgung erstrebenswert ist.

I.1.1.2 Problematik des Korngemisches im Rückbau kerntechnischer Anlagen

Beim Zerschneiden von radioaktiven Bauteilen im kerntechnischen Bereich mittels WASS stellt dieser Abfall ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar. Dies liegt daran, dass es sich in diesem Bereich in der Regel um die Zerlegung von aktivierten Bauteilen handelt.

Unter der Aktivierung der Bauteile wird dabei die teilweise langjährige Aussetzung der Komponenten mit Neutronenstrahlung aus der Kernspaltung während des Betriebs des Kernkraftwerks verstanden [16]. Durch die große Anzahl der dabei vorherrschenden Neutronen ist, je nach Energie, eine wahrscheinlichkeitsabhängige Absorption der Neutronen möglich, wodurch bestimmte Elemente (wie z. B. ^{59}Co , ^{54}Fe) in das nächst schwerere Isotop (in den genannten Beispielen ^{60}Co und ^{55}Fe) überführt werden. Im Gegensatz zu ihren leichteren Isotopen sind diese instabil, weshalb sie mit einer gewissen Halbwertszeit zerfallen und ionisierende Strahlung freisetzen. Durch diesen Vorgang wird das Material aktiviert und stellt damit ein Risiko für die Umwelt dar. Seine Handhabung und Entsorgung erfordert daher gewisse Strahlenschutzmaßnahmen, was dazu führt, dass die zerlegten aktivierten Bauteile und Gebäudestrukturen im Anschluss entsprechend den gültigen Endlagerbedingungen [17] entsorgt werden müssen. Die Aktivierung von Elementen beruht auf den freigesetzten Neutronen aus der Kernspaltung. Durch die Abschaltung eines Kernkraftwerks und das Entfernen der Brennelemente vor dem Rückbau werden jegliche Neutronenquellen entfernt. Eine weitere Aktivierung von Elementen ist daher im Verlauf des Rückbaus nicht mehr möglich.

Findet in diesem Zusammenhang eine Ablagerung von radioaktiven Teilchen auf nicht aktivierten Bauteilen jeglicher Art statt, wird von einer Kontamination gesprochen [16], weshalb diese Bauteile auch dem Strahlenschutz unterliegen. Je nach Bauteil und Art der Kontamination kann diese durch eine Dekontaminationstechnik entsprechend wieder entfernt werden. Dabei ist, nach entsprechendem Nachweis, eine uneingeschränkte Freigabe des Bauteils möglich. Dies ist jedoch, je nach Dekontaminationsaufwand, nicht immer möglich. In diesem Fall wird das kontaminierte Material auch zu radioaktivem Abfall und muss entsprechend entsorgt werden.

Kommt daher eine Zerlegetechnik zum Einsatz, bei deren Anwendung zusätzlich radioaktiver Abfall durch Kontamination produziert wird, muss dieser zusätzlich zu den aktivierten Bauteilen entsprechend entsorgt werden. In diesem Zusammenhang wird demnach von radioaktivem Sekundärabfall gesprochen. Veranschaulichen lässt sich dies beispielsweise durch einen elektrischen Antriebsstrang, der durch seine komplexe Struktur mit Elektromagnetspulen bei Kontamination nicht mehr gereinigt werden kann und entsprechend dem aktuellen Stand der Technik entsorgt werden muss.

Auch der Einsatz der WASS-Technik im Rückbau kerntechnischer Anlagen hat die Erzeugung von Sekundärabfall zur Folge. Beim Schnitt erfolgt, wie in Abschnitt I.1.1.1 beschrieben, die Zerspanung des Werkstücks durch den Einsatz des Abrasivs, das durch Abrasion Späne aus der Schnittfuge her austrennt und sich mit diesen mischt. Da es sich bei diesen Spänen um radioaktives Material handelt, wird das entstehende Korngemisch kontaminiert. Es muss daher, zusätzlich zu den zerschnittenen Bauteilen, als Sekundärabfall entsorgt werden.

Beim Einsatz der WASS-Technik im kerntechnischen Bereich steht die Anlagentechnik (siehe Abbildung I.1) üblicherweise außerhalb der Einsatzzone. Damit wird eine Kontamination dieser teuren Komponenten vermieden. Es wird lediglich der Hochdruckschlauch mit der WASS-Düse in den kontaminierten Bereich zu einem Manipulator geführt. Um eine Kontamination der Anlagentechnik auch über den gesamten Einsatzzeitraum gewährleisten zu können, wird bei der kerntechnischen Anwendung bewusst auf die Rezyklierung des Abrasivs verzichtet. Dadurch bleibt die Anlagentechnik des WASS-V nach dem Einsatz komplett kontaminationsfrei und kann für weitere Zwecke nach dem Einsatz problemlos, auch außerhalb eines Kernkraftwerks, wieder genutzt werden.

Die Kontamination der Korngemische durch die Späne führt jedoch dazu, dass ein Einsatz der Technik im kerntechnischen Rückbau eine beträchtliche Menge an Sekundärabfall erzeugt [14]. Internationale Erfahrungswerte zeigen, dass insbesondere bei der Zerlegung von Reaktoreinbauten durch das WASS-Schneiden ca. das Eigengewicht der zerlegten Komponente als Sekundärabfall anfällt [13], [18], der zum jetzigen Stand der Technik entsprechend entsorgt werden muss. Dies führt zu einem erheblichen Nachteil der Anwendung der WASS-Technik im kerntechnischen Bereich. Werden dabei die momentan angesetzten 25.000 €/m³ für das vorgesehene Endlager Konrad in Deutschland berücksichtigt [19], ist der Kostenfaktor dieses zusätzlichen Abfalls nicht zu vernachlässigen. Trotzdem kam die Technik, unter Berücksichtigung der zusätzlichen Entsorgungskosten [12], erfolgreich im Kernkraftwerk Würgassen beim Zerlegen des 320 t schweren zylindrischen Teils des Siedewasser-Reaktordruckbehälters und dessen Einbauten zum Einsatz [20].

I.1.2 Beschreibung der Problemstellung

Im Folgenden wird die resultierende Problemstellung für die vorliegende Arbeit auf der Basis von bereits durchgeführten Untersuchungen zur Separation des Korngemisches aus Abrasiv und Stahlspänen erläutert.

I.1.2.1 Untersuchungen zur Separation des Korngemisches aus Abrasiv und Stahlspänen

Der Einsatz der WASS-Technik im Rückbau von kerntechnischen Anlagen wird durch die große Menge an radioaktivem Sekundärabfall wirtschaftlich massiv benachteiligt. Da während des Schneidvorgangs keine Neutronenquelle mehr im Einsatzgebiet vorhanden ist, erfolgt im Verlauf des Schnitts keine Aktivierung des Abrasivs. Es besteht lediglich eine Kontamination durch die Beimischung der aktivierten Stahlspäne. Hochrechnungen aus der Menge an angewendetem Abrasiv und dem resultierenden Volumen der erzeugten Schnittfuge ergeben, dass sich in der Mischung lediglich ca. 1 bis 2 *Volumen*-% an Stahl befindet [21]. Dadurch ergibt sich, dass der überwiegende Anteil von 98 *Volumen*-% des Abfalls aus nicht aktivierten Abrasivpartikeln besteht. Aufgrund der starken Aktivierung des RDB und der dazugehörigen Einbauten reicht diese Menge jedoch aus, um die Gesamtmenge an Korngemisch zu einer Gefährdung für Mensch und Umwelt darstellen zu lassen. Durch die Freigabe von Kennwerten aus den Zerlegungsarbeiten in Würgassen [22] sind Dosisleistungen reeller Korngemische vorhanden. Dabei wurde das Gemisch aus Abrasiv und Stahlspänen nach dem Schnitt in Einsatzkörben für Gussbehälter des Typs II [17] unter Wasser gesammelt. Die gemessenen Dosisleistungen in 0.3 m Abstand unter Wasser lagen dabei zwischen 0.53 und 30 *mSv/h*. Die große Schwankung dieser Werte liegt an der unterschiedlichen Aktivierung der jeweiligen geschnittenen Komponenten in Abhängigkeit vom Abstand zum Kern und an der inhomogenen Verteilung des gesammelten Materials im Behälter. Sie geben allerdings einen Richtwert zur Belastung des Materials durch die Beimischung der geringen Menge an enthaltenen Stahlspänen an.

Folglich wird der größte Teil der resultierenden Entsorgungskosten durch die unnötige Einlagerung des stabilen Abrasivs erzeugt. Um diese Problematik der WASS-Technik im Rückbau kerntechnischer Anlagen zu bearbeiten, wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes [23], gefördert durch das BMBF, nach einer Separationsmöglichkeit gesucht. Durch Trennung der Stahlspänenfraktion aus dem Korngemisch wird eine signifikante Abfallreduzierung verfolgt. Dabei wurden verschiedene Verfahrenstechniken untersucht. Der Einsatz eines Stabmagnetfilters erwies sich dabei als die wirkungsvollste Technik. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Pilotseparationsanlage aufgebaut, in der eine Trennung der Stahlspäne aus der großen Menge an Abrasiv erfolgreich und reproduzierbar mittels des Filters gezeigt werden konnte.

I.1.2.2 Resultierende Problemstellung

In dem Forschungsvorhaben konnte die grundlegende Separation von WASS-Korngemischen mithilfe der entwickelten Pilotanlage durchgeführt werden. Dabei konnte die Machbarkeit der Separation mittels eines Stabmagnetfilters gezeigt werden. Die Wahl der Betriebsparameter war im Zuge der zeitlichen Begrenzung nur auf Basis von Annahmen getroffen worden, wobei eine gute Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse im Rahmen des Vorhabens erreicht wurde [24], [25]. Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass es bei einer Variation eines einzigen Parameters zu signifikanten Unterschieden in den Ergebnissen kam [26]. Der hierbei eingesetzte Stabmagnetfilter, der im weiteren Verlauf noch näher erläutert wird, ist dabei keine konventionelle Lösung zur üblichen verfahrenstechnischen Magnetseparation. Auf der Suche nach Richtwerten zum Betrieb dieses Filters konnten keine Beiträge gefunden werden, die eine Erklärung zu dieser großen Diskrepanz der Ergebnisse geben konnte. Gleichzeitig zeigte die Untersuchung des verbleibenden und gereinigten Abrasivgemisches (Filtrat), dass sich nach der Filterung trotz langer Filterzeiten immer noch Stahlspäne im Filtrat befanden. Die bisher verwendeten Betriebsparameter erlauben daher nicht die gewünschte vollkommene Abscheidung der Stahlspäne durch den Stabmagnetfilter. Eine geeignete Wahl der Parameter und ein Verständnis der Abscheidemechanismen in diesem Stabmagnetfilter sind daher zwingend notwendig, wenn eine erfolgreiche Dekontamination der größten, nicht radioaktiven Menge an Abrasiv durch die Abtrennung der Stahlspäne erfolgen soll.

I.2 Grundlagen

In diesem Abschnitt wird auf die Grundlagen für diese Arbeit eingegangen. Hierbei werden grundlegende Größen des Magnetismus und das Verhalten von suspendierten Partikeln in magnetischen Feldern beschrieben. Im weiteren Verlauf wird auf den Stand der Technik der vorhandenen und relevanten Untersuchungen zu Magnetseparatoren eingegangen. Durch die geschlossene Geometrie des verwendeten Stabmagnetfilters besteht keine Möglichkeit zur Einsicht in die Strömungsverhältnisse innerhalb der Abscheidekammer. Aus diesem Grund wird im Verlauf der Arbeit eine Mehrphasensimulation mittels einer „Reynolds Averaged Navier-Stokes“ (RANS)-Simulation des Filters durchgeführt. Dazu werden die notwendigen Grundlagen dargestellt sowie auf weiterführende Literatur hingewiesen.

I.2.1 Definition der Separationsgrundlagen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Eigenschaften eines Magnetfeldes, die magnetischen Eigenschaften sowie der daraus resultierende Einfluss auf die Separation erläutert.

I.2.1.1 Definition magnetischer Eigenschaften einer Materie

Grundsätzlich gilt, dass alle Materialien von einem magnetischen Feld beeinflusst werden und dieses wiederum entsprechend beeinflussen. Dieser Einfluss kann dabei bekanntlich sehr stark sein. Oft ist er aber auch kaum messbar. Dieses unterschiedliche Verhalten ermöglicht grundsätzlich eine magnetische Separation. Das Verhalten von Stoffen in einem Magnetfeld wird dabei durch die Permeabilität und Suszeptibilität der jeweiligen Materie gekennzeichnet [27]. Sofern ein Magnetfeld im Raum vorhanden ist, entsteht durch dieses grundsätzlich ein magnetischer Fluss. Die Menge an magnetischem Fluss pro Flächeneinheit ergibt dabei die magnetische Flussdichte B und besitzt die Einheit Tesla $[T]$ [28].

Wird daher Materie in einem Magnetfeld betrachtet, so hat dies einen Einfluss auf die vorliegende magnetische Flussdichte. Im Verhältnis zum Zustand ohne Materie kann dabei die magnetische Flussdichte, je nach Materialeigenschaften, erhöht oder erniedrigt werden, was durch die Permeabilität der Materie beschrieben wird. Die Permeabilitätszahl stellt daher die resultierende Veränderung der magnetischen Flussdichte B durch die Materie im Verhältnis zur magnetischen Flussdichte B_0 ohne Materie dar [29]. Damit folgt für die Permeabilitätszahl einer Materie μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (I.1)$$

Wenn sich im Raum des Magnetfeldes keine Materie befindet und somit Vakuum herrscht, wird in diesem Fall die magnetische Flussdichte nicht verändert. Folglich gilt durch Gleichung (I.1) für die Permeabilitätszahl von Vakuum $\mu_{r,0} = 1$. Anhand dieses Verhältnisses lassen sich Materialien relativ zum magnetischen Feld im Vakuum magnetisch einordnen. Die magnetische Suszeptibilität χ einer Materie beschreibt wiederum ihre Magnetisierbarkeit in einer extern angelegten magnetischen Flussdichte B . Durch das Magnetfeld treten auf atomarer Ebene Kreisströme (Spins der Elektronen) auf, was ein magnetisches Dipolmoment erzeugt. Die Magnetisierung M der Materie, mit der Einheit $[A/m]$, entspricht dabei dem Quotienten aus der Summe aller magnetischen Dipolmomente bezogen auf das Volumen der Materie [29]. Allgemein gilt dadurch für die dimensionslose Suszeptibilität χ [30]:

$$\chi = \frac{\partial M}{\partial H} \quad (I.2)$$

Das magnetische Feld wird dabei durch die von außen wirkende magnetische Feldstärke H , mit der Einheit $[A/m]$, im Raum bestimmt. Für die meisten Stoffe stellt dabei die Suszeptibilität eine Konstante dar, wodurch sich der Zusammenhang aus Gleichung (I.2) zu $\chi = M/H$ vereinfacht. Dabei gilt der folgende Zusammenhang zwischen der relativen Permeabilität μ_r und der Suszeptibilität χ :

$$\mu_r = (1 + \chi) \quad (1.3)$$

Die magnetische Feldstärke H und die magnetische Flussdichte B sind dabei außerhalb der Materie proportional und durch die Permeabilität von Vakuum μ_0 gegeben durch [31]:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (1.4)$$

wobei μ_0 eine Naturkonstante mit dem folgenden Betrag ist:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right] \quad (1.5)$$

Liegt in einer Materie daher eine gewisse Magnetisierung M vor, so wird die magnetische Flussdichte in der Materie B_m sowohl von der anliegenden magnetischen Feldstärke H als auch von der eigenen Magnetisierung beeinflusst. Der Zusammenhang für die magnetische Flussdichte der Materie B_m beträgt somit [30]:

$$B_m = \mu_m (H + M) \quad (1.6)$$

wobei die Permeabilität der Materie mit $\mu_m = \mu_r \mu_0$ gegeben ist. Mit den zwei Eigenschaften der Permeabilitätszahl und der Suszeptibilität können Materialien in die folgenden drei Gruppen eingeteilt werden:

Stoffe mit $\mu_r < 1$ bzw. $\chi < 0$ sind diamagnetisch und schwächen das Magnetfeld.

Stoffe mit $\mu_r > 1$ bzw. $\chi > 0$ sind paramagnetisch und verstärken das Magnetfeld.

Stoffe mit $\mu_r \gg 1$ bzw. $\chi \gg 0$ sind ferromagnetisch und verstärken das Magnetfeld.

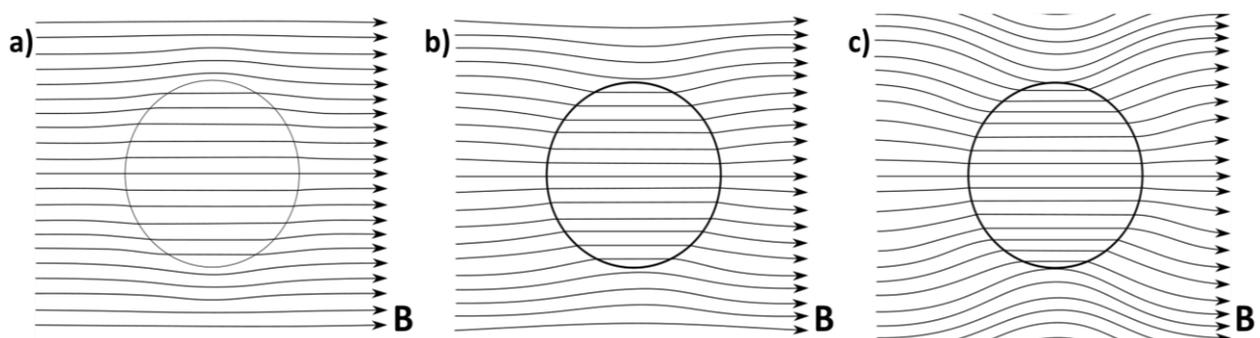


Abbildung I.4: Einfluss diamagnetischer (a), paramagnetischer (b) und ferromagnetischer (c) Stoffe auf die magnetische Flussdichte [32]

Die Auswirkung des Magnetfelds auf die magnetische Flussdichte zeigt die folgende Abbildung I.4. Dabei ist ersichtlich, dass sich bei diamagnetischer Materie die Flussdichte leicht von der Materie abstößt. Paramagnetische Stoffe bündeln die magnetische Flussdichte leicht. Bei ferro-

magnetischer Materie macht sich diese Bündelung durch die große Permeabilitätszahl sehr stark bemerkbar.

Die Eigenschaften für dieses Verhalten werden im Folgenden näher erläutert.

Diamagnetismus:

Der Diamagnetismus ist eine Eigenschaft, die in jeder Materie vorhanden ist. Sie beruht auf der Wechselwirkung zwischen einem externen Magnetfeld und der Elektronenbahn in den jeweiligen Atomen. Das Magnetfeld bewirkt dadurch eine Präzession der Elektronenbahnen, was zur Erzeugung von inneratomaren Ringströmen führt. Diese Ringströme bewirken somit ein Magnetfeld, das dem außen anliegenden Magnetfeld entgegengesetzt gerichtet ist [29]. Dieses interne Magnetfeld bewirkt lokal eine Abschwächung der magnetischen Flussdichte B ($\mu_r < 1$) und führt zu einer Kraft, die die diamagnetische Materie in Richtung der abnehmenden Magnetfeldstärke H bewegen lässt, den sogenannten negativen Gradienten von $\partial H / \partial x$. Dadurch distanziert sich diamagnetische Materie von einer magnetischen Quelle. Die Suszeptibilität von diamagnetischer Materie ist dabei negativ, temperaturunabhängig und hat eine Größenordnung, die bei etwa 10^{-5} bis 10^{-6} liegt [30]. Durch diese schwache Auswirkung auf das anliegende Magnetfeld ist dieses Phänomen nur bei Materie ausgeprägt, die eine abgeschlossene Elektronenkonfiguration besitzt. Dabei sind entweder alle Elektronenschalen und Unterschalen vollständig besetzt oder es liegen gepaarte Elektronen vor. Beispiele von diamagnetischen Stoffen sind Gold, Silber, Kupfer und Bismut.

Paramagnetismus:

Im Gegensatz zu der diamagnetischen Materie sind hier nicht alle Orbitale vollständig besetzt (bzw. es liegt eine ungerade Anzahl an Elektronen vor). Dadurch sind nicht kompensierte Bahn- und Spinmomente mit dem jeweiligen Drehimpuls vorhanden. Diese magnetischen Spinmomente sind in der Materie unregelmäßig verteilt und heben sich dadurch gegenseitig auf. Durch die Einwirkung eines externen Magnetfeldes richten sich die permanenten magnetischen Momente der Atome und Moleküle, je nach Stärke des Feldes, entsprechend aus, sodass daraus ein magnetisches Moment des Körpers in Richtung der zunehmenden Feldstärke resultiert ($\mu_r > 1$). Damit wird eine Kraft in Richtung des zunehmenden Gradienten $\partial H / \partial x_i$ bewirkt. Diese Ausrichtung erfolgt jedoch nicht vollständig, da die daraus resultierende Wärmebewegung der Atome diesem entgegen wirkt. Eine zunehmende Umgebungstemperatur hat zur Folge, dass die dadurch verstärkte Wärmebewegung der Atome überwiegt, wodurch der Grad der Ausrichtung der magnetischen Spinmomente abnimmt. Aus diesem Grund ist auch die magnetische Suszeptibilität in paramagnetischen Stoffen abhängig von der Temperatur, was dem Curie'schen Gesetz entspricht. Die Größenordnung der magnetischen Suszeptibilität liegt dabei etwa zwischen 10^{-3} und 10^{-5} . Beispiele von paramagnetischen Stoffen sind Platin, Wolfram, Aluminium und Zinn.

Ferromagnetismus:

Eine Ausnahme bei den Feldstärke steigernden Stoffen stellt die ferromagnetische Materie dar, bei der die magnetische Suszeptibilität keine Konstante ist. Die Magnetisierung ist dabei nicht proportional zu der angelegten Feldstärke, sondern folgt Gleichung (1.2). Dabei wird bereits bei geringen Feldstärken eine spontane parallele Ausrichtung der magnetischen Spinnomente der Elektronen erreicht, was zu einer sehr hohen Magnetisierungsrate führt. Die Suszeptibilität dieser Materie ist dabei, wie beim Paramagnetismus, von der Temperatur, der Vorgeschichte der Magnetisierung und der Feldstärke abhängig [33]. Nachdem jedoch eine komplette Ausrichtung erreicht wurde, stellt sich bei größer werdenden Feldstärken ein Maximalwert (sog. Sättigungsmagnetisierung) ein. Es gibt hierbei nur wenig elementare Materie, die diese Eigenschaft besitzt. Darunter fallen Eisen, Nickel, Kobalt, deren Legierungen sowie manganhaltige Kupferlegierungen (sog. Heusler'sche Legierungen) und einige seltene Erden. Unter den Mineralen zählen Magnetit, Maghemit, Franklinit und Pyrrhotin zu dieser Gruppe [27]. Die Größenordnung der Suszeptibilität kann dabei 10^5 betragen.

Das unterschiedliche Verhalten der jeweiligen Suszeptibilität wird durch das Verhältnis der Magnetisierung zur angelegten Feldstärke in der folgenden Abbildung I.5 veranschaulicht. Beispiele für gemessene Werte können dabei aus Wills et al. [34] entnommen werden.

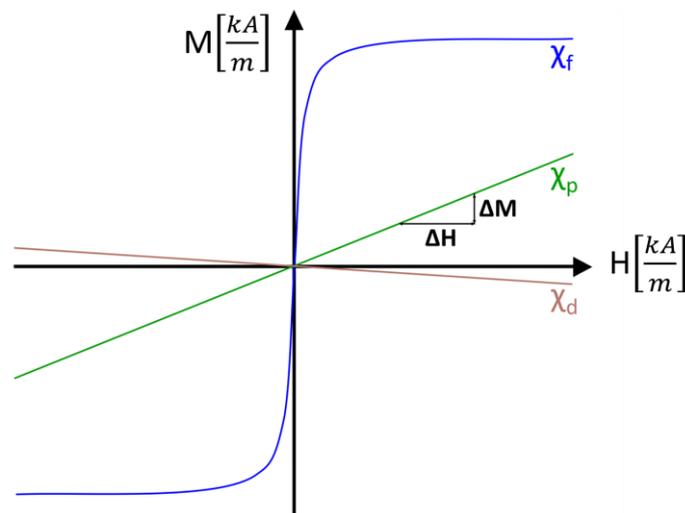


Abbildung I.5: Schematische Magnetisierung der ferromagnetischen (χ_f), paramagnetischen (χ_p) und diamagnetischen (χ_d) Stoffe gegeben über eine angelegte Feldstärke [29], [35]

Zusätzlich zu diesen Magnetismustypen existieren noch weitere magnetische Eigenschaften von Stoffen (wie z. B. Ferrimagnetismus). Da diese Eigenschaften allerdings nicht auf die untersuchten Stoffe in der Arbeit zutreffen, werden diese hier nicht weiter erläutert. Als weitere Lektüre und auch vertiefte Erklärung der magnetischen Grundlagen wird der interessierte Leser auf [30], [31], [36] verwiesen.

I.2.1.2 Definition magnetischer Eigenschaften von Magneten

In der bisherigen Betrachtung wurde das Verhalten von Stoffen bei einer anliegenden magnetischen Feldstärke H betrachtet, wobei stets von einem unendlich ausgedehnt homogen angelegtem Magnetfeld ausgegangen wird. Die Quelle des Feldes war bisher bewusst nicht Gegenstand der Erläuterungen. Im Folgenden wird daher auf die magnetische Eigenschaft von Stoffen eingegangen, die in der Lage sind, selbst ein Magnetfeld zu induzieren. In diesem Zusammenhang wird folglich auf die in der Arbeit benötigten Permanentmagneten eingegangen.

Das in Abschnitt I.2.1.1 beschriebene ferromagnetische Verhalten von Materie ist dabei nicht nur auf die Eigenschaften der Atome zurückzuführen, sondern auch auf die kristalline Zusammensetzung seines Festkörpers [37]. In Abhängigkeit von dieser sind bestimmte ferromagnetische Stoffe in der Lage, eine in einem magnetischen Feld erhaltene Magnetisierung auch nach Entfernen des Feldes beizubehalten. Stoffe mit dieser Eigenschaft werden als Magnet bzw. Permanentmagnet bezeichnet. Eine magnetische Materie besitzt dabei Bereiche mit gleichen Spinnmomenten der Elektronenschalen und folglich mit gleicher Magnetisierung (sog. Weiss'schen Bezirke [29]). Diese sind im „entmagnetisierten“ Zustand willkürlich verteilt, wodurch sich die magnetischen Momente gegenseitig aufheben. Wird ein Magnet im „entmagnetisierten“ Zustand dabei einer steigenden Magnetfeldstärke ausgesetzt, durchläuft es drei Elementarprozesse, wie die folgende Abbildung I.6 zeigt.

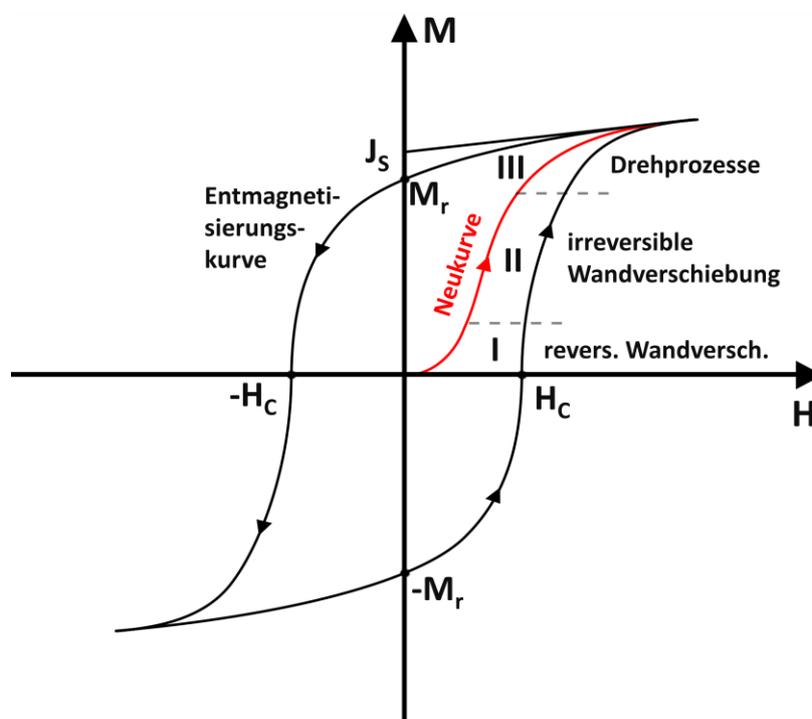


Abbildung I.6: Hysteresekurve der Magnetisierung von Magneten [29]

Dabei findet bei einem idealisierten magnetisch-neutralen Magneten anhand der Neukurve zu-

nächst eine Neuorientierung der magnetischen Momente durch das angelegte Magnetfeld statt. Somit erfolgt eine Erweiterung der gleichgerichteten Weiss'schen Bezirke innerhalb des Magnets. Diese Erweiterung findet zunächst nur im niedrigen reversiblen Energiebereich (Bereich I) statt. Mit zunehmender Feldstärke werden auch schwerere und damit auch irreversible Verschiebungen vollzogen (Bereich II). Dabei werden sämtliche Bezirke in jene kristallographische Vorzugsrichtung orientiert, deren Winkel mit dem Magnetfeld am nächsten kommt [27]. Diese beiden ersten Bereiche entsprechen daher dem größten Anteil der Magnetisierung, wie in Abbildung I.6 exemplarisch gezeigt wird. Durch weitere Erhöhung der Feldstärke finden energiereiche, jedoch reversible, Drehprozesse von Elementarbezirken aus der kristallographischen Vorzugsrichtung statt, bei denen sich die magnetischen Momente der Materie vollends in die angelegte Feldrichtung ausrichten (Bereich III) [29]. Der Abschluss dieses Prozesses führt zur vollkommenen Magnetisierung des Magnets, womit die Magnetsättigung erreicht wird.

Durch das nachträgliche Entfernen des angelegten äußeren Magnetfelds, bleibt im Permanentmagneten eine Restmagnetisierung übrig, die als Remanenz (sogenannte Remanenzflussdichte) bezeichnet wird (in Abbildung I.6 mit M_r gekennzeichnet). Je höher die Remanenz in der Materie ist, desto stärker ist der Permanentmagnet. Eine weitere wichtige Kenngröße eines Magneten ist dabei die Fähigkeit, diese Remanenz gegenüber fremdwirkenden magnetischen Quellen beizubehalten. Durch das Anlegen eines entgegen gerichteten magnetischen Feldes ist nämlich eine Umkehrung des Prozesses und somit eine Entmagnetisierung möglich. Je höher dabei die benötigte Feldstärke zum Umkehrungsprozess ist, desto unempfindlicher ist der Magnet gegenüber Fremdfeldern. In Abbildung I.6 ist die hierzu exemplarische benötigte Feldstärke mit H_c gekennzeichnet und wird als Koerzitivfeldstärke bezeichnet. Damit lassen sich Permanentmagnete durch den Betrag der Sättigungsmagnetisierung, die Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke beschreiben. Dabei sind letztere zwei für den Einsatz der Permanentmagnete von Wichtigkeit. Zum langfristigen Erhalt der Magnetisierung von Permanentmagneten sind jedoch noch weitere Entmagnetisierungsfaktoren wie die bereits erwähnte Temperatur (Curie'sches Gesetz) sowie starke Erschütterungen für den sicheren und zuverlässigen Betrieb des Magnets zu berücksichtigen.

Dadurch, dass Permanentmagneten mit einer hohen Koerzitivfeldstärke durch ihre kristallographische Zusammensetzung hart und damit spröde sind, werden diese üblicherweise als hartmagnetische Materialien bezeichnet [31]. Weiche Magnete haben dagegen eine geringe Koerzitivfeldstärke und eignen sich für den Einsatz, bei dem eine hohe Magnetisierungsrate aber keine verbleibende Remanenz gewünscht ist. Die zurzeit stärksten verfügbaren Permanentmagneten stellen dabei die Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) dar [38], welche eine Flussdichte (Remanenz) von 0.9 bis 1.2 T besitzen, Koerzitivfeldstärken von 700 bis 800 kA/m aufweisen und bis zu einer Temperatur, je nach Legierung, von 120 °C betrieben werden können [29]. Als Ver-

gleich sei hier genannt, dass natürliche Permanentmagnete aus Magnetit eine Remanenz von ca. $0.03 T$ besitzen [37] und das Erdmagnetfeld lediglich $0.5 \mu T$ aufweist [39].

Für die folgenden Untersuchungen werden NdFeB-Magneten in der zylindrischen Stabform angewendet. Die magnetische Feldstärke die sich dabei um und in diesen Permanentmagnet ergibt, kann dabei analytisch wiedergegeben werden. Nach Coey [31] und Furlani [40] werden hierfür verschiedene Ansätze vorgestellt. Das Modell, das die Feldstärke H sowohl innerhalb als auch um einen zylindrischen Permanentmagneten wiedergibt, ist das Ladungsmodell und basiert auf den Maxwell'schen Gleichungen [41]. Dabei wird die Coulombische Approximation verwendet, was den Permanentmagneten auf eine Verteilung gleichwertiger magnetischer Ladung q_r im Inneren und an der Oberfläche des Magnets reduziert. Mit der Annahme einer gleichmäßige Verteilung der Magnetisierung M über die Länge ergibt sich somit folgender Zusammenhang für die lokale Feldstärke [31], [42]:

$$H(r) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{M(r'') \cdot e_n(r' - r'')}{|r' - r''|^3} d^2r'' \quad (1.7)$$

wobei S sich auf die Oberfläche des Zylinders bezieht, e_n der nach außen gewandte Einheitsvektor orthogonal zur Oberfläche S . r' sowie r'' sind die Abstände zwischen dem Dipolzentrum und dem Betrachtungspunkt $P(x, y, z)$ sowie dem orthogonalen Beobachtungspunkt zur Oberfläche. Dies wird links in der folgenden Abbildung I.7 veranschaulicht.

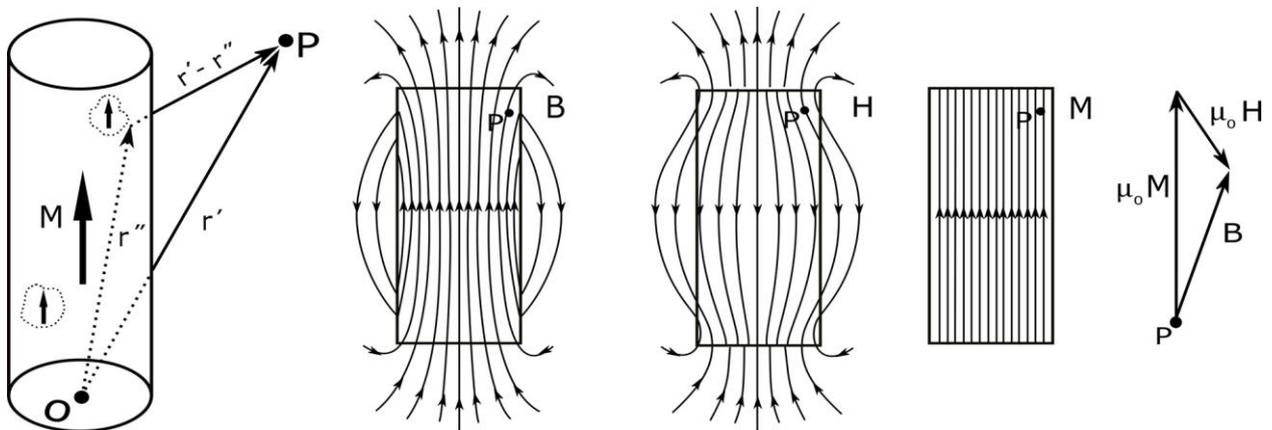


Abbildung I.7: Skizze zur Berechnung der Feldstärke sowie des Zusammenhangs zwischen Feldstärke H , Magnetisierung M und Magnetflussdichte B eines zylindrischen Permanentmagnets [31]

Der Zusammenhang zwischen H , M und B für einen einzigen alleinstehenden zylindrischen Permanentmagneten wird auf der rechten Seite von Abbildung I.7 gezeigt. Dabei sind die B -Felder in sich geschlossen. Die Feldstärke H verläuft außerhalb des Magnets um den Faktor μ_0 in die gleiche Richtung wie die Magnetflussdichte B , was durch Gleichung (I.4) beschrieben wird. Die Magnetisierung ist dabei gleichmäßig im Magneten verteilt, wobei an den Polen der höchste Be-

trag erreicht wird. Außerhalb des Magnets ist die Magnetisierung ohne Materie zwangsläufig null. Der Magnetisierung wirkt im Inneren des Magnets die Feldstärke entgegen. Sie folgt dem Zusammenhang, der in Gleichung (I.6) gegeben ist, und verläuft damit gegenläufig zu B und M . Der vektorielle Zusammenhang für einen Punkt P ist dabei rechts in Abbildung I.7 gezeigt, womit Gleichung (I.6) erfüllt ist.

I.2.1.3 Kräfteverhältnisse der magnetischen Separation von suspendierten Partikeln

Ziel dieser Arbeit ist, basierend auf der Suszeptibilität von unterschiedlichen Partikeln eine Fest/Fest-Sortierung (Trennen nach stofflichen Eigenschaften) eines Korngemisches zu erreichen [43]. Das Korngemisch wird hierzu in Wasser suspendiert und an einem Stabmagnetfilter durch Zwangskonvektion vorbeigeführt. Zur Erzielung einer gewünschten magnetischen Separation wirken hierbei verschiedene konkurrierende Kräfte, die die Sortierung des Korngemisches beeinflussen. Im Folgenden wird die magnetische Sortierung schematisch dargestellt:

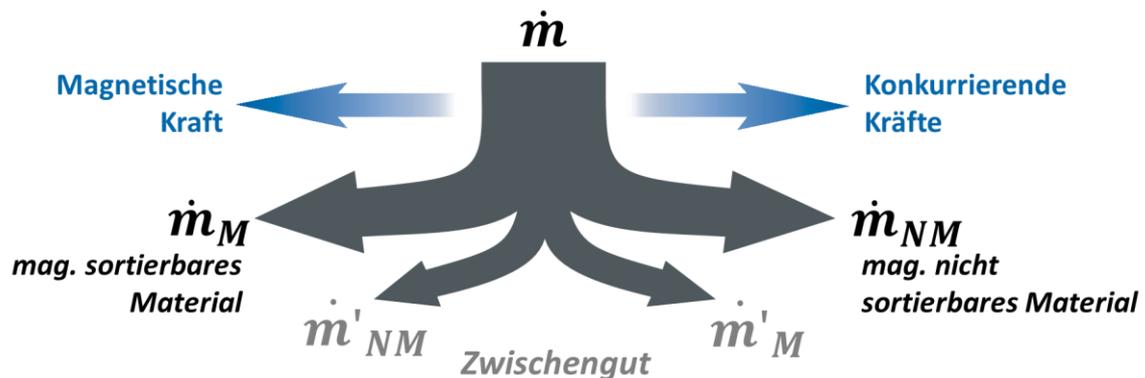


Abbildung I.8: Schematische Aufteilung des Stoffstroms einer magnetischen Sortierung

Wird ein suspendiertes Korngemisch einem Magnetfeld ausgesetzt, ergibt sich eine Kräftebilanzierung zwischen der magnetischen Kraft \vec{F}_M und den konkurrierenden Kräften \vec{F}_{NM} , die das Gemisch in magnetisch sortierbares und magnetisch nicht sortierbares Material einteilen. Die konkurrierenden Kräfte sind dabei unter anderem die hydrodynamische Widerstandskraft, die Schwerkraft, die Trägheitskraft, interpartikuläre Kräfte sowie die Zentrifugalkraft [44]. Je nach Magnetseparator spielen diese Kräfte eine unterschiedlich wichtige Rolle [45]. Gleichzeitig ist die Wahl der Intensität von \vec{F}_M von großer Bedeutung. Grundsätzlich gilt für die magnetische Separation, dass $\vec{F}_M > \vec{F}_{NM}$ sein muss. Wird \vec{F}_M jedoch zu groß gewählt, führt es zu einer ungewollten Separation eines Teils der nicht vorgesehenen Fraktion (m'_{NM}), sofern die Unterschiede der magnetischen Suszeptibilität gering sind (siehe Abschnitt I.2.1.1). Insbesondere bei ferromagnetischer Materie ist eine zu große magnetische Kraft zum Teil sogar hinderlich und kann zur Minderung von \vec{F}_M führen [34], [46]. Eine gezielte Einstellung des Verhältnisses von \vec{F}_M und \vec{F}_{NM} ist

daher von großer Bedeutung in der magnetischen Separation, wie in [33] ausführlich erläutert wird. Das ungleiche Gleichgewicht der Kräfte oder eine Überlappung der Kräftebereiche führt zur Erzeugung von Zwischengut (siehe Abbildung I.8, \dot{m}'_{NM} und \dot{m}'_M). Oft ist daher eine experimentelle Untersuchung unumgänglich. Im Folgenden werden die wichtigsten Zusammenhänge für die vorliegende Arbeit vorgestellt.

Magnetische Kraft

Das magnetische Feld bewirkt nach den bereits erklärten Prinzipien eine Magnetisierung der Materie in einem Magnetfeld. Durch dieses Ausrichten entstehen zwei entgegengesetzte starke Pole. Die magnetische Kraft \vec{F}'_M , die auf diese Pole im Magnetfeld wirkt, ist dabei das Produkt der Polstärke Φ und der wirkenden Feldstärke. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\vec{F}'_M = \Phi H \quad (I.8)$$

Aufgrund der entgegengesetzt gepolten Pole mit gleichem Betrag, wirkt in einem homogenen Feld eine entgegengesetzte Kraft an den jeweiligen Extremen. Dies führt zu einer entsprechenden Orientierung der Materie entlang der Felder, wobei ein magnetisches Moment bezogen auf die Länge des Körpers entsteht. Die Folgerung daraus ist, dass sich ein Körper in einem homogenen Feld lediglich in Richtung des Verlaufs der Feldstärke ausrichtet, sich aber nicht in diesem fortbewegt. Hierfür ist ein Gradient der Feldstärke nötig, damit die wirkende magnetische Kraft an einem der Pole \vec{F}'_M überwiegt. Magnetische Materie wird also nur in inhomogenen Magnetfeldern abgeschieden. Der resultierende Zusammenhang für die wirkende magnetische Kraft auf ein magnetisches Partikel in Suspension ergibt sich daher aus [47]–[49]:

$$\vec{F}_M = V_m \mu_0 (M_m - M_f) \nabla H \quad (I.9)$$

wobei V_m für das Volumen des Partikels steht und M_m sowie M_f für die Magnetisierung des Partikels bzw. des Trägermediums. Die Magnetisierung ist dabei gegeben durch Gleichung (I.2), wobei zu beachten ist, dass die Suszeptibilität von ferromagnetischen Stoffen nicht konstant ist. Aus technischen Gründen ist in der Literatur zum Teil die magnetische Kraft mit der Magnetflussdichte anstatt der Feldstärke aufgeführt. Dabei gilt der Zusammenhang aus Gleichung (I.4).

Bei der hier vorgesehenen Anwendung von Wasser als Trägermedium ist die Magnetisierung des Mediums zu vernachlässigen, da die Suszeptibilität von Wasser nahe null liegt. Daraus folgt:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{\mu_0} \chi_m V_m B \nabla B \quad (I.10)$$

Die magnetische Kraft ist somit proportional zur Größe des Partikels [50], der angelegten magnetischen Feldstärke, dem Gradienten des Felds und der Suszeptibilität der Materie.

Konkurrierende Kräfte

Der magnetischen Kraft stehen die konkurrierenden Kräfte \vec{F}_{NM} gegenüber. Diese setzen sich wiederum aus verschiedenen Einflussgrößen zusammen. Eine hohe Konzentration an Partikeln führt bekanntlich zu einer gegenseitigen Behinderung der Partikel (Schwarmverhalten [51]) was einen negativen Einfluss auf eine beabsichtigte Sortierung hat. Für technische Trennungen wird daher eine Konzentration unter 1 *Volumen-%* empfohlen, um gegenseitige Einflüsse zu vermeiden [52]. Dies wurde auch in den vorliegenden Untersuchungen berücksichtigt, wodurch interpartikuläre Kräfte vernachlässigt werden können. Durch die Abwesenheit von rotierenden Elementen im angewendeten Stabmagnetfilter wird im Folgenden auch die Zentrifugalkraft vernachlässigt. Trotz einer Vielzahl an weiteren Einflussgrößen, die zu berücksichtigen wären [53], beschränkt sich der Einfluss der wesentlichen Kräfte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen auf die Widerstandskraft \vec{F}_W , die Schwerkraft \vec{F}_G und die Trägheitskraft \vec{F}_T [27]. Dies führt zu folgendem Zusammenhang:

$$\vec{F}_{NM} = \vec{F}_W + \vec{F}_G + \vec{F}_T \quad (I.11)$$

Die einzelnen wirkenden konkurrierenden Kräfte werden im Folgenden kurz erläutert.

a) Widerstandskraft

In der Verfahrenstechnik wird zur Stoffsortierung oft auf die Nutzung von turbulenten Strömungen verzichtet [52]. Unter der Annahme von annähernd runden Partikeln kann die Widerstandskraft daher wie folgt berechnet werden [51], [53]:

$$\vec{F}_W = c_W A_m \frac{\rho_f}{2} |\nu| \cdot \vec{\nu} \quad (I.12)$$

Dabei ist c_W die von der Reynolds-Zahl Re abhängige Widerstandzahl, A_m die Projektionsfläche der Materie in Anströmungsrichtung, ρ_f die Dichte des Trägermediums, $|\nu|$ die Anströmgeschwindigkeit und $\vec{\nu}$ die Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Partikel. Im Stokes-Bereich ($Re < 0.25$) lässt sich die Widerstandskraft weiter analytisch zu folgendem Zusammenhang vereinfachen [53]:

$$\vec{F}_W = 12 \pi \mu r \vec{\nu} \quad (I.13)$$

mit der Viskosität μ des Trägermediums sowie dem Radius r des Partikels.

b) Schwerkraft

Unter der Annahme von annähernd runden Partikeln und unter Berücksichtigung des Auftriebs in einem dichten Medium folgt für die Schwerkraft [33]:

$$\vec{F}_G = V_m(\rho_m - \rho_f)\vec{g} \quad (I.14)$$

mit der Dichte der Materie ρ_m sowie der Erdbeschleunigung \vec{g} .

c) Trägheitskraft

Die Trägheitskraft, die auf die Partikel wirkt, ist gegeben durch [54]:

$$\vec{F}_T = (\rho_m - \alpha\rho_f)V\frac{\partial\vec{v}}{\partial x_i} \quad (I.15)$$

wobei die Verdrängung des Trägermediums durch die Trägheit der Partikel mit der Verdrängungskonstante α berücksichtigt wird.

Wechselwirkungen der konkurrierenden Kräfte

Aus den beschriebenen Zusammenhängen kann eine Wechselwirkung des Einflusses der einzelnen Kräfte entnommen werden. Diese lässt sich vereinfacht auf die Größe der betrachteten Partikel reduzieren [49]. Aus den Gleichungen (I.10), (I.13) und (I.14) kann abgeleitet werden, dass in Bezug auf die Größe der Partikel die Schwerkraft und die magnetische Kraft durch die volumetrische Abhängigkeit den größten Einfluss bewirken. Unter der Annahme annähernd kugelförmiger Partikel ist somit der Einfluss dieser Kräfte proportional zu r^3 . Oberteuffer zeigt jedoch im Falle der magnetischen Kraft, dass aufgrund von Wechselwirkungen der Magnetisierung, welche Einfluss auf die Feldstärke und den damit gekoppelten Gradienten haben, für $r \rightarrow \infty$ ein Maximum der magnetischen Kraft existiert [49]. Er zeigt weiter, dass es zielführend ist, den Gradienten der Feldstärke an die Partikelgröße möglichst anzupassen, womit die magnetische Kraft sich auf eine Funktion von r^2 reduziert.

In diesem Zusammenhang folgen Partikel mit zunehmend größer werdendem Radius daher überwiegend der Schwerkraft. Im Gegensatz dazu ist die Widerstandskraft auf die Projektionsfläche mit r^2 bzw. bei schleichenden Strömungen sogar auf den Radius r reduzierbar. Partikelgrößen haben so folglich im Vergleich den geringsten Einfluss auf die Widerstandskraft. In Wechselwirkung mit der Schwerkraft und der magnetischen Kraft folgen Partikel mit kleiner werdendem Radius zunehmend dem Strömungsverlauf, was einer magnetischen Abscheidung entgegenwirkt. Unter Vernachlässigung der Trägheitskraft kann bei dieser Gegenüberstellung gezeigt werden, dass eine magnetische Sortierung nur in einem Partikelgrößenbereich von $5 \mu\text{m}$ bis $10^3 \mu\text{m}$ effektiv durchzuführen ist [49], wobei sich eine Partikelgröße von ca. $100 \mu\text{m}$ als optimal darstellt [55].

Um die Wechselwirkungen bei der Evaluation der Ergebnisse aus den vorliegenden Untersuchungen besser deuten zu können, wurde mit den Parametern aus den oben genannten Kräften eine Dimensionsanalyse anhand [56], [57] durchgeführt. Dabei lassen sich aus den Parametern

der einzelnen Kräfte folgende $n = 8$ unabhängige, dimensionsbehaftete Parameter ableiten. Zusammenhängende Parameter wie z. B. das Partikelvolumen werden dabei durch den unabhängigen dimensionsbehafteten Radius r dargestellt:

$$\mu_0, B, r, \mu, \rho_m, \rho_f, \vec{v}, \vec{g} \quad (I.16)$$

Als Grundlage dienen die Grundgrößen Länge $[L]$, Masse $[M]$, Zeit $[T]$ und Stromstärke $[I]$. Mit diesen lassen sich alle acht Parameter in einer Dimensionsmatrix aufstellen, womit sich ein Rang $R = 4$ bestimmen lässt. Mit der Differenz aus Parameteranzahl und dem Rang ($n - R$) lässt sich das vorliegende Separationsproblem mittels Dimensionsanalyse auf den Zusammenhang von vier dimensionslosen Kennzahlen zurückführen. Die Basis bilden dabei der Partikelradius r $[L]$ als Grundgröße für die Länge, die Dichte des Partikels ρ_m $[M \cdot L^{-3}]$ als Grundgröße für die Masse, die Geschwindigkeit des Partikels \vec{v} $[L \cdot T^{-1}]$ als Grundgröße für die Zeit und die Permeabilität des Vakuums μ_0 $[M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}]$ als Grundgröße für die Stromstärke. Die restlichen vier Parameter können somit als Potenzprodukte der Grundgrößen dargestellt werden. Es resultieren dabei die folgenden vier dimensionslosen Zusammenhänge:

$$\Pi_1 = \frac{B^2}{\mu_0 \rho_m \vec{v}^2} \quad \Pi_2 = \frac{\mu}{\vec{v} r} \quad \Pi_3 = \frac{\vec{g} r}{\vec{v}^2} \quad \Pi_4 = \frac{\rho_f}{\rho_m} \quad (I.17)$$

Diese physikalischen Zusammenhänge sind in der Literatur bekannten dimensionslosen Kennzahlen zuzuordnen [58]. Die erste dimensionslose Kennzahl Π_1 ist dabei als die magnetische Druck-Kraft aufgeführt. Sie wird als der Quotient aus der magnetischen- und der Trägheitskraft verstanden und gibt den Zusammenhang der treibenden Kraft des Partikels in Richtung des Magnets wieder. Die zweite dimensionslose Kennzahl Π_2 ist der reziproke Wert der Reynolds-Zahl (Re). Sie ergibt den Quotienten aus der Trägheits- und der Zähigkeitskraft und stellt ein Maß für die Charakterisierung der Strömungsform dar. Die dritte Kennzahl ist als Stokes-Zahl (St) bekannt und stellt die Massenträgheit der Bewegung eines Partikels in einem Fluid dar. Für $St \ll 1$ folgen die Partikel der lokalen Strömung und stellen in diesem Zusammenhang die Hinderung der Separation durch das Überwiegen der hydrodynamischen Kräfte dar. Die letzte dimensionslose Kennzahl Π_4 stellt den Quotienten der Dichte des Fluids und des Partikels dar und verkörpert in diesem Zusammenhang den gegenläufigen Einfluss der Schwerkraft sowie der Trägheit bei zunehmender Partikeldichte auf die Separation.

Die Dimensionsanalyse ergibt somit für das gegebene Kräfteverhältnis den folgenden Zusammenhang:

$$Separation = f\left(\frac{B^2}{\mu_0 \rho_m \vec{v}^2}; \frac{\mu}{\vec{v} r}; \frac{\vec{g} r}{\vec{v}^2}; \frac{\rho_f}{\rho_m}\right) = f(\Pi_1; Re^{-1}; St; \Pi_4) \quad (I.18)$$

Dieser einfache Zusammenhang zeigt den Einfluss der wirkenden Parameter auf die Separation

in der betrachteten Untersuchung und wird daher für die spätere Interpretation der Ergebnisse in Abschnitt VI.3 benötigt.

I.2.2 Grundlagen zur Mehrphasenströmungssimulation

Zur numerischen Untersuchung des Stabmagnetfilters werden im Verlauf dieser Arbeit die Bewegung der Partikel in Suspension sowie die Strömung des Trägermediums durch den numerisch diskretisierten Raum simuliert [59], wofür eine Mehrphasenströmungssimulation zum Einsatz kommt. Dabei kann die disperse Phase (Partikel) im Fluid mit zwei verschiedenen Konventionen zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverhältnisse modelliert werden, namentlich das Euler-Lagrange- und das Euler-Euler-Verfahren [54].

Im Euler-Euler-Verfahren werden beide Phasen als vollwertiges Medium betrachtet, die kontinuumsmechanische Eigenschaften besitzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die kontinuierliche und die disperse Phase nahezu die gleiche Geschwindigkeit besitzen. Wechselwirkungen zwischen den Phasen werden nachträglich über Quellterme ausgeglichen [60]. Zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen werden für jede Phase gemittelte Werte für die diskreten Volumenelemente angewendet, was jedoch voraussetzt, dass die disperse Phase homogen verteilt ist und dabei, insbesondere zur Bestimmung der Viskosität, eine geringe Standardabweichung des mittleren Korndurchmessers besitzt. Größere Partikelgrößenunterschiede innerhalb der dispersen Phase führen dazu, dass diese in kleinere Fraktionen unterteilt werden müssen, die als einzelne zusätzliche Phase modelliert werden. Durch die zusätzlichen Gleichungen, die dadurch gelöst werden müssen, steigt der Rechenaufwand mit zunehmender Polydispersität exponentiell an [61].

Im Euler-Lagrange-Verfahren wird ausschließlich die kontinuierliche Phase über die Bilanzgleichungen beschrieben, wobei ein ortsfestes Euler'sches Koordinatensystem gilt. Die disperse Phase wird mittels einer statischen Betrachtungsweise der Partikel und somit mit einem auf den Partikelbahnen mitbewegten Lagrange'schen Koordinatensystem beschrieben. Die disperse Phase wird dabei durch gewöhnliche Differentialgleichungen für die örtliche, die translatorische sowie die rotatorische Geschwindigkeit gelöst [61]. Aufgrund dieser unterschiedlichen Betrachtungsweise wird die Berechnung einer größenverteilten dispersen Phase erleichtert, wobei der disperse Phasenanteil jedoch auf 5 Massen-% beschränkt ist. Die Anzahl an tatsächlich modellierten Partikel wird des Weiteren maßgeblich durch die Gruppierung der Partikel in sogenannte „Partikelpakete“ reduziert [62], [63]. Es ist dabei möglich, das Euler-Euler-Verfahren aus dem Euler-Lagrange-Verfahren herzuleiten. Dadurch ist unter gewissen Voraussetzungen ein Vergleich untereinander möglich [64].

Zur Lösung der kontinuumsmechanischen Bilanzgleichungen der Phasen im Euler-Euler-Verfah-

ren, sowie der kontinuierlichen Phase in dem Euler-Lagrange-Verfahren, werden die gemittelten RANS Gleichung angewendet. Diese sind für die Kontinuitätserhaltung wie folgt in der einsteinsche Summenkonvention gegeben durch [65]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i u_i) = 0 \quad (1.19)$$

Für die Impulserhaltung gilt:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i u_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\alpha_i \nabla p + \alpha_i \rho_i g_i + \nabla \alpha_i \tau_i + F_i \quad (1.20)$$

Sie enthalten die Parameter für die Geschwindigkeit u , die Dichte ρ , den Druck p und die Schwerkraft g der einzelnen Phase, die durch den Index i zugeordnet wird. Der Phasenanteil α_i wird dabei durch den Quotienten des Volumens der Phase und des Gesamtvolumens gegeben. Dabei gilt für die einzelnen modellierten Phasen:

$$\sum_{j \neq i} \alpha_j = 1 \quad (1.21)$$

Im Euler-Lagrange-Verfahren ergibt sich für die Impulserhaltung durch das Lagrange'sche Koordinatensystem aus Gleichung (1.20) die folgende vereinfachte Bewegungsgleichung für die diskreten homogenen Partikelpakete:

$$\sum F_i = m_m \frac{du_m}{dt} \quad (1.22)$$

wonach m_m die Masse des Partikels mit der Geschwindigkeit u_m ist. Zur Schließung der Gleichungen werden Modellierungen der wirkenden Kräfte auf die Partikel F_i benötigt sowie Turbulenzmodelle für den Reynolds-Spannungstensor τ_i . Die wesentlichen Kräfte, die dabei auf die Partikel wirken, sind zum Teil bereits in Abschnitt 1.2.1.3 genannt worden, wobei noch die virtuelle Massenkraft (Widerstand aufgrund der Fluidverdrängung durch Geschwindigkeitsunterschiede) sowie die turbulente Dissipation zu nennen sind [65].

Zur Turbulenzmodellierung gibt es verschiedene Ansätze. Es wird sich jedoch im Rahmen der Untersuchungen auf das Zwei-Gleichungsmodell (im Speziellen das k - ε -Turbulenzmodell) über den Boussinesq Ansatz beschränkt. Dabei wird eine zusätzliche Gleichung für die turbulente kinetische Energie k sowie eine Gleichung für die Dissipationsrate ε gelöst [66]. Durch die vorliegende Mehrphasenbetrachtung sind in diesen Gleichungen noch zusätzlich Terme berücksichtigt, die je nach Partikelgrößenverhältnis zum Turbulenzwirbel beitragen und diesen ggf. verstärken oder abschwächen. Zu weiteren Einzelheiten der numerischen Grundlagen der Fluidmechanik und der Mehrphasenströmungssimulation sei an diesem Punkt auf die Literatur verwiesen [62], [67].

I.2.3 Stand der Technik

Die magnetische Eigenschaft von Stoffen ist schon seit vielen Jahrtausenden bekannt, wobei die Kenntnis über den Zusammenhang der magnetischen Anziehung von Magnetit und Eisen bereits bis in das Jahr 600 v.Chr. nachgewiesen werden kann [37]. Die Nutzung des Magnetismus in der Verfahrenstechnik erfolgte erste gegen Mitte des 19. Jahrhunderts. Dabei konnte grobes und stark magnetisierbares Eisenerz überwiegend durch den Einsatz entwickelter Elektromagneten abgetrennt werden [33], [68]. Eine starke Zunahme der Entwicklung der Magnetseparation setzte jedoch erst in der Mitte des letzten Jahrhunderts ein, die noch bis heute anhält [44], [45], [69]. Die Nutzung von Permanentmagneten spielte dabei lange eine untergeordnete Rolle, da diese den Elektromagneten deutlich unterlegen waren. Revolutioniert wurde dies erst in den 1970er-siebziger Jahren durch die Entdeckung von seltenen Erden zur Erzeugung von stärkeren Permanentmagneten. Verstärkt wurde dies gegen Ende des letzten Jahrhunderts insbesondere durch die Entwicklung von NdFeB-Magneten, die stromlos Feldstärken von Elektromagneten besitzen [31], [38], [70]. Damit ist die Nachfrage von Permanentmagneten für viele Anwendungszwecke in den letzten Jahren sehr stark gestiegen [71]. Die gleichzeitige Einführung der chinesischen Exportbeschränkungen für seltene Erden seit 2011 führte zum starken Anstieg der Herstellungskosten von NdFeB-Magneten weltweit [72]. Die Gewinnung von seltenen Erden außerhalb von China wird daher verstärkt verfolgt und Untersuchungen zur wirtschaftlichen Gewinnung von seltenen Erden weltweit vorangetrieben [72], wodurch der Einsatz von Permanentmagneten an Attraktivität gewinnt.

Über die Jahrzehnte ist infolgedessen eine Vielzahl von verschiedenen Magnetseparatoren für unterschiedliche Anwendungsbereiche sowohl im Nass- als auch im Trockenbetrieb entwickelt worden [44], [73]–[76]. Sie werden dabei grundsätzlich in Schwach- und in Starkfeldscheider [77] eingeteilt. Die Schwachfeldscheider werden fast ausschließlich durch Permanentmagneten in einem offenen Magnetsystem betrieben (z. B. Förderband). Hierfür sind die Magnetpole auf einer Ebene unter oder über dem zu trennenden Gut angebracht, das daran vorbeigeführt wird. Dafür wird hauptsächlich ein Zylindermantel (Trommelscheider) verwendet. Aber auch Förderbänder kommen zum Einsatz [78]. Durch die schwachen Felder werden sie jedoch zur Trennung von Materialien mit hoher Suszeptibilität angewendet. Eine Steigerung der Trenngüte kann dabei durch abwechselnde Magnetpole erreicht werden [79]. Durch die wechselnde Umpolung wird nicht magnetisches Mischgut aus dem Filterbett gelöst, was technisch immer häufiger Anwendung findet. Mit diesem einfachen Prinzip der Schwachfeldscheider gibt es eine sehr große Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren, die zum Einsatz kommen können, die hier aufgrund der Irrelevanz für die vorliegenden Untersuchungen aber nicht weiter betrachtet werden. Hierzu sei auf [27], [33], [34], [80], [81] verwiesen.

Für die Abscheidung von Stoffen mit geringer Suszeptibilität bzw. von zunehmend kleinerer Partikel (teilweise bis in den Nanobereich) werden Starkfeldscheider verwendet. Diese werden überwiegend im sogenannten geschlossenen Magnetsystem betrieben, wo das zu trennende Gut durch einen Spalt zwischen zwei Polen durchgeführt wird (oft basierend auf Elektromagneten) [27]. Durch die Entwicklung von starken Permanentmagneten, insbesondere der neueren NdFeB-Magneten, werden zunehmend auch offene Magnetsysteme angewendet. Analog zu den Schwachfeldscheidern sind hier überwiegend bestückte Zylinder oder Förderbänder im trockenen Einsatz. Beispiele können in [33], [80], [82] gefunden werden. Die trockene Separation ist allerdings in der Größe der Partikel begrenzt ($> 75 \mu\text{m}$ [33]) und wird durch die energieintensive notwendige Trocknung, die Eindämmung von Staub, die vorgeschaltete Größenklassierung und die begrenzte Schichtung des Gutes benachteiligt [33]. Aus diesem Grund werden hier zunehmend auch nasse Verfahren angewendet [83]. Grundlage hierfür bildet die 1937 eingeführte Anwendung einer magnetisierbaren Matrix, die in einem durchströmten Kanal platziert und von einem von außen angelegten Feld magnetisch induziert wird [84], [85]. Als Matrix dienen hier verschiedene Körper wie z. B. Kugeln, Stäbe, Profilplatten, Stahlwolle, Drahtgewebe u. a. [27]. Dabei wird nicht nur das magnetische Feld verstärkt, sondern durch die geringe Geometrie der einzelnen Elemente in der Matrix ein sehr großer Gradient der Felder erzeugt und somit die magnetische Kraft um mehrere Größenordnungen gesteigert [33]. Diese Magnetabscheider werden daher, anlehnend an den englischen Begriff, Hochgradienten-Magnetseparatoren (HGMS) genannt. Diese Art von Separatoren erlaubt eine Vielzahl von neuen Anwendungen und ermöglicht die magnetische Behandlung von Materialien, die bisher als unmagnetisch galten. Dadurch zählen sie aktuell zu den aktivsten Forschungsgebieten in der magnetischen Separation. Beispiele zu den unterschiedlichen Bauarten und Anwendungsfeldern sind in [86]–[91] zu finden. Zur Erzeugung der Magnetfelder werden industriell fast ausschließlich Elektromagneten genutzt. Dies hat den Vorteil einer Feineinstellung der Magnetfeldstärke und der damit verbundenen magnetischen Kraft. Dadurch ist dieses Verfahren sehr energieintensiv [92], wodurch es zunehmend Untersuchungen zur Entwicklung von Systemen gibt, die auf Permanentmagneten beruhen [93]–[96].

Für die vorliegenden Separationsuntersuchungen sind aufgrund der Handhabung von radioaktiven Stoffen insbesondere die nass betriebenen Magnetabscheider zur Vermeidung von Staub von Interesse. Zur Reduzierung des Strombedarfs sowie die Berücksichtigung des Einflusses der ionischen Strahlung auf elektronische Systeme wird die Anwendung von Permanentmagneten bevorzugt. Ansätze für die magnetische Separation mit Permanentmagneten von Korrosionsrückständen im Primärkreislauf sind dabei in der Kerntechnik bereits vorhanden und vielversprechend [97], [98]. Zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung durch Leckagen ist dabei ein durchströmbares und geschlossenes Filtergehäuse von großer Wichtigkeit. Gleichzeitig ist eine

Dekontamination des Filters im Anschluss zum Rückbau von großer Bedeutung, was einen sehr einschränkenden Faktor bei der Geometrie darstellt. Damit stellen klassische HGMS durch die komplexe Matrix-Geometrie, die zum Teil sehr aufwendige Rückspülsysteme benötigen [99], eine Herausforderung für die Reinigung dar. Auch neuere entwickelte HGMS-Systeme, die auf der Basis von Trommelscheidern basieren [100], enthalten durch rotierende Zylinder ein Potenzial zur Abrasion und zu Leckagen. Für die vorliegende Anwendung wurde daher ein System mit Starkfeldscheider und sehr einfacher Geometrie gesucht, wofür es durchaus simple Lösungen gibt [101], [102]. Eine Gegenüberstellung von unterschiedlichen Lösungsansätzen zeigte, dass für die vorliegende Fest/Fest-Sortierung die Nutzung von permanenten Stabmagneten unter den genannten Aspekten eine gute, simple und anwendbare Lösung darstellt.

Der Stabmagnetfilter verwendet, wie der Name besagt, zylindrische Permanentstäbe zur Abscheidung von para- und ferromagnetischen Stoffen. Die Stäbe bestehen dabei aus mehreren hintereinander angeordneten Permanentmagneten, die jeweils gegenpolig zueinander angeordnet sind. Diese Magnetstäbe werden für unterschiedliche Separatoren eingesetzt. Vorwiegend werden sie in der Trockenanwendung von Granulaten in Form eines sogenannten Magnetstabrosts verwendet. Dieser ist ein runder oder viereckiger Rahmen, der mit unterschiedlich vielen Stabmagneten auf einer Ebene bestückt ist [33]. Zur nassen Anwendung wird er in ein geschlossenes Gehäuse untergebracht, das an Rohrsystemen mittels Flanschen angeschlossen werden kann. Für beide Produktkategorien gibt es auf dem Markt eine Vielzahl von Herstellern, die unterschiedliche Produkte in den zwei Kategorien anbieten. Beispiele können unter [103]–[105] gefunden werden. Sie werden dabei nicht in der klassischen Trenntechnik, sondern überwiegend in der Nahrungs- und Pharmazieindustrie zur Reinheitsabsicherung gegen metallische Unreinheiten in den Endprodukten angewendet. Beispiele sind in Zuckerfabriken, Bäckereien, Käsereien, Schokoladenfabriken etc. zu finden [75], [106]. Die Anwendung eines solchen Stabmagnetfilters in dem vorliegenden Vorhaben der gezielten Trennung von Korngemischen stellt somit eine Sonderanwendung dar. Es gibt zwar in der Literatur teilweise Untersuchungen zur Abscheidung von Partikeln in Kanälen durch die Anwendung von zylindrischen Permanentmagneten [107]–[109], wobei Geometrie und Anwendungsbereich sich von den vorliegenden Untersuchungen maßgeblich unterscheiden. Eine Nutzung eines Stabmagnetfilters zur Fest/Fest-Sortierung von Korngemischen, wie sie in den vorliegenden Untersuchungen vorgesehen ist, existiert derzeit aber nicht.

I.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Grundlagen für die Fest/Fest-Separation von Korngemischen durch einen Stabmagnetfilter zu untersuchen. Obwohl Stabmagnetfilter in der

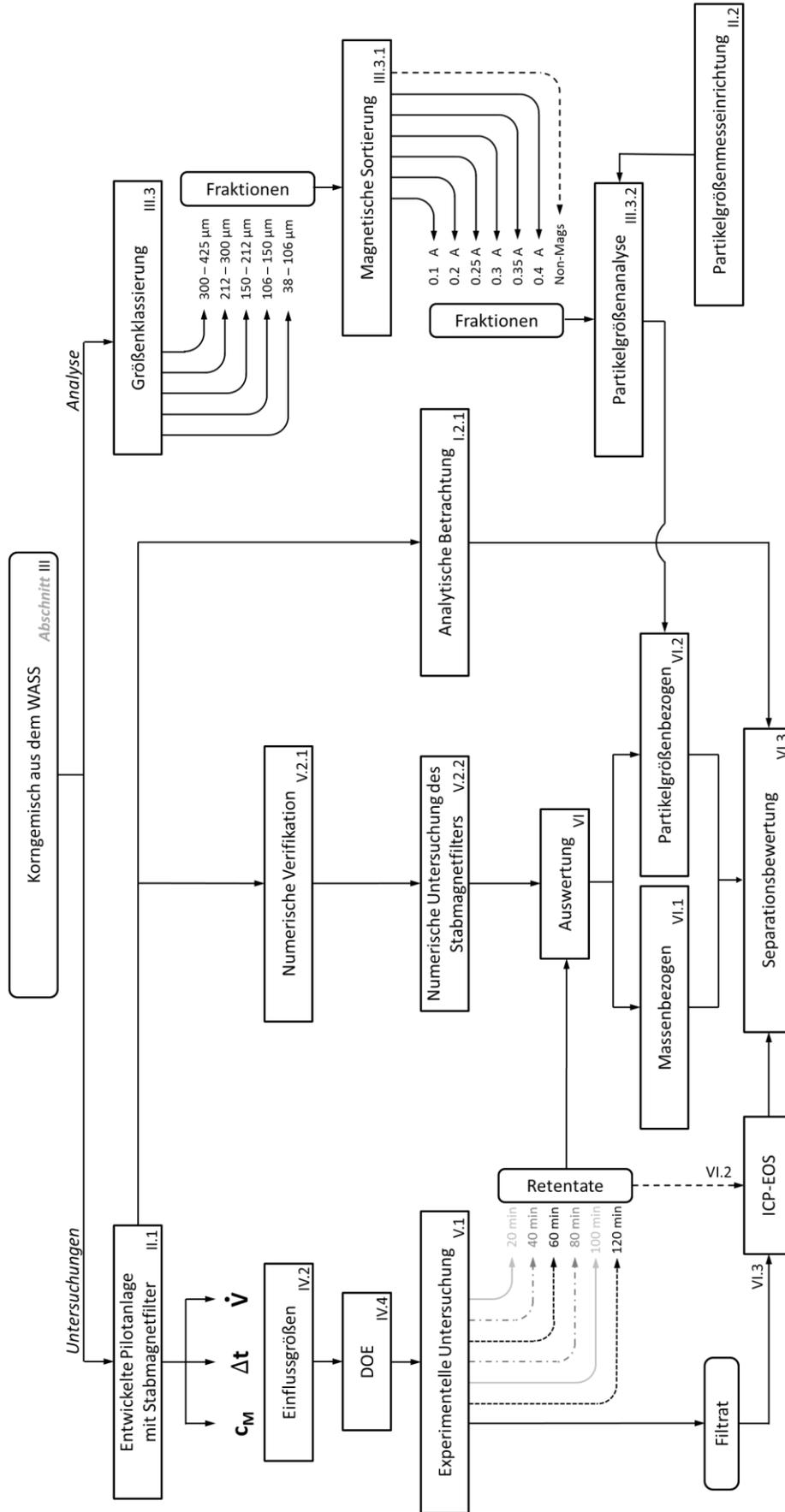


Abbildung I.9: Darstellung der Vorgehensweise und Struktur der Arbeit zur Erreichung der Zielsetzung

Verfahrenstechnik nicht für die Fest/Fest-Sortierung zur Anwendung kommen, stellt diese Art von Filter zur Behandlung der beschriebenen Korngemische aus der WASS-Technik eine effektive Lösung dar (siehe Abschnitt I.1). Dies setzt jedoch eine hohe Effizienz der Separationsgüte voraus, die – durch fehlende Erfahrungswerte – im Zuge dieser Arbeit verfolgt wird.

Die Vorgehensweise und die Struktur der Arbeit ist in der Abbildung I.9 dargestellt. Die Zuordnung der aufgelisteten Schritte zu den entsprechenden Abschnitten in der Arbeit ist jeweils rechts unten durch die Abschnittsnummerierung gegeben.

Das Korngemisch, das detailliert in Kapitel III beschrieben wird, dient den experimentellen Untersuchungen in der neu entwickelten Pilotanlage zur Separation des Korngemisches aus der WASS-Technik. Dabei werden mittels eines Versuchsplans (DOE) die anlagentechnischen Einflussfaktoren auf den Betrieb des Stabmagnetfilters zur Fest/Fest-Sortierung untersucht. Durch die begleitende numerische Strömungssimulation sowie die Charakterisierung der abgeschiedenen Materialien durch Erkenntnisse aus der durchgeführten Korngemischanalyse wird eine genaue Beurteilung des Verfahrens erlaubt sowie die Separationseffizienz des Stabmagnetfilters bewertet und gesteigert.

Mit dieser Vorgehensweise wird eine umfängliche Charakterisierung der Separationseigenschaften des Stabmagnetfilters angestrebt, ein grundlegendes Verständnis der Mechanismen erarbeitet und somit ein wichtiger Beitrag zur effizienten Nutzung des Stabmagnetfilters zur Fest/Fest-Sortierung – auch im nicht kerntechnischen Bereich – geleistet

II Versuchsaufbauten

Im Folgenden werden die Versuchsaufbauten der entwickelten Separationsanlage sowie der Partikelgrößenmessenrichtung und dessen Funktionsweise vorgestellt. Dabei wird auf die wichtigsten Komponenten eingegangen, die im Zuge dieser Arbeit zur experimentellen Untersuchung benötigt werden.

II.1 Separationsanlage

Im Zuge der Forschungsarbeiten ist eine Versuchsanlage entstanden, die im Folgenden vorgestellt wird. Hierzu wurde von der Problematik des Sekundärabfalls ausgegangen, wobei ein Lösungsansatz zur Abfallbehandlung durch ein Separationsverfahren entstand. Dafür waren einige Erprobungen und Vorversuche zur Definition der verwendeten Technik nötig. Grundlage für diese Arbeit sind daher die Untersuchungen zur Separation, die im Zuge eines BMBF-geförderten Projektes vorläufig zu dieser Arbeit durchgeführt wurden. Einzelheiten zu diesen Untersuchungen können dem Abschlussbericht entnommen werden [21].

II.1.1 Randbedingungen für die Separationsanlage

Der Aufwand zur Durchführung von Separationsversuchen mit radioaktivem Sekundärabfall aus der WASS-Technik würde für die verfolgte Zielsetzung, die Entwicklung einer Separationsanlage, nicht vertretbar sein. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine realitätsnahe Mischung für das weitere Vorgehen erzeugt, die in den folgenden Untersuchungen auch verwendet wird. Hierfür wurden gezielt Stähle ausgesucht, die das RDB und insbesondere

dessen Einbauten in aktuellen Anlagen realitätsnah widerspiegeln [110]. Mit diesen entsprechenden Stahlsorten wurde mit der gleichen eingesetzten WASS-Technik in einem Mock-Up (ein Modell in der Skala 1:1) unter Wasser Schnitte an Stahlstücken in einer nicht-kontaminierten Umgebung durchgeführt. Dabei entstanden realitätsnahe Korngemische aus Abrasiv und Stahlspänen [21], die als Grundlage für die folgenden Separationsuntersuchungen genutzt werden.

Um die Separation der Stahlspänenfraktion von der Abrasivfraktion zu realisieren, sind verschiedene Techniken im Laufe des Forschungsvorhabens betrachtet worden. Wichtig waren in diesem Zusammenhang folgende Merkmale, die beim Bau des Prototyps umgesetzt wurden [21]:

- Beschränkte Baugröße, max. 6 x 2.5 x 2.5 m³
- Dekontaminierbarkeit der Anlage
- Zuverlässige und wartungsarme Technik
- Vermeidung von neuem Abfall (sog. Terziärabfall)
- Mobilität und Transportfähigkeit
- Modularer und einfacher Aufbau
- Kostengünstige Anschaffung und Betrieb

Für den Einsatz der Technik zur Behandlung von radioaktivem Abfall ist zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppung und zur Einhaltung des Strahlenschutzes ein Betrieb nur innerhalb eines Kontrollbereichs möglich. Durch die beschränkten Platzverhältnisse ist eine beschränkte Nutzung dieser Ressource notwendig. Mit der Zielsetzung, die Abfallmenge zu reduzieren, sind wichtige Kriterien zur Vermeidung von weiteren Abfällen im Rahmen der Abfallbehandlung einzuhalten. Außerdem ist eine anschließende Dekontamination der Anlage zur Freigabe und Weiterverwendung nötig. Diese Rahmenbedingungen führten zu einer erheblichen Einschränkung der in Frage kommenden Techniken, die für die Fest/Fest-Sortierung zur Verfügung stehen. Eine detaillierte Erläuterung der verschiedenen untersuchten Separationsmethoden zur Behandlung der Korngemische ist im Abschlussbericht des BMBF-geförderten Vorhabens zu finden [21]. Am vielversprechendsten sind darunter die Grobklassierung der Korngemische mittels der Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Fraktionen (wobei eine signifikante Überlappung im Zwischengut entsteht) und die Feinsortierung mittels Magnetabscheider durch die Anwendung eines Stabmagnetfilters. Die entwickelte Pilotseparationsanlage dient dabei der experimentellen Untersuchung der Separation des Korngemisches. Aufgrund der grundlegenden experimentellen Arbeiten ist diese nicht für die direkte Anwendung mit kontaminierten Gemischen ausgelegt. Dadurch erlaubt sie die problemlose Entnahme von Kornfraktionen und Überstandswasser zur anschließenden Bewertung der Ergebnisse. Aus den hier gewonnenen Erkenntnissen ist eine weitere Anlage zur Separation von radioaktiven Gemischen innerhalb eines Kontrollbereichs in Planung. Dies ist Bestandteil eines neuen Forschungsvorhabens, das voraussichtlich in 2019 abgeschlossen sein wird [22].

II.1.2 Verfahrenstechnische Kette der Separationsanlage

Die Separationsanlage besteht prinzipiell aus einem Suspensionsmischer, einer Förderpumpe und dem Stabmagnetfilter. Der Aufbau der Separationsanlage ist der folgenden Abbildung II.1 zu entnehmen. Im Suspensionsmischer **(1)** wird gezielt die zugeteilte Menge **(7)** an Abrasiv aus einem Reservoir **(4)** und die benötigte Menge an Frischwasser **(5)** über eine Füllstandsmessung zugeführt. Über einen Schaltschrank kann der Motor des Rührers **(3)** drehzahlgesteuert werden, wodurch eine homogene Suspension mit einem Rührer **(2)** erzeugt wird. Die Suspension wird über eine stufenlos einstellbare Pumpe **(8)** über 2/3-Wege-Ventile **(9)** mittels Zwangskonvektion durch den Stabmagnetfilter **(10)** gepumpt. Der dabei geförderte Volumenstrom wird durch ein Volumenstrommessgerät **(11)** überwacht. Die separierte Suspension (Filtrat) wird, in einem geschlossenen Kreislauf, wieder in den Suspensionsmischer zurückgefördert. Dieser Kreislauf ist in der folgenden Abbildung II.1 auf der linken Hälfte zu sehen und wird im Folgenden als Filterkreislauf bezeichnet.

Dieser Kreislauf wird für eine bestimmte Zeit betrieben, was im Verlauf der Arbeit als Filterzeit bezeichnet wird. Nach dem Erreichen einer Sättigung an separiertem Material im Filter wird der Filterkreislauf unterbrochen und über den By-Pass **(12)** durch 2/3-Wege-Ventile umgeleitet. Daraufhin kommt ein zweiter Kreislauf zur Spülung des Filters zum Einsatz, der auf der rechten Hälfte von Abbildung II.1 zu sehen ist. Hierfür werden zunächst die Stabmagneten aus dem Filter gezogen, was das Entfernen der wirkenden Magnetkräfte auf die separierte Fraktion im Filter zur Folge hat. Durch die Betätigung einer zweiten Pumpe und der 2/3-Wege-Ventile vor und nach dem Filter wird Frischwasser durch den Filter gespült. Die separierte Fraktion wird somit aus dem Filter in einen Sedimentationsbehälter **(13)** gefördert. Durch das Absetzen der Partikel im Sedimentationsbehälter wird das Konzentrat über ein Ventil in einen Filtertrichter ausgespült, womit eine signifikante Entwässerung erzielt wird. Durch die Anwendung von Filterpapier wird im Trichter **(14)** dem Konzentrat das restliche Überstandwasser mittels einer Saugflasche **(15)** entzogen, in der durch eine Pumpe Vakuum erzeugt wird **(16)**. Die separierte Fraktion wird daraufhin im Ofen letztendlich getrocknet, gewogen und nachträglich untersucht.

Nach der Reinigung des Filters kann der Filterkreislauf wieder, durch die Umstellung der parallel geschalteten 2/3-Wege-Ventile vor und nach dem Filter, in Betrieb genommen werden. Die Filtration wird dabei in bestimmten Intervallen zur Spülung während einer Versuchsreihe unterbrochen. Die Anzahl und die Dauer der Filterungszyklen kann dabei variiert werden. Das Überstandwasser im Sedimentationsbehälter kann dabei für die Filterreinigung innerhalb einer Versuchsreihe wiederverwendet werden. Ist die vorgesehene Filterzeit erreicht, kann das Filtrat im Suspensionsmischer durch das höhen- und positionsverstellbare Ansaugrohr aus dem Mischer abgepumpt werden **(17)**. Das Filtrat verlässt das System durch einen Auslass **(18)** und wird an-

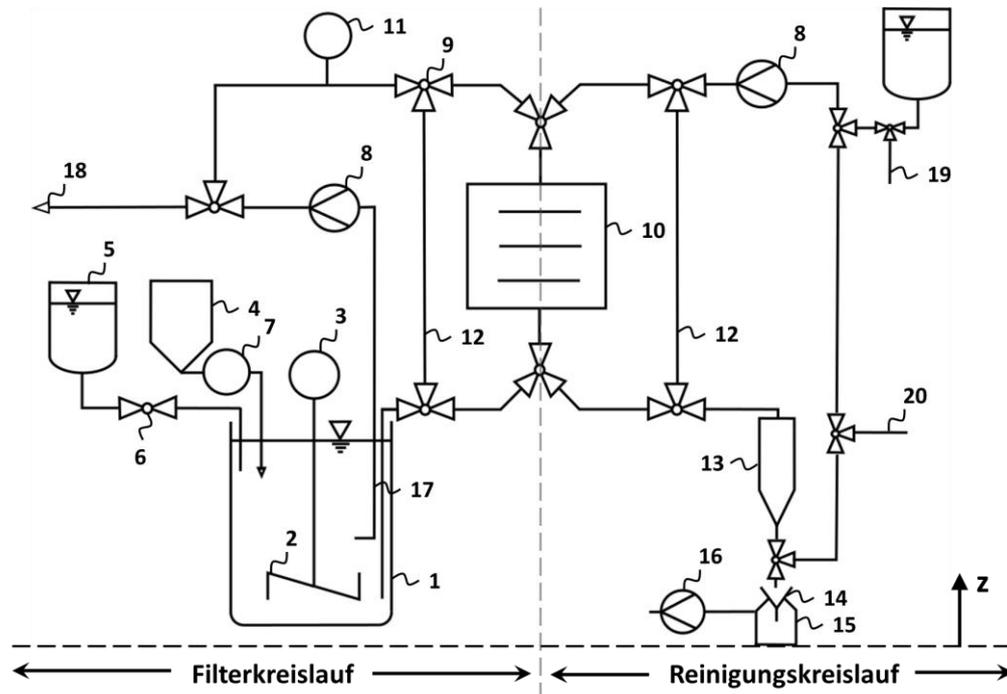


Abbildung II.1: Verfahrenstechnische Kette der Separationsanlage

schließlich, analog zur gefilterten Fraktion, weitestgehend entwässert, im Ofen getrocknet, gewogen und nachträglich untersucht. Das verbleibende Überstandswasser im Sedimentationsbehälter und aus dem Mischer kann aufgrund der hohen Sedimentationsgeschwindigkeiten der Kornfraktionen nach einer gewissen Zeit entsorgt werden. Eine komplette Entleerung des Reinigungskreislaufs ist dabei durch einen Anschluss zur Umgebungsluft (**19**) und den Auslass aus dem System (**20**) möglich. Die in Abbildung II.1 gezeigte verfahrenstechnische Kette ist dabei in Anlehnung an die DIN 28004 [111] erstellt worden. Die technische Umsetzung der Separationsanlage ist in der Abbildung II.2 zu sehen.

Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden näher beschrieben.

Suspensionsmischer

Der Suspensionsmischer wurde in Eigenregie durch die Werkstatt des Instituts gefertigt [112]. Er wurde auf der Grundlage der DIN 28131 [113] und DIN 28011 [114] ausgelegt. Sein Fassungsvermögen beträgt bis zu 200 l, das großzügig gehalten wurde, um eine gewisse Variation der Parameter zuzulassen. Um dabei das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser nach der DIN einhalten zu können, ist ein sehr langer Rührstab von 1400 mm angebracht worden. Dieser wird am Behälterboden durch ein abgedichtetes Kugellager gehalten, um einen Rundlauf gewährleisten zu können. Zur Mischung der Suspension dienen zwei Rührer, die auf unterschiedlichen Höhen angebracht wurden. Dabei handelt es sich um mehrstufige Rührer, deren Rührerblätter gegeneinander verdreht sind. Diese spezielle Form führt dazu, dass im inneren Bereich des Rührbehäl-



Abbildung II.2: Separationsprototyp zur magnetischen Sortierung der WASS-Korngemische

ters sich eine nach oben gerichtete Strömung einstellt, wobei an der Behälterwand durch das entgegengesetzte Blatt (vgl. Abbildung II.3 rechts) eine nach unten gerichtete Strömung erzielt wird. Damit werden sedimentierte Partikel am Boden des Behälters wieder in Suspension gebracht, was die Homogenität der Suspension fördert [115]. Um dabei eine Trombenbildung im Zentrum des Mixers [116] und die Rotation des Mischgutes zu verhindern, wurden vier Strombrecher an den Wänden des Mixers angebracht. Diese sind, bei Bedarf, durch ein Schienensystem entfernbar bzw. austauschbar. Zur Befestigung und gleichzeitiger Mobilität des Mixers wurde mit Boschprofilen ein Gestell auf Panzerrollen entworfen. Dieses dient dabei auch als Aufhängung des Motors und jeglichen anderen Komponenten, die zur Separationsanlage benötigt werden. Die Konstruktion wird in der folgenden Abbildung II.3 auf der linken Seite als „Computer Aided Design“ (CAD) Zeichnung dargestellt.

Als Antrieb dient ein Elektromotor, der über einen Schaltkasten gesteuert wird. Über die Stromstärke ist er stufenlos einstellbar und für den sicheren Betrieb mit einer Notabschaltung ausgestattet. Zusätzlich ist die komplette Anlage über FI-Schaltungen gesichert. Die Einstellung der Drehzahl des Suspensionsmischers erfolgte durch Probenentnahme. Dabei wurde die Homogenität der Mischung anhand der Volumenanteile der Probe mit der ursprünglichen in den Mischer



Abbildung II.3: Suspensionsmischer als CAD-Zeichnung (links) und im Einsatz (rechts)

gebrachten Feststoffkonzentration verglichen. Die geeignete Drehzahl ist dabei auf 100 Umdrehungen pro Minute eingestellt worden, die im Zuge der Arbeit konstant gehalten wird.

Pumpen und Durchflussmessgerät

Zur Förderung der hoch abrasiven Suspension werden Membranpumpen verwendet (siehe Anhang H). Sie werden pneumatisch betrieben und sind stufenlos über eine Drossel regelbar. Sie besitzen für die Förderung zwei durch Membranen geteilte Druckkammern. Die Membrane trennt dabei die zur Förderung verwendete Luft von der Fluidseite. Die Förderung des Fluids findet durch die Beaufschlagung der Luftseite mit Druckluft statt. Durch Aufblasen der Membrane wird aufgrund von Rückschlagventilen das Fluid auf der gegenüberliegenden Seite verdrängt.

Beide Kammern sind dabei symmetrisch angeordnet, wobei beide Membranen mittels eines Pleus miteinander verbunden sind. Die Bewegung der aufgeblasenen Membrane wird somit über den Pleu auf die zweite Membrane übertragen. Dies erzeugt auf der Fluidseite der gegenüberliegenden Kammer einen Unterdruck, wodurch das Fluid in die Kammer gezogen wird. Die Druckluft wird hierfür über einen simplen mechanischen Mechanismus im Inneren der Pumpe über die Pleubewegung abwechselnd in die Luftkammern geführt und bei Entspannung an die Umgebung abgeführt. Das Fördervolumen ist daher von der Baugröße sowie vom Luftdruck und dem Volumenstrom der Luft abhängig.

Durch die Förderung des Fluids mittels der Membrane ist der Verschleiß dieser Pumpenart bei der Anwendung mit Suspensionen aus abrasiven Partikeln sehr gering [117]. Die Förderung der ca. 30 000 l, die im Rahmen dieser Untersuchung nötig waren, stellte für die Pumpe kein Problem dar. Ein weiterer Vorteil der Pumpenart ist die Fähigkeit der Unterdruckerzeugung. Die Pumpen

wurden zwar an der Separationsanlage unterhalb des Wasserspiegels angebracht, dies ist aber für den Betrieb nicht notwendig. Es besteht keine Leerlaufgefahr, was auch eine Inbetriebnahme der Anlage im unbefüllten Zustand problemlos ermöglicht. Die Pumpen sind aus diesem Grund auch zur Unterdruckerzeugung der Saugflasche für die Filterung der Fraktionen problemlos angewendet worden.

Zu beachten ist dabei jedoch der fluktuierende Volumenstrom, der durch die abwechselnde Kammerbeaufschlagung erzeugt wird. Dies ist auf die Funktionsweise der Pumpe, die unterschiedliche Dichte, der Kompressibilität der beiden Medien sowie auf die unterschiedlichen Druckverluste der beiden Seiten zurückzuführen. Dieser schwankende Volumenstrom ist demzufolge auch bei der Bewertung der Separationsergebnisse zu berücksichtigen.

Zur Messung des geförderten Volumenstroms wurde ein induktiver Durchflussmesser eingesetzt (siehe Anhang G). Er besteht aus zwei Spulen, die in einem gewissen Abstand um ein Rohr angebracht sind. Durch den induzierten Strom des passierenden Mediums wird über den Abstand der Spulen der Volumenstrom ermittelt. Damit besitzt das Messgerät keine Sensorik unmittelbar in der Strömung, wodurch keine Gefahr einer Abrasion der Messeinrichtung besteht. Durch die Anbringung von Rohren vor und nach dem Gerät wird auch einem Einfluss von jeglichen Krümmungen der verwendeten Panzerschläuche entgegengewirkt. Gleichzeitig ist die Messstrecke mit einem leichten Neigungswinkel eingebaut worden, womit Rückstände innerhalb des Messbereichs vermieden werden. Das Gerät ist dabei von Herstellerseite kalibriert worden, wonach eine Standardgenauigkeit von 0.3 % angegeben wird. Eine Überprüfung der Messwerte erfolgte durch das Pumpen einer größeren vordefinierten Menge an Wasser. Damit konnte eine Förderleistung der Membranpumpe, die mit ca. 6 bar beaufschlagt wurde auf max. 20 l/min gemessen werden. Die Schwankungen aufgrund der fluktuierenden Förderung wurden damit auf ca. $\pm 2\%$ im Bereich über 10 l/min ermittelt, die jedoch mit abnehmender Volumenstromforderung stark anstiegen.

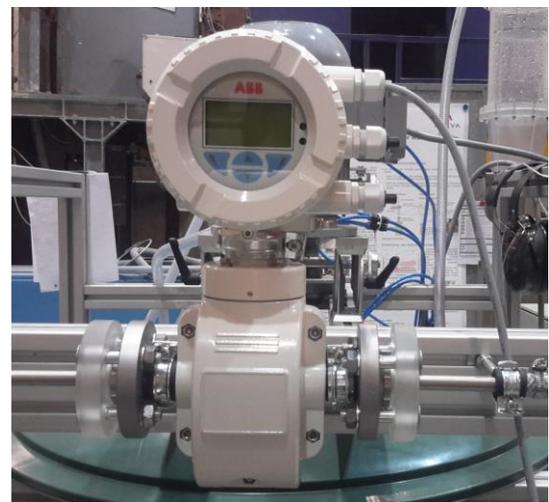
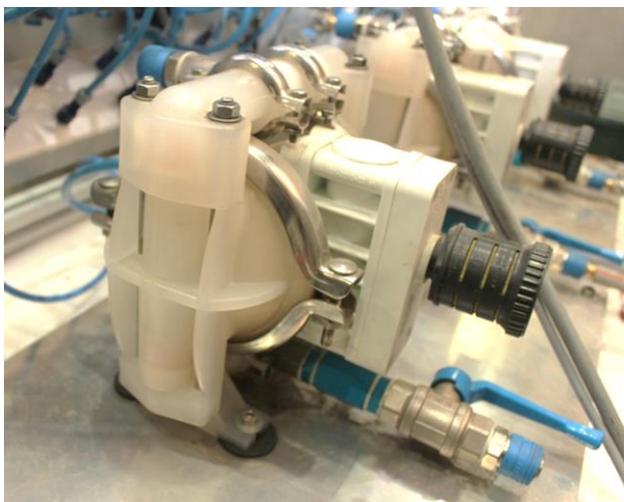


Abbildung II.4: Membranpumpen und Volumenstrommessgerät der Separationsanlage

Bei z. B. 4 l/min betrug diese bereits knapp 20 %, was in den experimentellen Untersuchungen berücksichtigt werden muss (siehe Abschnitt V.1). In Abbildung II.4 sind die verwendeten Membranpumpen sowie das Durchflussmessgerät abgelichtet.

Weitere Komponenten

Zwischen den Komponenten wurden zur variablen Gestaltung der Anlage im Bau Schläuche mit Gewebeeinlage verwendet. Die Steuerung der Anlage erfolgt, abgesehen von der Drehzahlregulierung des Rührermotors, ausschließlich durch pneumatische Schaltungen. Dafür sind jegliche Ventile mit einer pneumatischen Schaltapparatur ausgestattet worden. Damit lässt sich die Anlage vom Steuerpult aus bedienen (siehe Abbildung II.2).

Die Entwässerung der gefilterten Fraktion erfolgte durch einen Sedimentationsbehälter. Dieser wurde eigens dazu aus Plexiglas gebaut. Durch die hohe Sinkgeschwindigkeit der Partikel ist nach kurzer Zeit eine signifikante Entwässerung möglich. Die gefilterte Fraktion wurde anschließend durch eine Saugflasche mittels Filterpapier entwässert und im Ofen getrocknet. Somit ist es möglich, die magnetisch abgeschiedene Fraktion (Retentat) weiteren Untersuchungen zu unterziehen.

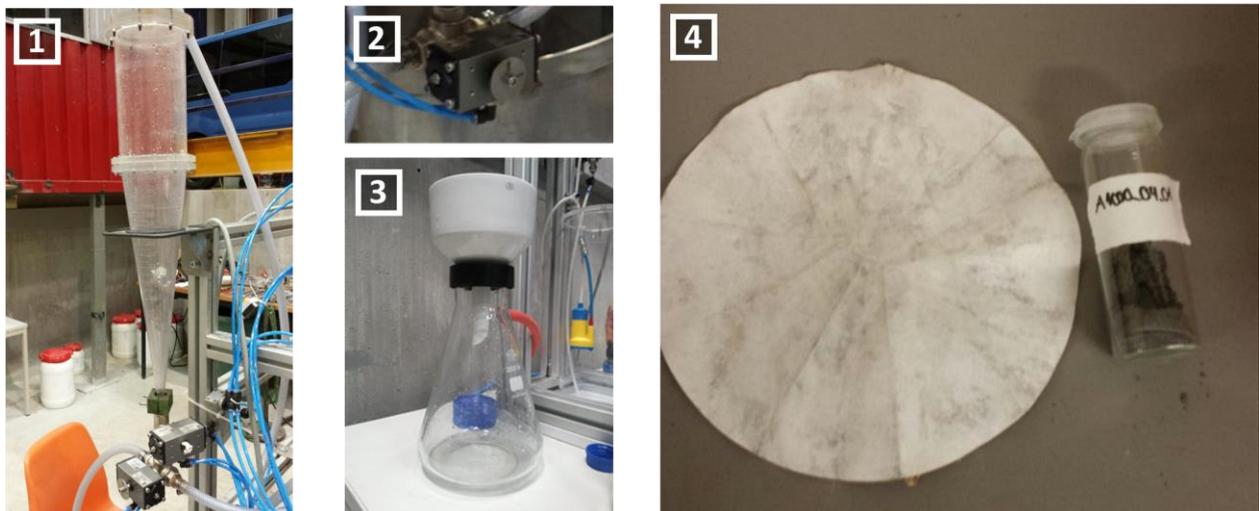


Abbildung II.5: Sedimentationsbehälter (1), pneumatisch gesteuertes 2/3-Wege-Ventil (2), Saugflasche mit Filtertrichter (3) und gewonnene magnetische Filterfraktion (4)

II.1.3 Der Stabmagnetfilter

Der Magnetfilter, der in diesen Untersuchungen zur Anwendung kommt, ist ein sogenannter Stabmagnetfilter (siehe Anhang I). Wie bereits kurz erläutert, beruht der Name auf der Anwendung von permanenten Magnetstäben in zylindrischer Form. Die Stäbe (1) sind dabei von einer Edelstahlhülle umgeben. Somit wird das NdFeB vor Korrosion und mechanischen Schäden geschützt. In der vorliegenden Anwendung werden die Stabmagneten genutzt, um aus der Suspension aus

Abrasiv und Stahlspänen anhand der unterschiedlichen Suszeptibilität eine Nasssortierung der Stahlspäne zu erzielen. In dem hier angewendeten Produkt sind die Magnetstäbe in einem Gussgehäuse untergebracht, das in der folgenden Abbildung II.6 zu sehen ist.

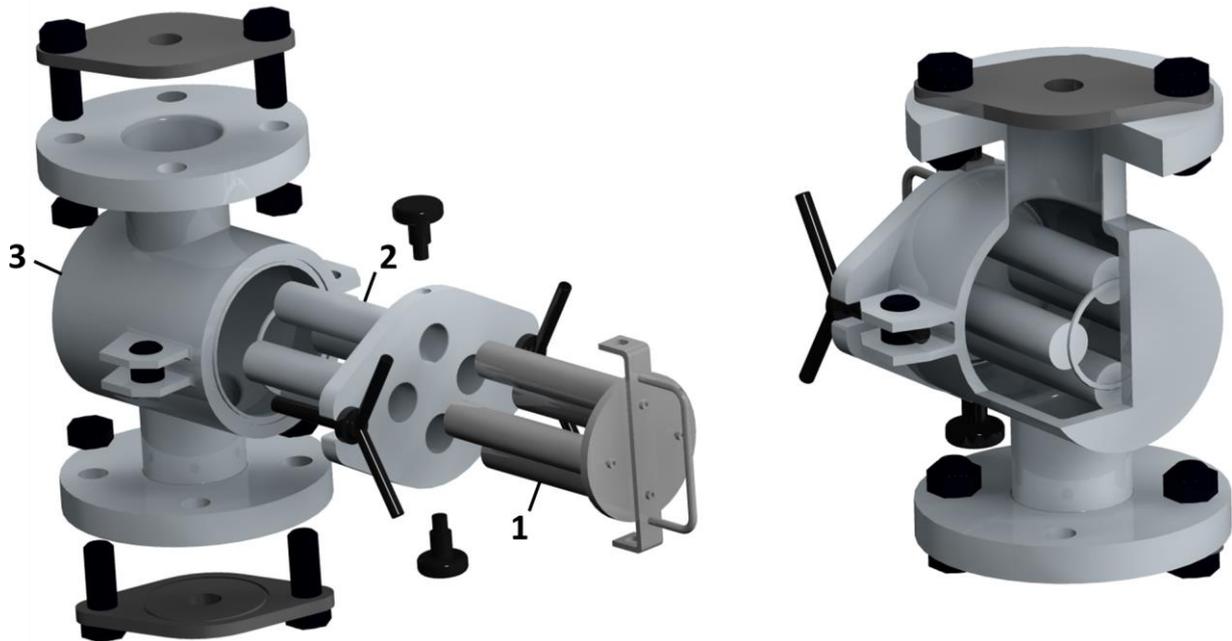


Abbildung II.6: Stabmagnetfilter [118]

Das Gussgehäuse (3) ist so konzipiert, dass die Stabmagnete orthogonal zu der Strömung angeordnet sind. Dafür besitzt das Gehäuse in der gezeigten Perspektive oben und unten einen Flansch, wodurch der Filter leicht in einem Rohrsystem integriert werden kann. Zur Einbindung des Filters in das Separationssystem sind hier eigens angefertigte Gegenstücke über Schrauben angebracht worden, woran mittig die im Versuchstand verwendeten Schläuche fixiert werden. Die Stabmagnete selbst sind dabei nicht direkt der Suspension ausgesetzt. Um abgeschiedene Partikel wieder von den Stäben entfernen zu können, werden diese in Hüllrohre (2) von außen in den Filterraum eingeführt. An der Vorderseite (links in Abbildung II.6) ist hierfür eine Öffnung angebracht, in der die jeweiligen Hüllrohre für die Stabmagnete an einem Deckel durch Verschweißungen angebracht sind. Der Deckel wird mit den Schraubenschlüssen rechts und links an das Gehäuse angepresst und durch einen Gummiring abgedichtet. So entsteht ein wasserdichter Innenraum. Die Stabmagnete werden durch eine weitere Konstruktion in die vorgesehenen Hüllrohre eingeführt. Sie können dabei unten und oben jeweils durch kleine Schrauben fixiert werden. In der hier erworbenen Version lässt sich das Einführen und Herausziehen der Magnetstäbe händisch mittels eines Griffes bewältigen. Zur Reinigung ist daher üblicherweise die Anpressschraubung zu lösen und die Stabmagnete inklusive Deckel mit den Hüllrohren zu entnehmen. Das Ergebnis einer magnetischen Separation des Abrasivs und Stahlspänen-Korngemisches aus Vorversuchen [119] wird in der folgenden Abbildung II.7 gezeigt.



Abbildung II.7: Separationsergebnis des WASS-Gemisches mittels Stabmagnetfilter vor (links) und nach (rechts) dem Entfernen der Magnetstäbe

Auf der linken Seite in Abbildung II.7 sind die abgeschiedenen Stahlspäne an den Stabmagneten zu sehen. Diese können nach Entfernen der Stabmagnete aus den Hüllrohren durch Trocknung, rechts in Abbildung II.7, entfernt werden. Mit dieser Vorgehensweise ist jedoch ein sehr großer Aufwand verbunden, weshalb die Separationsanlage in Abbildung II.1 mit einem Spülkreislauf ergänzt worden ist. Eine weitere Vereinfachung der Handhabung stellt die Manipulation der Permanentmagnetstäbe mittels pneumatischer Zylinder dar [120]. Diese Modifikation ist in Abbildung II.8 zu sehen. Hierbei handelt es sich um eine einfache Lösung, die ohne großen Aufwand am erworbenen Modell umgesetzt werden konnte. Auf dem Markt sind zwar zum Teil auch vollautomatisierte Systeme kommerziell erwerblich, jedoch sind die daraus mehr als das Fünffache betragenden resultierenden Kosten hier nicht gerechtfertigt. Gleichzeitig erfüllen viele der vollautomatischen Systeme nicht die Anforderungen eines geschlossenen Systems. Mit der Bestückung des Filters mit pneumatischen Zylindern ist eine gewisse Fernhandhabung des Filters erreicht worden, die für die spätere vorgesehene Anwendung von großer Bedeutung ist. Die parallel angesteuerten Zylinder werden dabei, wie die restlichen Ventile, vom Pult an der Vorderseite der Anlage gesteuert. Dabei ist die Distanz des Pults zur Anlage in der radioaktiven Behandlung durchaus auch größer zu gestalten.

Das Muster des abgeschiedenen Materials am Stabmagnetfilter in Abbildung II.7 ist dabei auf die konstruktive Zusammensetzung der einzelnen Permanentmagnetstäbe zurückzuführen. Der Magnetstab ist ein Konstrukt aus mehreren hintereinander angereihten zylindrischen Permanentmagneten. Dies erlaubt eine gezielte Anreicherung der Magnete innerhalb des Stabes. Wie in Abschnitt I.2.1.2 beschrieben, sind die Permanentmagnete im Rahmen der Hysterese magnetisiert

worden. Dadurch besitzen sie ein gerichtetes Magnetfeld, das an den Polen die maximale Stärke aufweist (gegeben durch die Polstärke $\pm\Phi$).



Abbildung II.8: Modifizierter Stabmagnetfilter zur fernhantierten Manipulation der Permanentmagnetstäbe als CAD-Zeichnung rechts [120] und Umsetzung links

Die gezielte Orientierung der verketteten Magnetstäbe wirkt sich auf die resultierende Magnetfelder aus (siehe Abbildung II.9). Entgegengepolte Pole gleichen sich dabei an den Berührungstellen aus. Damit wirkt die Kette wie ein einzelner langer Magnetstab. Exakt in der Mitte der Kette ist folglich durch den Ausgleich der Polstärken der Gradient der Feldstärke gleich null. Die größten Gradienten der Feldstärke sind somit achsensymmetrisch an den Polen der Kette vorzufinden, wie der obere Teil von Abbildung II.9 schematisch veranschaulicht.

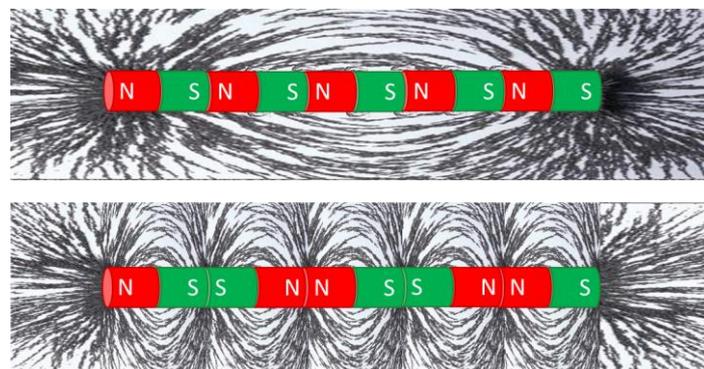


Abbildung II.9: Magnetfelder von Magnetketten

Werden die einzelnen Magnete, wie im unteren Teil der Abbildung II.9 zu sehen ist, entgegengepolt angeordnet, bewirkt die Polung zunächst eine gegenseitige Abstoßung und führt zu einem magnetischen Moment, das auf das einzelne Glied wirkt. Werden die Magnete jedoch mechanisch an dieser Position und gegen eine Verdrehung fixiert, so führt dies aufgrund der Koerzitivität der Magnete zu einer wechselnden Polung innerhalb der Kette. Die Magnetfelder richten sich entsprechend der Pole aus, was unten in Abbildung II.9 veranschaulicht wird. Durch die verkürzte Strecke zwischen den Polen innerhalb des Stabes wird durch die gleichbleibende Feldstärke eine

Erhöhung des Gradienten erreicht. Gleichzeitig führt das Aufeinandertreffen zwei gleichgepolter Pole zur Addition der Polstärken Φ und somit der Feldstärke, was den Effekt entsprechend verstärkt. Beide Effekte tragen dabei zur wesentlichen Steigerung der resultierenden Magnetkraft bei (vgl. Gleichung (I.10)). Diese Anordnung führt somit auch zur Musterung der Ablagerungen in Abbildung II.7. Damit kann gezeigt werden, dass die jeweiligen Magnetstäbe aus vier Permanentmagneten bestehen.

Nach Herstellerangaben besitzt der Magnetfilter bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine Magnetqualität von $13\ 200\text{ Gauss}$, was einer Remanenz von 1.32 T entspricht. Durch die Edelstahlhülle, die die Magneten fixiert und schützt, das Hüllrohr, das die direkte Haftung von Partikeln am Stab verhindert, sowie durch den nötigen dazwischenliegenden Schlupf von 0.5 mm reduziert sich dieser Wert maßgeblich. An den Hüllrohren werden daher noch 0.8 T angegeben. Um dies experimentell verifizieren zu können und folglich eine vollkommene Beschreibung des Stabmagnets erlauben zu können, wurde ein kleiner Versuchsaufbau durchgeführt, der in der folgenden Abbildung II.10 zu sehen ist.

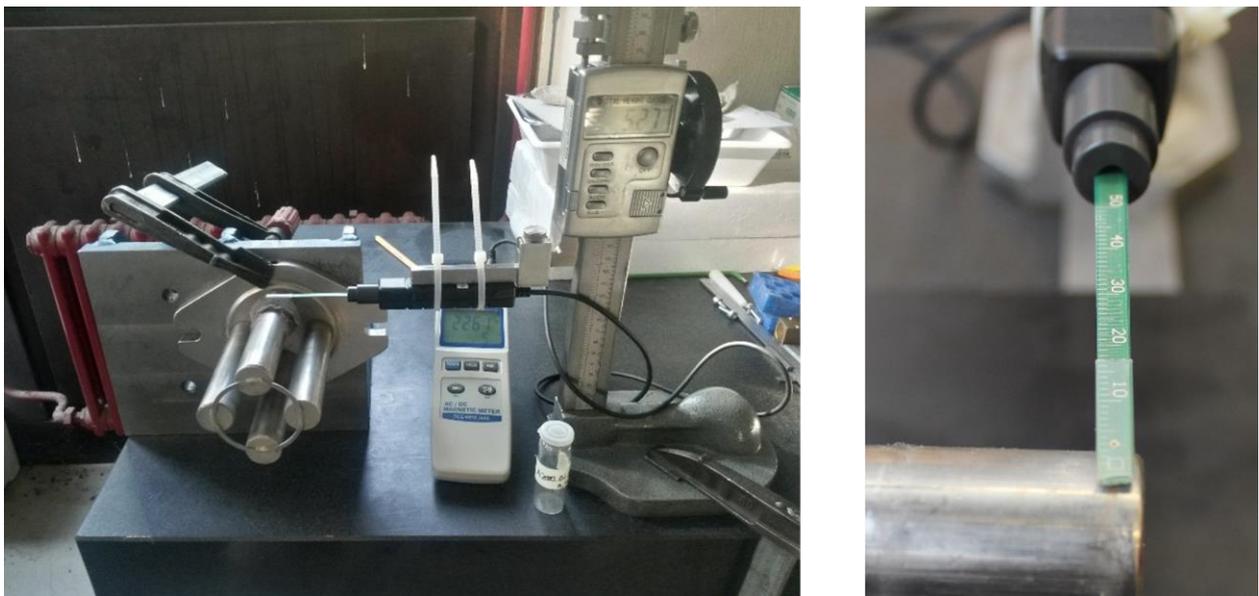


Abbildung II.10: Versuchsaufbau zur Magnetflussdichtenmessung des Magnetstabes

Mithilfe eines digitalen Gaussmeters, der im Zentrum des linken Bildes in Weiß zu sehen ist, wurde eine Ausmessung des Stabmagnets durchgeführt. Der Messkopf des Gaussmeters ist an der Spitze des nadelförmig endenden schwarzen Griffs angebracht, der im rechten Bild von Abbildung II.10 zu sehen ist. Seine Größe beträgt ca. $2 \times 2\text{ mm}^2$. Dieser wurde zur Messung an einem Stativ fixiert, womit der Abstand zum Hüllrohr bis auf zwei Zehntelmillimeter gemessen werden konnte. Der Magnetstab inklusive dem Hüllrohr wurden an einer Vorrichtung fixiert, die parallel zum Tisch und somit dem Hüllrohr entlang in axialer Richtung verschoben werden konnte. Mithilfe dieses Aufbaus wurde die Magnetflussdichte des Permanentstabes zweidimensional über

die Länge des Stabes und über den Abstand orthogonal dazu gemessen. Die erhaltenen Ergebnisse sind der folgenden Abbildung II.11 zu entnehmen.

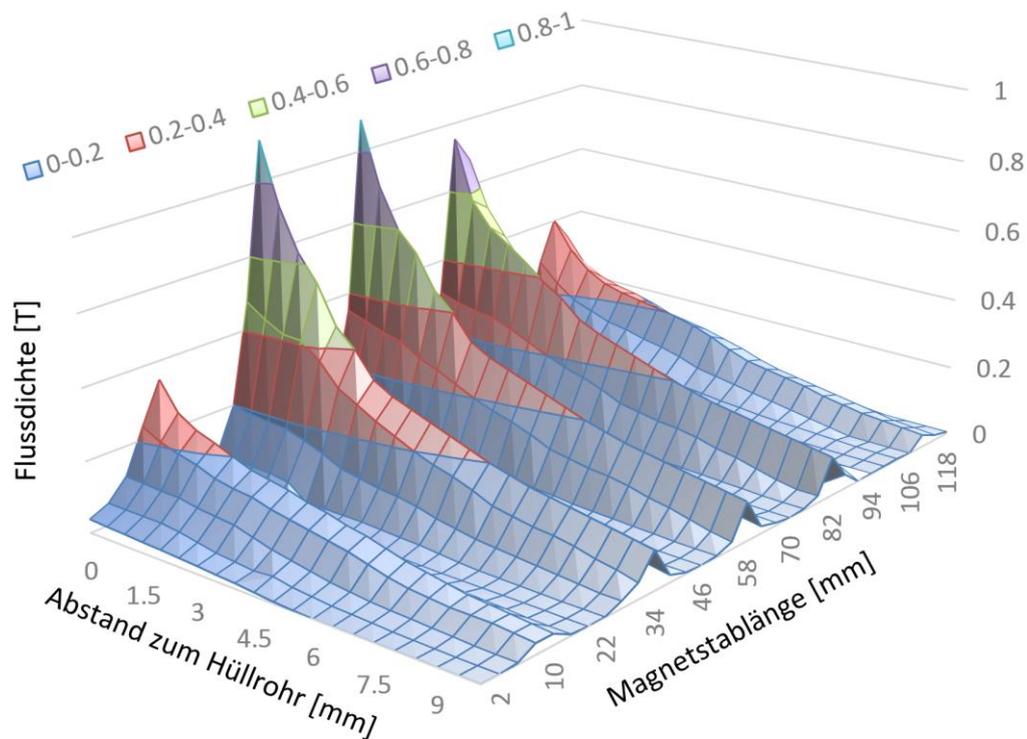


Abbildung II.11: Magnetflussdichtenmessung des Magnetstabes

Das Diagramm in Abbildung II.11 zeigt die Verteilung der magnetischen Flussdichte axial und orthogonal zum Magnetstab. Dabei ist die Skala der jeweiligen Abstände zu beachten. Die Abszisse zeigt den Abstand zum Hüllrohr im Bereich von 0 bis 10 mm, die Ordinate gibt die Magnetstablänge von 0 bis 120 mm an. Die Skalierung ist dabei zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse gewählt worden. Es kann somit gezeigt werden, dass die Herstellerangaben mit einem Maximum von 0.9 T, eingehalten werden. Durch den hier angewandten Aufbau ist allerdings noch zu berücksichtigen, dass das Hüllrohr direkt auf dem an der Vorrichtung fixierten Magnetstab aufliegt. Zwischen den Spitzenwerten ist die Anordnung der einzelnen Permanentmagnete zu entnehmen. Die alternierende Polung ist dabei durch eine Anzeige am Gerät zu entnehmen. Die Beträge der Magnetflussdichte B im Diagramm erlauben somit eine Visualisierung der Höhe der Gradienten um die jeweiligen Pole. Die Beträge zeigen auch die Superposition der Polstärken an den Stellen, wo sich zwei Magnete gegenüberstehen. Ihr Wert steigt an diesen Stellen auf mehr als das Doppelte im Vergleich zu den beiden Randpolen. Dabei muss aufgrund der Größe des Messensors von $2 \times 2 \text{ mm}^2$ beachtet werden, dass geringe Abweichungen im Mikrometerbereich, insbesondere an den Polen, einen signifikanten Einfluss auf den Messwert haben. Wegen der Durchführung der Messung in äquidistanten Abständen von 4 mm konnte der maximale Betrag des vierten Pols (ca. bei 85 mm) beispielsweise nicht erfasst werden. Es liegen lediglich

zwei Werte vor und nach dem Pol vor, was in den folgenden Diagrammen in Abbildung II.12 verdeutlicht wird.

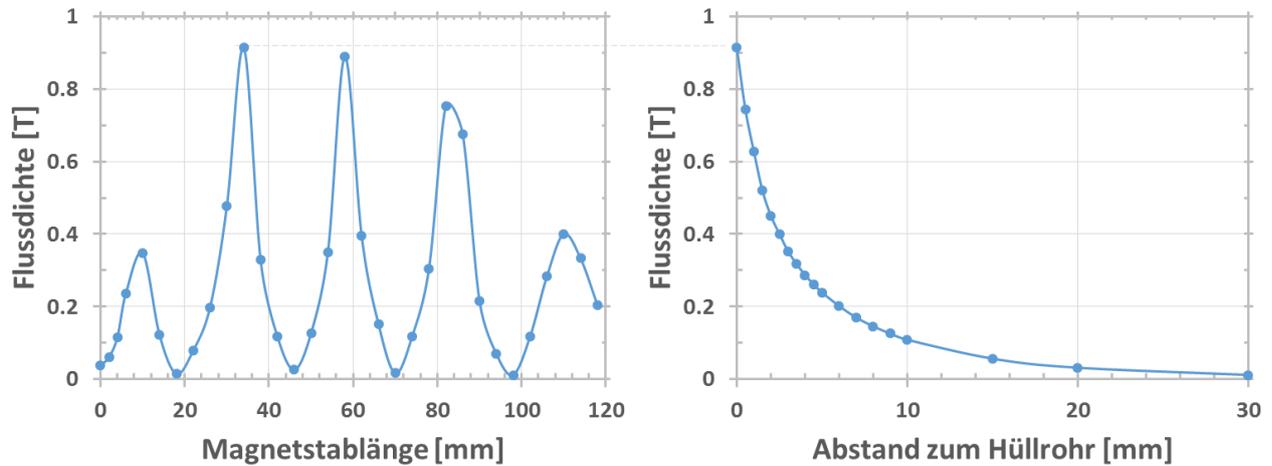


Abbildung II.12: Magnetflussdichtenmessung entlang und orthogonal zum Magnetstab

Im Diagramm links von Abbildung II.12 ist die Verteilung der Magnetflussdichte B über die Magnetstablänge entlang der Oberfläche zu sehen (vgl. Abbildung II.11). Dies verdeutlicht die äquidistante Messung, wodurch der vierte Pol nur links und rechts des Maximalwerts erfasst wurde. Auch die Messung am ersten Pol (bei ca. 9 mm) ist leicht hinter dem Pol erfolgt. Die Messwerte des zweiten (ca. 34 mm) und dritten (ca. 58 mm) Pols sind offensichtlich sehr gut getroffen worden. Dies lässt auch auf die Länge der zylindrischen Permanentmagnetsegmente von ca. 24 mm schließen.

Durch die im Diagramm erkennbare Verteilung der Magnetflussdichte wird die Verwendung von vier Magneten gleicher Länge deutlich. Im Falle des ersten Magneten (ca. von 10 bis 34 mm) ist an der Stelle 10 mm ein Wert von ca. 0,35 T und an der Stelle 34 mm ein Wert von 0,91 T zu entnehmen. Entsprechend diesen Werten stellt sich ein Ausgleich der zwei Polstärken ($B = 0$) bei ca. 18 mm mit 0,01 T ein. Bezogen auf die Länge des Magneten liegt dies bei ca. 1/3 der Länge zwischen den beiden Polen. Beim zweiten Magnet (ca. von 34 bis 58 mm) erfolgt der Ausgleich aufgrund der etwa gleichgroßen Polstärken dagegen entsprechend mittig.

Im linken Diagramm der Abbildung II.12 ist repräsentativ der Betrag der Flussdichte über den Abstand orthogonal zum Hüllrohr des zweiten Pols (bei ca. 34 mm der Stablänge) aufgetragen. Die Skalierung ist hier zur besseren Veranschaulichung im Vergleich zum linken Diagramm auf 30 mm begrenzt worden. Dabei sind die Haupt- und Hilfsgitterlinien mit dem gleichen Betrag belassen worden. Es ist eindeutig der exponentielle Abfall des Feldes mit steigendem Abstand zum Magneten (Feldquelle) erkenntlich, der auch durch Gleichung (I.7) beschrieben wird. Der Gradient der Feldstärke ist daher nahe dem Magnet sehr hoch und nimmt exponentiell zum Abstand

ab. Damit wird auch die exponentielle Beschleunigung von sich gegenseitig magnetisch anziehenden Objekten erklärt. Dies hat jedoch zur Folge, dass bereits bei einem Abstand von 2 mm vom Hüllrohr (vgl. rechts in Abbildung II.12) 50 % der an der Oberfläche gemessenen Kraft verbleibt. Bei 5 mm sind es lediglich noch ca. 25 %, bei 10 mm ca. 10 % und bei 30 mm mit ca. 1 % ist diese kaum noch messbar. Aus diesem Grund sind auch sehr hohe Ansprüche an die Fertigung des Magnetfilters gestellt worden, wobei Edelstahlhülle, Hüllrohre und der dazwischenliegende Schlupf so gering wie möglich gehalten wurden. Alleine der Spielraum von 1 mm zwischen Stab und Hüllrohr führt, je nach Lage des Magnetstabes im Rohr, zu einer Schwankung des Werts an der Hüllrohroberfläche am Beispiel des zweiten Pols (siehe links in Abbildung II.12) zwischen 0.63 und 0.91 T. Damit führt die Position des Stabes im Hüllrohr zu einer Minderung der Magnetflussdichte von ca. 70 %, was in der Bewertung der Ergebnisse in Betracht gezogen werden muss.

II.2 Partikelgrößenmesseinrichtung

Das aus der WASS-Technik entstandene Korngemisch besteht, wie in Abschnitt I.1.2.1 beschrieben, aus zwei Fraktionen: aus Abrasivpartikeln und Stahlspänen. Der Schnitt erfolgt durch die Abrasion des Stahls durch die kinetische Energie der Abrasivpartikel. Dabei werden unterschiedlich große Stahlpartikel aus der Schnittfuge herausgetrennt. Gleichzeitig werden durch die Wucht des Aufpralls Teile der Abrasivkörner abgesplittert, wodurch unterschiedlich große Bruchteile entstehen. Das resultierende Korngemisch besteht daher aus einer Vielzahl an unterschiedlich großen Stahl- und Abrasivpartikeln, wie in Abbildung I.3 repräsentativ zu sehen ist. Die Partikelgrößenverteilungen spielen deshalb für die vorliegenden Untersuchungen eine große Rolle. Aus diesem Grund wurde eine Partikelgrößenmesseinrichtung aufgebaut, die im Folgenden näher vorgestellt wird.

II.2.1 Verfahrenstechnische Kette der Partikelmesseinrichtung

Grundsätzlich war der Einbau eines Partikelmessensors direkt in die Separationsanlage vorgesehen. Aufgrund der hohen Konzentration der in Betracht kommenden Korngemische in der Separationsanlage war dies jedoch nicht möglich. Um daher Abhilfe zu schaffen, ist hierfür ein separater Versuchsaufbau durchgeführt worden, der in der Abbildung II.13 gezeigt wird.

Die Erzeugung der Suspension erfolgt in diesem Aufbau analog zu dem Aufbau in der Separationsanlage mithilfe eines Suspensionsmischers (1). Aufgrund der geringeren Geometrie kommt hier ein einfacher Propellerrührer (3) [121] zur Anwendung. Als Antrieb dient ein kleiner Elektromotor (2), der stufenlos über eine Spannungsregelung steuerbar ist. Um eine ordnungsgemäße

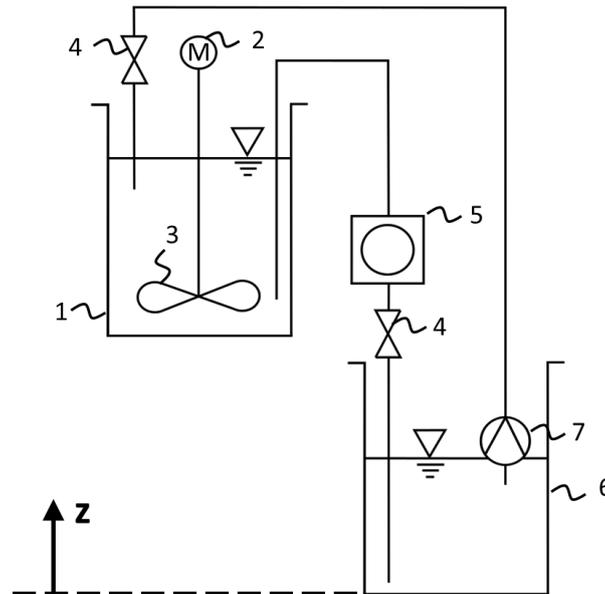


Abbildung II.13: Verfahrenstechnische Kette der Partikelmesseinrichtung

Funktionsfähigkeit des angewendeten Messensors erzielen zu können, wird eine kontinuierliche und gleichmäßige Strömung im Messkanal vorausgesetzt. Für die Förderung der hochabrasiven Suspension unter diesen Bedingungen stellt die Wahl einer geeigneten Pumpe eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund wird hier auf die potenzielle Energie aufgrund des hydrostatischen Höhenunterschieds zurückgegriffen. Der Suspensionsmischer wird in diesem Zuge an einem aus Boschprofilen gebauten Gerüst auf eine Höhe von ca. 80 cm (Wasserspiegel) angebracht, wie der Abbildung II.14 zu entnehmen ist. Zur Messung der Partikelanzahl sowie der Partikelgröße dient ein Extinktionszähler (5), der im Folgenden noch näher erläutert wird. Dieser ist zwischen dem Suspensionsmischer und einem Auffangbehälter (6) platziert, und jeweils mit einem Schlauch mit diesen verbunden. Durch die Erzeugung eines leichten Unterdrucks am Schlauchende kann mit diesem Aufbau eine kontinuierliche Strömung von etwa 150 ml/min erzeugt werden [26].

Beim Betrieb der Anlage ist unbedingt eine Trombenbildung im Suspensionsmischer zu vermeiden. Diese führt am Rührer nämlich zur Erzeugung von Luftblasen, die vom Messsensor ebenfalls als Partikel wahrgenommen werden und somit die Messung verfälschen. Um diesem entgegenzuwirken, wurde seitlich im Gefäß ein Stromstörer angebracht, der gleichzeitig als Führung für den Entnahmeschlauch dient. Damit wird zeitgleich eine Kollision des Schlauches mit dem Rührer vermieden. Zur Suspendierung, insbesondere der Abrasivpartikel, ist eine hohe Leistung des Rührers notwendig [122]. Hierfür ist ein gleichbleibender Wasserstand im Suspensionsmischer notwendig. Um das Leerlaufen des Suspensionsmischers während der Messung zu verhindern, wurde daher im Auffangbehälter eine Tauchpumpe angebracht, die durch geeignete Einstellung über eine stufenlose Stromregelung den Wasserpegel im Suspensionsmischer konstant hält.

Zur Reinhaltung des Aufbaus und insbesondere des Sensors wird das System mit destilliertem Wasser betrieben. Damit wird auch der Einfluss von Partikeln im Leitungswasser reduziert [26]. Die Anwendung von 2/2-Wege-Ventile (4) unterhalb des Sensors und im Rücklaufschlauch erlaubt, das System durchgehend geflutet zu halten, womit ein Neustart durch alleiniges Öffnen der Ventile (bei laufender Pumpe) ermöglicht wird. Gleichzeitig wird somit, gemäß Herstellerangaben, eine Trocknung des Sensors vermieden. Der Aufbau des bisherigen beschriebenen Systems kann im linken Teil von Abbildung II.14 betrachtet werden.



Abbildung II.14: Aufbau der Partikelmesseinrichtung

Die Steuerung des Rührermotors sowie der Pumpe ist auf der rechten Seite von Abbildung II.14 zu sehen. Zur Auswertung der Messsignale des Extinktionszählers dienen ein Analog-Digital-Wandler sowie eine Analysesoftware, die die Ergebnisse der Messungen mittels eines PC erlaubt. Im Folgenden wird die Funktionsweise des Extinktionszählers erläutert.

II.2.2 Der Extinktionszähler

Das Prinzip des hier angewendeten Messverfahrens beruht auf der Abschattung einer Lichtquelle durch ein vorbeiströmendes Partikel. Dies wird von einem Sensor durch das sogenannte Lichtblockadeprinzip [123] wahrgenommen. Wie in der folgenden Abbildung II.15 zu sehen ist, wird dabei jedes einzelne Partikel durch den Sensor registriert, was eine direkte Messung der Anzahl an Partikeln ermöglicht [124]. Das Messverfahren ist dabei in weiten Bereichen unabhängig von den Streueigenschaften der Partikel.

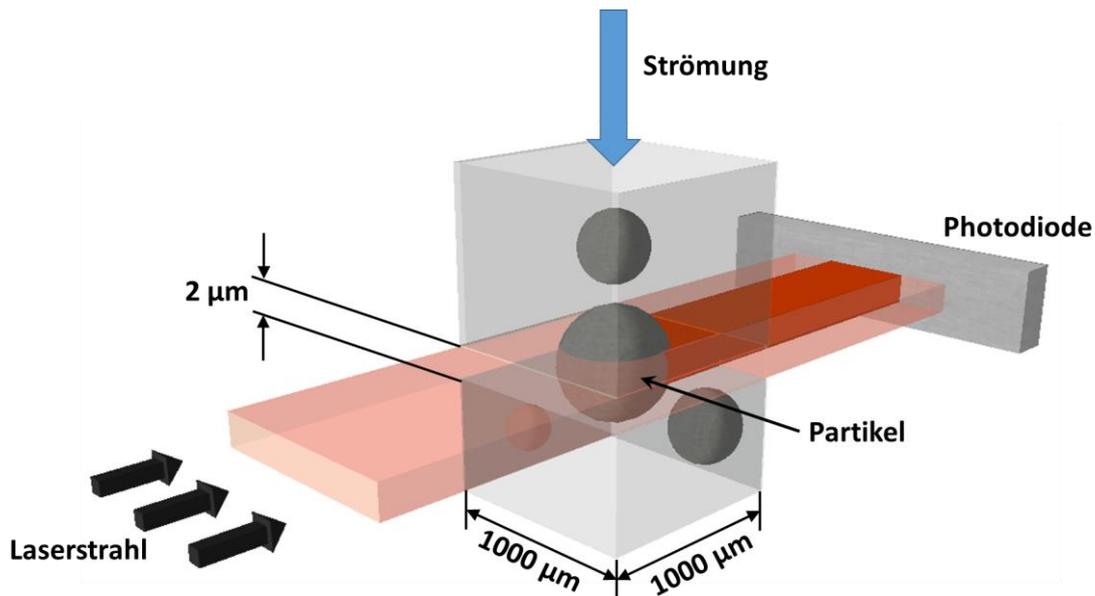


Abbildung II.15: Funktionsprinzip des Extinktionszählers

Das Produkt, das hier zur Anwendung kommt, besitzt hierfür eine $2 \times 1000 \times 1000 \mu\text{m}^3$ große Messzelle, die mit einer Halbleiterlaserdiode mit einer Wellenlänge von 230 nm durchleuchtet wird. Der Sensor ist, wie in Abbildung II.14 mittig zwischen den Behältern in Schwarz zu sehen, sehr kompakt, vibrationsunempfindlich und strahlt ein homogenes und paralleles Licht aus. Wird die Messzelle von einem Partikel durchströmt, wird das Licht, in Abhängigkeit der Größe und Form des Partikels, durch dieses absorbiert. Durch die Abschattung der Photodiode erzeugt dies eine Schwächung des anliegenden Spannungssignals, das proportional zu der abgedeckten Projektionsfläche ist. Das Spannungssignal wird von der Software analysiert und bewertet, wodurch jedes einzelne Partikel gezählt und vermessen wird. Die Abschattungsfläche wird dabei in einen Äquivalentdurchmesser eines flächengleichen Kreises umgewandelt, was als Ergebnis der jeweiligen Partikelgröße ausgegeben wird. Da die Partikel länger als die $2 \mu\text{m}$ hohe Messzelle sind, ist eine kontinuierliche und gleichmäßige Strömung unabdingbar. Des Weiteren muss das Trägermedium transparent sein und es dürfen sich nicht mehrere Partikel gleichzeitig in der Messzelle befinden. Dies würde zu einem sogenannten Koinzidenzfehler [124] führen, der jedoch durch die Auswertesoftware erkannt wird. Eine zu hohe Häufigkeit an Koinzidenzfehlern durch zu hohe Konzentration an Partikeln in Lösung führt zu einer Fehlmessung. Aus diesem Grund ist der direkte Einbau der Messtechnik in die Separationsanlage durch hohe Partikelkonzentration nicht ohne entsprechende Verdünnungsmaßnahmen möglich.

Der Sensor ist von Herstellerseite mit monodispersen Latexpartikeln kalibriert worden und kann Partikel im Größenbereich von 5 bis $500 \mu\text{m}$ messen. Hierbei wird die größte Standardabweichung von $8 \mu\text{m}$ bei einer Partikelgröße von $500 \mu\text{m}$ angegeben. Zur Bewertung des Sensors

wurde eine Partikelgrößenverteilung des frischen Abrasivs mit den Ergebnissen aus einer Lasergranulometrie sowie einer Siebanalyse verglichen [26]. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Messverfahren sowie einer möglichen Streuung der Partikelgrößenverteilung des stark inhomogenen Abrasivs sind mit dem Extinktionszähler gute Übereinstimmungen erzielt worden. Bemerkenswert ist dabei die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, die mit dem Extinktionszähler erreicht wird. Bei der dreimaligen Messungswiederholung einer Probe lag die Standardabweichung bei weniger als 1 % [26], [122].

Zur Erläuterung der somit erzielten Ergebnisse wird exemplarisch in Kapitel III im zweiten Teil von Abschnitt III.1 das Vorgehen der Messung anhand der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung des frischen Abrasivs vorgestellt.

III Charakterisierung des Korngemisches

In diesem Kapitel wird ausführlich auf das Abrasiv, die Stahlsorte sowie auf das in der WASS-Anlage entstehende Korngemisch eingegangen. Die detaillierte Charakterisierung der Ausgangsstoffe, des erzeugten Gemisches sowie dessen Fraktionen stellen die Basis für die experimentellen Untersuchungen des Stabmagnetfilters in dieser Arbeit dar. Durch eine umfangreiche Analyse des Korngemisches durch eine Größenklassierung und anschließender Magnetseparation mit einem Frantz-Scheider wird mittels der Partikelgrößenmesseinrichtung auf die eindeutigen Unterschiede der Partikelgrößenverteilung der beinhaltenen Fraktionen eingegangen. Diese Unterschiede stellen die Grundlage für die leichte und effektive qualitative Einschätzung der erzielten Retentate in der partikelgrößenbezogenen Bewertung der Versuchsdurchführungen dar (siehe Abschnitt VI.2).

III.1 Abrasiv

Das Abrasiv, das weltweit am häufigsten in WASS-Anlagen zum Einsatz kommt [125], ist in der Abbildung III.1 zu sehen. Dieses Abrasiv wird daher auch in der kerntechnischen Anwendung der WASS-Technik in Deutschland vom Hersteller eingesetzt. Dabei wird eine Suspension durch Beimischung von 10 *Massen-%* an Abrasiv bei einem Druck von ca. 2000 *bar* in der Anlage erzeugt [126]. Der geförderte Wasservolumenstrom beträgt 9.7 *l/min* was zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 3.3 *m/s* im 8 *mm* Hochdruckschlauch führt. Der Düsendurchmesser beträgt lediglich 0.6 *mm*, womit sich eine Strömungsgeschwindigkeit am Austritt von ca. 590 *m/s* einstellt. Damit wird eine hydraulische Leistung von 32 *kW* am Düsenaustritt erzeugt.



Abbildung III.1: Abrasivpartikel, die zum Schnitt in der WASS-Technik verwendet werden

Beim Abrasiv handelt sich um das *Barton HPX80*, das aus metamorphen Gestein im Nordosten der USA (Bundesstaat New York) in den Gore-Mountains gebrochen und gesiebt wird. Die Bezeichnung *HPX80* steht dabei für die US-Standardsiebgröße 80, was einer Siebmaschenweite von $177\ \mu\text{m}$ entspricht [127]. Die resultierende Partikelgrößenverteilung des Produkts liegt dadurch zwischen 125 und $355\ \mu\text{m}$, wobei die mittlere Partikelgröße d_{50} bei ca. $250\ \mu\text{m}$ angegeben wird [125]. Aufgrund der natürlichen Zusammensetzung schwanken die Materialeigenschaften des Abrasivs je nach Lot und Herkunft. Nach Angaben des Herstellers besteht das Abrasiv zu 94 bis 99 *Massen-%* aus den Granaten Almandin und Pyrop [128], die eine Dichte von $4.3\ \text{kg}/\text{dm}^3$ bzw. $3.5\ \text{kg}/\text{dm}^3$ [129] besitzen. Des Weiteren enthält das Produkt Spuren von u. a. Feldspat ($\rho \approx 2.6\ \text{kg}/\text{dm}^3$), Magnetit ($\rho \approx 5.1\ \text{kg}/\text{dm}^3$) und Calcium-Amphibolen (auch bekannt unter Hornblende, $\rho \approx 3.1\ \text{kg}/\text{dm}^3$), die sich in dem Produkt auf ca. 0.4 bis 6 *Massen-%* belaufen [128], [129]. Aufgrund der Tatsache, dass einige dieser Mineralien chemisch gebundenes Eisen aufweisen, besitzen bestimmte Anteile der Abrasivmischung eine magnetische Eigenschaft, was insbesondere auf das beinhaltete Magnetit zutrifft [130]. Die resultierende mittlere Dichte der Abrasivmischung beträgt $3.9 - 4.1\ \text{kg}/\text{dm}^3$, wobei es eine sehr hohe Härte von $7.5 - 8.5$ *Mohshärte* besitzt [128], [131]. Weitere relevante Eigenschaften sind die Nichtlöslichkeit in Wasser, die nicht brennbare Mischung sowie die scherbenartige und scharfkantige Form der gebrochenen Partikel (siehe Abbildung III.1).

Partikelgrößenverteilung

Mit der in Abschnitt II.1 beschriebenen Partikelmesseinrichtung wurde daraufhin das Abrasiv auf seine Korngrößenverteilung untersucht. Wie erläutert, misst der Extinktionszähler jedes einzelne vorbeiströmende Partikel. Dabei wird die Anzahl und ein jeweiligen Äquivalentdurchmesser bezogen auf die Abschattungsfläche wiedergegeben. Für die Abrasivpartikel wird dadurch folgendes Ergebnis, wie in Abbildung III.2 dargestellt, erzielt.

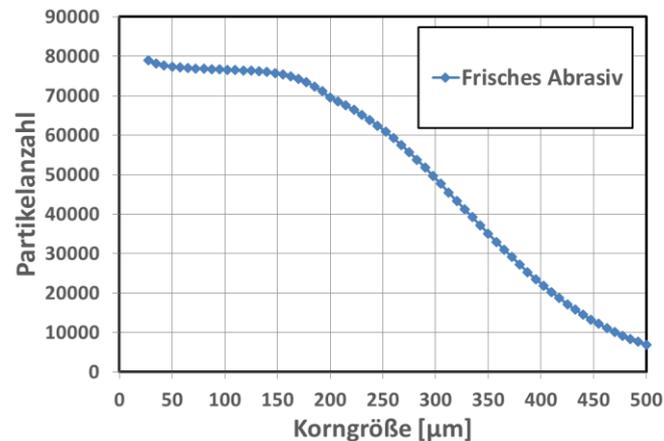


Abbildung III.2: Gemessene Partikelanzahl in den verschiedenen Korngrößen des Abrasivs

Diese Daten werden verarbeitet, indem die Anzahl der Partikel über die gemessene Korngröße in eine volumetrische Größe umgerechnet und über das Gesamtvolumen normiert wird. Dies führt zu der Dichteverteilungskurve ($q_2(x)$), die links in Abbildung III.3 zu sehen ist. Die Abszisse gibt den volumetrischen Anteil an Partikeln in einer spezifischen Korngröße in $Volumen\text{-}\%/µm$ wieder. In der Literatur werden diese Werte oft aufsummiert [132], was zur Summenverteilungskurve ($Q_2(x)$) rechts in Abbildung III.3 führt. Die Werte in der Kurve stellen dabei den Partikelanteil dar, der kleiner als eine bestimmte aufgetragene Korngröße auf der Ordinate ist. Hiermit kann auch die mittlere Partikelgröße d_{50} durch das 50 %-Quantil bestimmt werden.

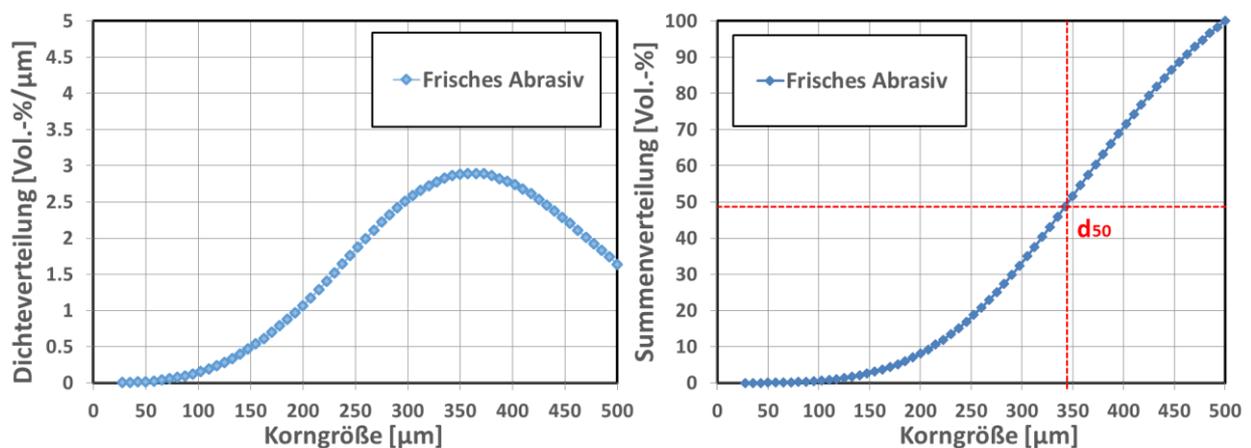


Abbildung III.3: Dichteverteilungskurve (links) sowie Summenverteilungskurve (rechts) des Abrasivs

Das Diagramm links von Abbildung III.3 zeigt, dass die Siebung des Herstellers eine Korngrößenverteilung um ca. $360 µm$ ergibt, was auf die genutzte Siebmaschengröße zurückzuführen ist. Dadurch, dass die Verteilung bei $500 µm$ noch nicht den Wert von null erreicht, lässt annehmen, dass es durchaus Partikel in der Mischung gibt, die größer als $500 µm$ sind. Dies kann auch bei genauerer Betrachtung von Abbildung III.1 erkannt werden. Durch die Auswertung rechts in Abbildung III.3 kann die mittlere Korngröße des Abrasivs mittels Extinktionszähler auf $d_{50} \cong 345 µm$

bestimmt werden. Dieser Wert liegt deutlich über den Angaben, die vom Hersteller gemacht wurden. Diese Diskrepanz ist auf die unterschiedliche Art der Messverfahren zurückzuführen, da die Angaben des Herstellers mittels einer Siebanalyse bestimmt worden sind (siehe Abschnitt III.3). Die längliche Form der Abrasivpartikel führt nämlich dazu, dass sie trotz ihrer Größe, die über der Maschenweite liegt, längs das Sieb passieren können. Dies führt bei der Auswertung der Siebanalyse dazu, dass diese Partikel zu der nächstkleineren Fraktion gezählt werden. Damit ergibt sich eine Verschiebung der Korngrößenverteilung im Diagramm nach links, was auch zu einem kleineren d_{50} führt.

Die mittlere Partikelgröße d_{50} wird auch im späteren Verlauf der Untersuchung eine wichtige Rolle spielen. Dafür ist eine Bestimmung der mittleren Partikelgröße notwendig, die mithilfe der Bestimmung des 50 %-Quantils ermittelt werden kann. In der Partikelgrößenanalyse wird dabei selten exakt das 50 %-Quantil durch die festgelegte Messgröße getroffen. Es liegen daher immer Korngrößen oberhalb des 50 %-Quantils mit der Größe d_j und Korngrößen unterhalb des 50 %-Quantils mit der Größe d_{j+1} vor. Dies wird in der folgenden Abbildung III.4 veranschaulicht.

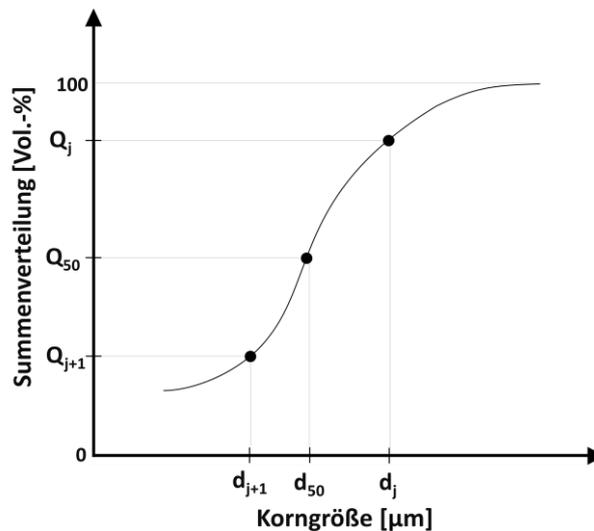


Abbildung III.4: Ermittlung des 50 %-Quantils aus der Partikelgrößenverteilung

Die mittlere Partikelgröße d_{50} kann somit wie folgt ermittelt werden:

$$d_{50} = 10^z \tag{III.1}$$

wobei z für den folgenden Zusammenhang steht:

$$z = \log d_{j+1} + (\log d_j - \log d_{j+1}) \cdot \frac{50 - Q_{j+1}}{Q_j - Q_{j+1}} \tag{III.2}$$

Dies erlaubt die genaue Bestimmung der mittleren Partikelgröße d_{50} . Im Falle des Abrasivs wird aus dem Verlauf im Diagramm rechts in Abbildung III.3 hiermit $d_{50} = 345.57 \mu m$ ermittelt.

III.2 Stahlsorte

Der Reaktordruckbehälter eines Kernkraftwerks besteht hauptsächlich aus einem speziellen ferromagnetischen Feinkornstahl. Um diesen jedoch vor Korrosion des zur Moderation verwendeten Wassers zu schützen, wird die innere Seite des druckführenden RDB der Sicherheitsklasse 1 und 2 mit einer austenitischen Plattierung überzogen [110]. Durch die unterschiedlichen Legierungen unterscheiden sich beide Stähle grundsätzlich in ihren physikalischen Eigenschaften. Dies betrifft auch die magnetischen Eigenschaften. Im Gegensatz zum Feinkornstahl ist der austenitische Stahl lediglich paramagnetisch, was von großer Bedeutung für die Behandlung des WASS-Gemisches mittels magnetischer Separation ist.

Aus diesem Grund sind zwei Stahlproben für die Untersuchungen der magnetischen Separation mit der WASS-Technik zerschnitten worden. Diese stellen die zwei Stahlsorten des RDB sowie der Kerneinbauten dar [21]. Aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften ist eine magnetische Abscheidung der Spanpartikel des Feinkornstahls realisierbar, womit sich die Untersuchungen in dieser Arbeit auf den austenitische Chrom-Nickel-Stahl X2CrNi 18-9 (St 1.4307) beschränken.

Diese Legierung besitzt eine Dichte von 7.9 kg/dm^3 [133]. Aufgrund des Nickelgehalts von 9 Massen-% handelt es sich um einen paramagnetischen Edelstahl. Er weist eine Permeabilität von 1.630 Vm/As auf, die sich nach Löschungsglühen von 2 Stunden bei $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ auf 1.056 Vm/As einstellt [134].

Zur Verifizierung der Stahlsorte wurden Fundstücke (größere Späne mit ca. $10 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$) im Korngemisch sowie die ursprünglich für die WASS-Schnitte genutzte Stahlprobe mit einer optischen Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) sowie mit einem Rasterelektronenmikroskop mit gekoppelter Elementanalyse (REM-EDX) untersucht. Mit beiden Methoden sind sehr ähnliche Werte für die einzelnen Elemente in der Stahllegierung erreicht worden, womit die Stahlsorte mit der Zusammensetzung nach DIN EN 10088-1 übereinstimmt [135].

III.3 Untersuchung des Korngemisches

Wie in Abschnitt II.1.1 bereits kurz erläutert, wurde das Korngemisch realitätsnah in einem Mock-Up erstellt. Dazu ist die WASS-Technik unter Wasser in einem Becken angewendet worden, bei dem das Abrasiv aus Abschnitt III.1 zur Anwendung kam. Geschnitten wurde dabei ein Edelstahlkörper (siehe Abschnitt III.2). Das somit erzeugte Korngemisch wurde daraufhin gesammelt und dient als Grundlage für die vorliegenden Untersuchungen. Zur weiteren Untersuchung wurde das gesammelte Korngemisch in neun Felder und drei Ebenen geteilt, wie Abbildung III.5 veranschaulicht.

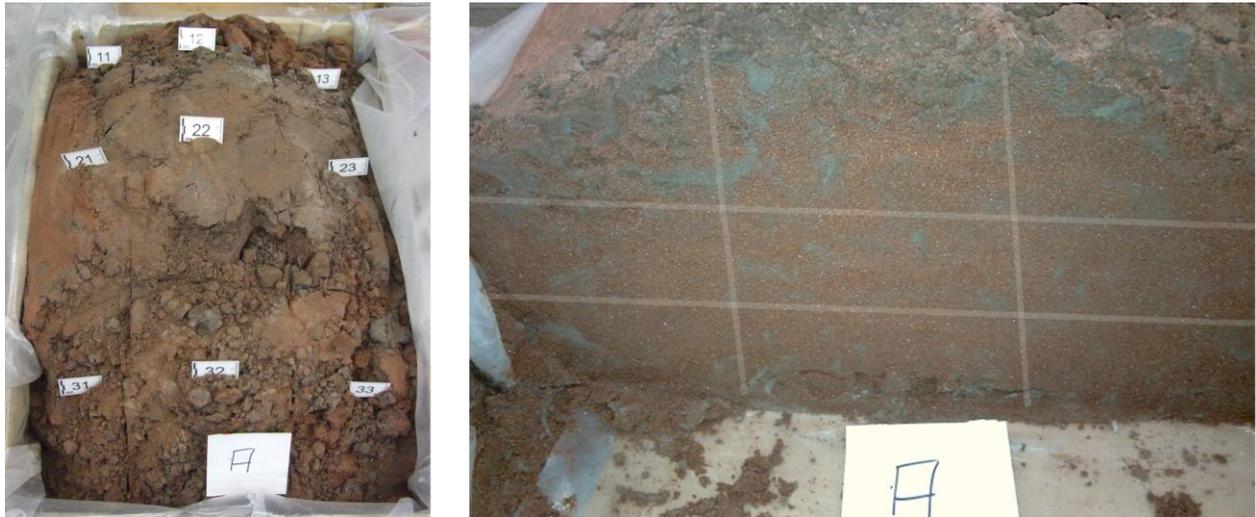


Abbildung III.5: Erzeugtes Korngemisch [131]

Die dadurch entstandenen 27 Proben sind im Rahmen des Forschungsprojekts [21] mittels Lasergranulometrie [136] auf ihre Partikelgrößenverteilung untersucht worden [131]. Die resultierenden Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung III.6 links zu sehen. Hierfür wird im Diagramm der volumetrische Durchgang bezogen auf die Partikelgröße wiedergegeben. Als Referenz dient dabei die Partikelgrößenverteilung des frischen Abrasivs, das hierfür auch mittels Lasergranulometrie bestimmt wurde. Die 27 Ergebnisse sind übersichtshalber durch den grauen Bereich dargestellt, wobei die Grenzen des Bereichs die Probe mit der kleinsten bzw. der größten Partikelverteilung darstellt. Damit ist ersichtlich, dass es sich bei dem Korngemisch um ein sehr inhomogenes Gemisch handelt.

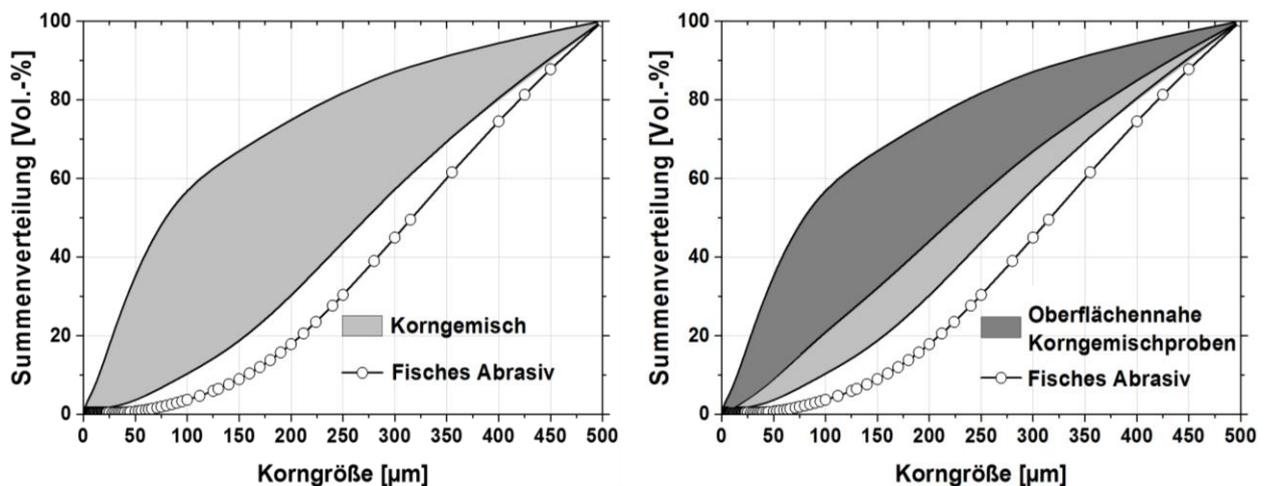


Abbildung III.6: Partikelgrößenverteilung des Korngemisches (links), wobei der Bereich der oberflächennahe Proben rechts hervorgehoben wird [131]

Bei genauerer Betrachtung der Schnittebenen der Palette in Abbildung III.5 rechts, kann diese Inhomogenität auch durch Bereiche mit unterschiedlicher Färbung erkannt werden. Genauere

Untersuchungen zeigten, dass es sich bei den grauen Bereichen um akkumulierte Spanpartikel handelt und die roten Bereiche überwiegend Abrasivpartikeln zuzuordnen sind.

Diese Akkumulierung der Stahlpartikel im oberen Bereich der Palette ist auf die unterschiedliche Sinkgeschwindigkeit der Fraktionen zurückzuführen, wie in der folgenden Abbildung III.7 gut zu erkennen ist. Dabei ist insbesondere die hohe Sinkgeschwindigkeit der Abrasivpartikel ($\rho \cong 3.95 \text{ kg/dm}^3$) mit roter Färbung zu erkennen. Der Stahlanteil ($\rho \cong 7.9 \text{ kg/dm}^3$) setzt sich dabei langsamer ab und ist als graue Schicht über dem Abrasiv zu erkennen. Nach Stokes [137] lässt sich dies auf den deutlichen Partikelgrößenunterschied zurückzuführen, wobei die Stahlpartikel deutlich kleiner sein müssen. Durch Betrachtung der Partikelgrößenverteilung der Proben in Abbildung III.6 wird dies auch durch die Partikelgrößenverteilung der obersten Schichten des Gemisches mit der größten Anhäufung an Stahlpartikeln verdeutlicht. Eine gezielte Probennahme aus den unterschiedlich gefärbten Bereichen konnte dies mittels Lasergranulometrieanalyse belegen [131].

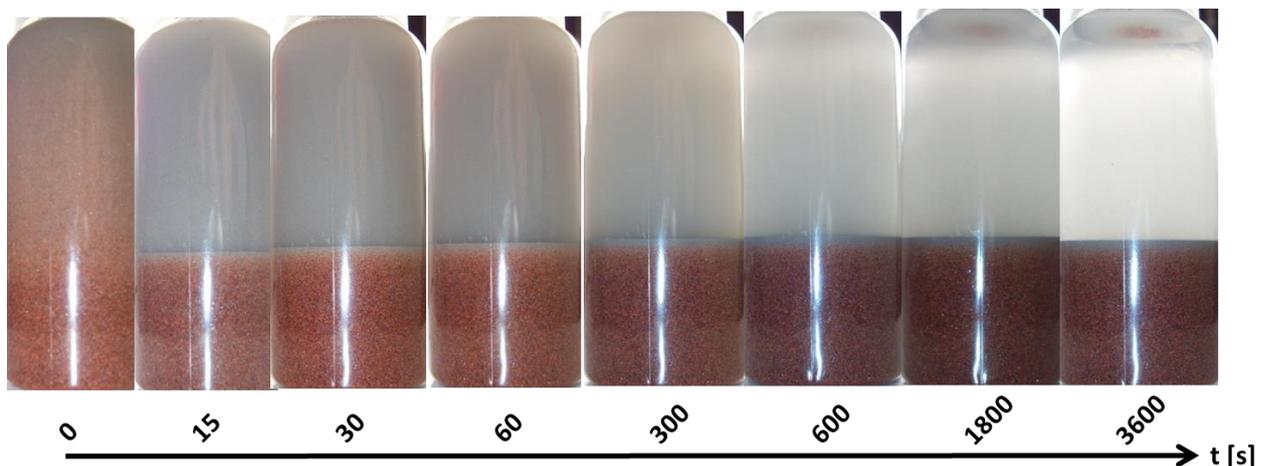


Abbildung III.7: Setzverhalten des Korngemisches [131]

Zur weiteren Verarbeitung wurde das Korngemisch mittels eines Trommelmischers homogenisiert. Das hiermit erzeugte Gemisch wurde mithilfe des Aufbaus in Abschnitt II.1 auf die Partikelgrößenverteilung untersucht, die in Abbildung III.8 im Vergleich zur Verteilung des frischen Abrasivs zu sehen ist. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass das Korngemisch kleinere Partikel wie das frische Abrasiv aufweist, was auf die Zertrümmerung der Abrasivpartikel während des Schnitts zurückzuführen ist. Diese Bruchstücke führen zu einer ungleichmäßigeren Verteilung des Korngemisches. Insbesondere im Feinanteil ist dadurch eine Vielzahl von neuen Partikeln mit unregelmäßiger Partikelgrößenverteilung erzeugt worden, wie der Bereich von $0 \mu\text{m}$ bis $200 \mu\text{m}$ in der Abbildung III.8 zeigt.

Um dies auch qualitativ bewerten zu können, wurde von dem frischen Abrasiv und dem Korngemisch jeweils eine Rasterelektronenmikroskopie mit Rückstreuungskontrast (BSE-REM)

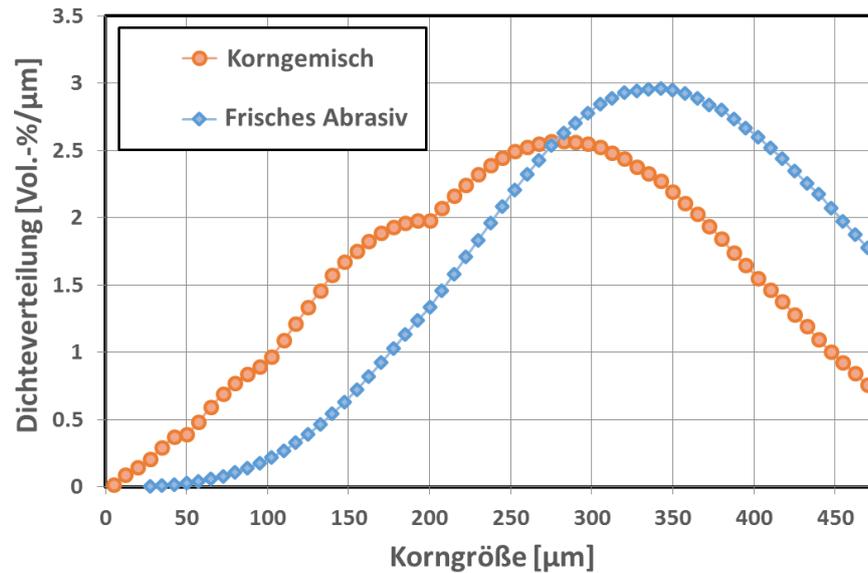


Abbildung III.8: Dichteverteilung des Korngemisches im Vergleich zum frischen Abrasiv

Aufnahme gemacht, die in Abbildung III.8 zu sehen sind. Dabei sind im Vergleich zum frischen Abrasiv (linkes Bild) die Splitterteile aus der Abrasion deutlich im mittleren Bild zu erkennen. Die Aufnahme des Korngemisches rechts mit höherer Auflösung zeigt, dass es sich dabei um Splitterteile mit unterschiedlichen Partikelgrößen handelt. Bei genauer Betrachtung sind auch die Stahlspäne auf den Aufnahmen des Korngemisches zu erkennen. Diese sind durch die höhere Elektronenrückstreueenergie in dem Bild heller zu erkennen und weisen eine deutlich kleinere Partikelgröße auf. Die Abrasivpartikel zeigen dabei keine erkenntlichen Unterschiede auf den Bildern (siehe hierzu die Mikroskopaufnahmen der Partikel mit unterschiedlicher Färbung in Abbildung III.1). Das Abrasiv setzt sich jedoch, wie beschrieben, aus verschiedenen Mineralien zusammen, was im Folgenden noch etwas deutlicher erläutert wird.

Um feststellen zu können, wie viele Stahlpartikel sich im Korngemisch befinden, wurde das Korngemisch einer ICP-OES-Analyse unterzogen. Dafür wurden die Stoffe im Gemisch chemisch aufgelöst. Dies erlaubt eine Quantifizierung der Masse der beinhalteten Elemente in Bezug auf die Gesamtmasse. Die Zuordnung der Menge an Abrasiv und Stahl im Gemisch wird dabei durch das überwiegend im Stahl auffindbare Nickel ermöglicht. Durch Bestimmung des Nickelgehalts mit einer reinen Stahlprobe (siehe auch Abschnitt III.2) wird eine Quantifizierung des Stahlanteils im Korngemisch ermöglicht. Mit einem Gesamtnickelgehalt im Korngemisch von etwa 0.343 Massen-% durch Korrektur des geringfügigen Nickelgehalts im reinen Abrasiv mit einem Betrag von 0.015 Massen-%, führt dies aufgrund der unterschiedlichen Dichte der Fraktionen zu einem Betrag von 0.16 Volumen-% Stahlgehalt im Korngemisch. Die Genauigkeit der Bestimmung des Nickelgehalts im Korngemisch durch fünf Stichproben liegt dabei bei einer Standardabweichung von ca. 5 %. Durch den deutlich geringeren Anteil an Nickel im reinen Abrasiv ist hier

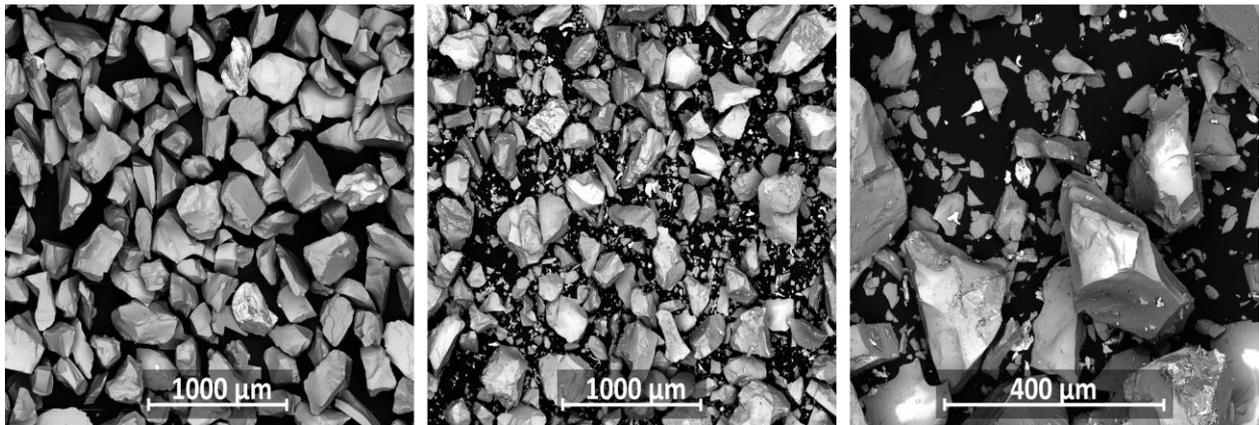


Abbildung III.9: BSE-REM-Aufnahmen des frischen Abrasivs (links) und des Korngemisches (mittig und rechts) in unterschiedlicher Auflösung

bei fünf Stichproben eine Standardabweichung in Höhe von 22 % erreicht worden. Die Bestimmung des Stahlanteils im Korngemisch ermöglicht im Verlauf der Untersuchungen eine Bewertung der Güte des Separationsprozesses, die in Abschnitt VI.3I.1 durchgeführt wird.

Zur besseren Unterscheidung der einzelnen Fraktionen im Korngemisch und dem frischen Abrasiv werden diese im Folgenden bzgl. ihrer magnetischen Eigenschaft untersucht. Durch die resultierende Partikelgrößenverteilung der einzelnen Fraktionen wird eine vereinfachte Bewertung der Separation mittels der Partikelgrößenmesseinrichtung (siehe Abschnitt II.2) ermöglicht.

III.3.1 Magnetisches Verhalten der Kornfraktionen

Für diese Untersuchung wurden jeweils ca. 200 g an Korngemisch sowie frisches Abrasiv zur weiteren magnetischen Untersuchung verwendet. Diese wurden zunächst einer Nasssiebung unterzogen [138]. Hierfür werden verschiedene Siebe mit unterschiedlicher Maschenweite der Größe nach aufeinander gestapelt. Das Gut wird hierfür in dem obersten Sieb mit den größten Maschen hineingegeben. Darüber wird eine Glocke angebracht, die gleichmäßig Wasser über das Sieb verteilt, wobei der gesamte Siebturm durch eine Unwucht in Bewegung gesetzt wird (sog. Vibrationssiebung). In den einzelnen Sieben werden die Partikel nach ihrer Größe in verschiedenen Rückstandsfraktionen klassiert. Dies wurde jeweils getrennt für das Abrasiv und das Korngemisch durchgeführt und führte zu den folgenden Rückständen in den verwendeten Siebgrößen 425, 300, 212, 150, 106 und 38 µm:

Tabelle III.1 : Klassierung des Abrasivs und des Korngemisches durch Nasssiebung

Siebgröße [µm]	38	106	150	212	300	425
Abrasiv [M.-%]	0.43	5.05	28.34	40.42	25.73	0.10
Korngemisch [M.-%]	23.09	14.52	23.83	31.96	6.51	0.04

Die Siebanalyse zeigt, dass es aufgrund der länglichen Form der Partikel kaum Partikel im Abrasiv sowie im Korngemisch gibt, die größer als $425 \mu\text{m}$ sind. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass durch die Abrasion der Durchgang an Partikeln im Korngemisch in die kleineren Größenklassen überwiegt. Somit sind im Korngemisch noch deutlich viele Partikel im kleinsten Sieb mit $38 \mu\text{m}$ aufzufinden, wohingegen beim Abrasiv die Menge vernachlässigbar klein ist. Aus diesem Grund werden Fraktionen über $425 \mu\text{m}$ sowie die Fraktion kleiner als $106 \mu\text{m}$ des Abrasivs im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die so erhaltenen neun Fraktionen wurden anschließend mit einem Frantz-Scheider weiter untersucht [49]. Das Gerät besteht aus einem Elektromagneten und einer im Luftspalt des Magnets laufenden Rinne. Diese kann, zusammen mit dem Elektromagneten, seitlich und nach vorne geneigt werden (siehe links in Abbildung III.10). Das untersuchte Gemisch wird dabei in einem Trichter am oberen Ende der Rinne gespeist. Durch eine Unwucht wird die Rinne angeregt und das Gemisch rutscht durch die Schwerkraft in Richtung der eingestellten Neigung. Im Beispiel rechts in Abbildung III.10 würde dies der linken unteren Seite der Rinne entsprechen (schwarzer Behälter).

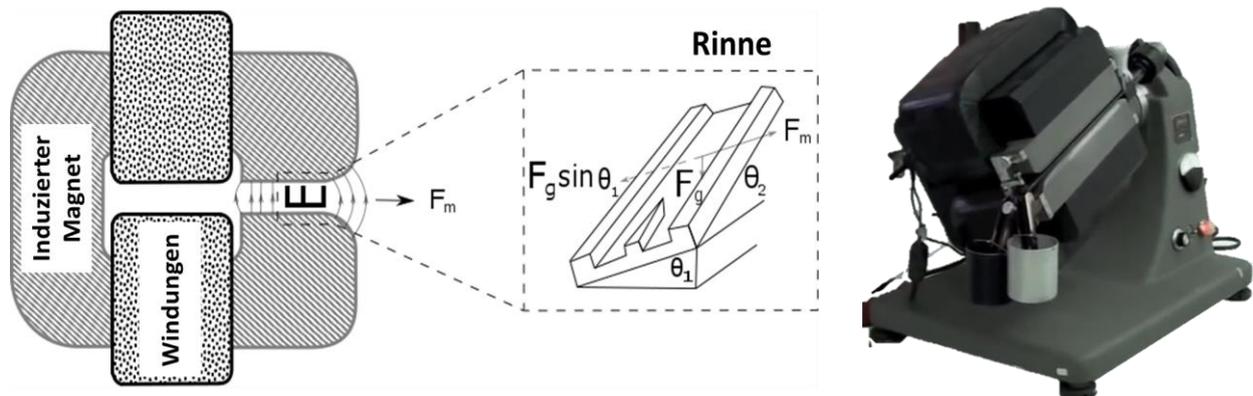


Abbildung III.10: Funktionsprinzip des Frantz-Scheiders [49]

Durch das Aktivieren des Elektromagnets und die konsekutive Steigerung der Stromstärke wird entgegen der Schwerkraft in Richtung θ_1 (siehe Abbildung III.10) eine magnetische Kraft erzeugt. Durch die Auslegung des Frantz-Scheiders wird über die komplette Rinne bei einer konstant angelegten Stromstärke eine konstante Magnetflussdichte erreicht ($B \nabla B = \text{konst}$) [139]. Werden daher Gleichung (I.10) und (I.14) unter Berücksichtigung des Winkels θ_1 gleichgesetzt, folgt nach Umstellung:

$$\kappa = \frac{\mu_0 g}{B \nabla B} \sin \theta_1 \quad (\text{III.3})$$

wobei $\kappa [kg/m^3]$ die massenbezogene Suszeptibilität ist. Mit der Suszeptibilität und der Dichte

gilt dabei der folgende Zusammenhang:

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} \quad (\text{III.4})$$

Damit ist die magnetische Abscheidung im Frantz-Scheider prinzipiell nur von der massenbezogenen Suszeptibilität der Partikel abhängig. Wirkt daher bei einem Partikel eine größere magnetische Kraft als die Schwerkraft, so wird das Partikel entgegen der Neigung der Rinne angezogen. Am Ende der Rinne ist ein Stromteiler angebracht, der den sortierten Stoffstrom in zwei Behälter teilt (siehe rechts in Abbildung III.10: grauer und schwarzer Behälter). Somit kann durch steigende Stromstärke eine magnetische Sortierung eines Gemisches aufgrund der Suszeptibilität der beinhalteten Partikel durchgeführt werden.

Mit dieser Methode wurden die vier Fraktionen des Abrasivs und die jeweils fünf Fraktionen des Korngemisches aus der Siebanalyse magnetisch mit dem Frantz-Scheider sortiert. Die Winkel im Frantz-Scheider betragen dabei $\theta_1 = 11^\circ$ und $\theta_2 = 23^\circ$. Die folgende Abbildung III.11 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

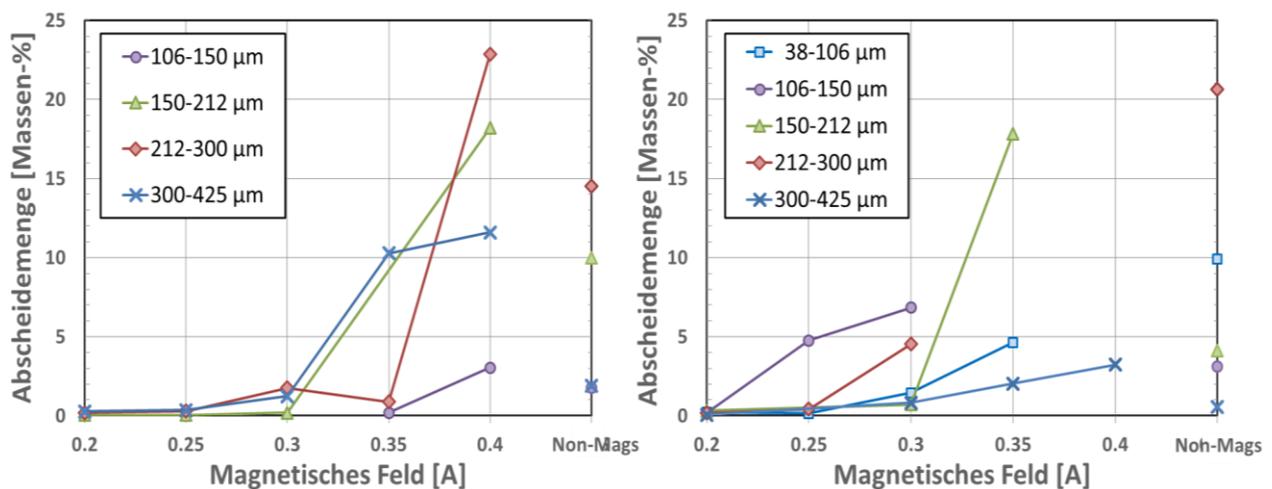


Abbildung III.11: Magnetische Sortierung des Abrasivs (links) und des Korngemisches (rechts)

Die Diagramme in Abbildung III.11 zeigen die magnetische Sortierung der größenklassierten Fraktionen mit steigender magnetischer Feldstärke. Die Massen der erhaltenen Fraktionen sind dabei mit der Gesamtmasse an Abrasiv bzw. des Korngemisches normiert worden. Die magnetische Feldstärke ist hier in Ampere gegeben, da sie sich auf die Stromstärke im Frantz-Scheider bezieht. Eine Ermittlung der jeweiligen Magnetflussdichte erfolgt durch das Umstellen der Gleichung (III.3) zur Berechnung von Elektromagneten, wobei für die massenbezogene Suszeptibilität gilt [33]:

$$\kappa = \frac{\sin\theta_1}{bI^n} \quad (\text{III.5})$$

Dabei stellt I die Stromstärke und b sowie n Konstanten dar [139]. Dies ermöglicht eine Umrechnung des Stroms in die Magnetflusssdichte. Für die vorliegende Anwendung ergeben sich näherungsweise folgende Werte:

Tabelle III.2 : Umrechnung der Stromstärke des Frantz-Scheiders in Magnetflusssdichte

Stromstärke I [A]	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
Magnetflusssdichte [T]	0.2	0.32	0.38	0.44	0.50	0.56

Im Diagramm links in Abbildung III.11 ist zu sehen, dass aufgrund der natürlichen Zusammensetzung der Elemente im Abrasiv eine gewisse magnetische Eigenschaft mit steigender Magnetflusssdichte festgestellt werden kann (vgl. Abschnitt III.3.1 und [130]). Dabei zeigt ein Großteil der hier vorhandenen Elemente ein paramagnetisches Verhalten [140]. Insbesondere ab einem 0.3 A erzeugten magnetischen Feld wird ein signifikanter Anteil des Abrasivs magnetisch sortiert. In der Summe aller Fraktionen ist hier zu sehen, dass bei einem 0.4 A erzeugten magnetischen Feld ungefähr 75 Massen-% des Abrasivs abgeschieden werden. Lediglich $\frac{1}{4}$ des Abrasivs ist bei dieser resultierenden Magnetflusssdichte noch nicht magnetisch sortierbar. Diese verbleibende Menge ist ganz rechts im Diagramm als „non-mag“ für die jeweilige Fraktionsgröße gegeben. Damit wird auch noch einmal die Bedeutung einer gezielten Wahl der Stärke eines eingesetzten Magnetfilters verdeutlicht. Diese Magnetflusssdichte wird nämlich in unmittelbarer Nähe der Polstellen des Stabmagnetfilters überschritten (vgl. Abschnitt I.2.1.3 sowie II.1.3 mit Tabelle III.2). Wird das Diagramm rechts in Abbildung III.11 für das Korngemisch betrachtet, lassen sich folgende Unterschiede zum frischen Abrasiv erkennen. Das Korngemisch beinhaltet, neben den Stahlspänen, auch gebrochenes Abrasiv. Es ist zu erkennen, dass durch den Bruch der Partikel sich gewisse Konzentrationen an Elementen aus größeren Partikeln freisetzen, die bereits bei kleineren Magnetflusssdichten magnetisch abgeschieden werden. Bei der kleinsten Fraktion des Korngemisches in der Größe 38 – 106 μm ist bei der Untersuchung mit dem Frantz-Scheider bereits mit einer geringeren Stromstärke von 0.1 A begonnen worden. Hier ist nämlich mit den meisten Stahlspänen aus den vorhergehenden Untersuchungen zu rechnen. Die Fraktion, die dadurch gewonnen wurde, betrug jedoch lediglich $5 \cdot 10^{-3}$ Massen-% und ist aufgrund des geringen Wertes nicht im Diagramm in Abbildung III.11 berücksichtigt worden. Sie wird aber der Vollständigkeit halber hier erwähnt, da sie für die folgenden Analysen weiter betrachtet wird. Die Fraktionsgröße 150 – 212 μm des Korngemisches zeigt bei größeren Feldstärken einen ähnlichen Verlauf wie bei dem Abrasiv. Auch in der folgenden Fraktionsgröße 212 – 300 μm zeichnet sich eine Zunahme des magnetisch sortierbaren Anteils durch die Abrasion ab. Die verbleibende Menge an nichtsortiertem Material von 20.6 Massen-% in dieser Fraktionsgröße lässt jedoch nur eine beschränkte Beurteilung der Tendenz zu.

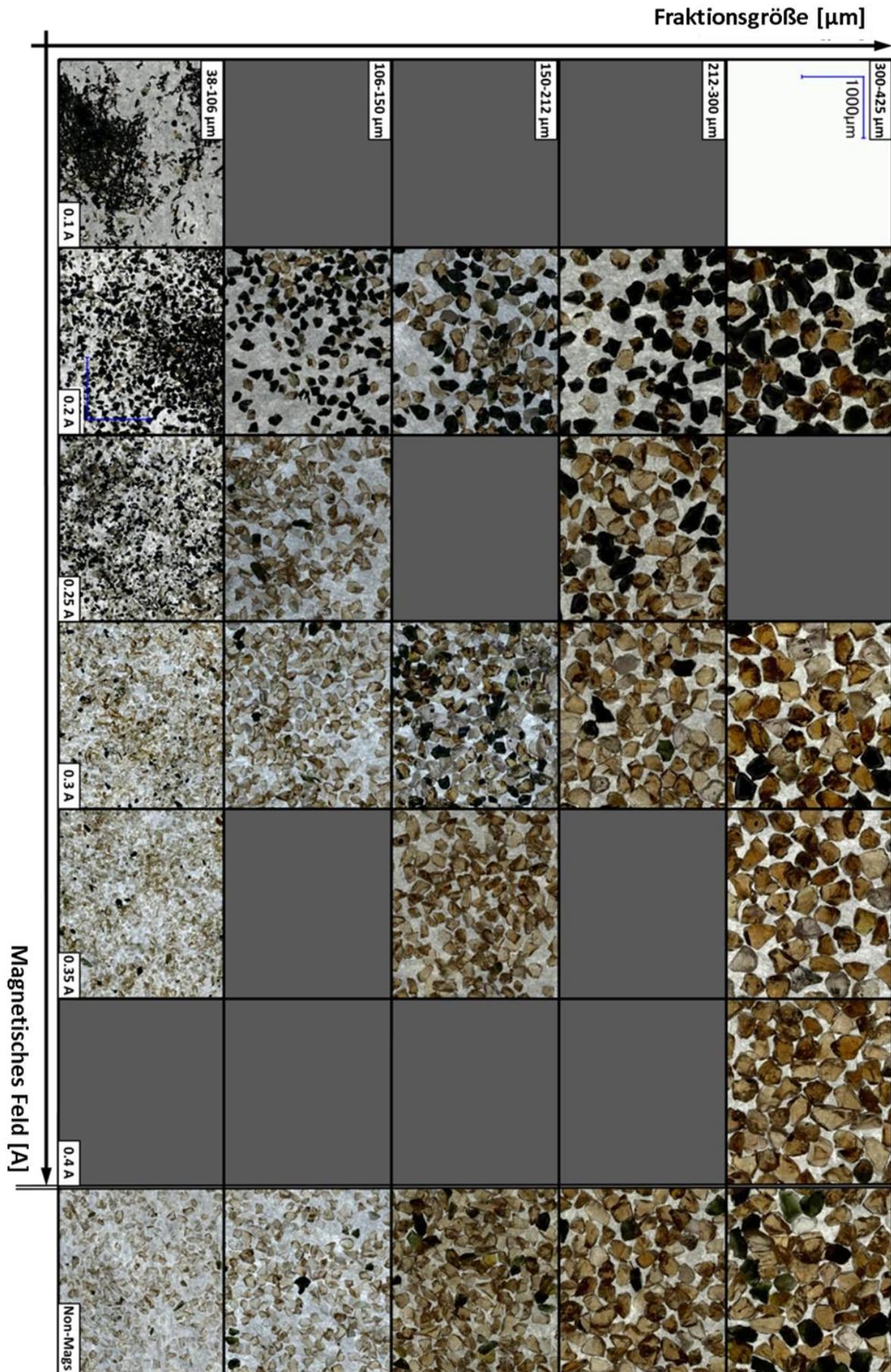


Abbildung III.12: Zusammenstellung der mikroskopischen Aufnahmen des Korngemisches

Um die gewonnenen Fraktionen qualitativ besser betrachten zu können, wurden die 23 Fraktionen, die durch die Größenklassierung und anschließende magnetische Sortierung gewonnen wurden, mit einem Mikroskop näher untersucht. Die so erhaltenen Bilder, sind in gleicher Größenskala und nach ihrer charakteristischen Größe geordnet in der folgenden Abbildung III.12 zusammengestellt.

Die Skala der Bilder in Abbildung III.12 ist dem weißen Bild oben links zu entnehmen. Graue Felder stellen dabei Bereiche dar, die durch die Analyse nicht abgedeckt wurden oder wo keine Fraktion abgeschieden wurde. Um eine bessere Unterscheidung der Abrasivpartikel von den Stahlspänen ermöglichen zu können, sind die Bilder hier von unten beleuchtet worden (Durchlicht). Auf der Abszisse ist, analog zu Abbildung III.11, das zunehmende magnetische Feld bei steigender Stromstärke aufgetragen. Dabei ist ganz rechts, durch den Doppelstrich abgetrennt, die restliche Fraktion abgelichtet, die bei entsprechender Stromstärke nicht weiter magnetisch sortiert werden konnte (z. B. $> 0.35 A$ in der Fraktionsgröße $212 - 300 \mu m$). Auf der Ordinate ist die Fraktionsgröße bezogen auf die Siebanalyse aufgetragen.

Auffällig ist zunächst die unterschiedliche Färbung der Partikel mit zunehmendem magnetischen Feld. So sind ganz links in Abbildung III.12 (geringe Magnetfeldstärke) insbesondere dunkle Partikel zu sehen. Diese Anhäufung an dunklen Partikeln ist dabei noch deutlicher bei der Zusammenstellung der Ergebnisse des Abrasivs zu sehen, was zur Vollständigkeit in Anhang A unter Abbildung XI.1 zu finden ist.

Durch diese Analyse sind die Stahlspäne im Korngemisch eindeutig in der kleinsten Fraktionsgröße $38 - 106 \mu m$ und dem $0.1 A$ erzeugten Magnetfeld links unten in Abbildung III.12 zu finden. Bei genauerer Betrachtung der Bilder in der gleichen Fraktionsgröße sind noch vereinzelt Stahlspäne in den Bildern rechts mit zunehmendem magnetischen Feld zu finden, die Anzahl nimmt aber zunehmend ab. In der darüber liegenden Fraktionsgröße $106 - 150 \mu m$ sind noch vereinzelt größere Späne bei $0.2 A$ zu finden. Eine Abscheidung mit $0.1 A$ ist in dieser Fraktionsgröße jedoch nicht erfolgt. Es ist damit festzustellen, dass eine Abscheidung der Stahlspäne bereits bei einer geringen Feldstärke von ca. $0.2 T$ ($0.1 A$) erfolgt. Dabei sind bei der Feldstärke kaum Abrasivpartikel in diesem Bild zu sehen, wie aus den folgenden Aufnahmen in Abbildung III.13 der Fraktion aus $38 - 106 \mu m$ und $0.1 A$ Feldstärke zu entnehmen ist. Die vereinzelt Abrasivkörner sind zum Großteil dem Magnetit zuzuordnen bzw. es handelt sich dabei um Zwischengut m'_{NM} , das zufällig durch Agglomeration mit abgeschieden wurde. Die Elemente des Abrasivs werden dahingegen erst bei höheren Feldstärken magnetisch sortiert ($> 0.2 A$), wie die restlichen Aufnahmen in der kleinsten Fraktionsgröße in Abbildung III.12 zeigen.

Mithilfe der Zusammenstellung der magnetischen Suszeptibilität verschiedener Mineralien aus Rosenblum et al. [130] können die Elemente aus dem Produktblatt des Abrasivs sowie die hier

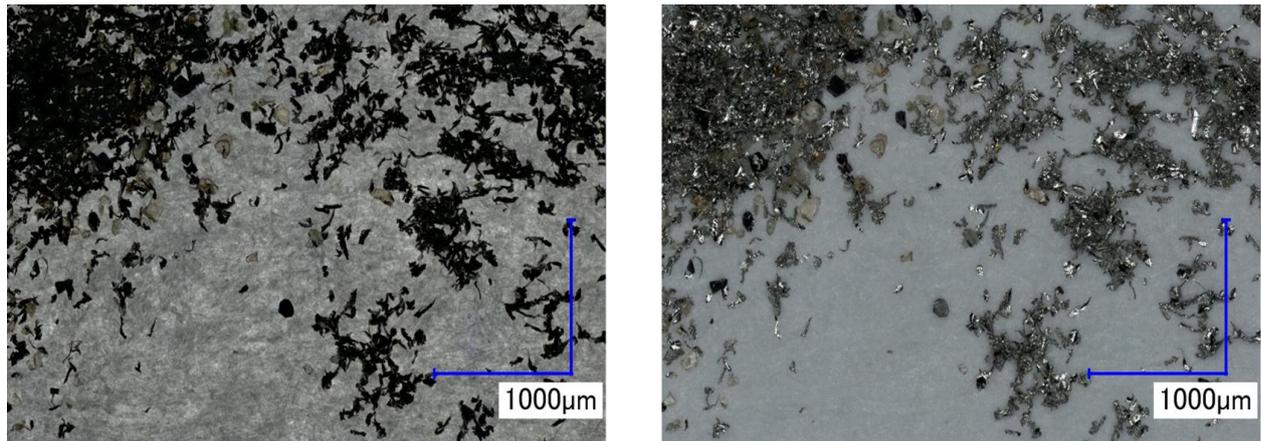


Abbildung III.13: Mikroskopaufnahme mit Durchlicht (links) und Auflicht (rechts) der sortierten Fraktion mit 38 – 106 μm Korngröße und 0.1 A erzeugten Feldstärke

erhaltenen Ergebnisse wie folgt in der zweiten Spalte der Tabelle III.3 eingeordnet werden. Durch den direkten Zusammenhang der Stromstärke I [A] und der massenbezogenen Suszeptibilität κ [kg/m^3] (siehe Gleichung (III.5)) kann die vierte Spalte in Tabelle III.3 ermittelt werden [141]. Mit den Angaben der Dichte sowie mit den Gleichungen (I.3) und (III.4) ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle III.3 : Magnetische Suszeptibilität des Korngemisches

Element	Sortierintensität [A]	Richtwert [A]	Dichte [kg/dm^3]	$\kappa \cdot 10^3$ [kg/m^3]	χ []	μ_r []
Magnetit	0.01 - 0.05	> 0.01	5.1	479.56	94.03	95.03
Stahlspäne (1.4307)	-	> 0.1*	7.9	4.80	0.61	1.61
Almandin	0.1 - 0.6	> 0.2	4.3	1.20	0.28	1.28
Hornblende	0.1 - 0.9	> 0.3	3.1	0.53	0.17	1.17
Pyrop	0.2 - 0.8	> 0.5	3.5	0.19	0.05	1.05
Feldspat [72], [140]	-	-	2.6	-	$\chi < 0$	$\mu_r < 1$

Aus Tabelle III.3 ist zu entnehmen, dass das Magnetit ferromagnetische (genauer gesagt ferri-magnetische [72]) die meisten Elemente im Korngemisch paramagnetische und der Feldspat diamagnetische Eigenschaften aufweisen. Die so ermittelte Suszeptibilität des Edelstahls (1.4307) spiegelt dabei die Werte, die in der Literatur für die Stahllegierung aufgewiesen sind, wider [134]. Mit diesen Angaben können die sortierten Fraktionen aus dem Franz-Scheider entsprechend eingeordnet werden. Somit wird bei der Fraktion mit 0.2 A überwiegend das Almandin abgeschieden, was durch Angaben aus der Literatur zur Färbung des Elements mit u. a. dunkel-rot bis schwarz

* Resultiert aus durchgeführten Frantz-Scheideranalysen

bestätigt wird [129]. Bei den grünlich-schwarzen Partikeln ist von Hornblende auszugehen, wobei vereinzelt Partikel über die komplette Bandbreite der Aufnahmen aufzufinden sind. Insbesondere in den Aufnahmen des Abrasivs (siehe Anhang A, Abbildung XI.1) ist eine Anhäufung von Hornblende in der nicht sortierten Fraktion der größten Fraktionsgröße zu sehen. Pyrop wird mit verschiedenen Rottönen beschrieben, die von sehr hell bis schwarz reichen [129]. Dies kann auf einen Übergang von Almandin zu einer zunehmenden Häufigkeit von Pyrop ab einer Feldstärke von 0.3 A hindeuten. Diese Angaben stellen jedoch nur eine Deutung der Verteilung dar, die sich nur durch chemische Analyse bestätigen lassen würde. Dabei gilt der Hinweis, dass die mikroskopischen Aufnahmen lediglich qualitativen Charakter haben und die Häufigkeit einzelner Partikel in den Bildern rein zufällig sein kann.

III.3.2 Partikelgrößenverteilung des Korngemisches

Um eine quantitative Aussage über die 23 Fraktionen treffen zu können, sind diese bezüglich ihrer Partikelgrößenverteilung untersucht worden. Dabei kam der Aufbau aus Abschnitt II.2 zur Anwendung. Durch die durchgeführte Siebung der Fraktionen erfolgte erwartungsgemäß eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung in den gleichen Fraktionsgrößen. Exemplarisch ist daher links in Abbildung III.14 die Verteilung der Partikelgrößen in der Fraktionsgröße 106 – 150 μm für die unterschiedlichen gemessenen Feldstärken dargestellt. Ausnahme dieser gleichmäßigen Verteilung stellt dabei rechts in Abbildung III.14 die Verteilung der Partikelgrößen in der Fraktionsgröße 38 – 106 μm dar. Hier erfolgt eine deutliche Streuung der Partikelgrößenverteilungen.

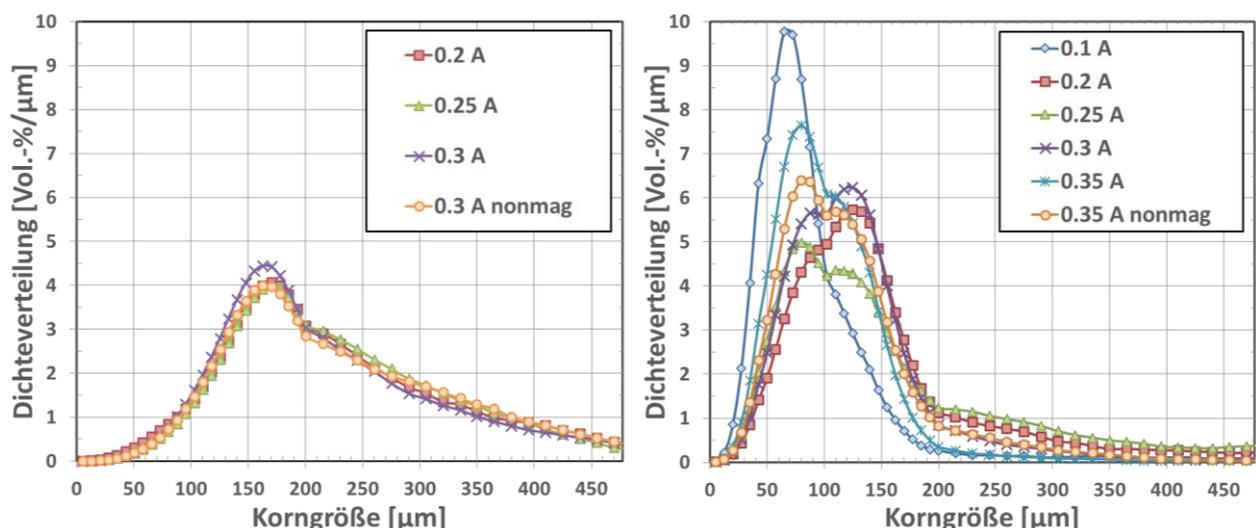


Abbildung III.14: Dichteverteilung der Fraktionen in den Größen 106 – 150 μm (links) und 38 – 106 μm (rechts) bezogen auf die unterschiedliche magnetische Suszeptibilität gegeben durch die angelegte Stromstärke

Durch die Aufnahmen in Abbildung III.12 ist die Partikelgrößenverteilung der mit 0.1 A erzeugten Fraktion eindeutig den Stahlspänen zuzuordnen. Diese Größenverteilung hat dabei eine sehr charakteristische Form, die sich von den anderen abhebt. Sie hat ein Maximum, das ungefähr bei der Partikelgröße $68 \mu\text{m}$ liegt. Durch genauere Betrachtung des Verlaufs der Kurve (siehe Abbildung III.15) sind weitere Wendepunkte zu beobachten. Es sind leichte Zunahmen in der Partikelzahl im Bereich der Partikelgrößen von ca. $42 \mu\text{m}$ und $125 \mu\text{m}$ ersichtlich. Im Gegensatz dazu sind die Größenverteilungen der Fraktionen mit $\geq 0.2 A$ alle zu höheren Partikelgrößen verschoben, wobei eine Häufung der Maxima der Kurven in den Partikelgrößen um $80 \mu\text{m}$ und $125 \mu\text{m}$ zu erkennen ist. Werden dabei sukzessiv die Kurven nach steigender Feldstärke betrachtet, ist ein alternierendes Maximum der Kurven zu beobachten. Bei 0.2 A liegt dieses bei $125 \mu\text{m}$, wobei bei 0.25 A das Maximum bei $80 \mu\text{m}$ liegt. Bei den Größen 0.3 A und 0.35 A wiederholt sich diese Reihenfolge. Dabei weisen alle Kurven weitere Wendepunkte um die jeweilige Partikelgröße von etwa $80 \mu\text{m}$ und $125 \mu\text{m}$ auf. Wird diese Erkenntnis mit den mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung III.12 verglichen, ist durch eine genauere Betrachtung eine Häufung an großen schwarzen Partikeln in der 0.2 A Fraktion zu sehen. Bei der nächstgrößeren Intensität von 0.25 A sind immer noch überwiegend schwarze Partikel zu erkennen, wobei diese aber deutlich kleiner sind. Ein weiterer Unterschied zur 0.2 A Fraktion stellt eine Zunahme an größeren transparent-rötlichen Partikeln dar. Der Vergleich von 0.25 A und 0.3 A zeigt dagegen kaum noch schwarze Partikel und deutlich größere transparent-rötliche Partikel, wobei die Größe dieser bei 0.35 A wieder entsprechend abnimmt. Mit der Beschreibung der Färbung der unterschiedlichen Elemente in der Mischung und der jeweiligen Suszeptibilität deutet diese Beobachtung bei steigender Feldintensität auf eine Abscheidung der größeren Partikel des Almandins hin. Erst eine zunehmende Feldintensität erlaubt die Abscheidung der kleineren Almandin-Partikel, wobei aufgrund der geringeren Suszeptibilität zunehmend große Pyrop-Partikel magnetisch sortiert werden. Erst eine weitere Zunahme der Feldstärke (0.35 A) führt zur Abscheidung der kleineren Partikel dieses Elements, was zu dem deutlichen Maximum bei $80 \mu\text{m}$ in Abbildung III.15 führt.

Der Vergleich dieser Beobachtung mit dem Diagramm rechts in Abbildung III.14 zeigt jedoch, dass die Annahme $B \nabla B \approx \text{konst.}$ in einem Frantz-Scheider nur für größere Partikel gilt (siehe Abschnitt III.3.1 bzw. [139]). Nach Gleichung (III.3) folgt bei den gegebenen Bedingungen im Frantz-Scheider eine Unabhängigkeit der Abscheidung von der Partikelmasse und der Partikelgröße [33]. Mit der hier durchgeführten Siebanalyse kann jedoch gezeigt werden, dass durchaus die Abscheidung nicht alleinig auf der massenbezogenen Suszeptibilität bei einer Partikelgröße $< 100 \mu\text{m}$ beruht. Durch die jeweilige Abscheidung der Abrasivbestandteile in Abhängigkeit von der Partikelgröße liegt hier ein Grenzwert für die Annahme $B \nabla B = \text{konst.}$ bei einer Partikelgröße $< 100 \mu\text{m}$ im Franz-Scheider vor. Kleinere Partikel führen somit auf die beschriebene Größen-

klassierung der Abrasivpartikel, was in Abbildung III.12 sowie in Abbildung III.15 verdeutlicht wird.

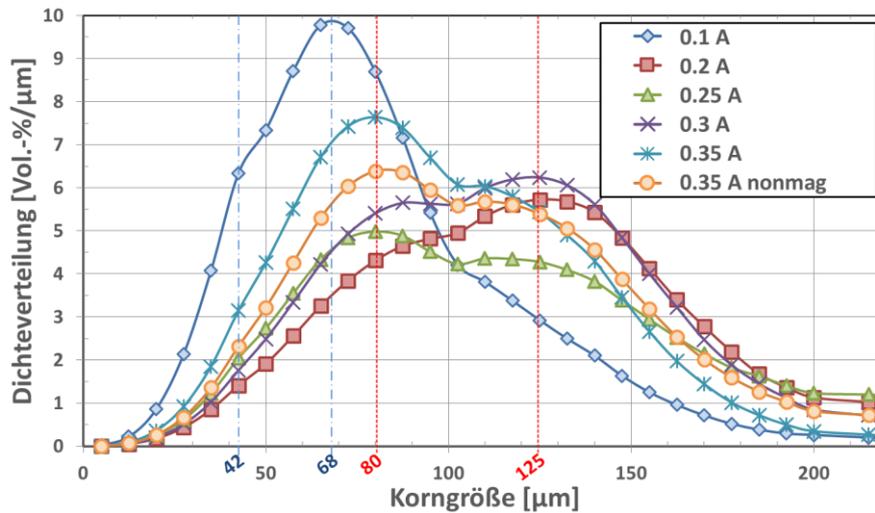


Abbildung III.15: Skalierte Dichteverteilung der Fraktionen der Größe 38 – 106 μm auf den Bereich 0 – 220 μm

Somit liegt in diesem Partikelgrößenbereich ein eindeutiger Einfluss der Größe und folglich des Volumens der Partikel vor, welches dem Zusammenhang der magnetischen Kraft in Gleichung (I.10) entspricht. Die Häufung der Partikelgrößen um die Werte 80 μm und 125 μm setzt dabei eine gewisse Normalverteilung der Partikel in den Größenbereichen voraus, ohne die diese Beobachtung nicht erfolgen würde. Unter dieser Voraussetzung wäre auch auf eine Normalverteilung der Bruchmechanik der Abrasivpartikel hinzudeuten, zumindest bezogen auf die Abrasion der Kanten, die die Splitterteile erzeugen, die in dieser Größenklasse untersucht wurden. Dabei ist diese charakteristische Bruchgröße für alle Elemente in der Abrasivmischung zuzuweisen, da auch bei den nicht magnetisch sortierten Partikeln derselbe Verlauf der Kurve zu beobachten ist (siehe Abbildung III.15).

III.3.3 Nutzung der charakteristischen Partikelgrößenverteilung zur Untersuchung des separierten Retentats

Die gewonnenen Erkenntnisse der Partikelgrößenverteilungen des größenklassierten und magnetisch-sortierten Korngemisches werden auf die Separationsanlage übertragen, wobei auf eine Versuchsreihe zurückgegriffen wird, die als Vorversuch für die geplanten Untersuchungen diente. Wie in der Problemstellung dieser Arbeit beschrieben (siehe Abschnitt I.1.2.2), wurden bei unterschiedlicher Filterzeit in der Separationsanlage signifikante Unterschiede in den Ergebnissen des Retentats beobachtet. Dabei führte ein zu langer Betrieb des Filters ohne Zwischenspülung (bei gleichbleibenden übrigen Parametern) zu einer signifikanten Zunahme der Retentatsmenge. Die unterschiedliche Güte der Separation bei der Spülung des Filters nach 20 *min* bzw. 90 *min* Filterzeit ist dabei deutlich der folgenden Abbildung III.16 zu entnehmen.

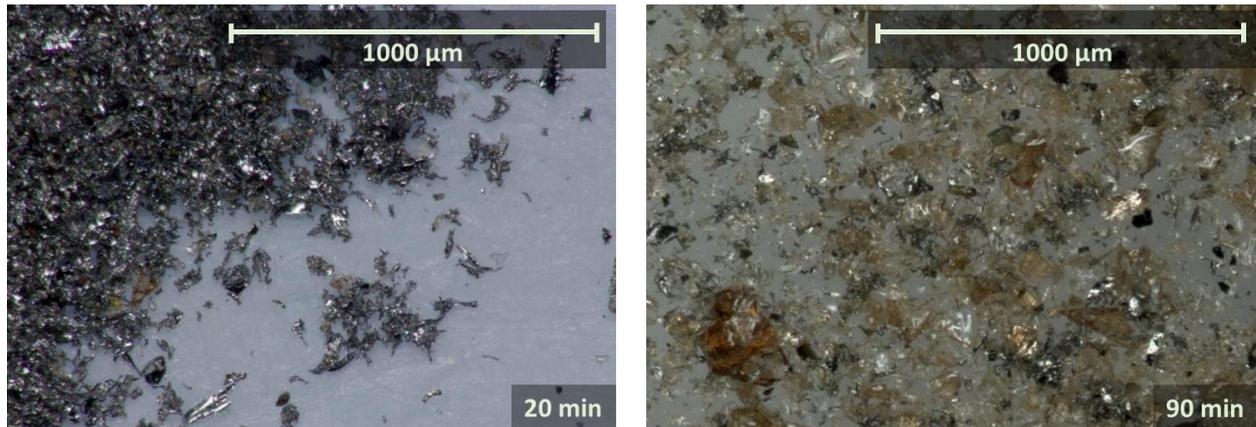


Abbildung III.16: Retentat nach unterschiedlicher Filterzeit ($\dot{V} = 10.4 \text{ l/min}$, $c_M = 1 \text{ Massen-\%}$)

Wie in Abbildung III.16 links zu sehen ist, wird bei einem Betrieb des Filters über 20 min im Retentat überwiegend Stahlpartikel akkumuliert. Der Betrieb unter den gleichen Voraussetzungen mit 90 min Filterzeit führen im Retentat zu einem Gemisch aus Stahlspänen und Abrasivpartikel (siehe rechts in Abbildung III.16). Das Verhalten ist dabei kein zufälliges Ereignis. Wird mit dem verbleibenden Filtrat im Suspensionsmischer die Separation mit der gleichen Filterzeit fortgesetzt, zeigen die folgenden Retentate die gleiche Zusammensetzung. Auch eine zweite Versuchsreihe unter den gleichen Bedingungen führte zu diesen Ergebnissen, wobei eine bemerkenswerte Reproduzierbarkeit erreicht wurde.

Zur näheren Betrachtung der Unterschiede der erzielten Retentate bei unterschiedlicher Filterzeit wird im Folgenden auf die unterschiedlich zusammengesetzten Retentate auf ihre Partikelgröße untersucht. Die resultierende Korngrößenverteilung der Retentate wird mittels der Partikelgrößenmessenrichtung (siehe Abschnitt II.2) in den Diagrammen der Abbildung III.17 wiedergegeben.

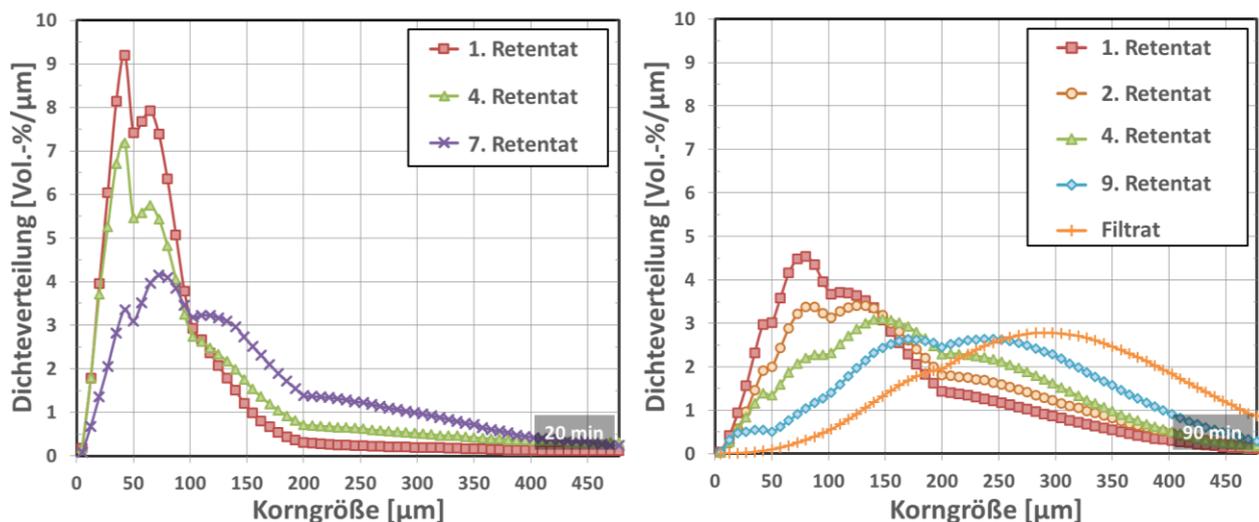


Abbildung III.17: Dichteverteilung des Retentats bei unterschiedlich langem Reinigungszyklus von 20 min (links) und 90 min (rechts) ($\dot{V} = 10.4 \text{ l/min}$, $c_M = 1 \text{ M.-%}$)

In den Kurven der Abbildung III.17 ist die charakteristische Partikelgrößenverteilung der Retentate aus der Separationsanlage zu sehen. Sie besteht im ersten Retentat überwiegend aus kleinen Partikeln (ca. 10 – 200 μm), was anhand der Kurve ganz links in den jeweiligen Diagrammen zu erkennen ist. Durch die Separation des Feinanteils in dem ersten Filterzyklus folgt eine Abnahme der Konzentration des Feinpartikelanteils im Gemisch der Suspension, woraufhin die folgenden Retentate in ihrer Zusammensetzung zunehmend aus größeren Partikeln bestehen. Aus diesem Grund werden die Kurven flacher und sind sukzessiv zu größeren Durchmessern in den Diagrammen verschoben, was deutlich in den beiden Diagrammen von Abbildung III.17 zu sehen ist. Dabei sind nicht alle Korngrößenverteilungen der Retentate in den Diagrammen aufgeführt, um diesen Verlauf übersichtlich darstellen zu können. Für die in diesem Abschnitt vorgesehene Beschreibung der Partikelgrößenverteilung des Korngemisches sollen nun aus diesen Versuchsreihen gezielt die zwei ersten Retentate der Versuchsreihe näher betrachtet werden. Diese sind in der Abbildung III.18 einander gegenübergestellt, wobei das Diagramm wie bereits bei Abbildung III.15 auf den Korngrößenbereich von 0 bis 220 μm begrenzt wurde. Zur weiteren Erläuterung ist hier auch die Partikelgrößenverteilung der Stahlfraktion (38 – 106 μm bei 0.1 A) aus dem Frantz-Scheider aufgeführt.

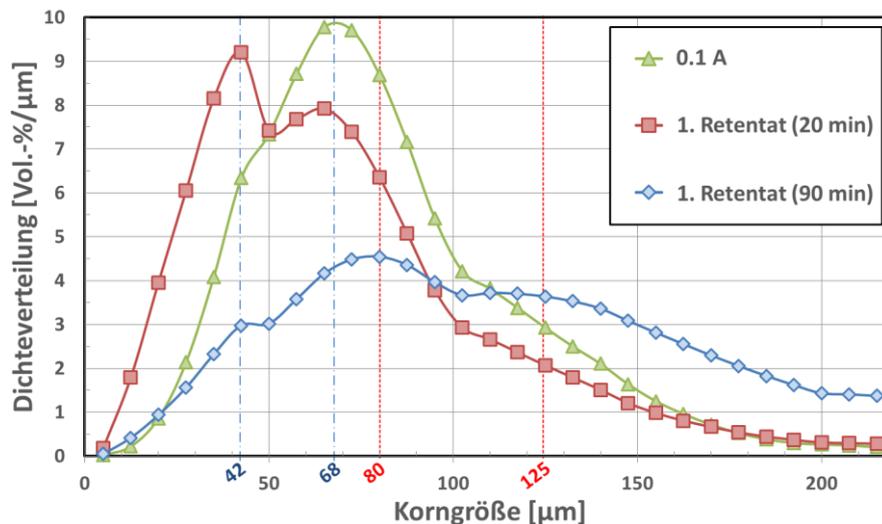


Abbildung III.18: Dichteverteilung des ersten Retentats der Versuchsreihen aus Abbildung III.17

Der Unterschied der Zusammensetzung der Retentate (siehe mikroskopische Aufnahme in Abbildung III.16) ist somit eindeutig im Verlauf der Korngrößenverteilung im Diagramm in Abbildung III.18 zu erkennen. Unter Berücksichtigung der in Abbildung III.15 diskutierten Verteilungen des Korngemisches aus dem Frantz-Scheider sind die charakteristischen Größen von 42 μm und 68 μm für die Stahlspäne und 80 μm und 125 μm für die Bruchstücke des Abrasivs hier wiederzuerkennen. Dabei weist insbesondere das „reine“ 20 min-Retentat eine sehr gute Übereinstimmung mit dem charakteristischen Verlauf der Stahlspäne aus dem Frantz-Scheider auf. Das Retentat beinhaltet dabei mehr feine Partikel im Vergleich zur Fraktion des Frantz-Scheiders, womit

die Dichteverteilung um $42\ \mu\text{m}$ deutlich größer ausfällt und somit das Maximum der Kurve hier entsteht. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass ein Großteil der kleinen Stahlspäne bei den Untersuchungen mit dem Frantz-Scheider durch die vorangegangene Siebklassierung in dem nicht untersuchten Restbestand im Auffangbehälter unter dem letzten Sieb mit $38\ \mu\text{m}$ Maschenweite verloren ging. Der Verlauf der Partikelgrößenverteilung zeigt aber, dass auch die Stahlspäne eine gewisse Normalverteilung in der Spangröße durch die Häufung der Partikelanzahl in den genannten Korngrößen aufweisen. Damit lässt sich auf eine Normalverteilung der erzeugten Partikelgrößen in der Abspannung des WASS-Verfahrens schließen. Die gleichzeitige Häufung der Partikelanzahl in der Abrasivbruchstückenfraktion bei gewissen Korngrößen zeigt eine Kopplung dieser Verteilung aufseiten der Abrasion der Abrasivpartikel. Somit lässt sich hier auf eine gewisse Normalverteilung der Bruchmechanik der Abrasivpartikel während der Zerspannung im WASS-Verfahren schließen.

Das Retentat nach $90\ \text{min}$ Filterzeit zeigt dieselbe zunehmende Dichteverteilung um die Korngröße $42\ \mu\text{m}$ auf, wobei hier jedoch die Dichteverteilung um die Korngrößen $80\ \mu\text{m}$ und $125\ \mu\text{m}$ überwiegt. Durch die Analyse in Abbildung III.15 wurde gezeigt, dass diese Größen auf die Bruchstücke des Abrasivs zurückzuführen sind. Die Korngrößenverteilung dieses Retentats zeigt somit, dass sich im Retentatbett eine Vielzahl an Abrasivpartikeln angesammelt hat und diese zusammen als Retentat mit aus der Anlage abgeschieden wurden. Das Ergebnis ist somit eine sehr mit Abrasiv belastete Probe, wie rechts in Abbildung III.16 zu sehen ist.

Der Verlauf der Dichteverteilung zeigt weiterhin, dass durch die Siebung der Fraktionen vor der Frantz-Scheider-Analyse die ermittelte Häufung in der Dichteverteilung der Abrasivbruchstücke um die Partikelgröße $125\ \mu\text{m}$ (siehe Abbildung III.15) leicht verfälscht wurde. Werden somit Abbildung III.17 und Abbildung III.14 miteinander verglichen, zeigt sich, dass die Partikelgrößenhäufung durch Sieb mit $106\ \mu\text{m}$ Maschenweite in den zwei größenklassierten Fraktionen aufgeteilt wurde. Die ungesiebte magnetisch sortierte Fraktion aus den experimentellen Untersuchungen zeigen jedoch, dass sich die Häufigkeit an Partikeln in der Dichteverteilung im größeren Korngrößenbereich von etwa $150\ \mu\text{m}$ befindet.

Diese gewonnenen Erkenntnisse sind somit von großer Relevanz, da anhand der Dichteverteilungen der gewonnenen Fraktionen aus dem Separationsprozess eine schnelle und einfache Bewertung der Zusammensetzung der Retentate erlaubt wird. Es kann nämlich gezeigt werden, dass Retentate, die einen hohen Anteil an Partikeln um die Korngrößen $42\ \mu\text{m}$ und $68\ \mu\text{m}$ aufweisen, einen sehr großen Anteil an Stahlspänen beinhalten. Dahingegen weisen Retentate, die viel Anteil an Dichteverteilung um die Korngrößen $80\ \mu\text{m}$ und $150\ \mu\text{m}$ besitzen, einen sehr großen Anteil an Abrasivpartikeln auf. Somit wird eine Deutung der Reinheit und folglich der Güte des Retentats anhand der Partikelgröße mittels der einfachen Partikelgrößenmesseinrichtung ermöglicht.

Um diese Erkenntnisse auch auf das verbleibende Filtrat nach der Separation veranschaulichen zu können, wurde aus der Versuchsreihe mit 90 *min* Reinigungszyklus im Anschluss eine Untersuchung der Partikelgrößenverteilung des Filtrats im Suspensionsmischer durchgeführt. Die Dichteverteilung ist im Vergleich zu der gemessenen Partikelgrößenverteilung des unbehandelten Korngemisches und des frischen Abrasivs in der folgenden Abbildung III.19 zu sehen, wobei die charakteristischen Größen aus den vorhergegangenen Untersuchungen mit aufgeführt sind. Es zeigt sich, dass durch die Separation ein Großteil des Feinanteils aus dem Korngemisch durch die Magnetseparation entfernt wird. Dies lässt sich bei dieser Versuchsreihe sehr deutlich erkennen, da durch die lange Filterzeit ein signifikanter Anteil an Abrasiv mit abgeschieden wurde (siehe Abbildung III.16). Die abgeschiedenen Abrasivpartikel liegen dabei in einem Bereich von ca. 30 bis 200 μm , wobei eine Häufung an Partikeln in der Verteilung um die Größen 80 μm und 150 μm deutlich zu erkennen sind. Die abgeschiedenen Stahlpartikel hingegen liegen in einem Bereich von etwa 5 bis 100 μm , wobei eine Häufung an Partikeln um die Größen 42 μm und 68 μm erkennbar ist. Diese entsprechenden charakteristischen Größen sind somit auch im Korngemisch vor der Separation zu sehen, wie Abbildung III.19 verdeutlicht, wobei sich hier die 68 μm und 80 μm Häufungen nahezu überlappen.

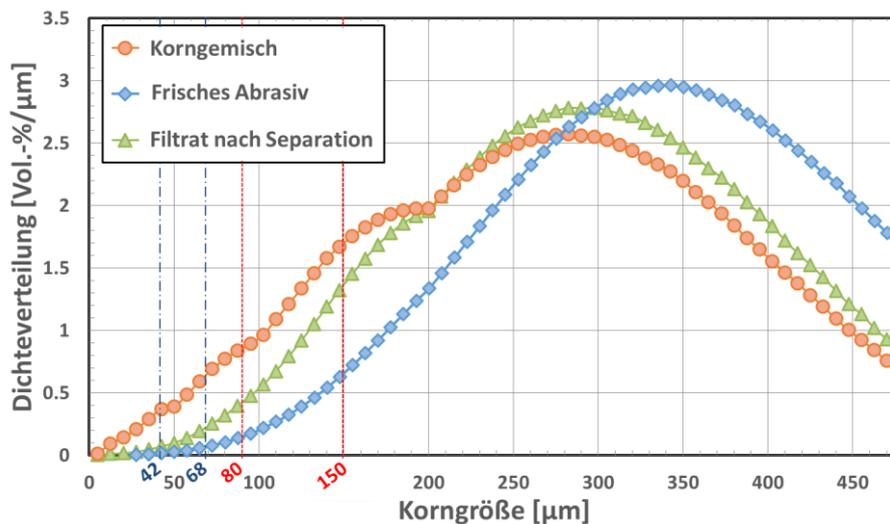


Abbildung III.19: Dichteverteilung des Filtrats im Vergleich zum Ausgangskorngemisch sowie frischen Abrasiv

Die Separation der einzelnen Fraktionen kann somit über die Dichteverteilung der Gemische vor und nach der Separation wahrgenommen werden. Aufgrund der geringen Menge an Stahlspänen im Korngemisch (ca. 0.16 *Volumen*-%, siehe Abschnitt III.3) ist, zumindest mit dem momentanen Messbereich von 5 bis 500 μm , nur eine grobe qualitative Beurteilung der Güte der Separation anhand der Retentate mit der Partikelgrößenverteilung möglich. Obwohl im Diagramm in Abbildung III.19 der Verlauf der Partikelgrößenverteilung um die Größen 42 μm und 68 μm kein merklicher Anteil mehr zu sehen ist, zeigt die folgende Abbildung III.20, dass durchaus noch Stahlpar-

tikel im Filtrat vorhanden sind.

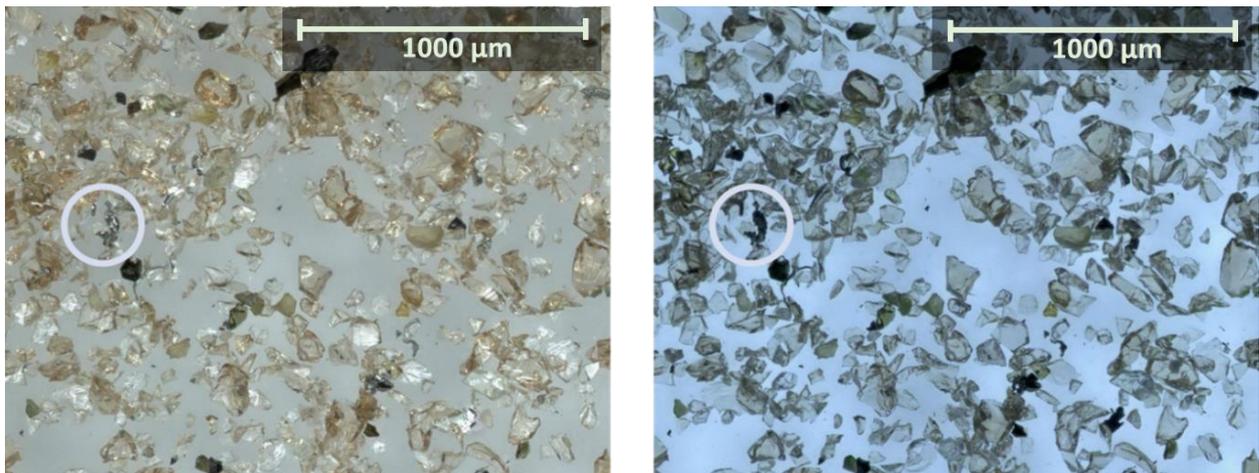


Abbildung III.20: Mikroskopische Aufnahme eines Stahlspans im Korngemisch nach der magnetischen Separation

Durch die geringe Menge ist dies jedoch in der Partikelgrößenverteilung des Filtrats nicht zu entnehmen (siehe Abbildung III.19). Ein Übertrag der Partikelgrößenverteilung zur Bewertung der Separation ist somit nur bei hoch konzentrierten Retentaten möglich. Die Bewertung der Filtrate ist durch die geringe Restmenge an Stahlspänen mit zu großer Unsicherheit behaftet, wodurch hier auf die aufwendigere Methode der ICP-EOS-Analyse zurückgegriffen werden muss.

III.3.4 Fazit der Untersuchungen

Die Erkenntnisse aus den detaillierten Analysen des Korngemisches sowie der Fraktionen nach der Separation lassen folgende Aussagen zu:

- Es befinden sich 0.16 *Volumen*-% Stahlanteile aus dem Schnittvorgang im Korngemisch (siehe Abschnitt III.3).
- Die Bestandteile des Abrasivs sind überwiegend paramagnetisch. Sie benötigen aufgrund der Suszeptibilität jedoch weitaus größere Feldstärken im Vergleich zur Stahlfraktion für eine magnetische Separation (siehe Tabelle III.3).
- Reine Stahlspäne zeigen eine große Häufung in der Dichteverteilung um die Partikelgrößen von 42 μm und 68 μm .
- Bruchstücke des Abrasivs weisen vergleichsweise Häufungen in der Dichteverteilung zu größeren Partikelgrößen in den Bereichen um 80 μm und 150 μm auf.
- Diese Unterschiede erlauben eine leichte und schnelle Beurteilung der Retentate mittels der Partikelgrößenmesseinrichtung (siehe Abschnitt II.2).
- Eine quantitative Beurteilung der Separationsgüte und somit der Reinheit der Filtrate ist nur durch eine aufwendige ICP-EOS-Analyse möglich.

IV Parameterbereiche und Versuchsplanung

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits gezeigt, dass die Separation der Stahlspäne aus dem Korngemisch mit der entwickelten Anlage erreicht werden kann, wobei die Ergebnisse reproduzierbar sind [24]. Die Durchführung von Vorversuchen zeigte jedoch, dass die Variation der Filterzeit zu signifikanten Veränderungen der durch die Anlage abgeschiedenen Retentate führt (siehe Abbildung III.16 und Abbildung III.17). Zur Erreichung des Ziels, eine Behandlung des WASS-Korngemisches und somit eine Abfallreduzierung zu erzielen, ist eine hohe Güte der Separation für das verbleibende Abrasiv (Filtrat) wichtig. Die bisherigen Untersuchungen zeigen aber, dass trotz erfolgreicher Abscheidung der Stahlspäne durchaus noch Stahlanteile im Filtrat verbleiben (siehe Abbildung III.20). In der Literatur ist zu dem hier angewendeten Stabmagnetfilter bisher keine grundlegende Untersuchung durchgeführt worden, die als Grundlage für einen sinnvollen Betrieb der Anlage führen könnte. Um daher ein Verständnis für die Abscheidecharakteristiken des Stabmagnetfilters zu erhalten und gleichzeitig eine grundlegende Richtungsweisung zur Verbesserung der Abscheidung im Sinne der Sekundärabfallbehandlung zu geben, werden hier experimentelle Untersuchungen mit der Separationsanlage durchgeführt. Im Folgenden werden die Einflussgrößen der Separation näher diskutiert.

IV.1 Zielgrößen

Der erste Schritt zur Realisierung einer statistischen Versuchsplanung für eine zielführende experimentelle Untersuchung ist die Wahl von Zielgrößen, da diese eine Bewertung des Ergebnisses erst ermöglichen [142]. Zielgrößen sollten quantifizierbar, voneinander abgegrenzt und un-

abhängig sein. Zusätzlich ist eine geringe Anzahl an Zielgrößen sinnvoll [143].

Während der Separation ist es zunächst erstrebenswert, eine möglichst große **Abscheidemenge** A_{ges} [Massen-%] zu erreichen, womit ein geringer Anteil an Stahlspänen im Filtrat erreicht werden soll. Sofern eine höhere Trenngüte im Filtrat des WASS-Sekundärabfalls erreicht wird (max. Reduktion des Stahlanteils), werden in diesem Zusammenhang höhere Anteile an Abrasiv im Retentat akzeptiert.

Für die Untersuchungen einer Filtratreinigung spielt die Abscheidemenge nur eine untergeordnete Rolle. Das Ziel des Vorhabens ist es, das Abrasiv so weit wie möglich von den Stahlspänen zu befreien. So lässt sich die Qualität der Ergebnisse durch die Effektivität der Separation ausdrücken. Diese kann durch die Einführung der **Separationseffizienz** E wie folgt quantifizierbar gemacht werden:

$$E = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \quad (IV.1)$$

wobei c_1 die Partikelkonzentration nach der Separation und c_0 die Anfangskonzentration am Stahlanteil im Korngemisch mit 0.16 *Volumen*-% darstellt (siehe Abschnitt III.3).

Ein weiterer Betrachtungspunkt, der sich aus den Analysen ergibt, ist die Reinheit des Retentats. Dies kann entscheidend werden, wenn die Separationsanlage zur Rückgewinnung des Stahls aus einem Korngemisch genutzt werden soll (z. B. zur Rezyklierung des Korngemisches in einer konventionellen Anwendung unter dem Aspekt sortenreiner Entsorgung). Als weitere, jedoch im Zusammenhang der vorliegenden Untersuchungen untergeordnete Zielgröße dient daher die **Reinheit des Retentats** R_S in Bezug auf den Stahlgehalt. Es wird somit eine Reduktion des Abrasivanteils im Retentat verfolgt, womit die Abscheidung von überwiegenden Stahlspänen erzielt werden soll.

Somit ergeben sich mit der Abscheidemenge, der Separationseffektivität und der Reinheit des Retentats drei quantifizierbare und voneinander abgegrenzte Zielgrößen.

IV.2 Einflussgrößen

Bei genauerer Betrachtung der Separationsanlage (siehe Abschnitt II.1.2) gibt es eine Vielzahl von Einflussgrößen, die die magnetische Separation der Stahlspäne aus dem Korngemisch beeinflussen kann. Diese umfassen die Variation der Geometrie, der Lage und des Betriebs der Komponenten im System, wie die Auflistung in der folgenden Tabelle IV.1 zeigt. Dabei wird auf die Hauptkomponenten der Anlage (der Suspensionsmischer und der Stabmagnetfilter) eingegangen, wobei die restliche Anlage unter dem Aspekt Kreislauf zusammengefasst wurde.

Tabelle IV.1 : Einflussgrößen der Separationsanlage

Suspensionsmischer	Stabmagnetfilter	Kreislauf
Geometrie: Größe, Form, Rührerart und Anzahl, Stromstörergöße und Anzahl	Geometrie: hydraulischer Durchmesser, Magnetstabanordnung, Filterform, Ausrichtung (quer/längs)	Geometrie: hydrostatische Höhe der Komponenten, Schlauchdurchmesser, -länge und -führung (gerade, gekrümmt, Radius der Umlenkungen)
Betrieb: Drehzahl, Position der Absaugung und des Rücklaufs	Betrieb: Filterzeit, Strömungsrichtung (oben/unten), Lage des Filters (horizontal, vertikal)	Betrieb: Strömungsgeschwindigkeit, Druckverlust, Strömungscharakteristik (z. B. pulsierend, gleichmäßig)
Suspension: Gesamtvolumen, Feststoffkonzentration, Zusammensetzung des Korngemisches, Mischungshomogenität	Magnetstäbe: Polanordnung und Anzahl, Anzahl der Stäbe, Variation der Magnetfeldstärke	

Es zeigt sich, dass eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten an der Anlage vorhanden wären, die einen Einfluss auf die Separation haben könnten. Die meisten dieser Einflussgrößen sind aber nur bedingt oder auch gar nicht veränderbar. Auch eine Untersuchung einer Vielzahl an Einflussgrößen wäre für die vorliegende Problemstellung nicht zielführend. Eine steigende Anzahl an Einflussgrößen hätte nämlich einen exponentiellen Aufwand der Untersuchungen zur Folge. Dabei sind die Ressourcen, insbesondere was die Menge an Korngemisch angeht, begrenzt und müssen entsprechend sinnvoll eingesetzt werden. Daher wird nachfolgend eine der wesentlichen Größen der jeweiligen Komponenten für die Untersuchungen herausgearbeitet.

Suspensionsmischer:

Im Suspensionsmischer ist ein großer Aufwand für die Gestaltung des Mixers erbracht worden, um ein gutes Mischverhältnis der Suspension zu erzielen. Die Geometrie- und Betriebsgrößen werden aus diesem Grund als konstant angesehen. Es wäre durchaus denkbar, eine Reduzierung der Drehzahl des Mixers zu untersuchen, um aus den unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Fraktionen Nutzen zu ziehen. Wie in Abschnitt III.3.2 beschrieben, existiert jedoch eine Überlappung der Partikelgrößenverteilung der Fraktionen, womit eine derartige Untersuchung innerhalb dieser Arbeit zunächst nicht weiter verfolgt wird.

Um eine große Menge an Korngemisch in kurzer Zeit behandeln zu können, ist eine Steigerung der zeitgleich behandelten Menge an Korngemisch von großer Bedeutung. Unter ökonomischen Gesichtspunkten ist daher für den hier vorgesehenen Batch-Prozess eine hohe Feststoffkonzentration im Suspensionsmischer anstrebenswert. Um die Folgen einer steigenden Feststoffkonzentration c_M [Massen-%] auf die Separationsgüte verfolgen zu können, wird daher diese Einflussgröße im Zusammenhang mit dem Suspensionsmischer in die Untersuchungen aufgenommen. Der Index M steht dabei für die massenbezogene Konzentration.

Stabmagnetfilter:

Wie bereits in Abschnitt III.3.3 gezeigt wurde, hat die Zeit, die der Filter ohne Spülung betrieben wird, einen signifikanten Einfluss auf die Menge an Retentat. Ist diese Filterzeit zu lange, führt dies zu einer Zusetzung und somit zu einer Fehlfunktion des Filters. Gleichzeitig bedeutet jedoch der Spülvorgang eine Unterbrechung des Separationsprozesses, was zu einer Verlängerung der Behandlungszeit führt. Die Zykluszeiten, in denen der Filter gespült wird, sollten eine gewisse kritische Länge zwar nicht überschreiten, aber gleichzeitig nicht zu kurz gewählt werden. Aus diesem Grund wird die Dauer der Filterzyklen Δt [min] als Einflussgröße innerhalb der vorliegenden Untersuchungen verfolgt. Des Weiteren sind hierfür weitestgehend kommerzielle Produkte für die spätere industrielle Umsetzung vorgesehen. Damit ist eine Weiterentwicklung in Bezug auf Geometrie und Sonderanpassungen des Stabmagnetfilters im Rahmen der Arbeit nicht vorgesehen, womit weitere Einflussgrößen des Filters konstant belassen werden.

Kreislauf:

Die Beschleunigung des Reinigungsprozesses wird neben der Erhöhung des Feststoffanteils in Suspension auch durch das Gesamtvolumen an Suspension, das zeitgleich behandelt wird, gesteigert. Voruntersuchungen im Hinblick auf die begrenzte vorhandene Menge an Korngemisch konnten zeigen, dass bei gleichbleibender Feststoffkonzentration Änderungen am Gesamtvolumen zwischen 50 l und 100 l an Suspension in der Separationsanlage keinen signifikanten Einfluss auf die Separation haben [144]. Die Grenzen einer Volumenvariation stellt der ordnungsgemäße Betrieb des Rührers dar. Die Auslegung des Suspensionsmischers ist für 160 l erfolgt. Dadurch, das gezeigt werden konnte, dass eine Reduktion des Suspensionsvolumens auf 50 l zu keinen signifikanten Änderungen in der Abscheidemenge führt, wurde im Zuge der begrenzten Menge an vorhandenem Korngemisch diese für die weiterführenden Untersuchungen gewählt und konstant belassen.

Eine weitere Beschleunigung des Reinigungsprozesses stellt die Erhöhung des Volumenstroms durch den Magnetfilter dar. Somit werden mehr Partikel pro Zeit durch den Filter geführt, durch die eine Beschleunigung der magnetischen Abscheidung der Stahlpartikel induziert werden könnte. Die Steigerung dieser Einflussgröße kann leicht durch die Leistungssteigerung der Pumpe erreicht werden. Es wird daher der Einfluss des Volumenstroms der Suspension \dot{V} [l/min] als weitere Einflussgröße untersucht. Die Förderung der hoch abrasiven Suspension stellte in der Entwicklung der Separationsanlage keine einfache Lösung dar, weshalb auf Membranpumpen zurückgegriffen wurde. Diese erzeugen eine pulsierende Strömung (siehe Abschnitt II.1.2), die nur bis zu einem bestimmten Punkt gedämpft werden kann, woraufhin hier kein weiterer Einfluss genommen wird. Auch weitere Variationen am Kreislauf (z. B. Druckverlustoptimierung, hydrostatische Höhe der Komponenten etc.) haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Separation.

Am verbleibenden Kreislauf wird somit nichts weiter variiert und dieser demzufolge als konstant betrachtet.

Hiermit ergeben sich drei Einflussgrößen die im Zuge dieser Untersuchungen weiter verfolgt werden. Diese sind:

- die Konzentration c_M [Massen-%] an Korngemisch, die in Suspension gebracht wird
- die Dauer des Filterzyklus Δt [min], bis eine Spülung erfolgt
- der Volumenstrom \dot{V} [l/min] im Kreislauf

IV.3 Faktoren und Faktorenstufen der Versuchsanlage

Nach der Bestimmung der möglichen Einflussgrößen für die geplanten Untersuchungen werden die drei genannten wichtigsten Einflussgrößen aus Abschnitt IV.2 für die vorgesehenen Untersuchungen als Faktoren aufgenommen. Für die Erstellung des Versuchsplans muss zur Variation für jeden Faktor eine Anzahl an Stufen festgelegt werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die ausgewählten Einflussgrößen einen nicht linearen Zusammenhang besitzen. Um diesen quantifizieren zu können, werden die Faktoren in die Mindestzahl von drei Stufen unterteilt [143], wobei die Steigerung der Werte linear erfolgt. Somit stellt die mittlere Stufe die Hälfte der Differenz der größten und kleinsten Stufe dar. Dies wird im Folgenden konkret erläutert.

Für die Konzentration ist bekannt, dass eine kontinuierliche Steigerung der Konzentration an Feststoff in Lösung dazu führt, dass sich Partikel gegenseitig signifikant beeinflussen. Dieser interpartikuläre Einfluss soll im Rahmen dieser Untersuchungen vermieden werden. Für homogen-disperse Suspensionen gilt dabei, dass diese einen Wert von 15 Massen-% nicht überschreiten dürfen [145]. Es wurde daher für die vorliegenden Untersuchungen ein maximaler Wert von 10 Massen-% vorgesehen. Um dabei eine gewisse Menge an Korngemisch behandeln zu können und einen spürbaren Unterschied zur Quantifizierung der Einflussgröße zu erhalten, wurde der minimale Wert der Konzentration auf 1 Massen-% gewählt. Da in den Untersuchungen drei Stufen für die Einflussgrößen vorgesehen sind, resultiert für die mittlere Stufe aus den Faktoren für die zweite Stufe der Faktor 5.5 Massen-%.

In den vorläufigen Untersuchungen wurde bereits ein möglicher Einfluss der Filterzeit auf die Separation untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass zwischen einer Filterzeit von 5 bis 20 min kein wesentlicher Unterschied in den Ergebnissen besteht [25]. Da kurze Filterzeiten einen wesentlich größeren Aufwand bedeuten ist die minimale Filterzeit auf 20 min begrenzt worden. Die in Abschnitt III.3.3 vorgestellte Untersuchung hat gezeigt, dass eine durchgehende Filterzeit von 90 min einen negativen Einfluss auf die Separation hat. Um trotzdem eine gewisse Steigerung der Filterzeit zu erreichen, wurde der maximale Wert für die Dauer des Filterzyklus

auf 60 *min* festgelegt. Dies hat auch den Hintergrund, dass die Ergebnisse im Verlauf der Arbeit in Abhängigkeit von der gesamten Filterzeit bewertet werden sollen. Um daher eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuchsreihen erreichen zu können, muss die Anzahl an Filterzyklen mit unterschiedlicher Filterzeit ein Vielfaches voneinander betragen. Dies wirkt sich insbesondere bei der Festlegung der zweiten Stufe dieser Faktoren aus, wenn eine lineare Steigerung der Faktoren erzielt werden soll. Hierfür sind einige Kombinationen möglich (z. B. 20/30/40 *min* bzw. 30/60/90 *min*), wobei der Abstand zwischen der kleinsten und größten Stufe zu gering wäre bzw. dies oft zu einer sehr großen Anzahl an Zyklen in den Versuchsreihen führen würde. Aus diesem Grund wurden die Stufen 20/40/60 *min* für die Filterzeit festgelegt. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird durch die Anzahl an Filterzyklen in den gewählten Stufen von 6, 4 bzw. 2 *Zyklen* erreicht. Somit wird durch $6 \cdot 20 \text{ min} = 3 \cdot 40 \text{ min} = 2 \cdot 60 \text{ min} = 120 \text{ min}$, die Gesamtfilterzeit von 120 *min* erreicht, was eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuchsreihen ermöglicht.

Der maximale Volumenstrom ist durch die maximale Leistung der Pumpe begrenzt. Da das eingesetzte Modell ein maximales Fördervolumen von 20 *l/min* erreicht, wurde der maximale Faktor auf 18 *l/min* begrenzt. Eine Reduktion des Volumenstroms hat dabei zur Folge, dass sich die Frequenz der Membranauslenkungen verringert (vgl. Abschnitt II.1.2). Diese Verringerung der Frequenz führt zu einer zunehmend stark pulsierenden Strömung. Um diesen Effekt zu begrenzen, wurde der Mindestwert des Faktors auf 4 *l/min* gewählt, woraus sich die mittlere Stufe von 11 *l/min* ergibt.

IV.4 Resultierender Versuchsplan

Nach der Ermittlung der Einflussgrößen und der Festlegung der Faktoren sowie der Faktorstufen wird ein Versuchsplan erstellt. Dabei wird auf eine statistische Versuchsplanung zurückgegriffen. Diese stellt sicher, dass zwischen einzelnen Versuchsreihen mehrere Parameter gleichzeitig verändert und keine einzelnen Parameter überwiegend durchgeführt werden. Somit werden Fehler bzw. äußere Einflüsse minimiert und eine ausgewogene Beurteilung erreicht [146]. Durch die ausgewogene Abdeckung der Parameterbereiche werden des Weiteren, durch mehrfache Nutzung der Ergebnisse, Effekte besser erfasst, wobei gleichzeitig eine Reduktion der Versuchsdurchführungen erreicht wird [147].

Da es grundlegend zu der vorliegenden Problemstellung noch keine bzw. wenig Vorkenntnisse gibt, die Versuchsdurchführungen über mehrere Tage sehr umfangreich sind und Korngemisch nur begrenzt zur Verfügung steht, bietet sich für die geplanten Untersuchungen des Stabmagnetfilters an, eine teilfaktorielle Versuchsplanung durchzuführen. Der Vorteil gegenüber einem Voll-

faktorplan ist die Effizienz, wobei mit minimalem Informationsverlust eine möglichst geringe Anzahl an Versuchen angestrebt wird. Die Grundlage hierfür bietet die Vernachlässigung von Wechselwirkungen von höherer Ordnung, was in 95 % der Fälle zulässig ist [148]. In der Regel sind nämlich Zweifachwechselwirkungseffekte wesentlich kleiner als die Haupteffekte, wodurch dreifache und höhere Wechselwirkungen bereits im Bereich der Streuung liegen und somit vernachlässigbar sind. Aus diesem Grund wird bei teilfaktoriellen Versuchsplänen auf die Auswertung dieser Wechselwirkungen höherer Ordnung verzichtet. Dadurch lässt sich die Anzahl an Versuchsreihen verringern.

Zur Erstellung des Versuchsplans kommt das kommerzielle Softwareprogramm *JMP* [149] der SAS Institute zur Anwendung, das ein Programm zur Analyse von Daten ist. Es bietet dabei ein sehr umfangreiches Modul zur Aufstellung eines Versuchsplans mit der Funktion „Design nach Maß“ (das sogenannte „*Design of Experiment*“ (DOE)). Durch statistische Grundlagen kommt hierzu die klassische statistische Versuchsplanung zur Anwendung, wobei auch die Reproduzierbarkeit durch Wiederholungen einzelner Versuchsreihen ermöglicht wird. Damit ergibt sich aus den Einflussgrößen, den Faktoren und deren Stufen sowie aus der Wiederholung von vier Versuchsreihen ein Versuchsplan, der in der folgenden Tabelle IV.2 zusammengefasst ist.

Tabelle IV.2 : Versuchsplan für die Untersuchungen

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_M [Massen-%]	1	5.5	1	1	5.5	10	1	10	5.5	10
Δt [min]	20	40	60	40	40	20	40	40	60	60
\dot{V} [l/min]	11	11	11	18	11	18	18	4	4	18
Nr.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
c_M [Massen-%]	1	10	5.5	1	5.5	1	10	1	1	
Δt [min]	40	40	20	40	40	20	40	20	40	
\dot{V} [l/min]	4	4	4	18	11	11	4	11	18	

Durch die statistische Versuchsplanung werden die Faktorstufen so verändert, dass kein Versuch in der Reihenfolge dem vor- und nachliegenden gleicht (Randomisierung). Dabei werden die Parameter statistisch verändert, um so bei dem teilfaktoriellen Versuchsplan trotz geringer Anzahl an Versuchen alle Faktorstufen abzudecken. Dadurch ergeben sich gegenüber einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit 27 Kombinationsmöglichkeiten lediglich zehn unabhängige Versuchsreihen.

Zur Veranschaulichung der somit entstehenden Versuchsmatrix ist in Abbildung IV.1 der Ver-

suchsplan für die drei untersuchten Parameter mit den jeweiligen drei Stufen grafisch dargestellt.

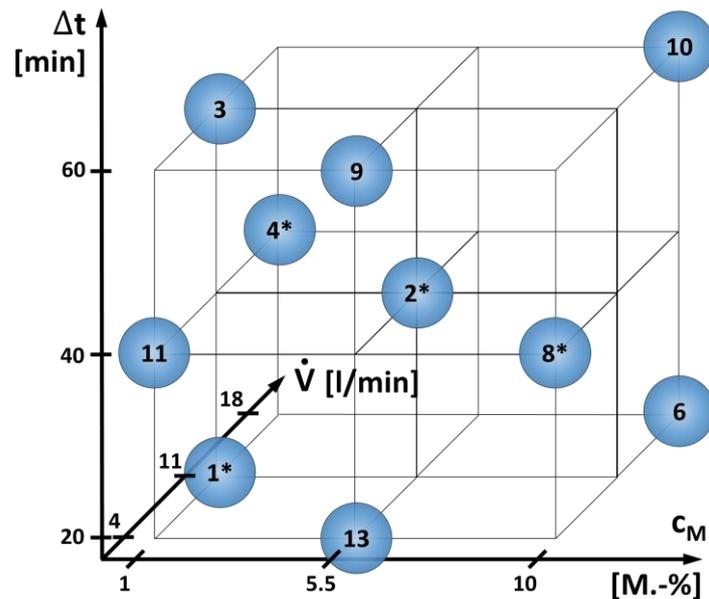


Abbildung IV.1: Grafische Darstellung des Versuchsplans für die drei untersuchten Faktoren mit jeweils drei Stufen (* Versuchsreihen mit Wiederholung)

Durch die grafische Darstellung in Abbildung IV.1 lässt sich die Vorgehensweise der teilfaktoriellen Versuchsplanung verdeutlichen. Es werden dabei die drei Faktoren (Konzentration c_M [Massen-%], Filterzyklus Δt [min] sowie Volumenstrom \dot{V} [l/min]) mit den jeweiligen gewählten Stufen im dreidimensionalen Raum gezeigt. Im Gegensatz zu der vollfaktoriellen Versuchsplanung, in der alle Punkte in der Matrix mit insgesamt 27 Versuchen besetzt wären, werden nur zehn unterschiedliche Kombinationen durch die angewendete DOE betrachtet. Die Wahl der Kombinationen wird dabei gezielt ermittelt, sodass trotzdem noch alle zweifachen Wechselwirkungen zwischen den Faktoren erfasst werden. Veranschaulichen lässt sich dies durch die zweidimensionale Betrachtung des Versuchsplans in den jeweiligen Ebenen. Dies wird grafisch in der folgenden Abbildung IV.2 verdeutlicht.

Durch die Betrachtung der einzelnen Ebenen der dreidimensionalen Versuchsmatrix aus Abbildung IV.1 kann in Abbildung IV.2 gezeigt werden, dass trotz der teilfaktoriellen Versuchsanzahlreduzierung trotzdem alle möglichen Wechselwirkungen der Faktoren durch die zehn unabhängigen Versuchsreihen abgedeckt werden. Lediglich bei der Betrachtung des Diagramm rechts in Abbildung IV.2 zeigt sich eine Einschränkung der Betrachtung durch die fehlende mittlere Stufe der Faktoren Volumenstrom bzw. Konzentration.

Die weiteren Neun Versuchsreihen der Versuchsplanung sind auf die einzelne Wiederholung bestimmter Versuchsreihen zurückzuführen. Dabei wurden vier Kombinationen zufällig ein zweite bzw. drittes Mal wiederholt, womit sich gewisse Versuchsreihen drei- bzw. viermal im Versuchs-

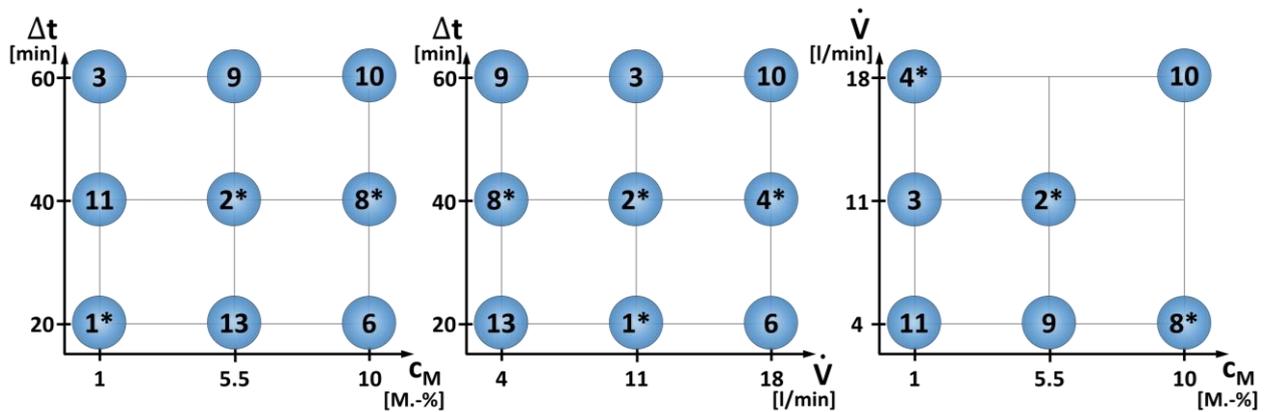


Abbildung IV.2: Grafische Abdeckung der zweifachen Wechselwirkung der Faktoren in der teilfaktoriellen Versuchsplanung (* Versuchsreihen mit Wiederholung)

plan wiederfinden. Aufgrund der Randomisierung der Reihenfolge der Versuchsreihen sind diese durch die DOE in der Reihenfolge der Versuchsdurchführung gestreut eingeplant, damit keine direkte Wiederholung der gleichen Parameter stattfindet. Aus diesem Grund sind in Abbildung IV.1 sowie in Abbildung IV.2 nicht alle Versuchsreihen aufgeführt. Es ist jeweils immer nur eine Kombination in der Nummerierung aufzufinden, die in den Abbildungen mit * gekennzeichnet wurden. Für die verbleibenden und somit wiederholten Versuchsreihen folgt, dass Versuchsreihe 16 und 18 die gleiche Faktorenkombination wie Versuchsreihe 1, Versuchsreihe 5 und 15 die gleiche Faktorenkombination wie Versuchsreihe 2, Versuchsreihe 7, 14 und 19 die gleiche Faktorenkombination wie die Versuchsreihe 4 sowie Versuchsreihe 12 und 17 die gleiche Faktorenkombination wie die Versuchsreihe 8 besitzen. Dieses Vorgehen dient der Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Anlage innerhalb des Versuchsplans und ist für die anschließende Bewertung notwendig. Somit führt dies zu einer gesamten Anzahl von 19 Versuchsreihen, die mit der Anlage aus Abschnitt II.1 und dem Korngemisch aus Abschnitt III in der gegebenen Reihenfolge aus Tabelle IV.2 durchgeführt werden.

V Untersuchungen und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die experimentellen Untersuchungen eingegangen und die Ergebnisse der Versuchsreihen vorgestellt. Um eine bessere Bewertung der Ergebnisse erlauben zu können, ist eine grundlegende Untersuchung der Strömungsverhältnisse im Filter unternommen worden, die in Abschnitt V.2 vorgestellt wird. Für die numerischen Untersuchungen kommt hierzu ein kommerzielles Programm zur Anwendung, wofür eine Verifikation mittels Modellierung eines experimentellen Aufbaus aus der Literatur durchgeführt wird.

V.1 Experimentelle Untersuchung

Zur Durchführung des Versuchsplans aus Abschnitt IV.4 wurden Checklisten für die Versuchsdurchführung erstellt [144]. Damit ist weitestgehend eine gleichbleibende Abwicklung der Vorgänge während der Versuchsdurchführung eingehalten worden. Aus den Vorgaben der Versuchsplanung ist bezogen auf die geplante Partikelkonzentration die entsprechende Menge m_0 an Korngemisch (500 g, 2750 g oder 5000 g) in den Suspensionmischer der Anlage gegeben worden. Hierzu wurden jeweils 50 l Wasser dem Gemisch hinzugefügt, womit im Mischer die Suspension für die jeweilige Versuchsreihe erzeugt wird. Der Filterkreislauf wird durch den Einsatz der Pumpe in Betrieb gesetzt. Dabei wird der vorgesehene Volumenstrom (4 l/min, 11 l/min oder 18 l/min) eingestellt. Die Filterzeit wird ab dem Moment, in dem die Permanentmagnetstäbe in den Filter gefahren werden gemessen und stellt somit den Start der Messung dar. Beim Erreichen der vorgesehenen Filterzeit (20 min, 40 min oder 60 min) wird auf den Spülkreislauf umge-

schaltet, wonach, durch Ausfahren der Magnetstäbe, die Spülung des Filters erfolgt. Die Entwässerung des Retentats erfolgt nach der Vorgehensweise aus Abschnitt II.1.2. Somit kann der Betrieb der magnetischen Filtration wieder aufgenommen werden. Diese Schritte werden dabei, je nach Filterzeit, entsprechend der Zyklenzahl wiederholt (6, 3, bzw. 2-Zyklen), was zu der Gesamtfilterzeit von 120 *min* pro Versuchsreihe führt.

Die Retentate, die aus dem Spülvorgang gewonnen werden, werden nach dem Abwiegen in kleine Glasbehälter abgefüllt (siehe rechts in Abbildung II.5). Zur Anwendung kommt eine Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 1 *mg* bei 120 *g* (siehe Anhang F). Das Gewicht des gewonnenen Retentats dient dabei zur Auswertung der Ergebnisse im folgenden Abschnitt (vgl. auch [144]). Die Retentate dienen auch für die weiterführenden Untersuchungen der Partikelgrößenverteilung sowie der chemischen Analysen im späteren Verlauf der Arbeit.

V.1.1 Massenbezogene Ergebnisse der Versuchsdurchführungen

In Abbildung V.1 werden alle 19 durchgeführten Versuchsreihen als Punkte im Diagramm gezeigt. Sie beziehen sich auf die Ergebnisse, die in Anhang B in Tabelle XII.1, Tabelle XII.2 und Tabelle XII.3 aufgelistet sind. Auf der Abszissenachse ist die Durchlaufdauer aufgetragen. Je nach festgelegter Filterzeit ergeben sich unterschiedlich viele Reinigungszyklen, die durch die Anzahl an Punkten pro Kurve ersichtlich sind. Der jeweilige Punkt gibt dabei die normierte Menge an Retentat m_i [*kg*] an, das sich nach der festgelegten Filterzeit im Filter angesammelt hat. Diese Menge wird daher auf der Ordinatenachse als massenbezogene Prozentzahl angegeben. Dabei wird die erzielte Abscheidemenge mit der ursprünglichen Ausgangsmenge m_0 (500 *g*, 2750 *g* oder 5000 *g*) normiert. Es gilt dabei für jeden Messpunkt A_i [*Massen-%*]:

$$A_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (\text{V.1})$$

Für das Diagramm in Abbildung V.1 wurden die Ergebnisse in der Legende übersichtshalber nicht nach der Versuchsnummerierung aufgelistet, sondern nach den festgelegten Parametern der jeweiligen Versuchsreihe. Dabei wird der Volumenstrom durch eine unterschiedliche Farbeinstellung der Linien und der Symbole (hellgrau, grau und schwarz), die Filterzeit durch unterschiedliche Linienarten (durchgezogen, mit Strichpunkten und gepunktet) sowie der beinhaltete Feststoffanteil durch unterschiedliche Symbole (Quadrat, Raute, Kreis) dargestellt. Die verbindenden Linien zwischen den Punkten dienen hierbei nur der Darstellung der zusammenhängenden Ergebnisse einer Versuchsreihe und geben keinen kontinuierlichen Verlauf der Abscheidung wieder.

Der Verlauf der Kurven zeigt, dass die Menge an Retentat bei allen Versuchsreihen bei der ersten Spülung am größten ist. Die darauffolgende Retentatsmenge nimmt aufgrund der Reduktion der

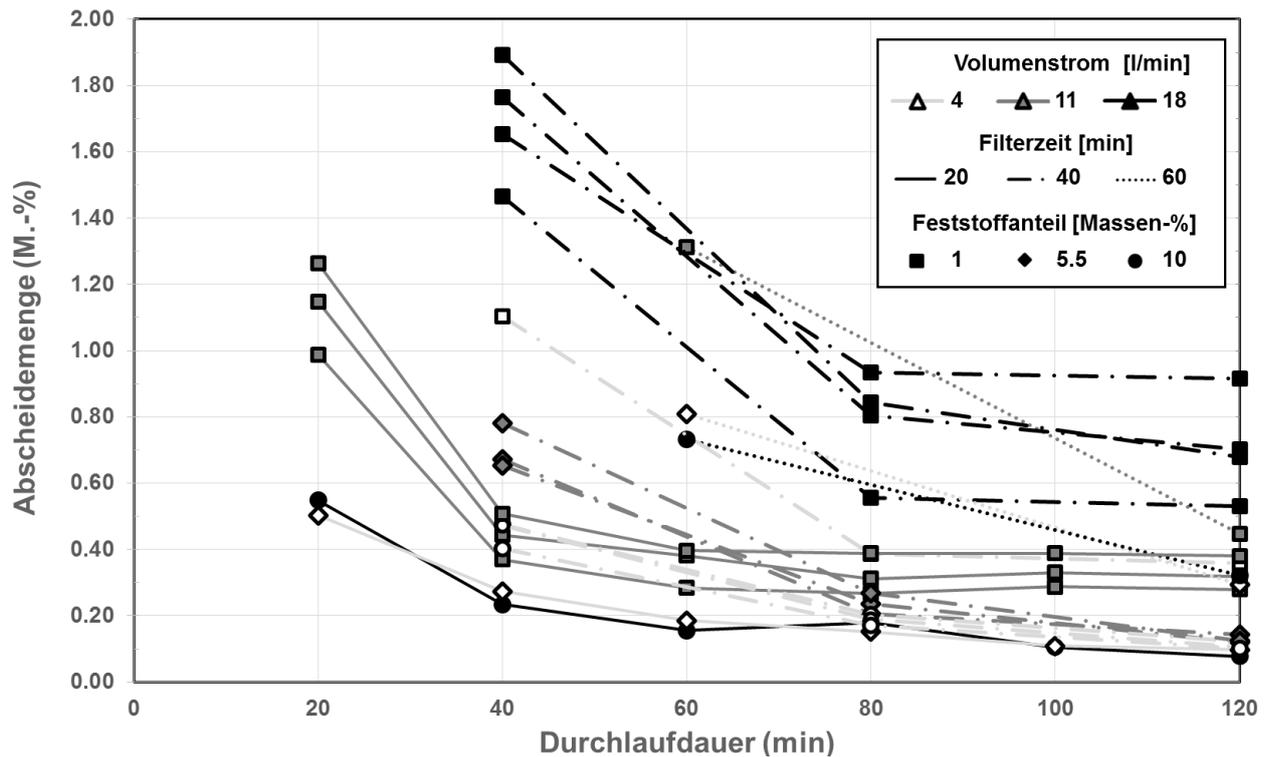


Abbildung V.1: Darstellung der experimentellen Ergebnisse

Konzentration an magnetisch abscheidbarem Material bei der zweiten Spülung signifikant ab. Bei längeren Filterzeiten und somit steigender Filterzyklenzahl zeigt sich ein Abklingen der abgeschiedenen Mengen, was besonders bei der Zykluszeit von 20 min ersichtlich ist. Während bei den Versuchsreihen mit 40 min und 60 min noch eine Abnahme der Menge im Diagramm erkennbar ist, zeigt sich bereits bei den Versuchsreihen mit 20 min ein gewisser asymptotischer Verlauf. Dies ist ein Erkenntnis, die auch in Vorversuchen nachgewiesen werden konnte. Dabei zeigten Versuchsreihen mit ähnlichen Parametern (1 Massen-%, 10 min, 10.4 l/min) nach 220 min Filterzeit, dass weiterhin Material abgeschieden wird [25]. Dies ist auf die Suszeptibilität des Abrasivs, insbesondere des Almandin (vgl. Abschnitt III.3.1), zurückzuführen, das einen großen Anteil des Abrasivs ausmacht.

Aus dem Diagramm ist weiter zu entnehmen, dass im Rahmen der hier untersuchten Parametergrenzen durchaus große Unterschiede in den erzielten Abscheidemengen zu erkennen sind. Dabei zeigt sich insbesondere, dass Versuchsreihen mit weniger Partikelkonzentration höhere Abscheideraten erzielen. Weitere Erkenntnisse sind bedingt durch die zeitgleiche Variation mehrerer Faktoren durch die teilfaktorielle Versuchsplanung, in dieser Anschauung jedoch nicht möglich und werden daher vertieft in Kapitel I bewertet.

Um die Streuung der Wiederholungen quantifizieren und somit auch das Diagramm in Abbildung V.1 übersichtlicher darstellen zu können, wird im Folgenden näher auf die Ergebnisse der Wiederholungen eingegangen.

Für die Untersuchung, ob die erzielten experimentellen Ergebnissen einer Normalverteilung unterliegen, wird im Folgenden eine Überprüfung mittels eines Quantil-Quantil-Plots (QQ-Plot) durchgeführt. Um dies erlauben zu können, muss zunächst eine gemeinsame vergleichbare Größe definiert werden. Durch die gewählten Filterzeiten von 20, 40 und 60 *min* wird eine Auswertung der Ergebnisse anhand der Gesamtabseidmengen nach 120 *min* erlaubt. Aus diesem Grund werden die jeweiligen Abscheidmengen der einzelnen Versuchsreihen A_i wie folgt aufaddiert:

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^n A_i \quad (V.2)$$

wobei n die Anzahl an Filterzyklen angibt (2, 3 bzw. 6). Dadurch werden die folgenden Ergebnisse für die Abscheidmenge A_{ges} nach insgesamt 120 *min* Filterzeit in der fünften Spalte der Tabelle V.1 erreicht.

Tabelle V.1 : Erzielte Ergebnisse nach 120 *min* Filterzeit

Versuchsreihe	c_M	Δt	\dot{V}	A_{ges}	$\overline{d_{50}}^*$
[-]	[Massen-%]	[min]	[l/min]	[Massen-%]	[μm]
1	1	20	11	2.93	78.81
2	5.5	40	11	1.02	48.64
3	1	60	11	1.76	62.97
4	1	40	18	2.55	91.33
5	5.5	40	11	1.01	44.02
6	10	20	18	1.30	55.74
7	1	40	18	3.50	76.17
8	10	40	4	0.77	30.05
9	5.5	60	4	1.10	32.86
10	10	60	18	1.05	40.52
11	1	40	4	1.85	41.05
12	10	40	4	0.80	32.51
13	5.5	20	4	1.32	40.03
14	1	40	18	3.41	64.70
15	5.5	40	11	1.17	46.64

* Die gemittelte mittlere Partikelgröße $\overline{d_{50}}$ wird in Abschnitt VI.2 behandelt, ist aber hier der Vollständigkeit bereits mit aufgelistet.

Versuchsreihe [-]	c_M [Massen-%]	Δt [min]	\dot{V} [l/min]	A_{ges} [Massen-%]	$\overline{d_{50}^*}$ [μm]
16	1	20	11	2.48	77.71
17	10	40	4	0.68	34.10
18	1	40	18	3.27	75.27
19	1	20	11	3.32	71.13

Für die weitere Betrachtung der erhaltenen Werte müssen zunächst die Ergebnisse aus den jeweiligen Wiederholungen gemittelt werden. Dies wird durch die Summe der Ergebnisse mit gleichen Parametern und durch die Anzahl an Wiederholungen erreicht. Damit reduzieren sich die Ergebnisse aus Tabelle V.1 auf zehn unabhängige Ergebnisse, die in folgender Tabelle V.2 zusammengefasst sind.

Tabelle V.2 : Erzielte Ergebnisse nach 120 min Filterzeit mit gemittelten Ergebnissen der Wiederholungen (mit * gekennzeichnet)

Versuchsreihe [-]	c_M [Massen-%]	Δt [min]	\dot{V} [l/min]	A_{ges} [Massen-%]	$\overline{d_{50}}$ [μm]
1*	1	20	11	2.91	77.26
2*	5.5	40	11	1.07	46.43
3	1	60	11	1.76	62.97
4*	1	40	18	3.18	75.83
6	10	20	18	1.30	55.74
8*	10	40	4	0.74	32.22
9	5.5	60	4	1.10	32.86
10	10	60	18	1.05	40.52
11	1	40	4	1.85	41.05
13	5.5	20	4	1.32	40.03

Zur Untersuchung ob diese Ergebnisse einer Normalverteilung unterliegen, wird hierzu ein QQ-Plot aus diesen gebildet [150]. Hierfür werden die erhaltenen Größen aus Tabelle V.2 zunächst anhand der erzielten Abscheidemenge nach insgesamt 120 min der Größe nach geordnet ($A_{ges_1} < \dots < A_{ges_t}$), wobei $t = 10$ die Anzahl an erhaltenen Ergebnissen darstellt. Zum weiteren Vorgehen wird die Normalverteilung hinzugezogen (siehe Funktion links in Abbildung V.2). Dabei wird mit $\sigma = 1$ und $\mu = 0$ die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung erhalten [151]. Mit

deren Hilfe wird anhand der theoretischen Verteilung für jede Abscheidemenge ein jeweiliger Erwartungswert zugewiesen, ein sogenanntes Quantil. Durch die Paarung dieser erwarteten Werte und der gemessenen Ergebnisse kann eine Verteilung der Ergebnisse grafisch dargestellt werden. Dies ergibt den sogenannten QQ-Plot, dargestellt als Diagramm rechts in Abbildung V.2. Dabei lässt sich eine Anordnung der erzielten Ergebnisse entlang der Winkelhalbierenden erkennen. Durch diese Orientierung der Werte zeigt sich, dass die Verteilung der Ergebnisse annähernd der idealen Normalverteilung folgt. Zur Interpretation der grafischen Untersuchung sei auf Beispiele in [152] sowie [150] hingewiesen. Es kann somit grafisch dargestellt werden, dass die Ergebnisse, näherungsweise einer Normalverteilung unterliegen. Um dies jedoch weiter belegen zu können, wird es noch im Folgenden rechnerisch überprüft.

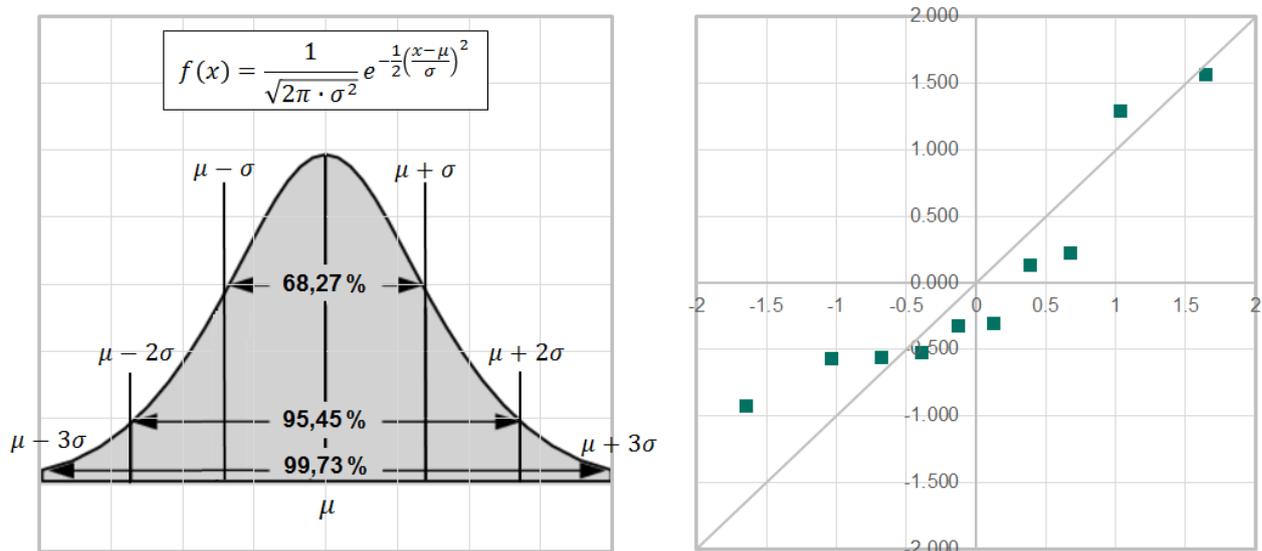


Abbildung V.2: Normalverteilung und QQ-Plot der Ergebnisse aus Tabelle V.1

Zur rechnerischen Überprüfung der Normalverteilung der Ergebnisse wird der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt. Dieser Test eignet sich gerade für Untersuchungen mit geringen Mengen an Werten [153], wie es hier der Fall ist. Analog zur Vorgehensweise im QQ-Plot werden die Werte wieder der Größe nach sortiert ($A_{ges_1} < \dots < A_{ges_t}$). Die Teststatistik W , zur Überprüfung der Abweichung der Varianz der Proben, lässt sich wie folgt für eine gerade Anzahl an Werten berechnen [154]:

$$W = \frac{\left(\sum_{j=1}^{t/2} a_{t/2+1-j} (A_{ges_{t+1-j}} - A_{ges_j}) \right)^2}{\sum_{j=1}^t (A_{ges_j} - \overline{A_{ges}})^2} \quad (V.3)$$

wobei $\overline{A_{ges}}$ den Mittelwert der erzielten Werte darstellt. Die Werte a_{t+1-j} sind abhängig von der Anzahl der untersuchten Werte und wurden tabellarisch durch Shapiro und Wilk in [154] aufgelistet. Für die hier betrachteten zehn Werte ergibt sich folgende Zuordnung:

Tabelle V.3 : a_{t+1-j} des Shapiro-Wilk-Tests für die Untersuchung von zehn Werten

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.5739	0.3291	0.2141	0.1224	0.0399

Mit diesem Vorgehen lässt sich für die Teststatistik W ein Wert von 0.845 ermitteln. In Abhängigkeit von der Anzahl der untersuchten Werte ist in [154] durch Shapiro und Wilk tabellarisch eine Umrechnung des Werts in den Signifikanzwert (p-Wert) möglich. Durch Interpolation wird für das gegebene Problem ein p-Wert von 0.0555 erhalten. Da der p-Wert > 0.05 liegt, wird somit die Nullhypothese erfüllt [142], [147], wodurch eine Normalverteilung der Ergebnisse vorliegt [149], [155]. Diese Feststellung erlaubt im Folgenden die Vereinfachung des Diagramms in Abbildung V.1 in Bezug auf die wiederholten Versuchsreihen.

Wie in der statistischen Versuchsplanung beschrieben, sind vier Einstellungen in diesen Untersuchungen jeweils 2- bzw. 3-mal wiederholt worden. Um hier die Reproduzierbarkeit der Anlage besser einschätzen zu können, wurden im linken Diagramm der folgenden Abbildung V.3 die sechs nicht wiederholten Versuchsreihen ausgeblendet. Dadurch ist eine Gruppierung der Versuchsreihen mit gleichen Parametern durch die gleiche Codierung aus der Legende besser ersichtlich. Aus der statistischen Versuchsplanung wurden zufällig drei Einstellungen mit jeweils 40 Minuten Filterzeit und jeweils eine mit 20 Minuten Filterzeit wiederholt. Dabei unterscheiden sich die drei Versuchsreihen mit 40 Minuten Filterzeit dahingehend, dass eine zunehmende massenbezogene Abscheidemenge mit zunehmendem Volumenstrom bei abnehmendem Feststoffanteil erreicht wird. Dabei zeigt sich, dass mit zunehmender massenbezogener Abscheidemenge auch die Streuung der Ergebnisse steigt.

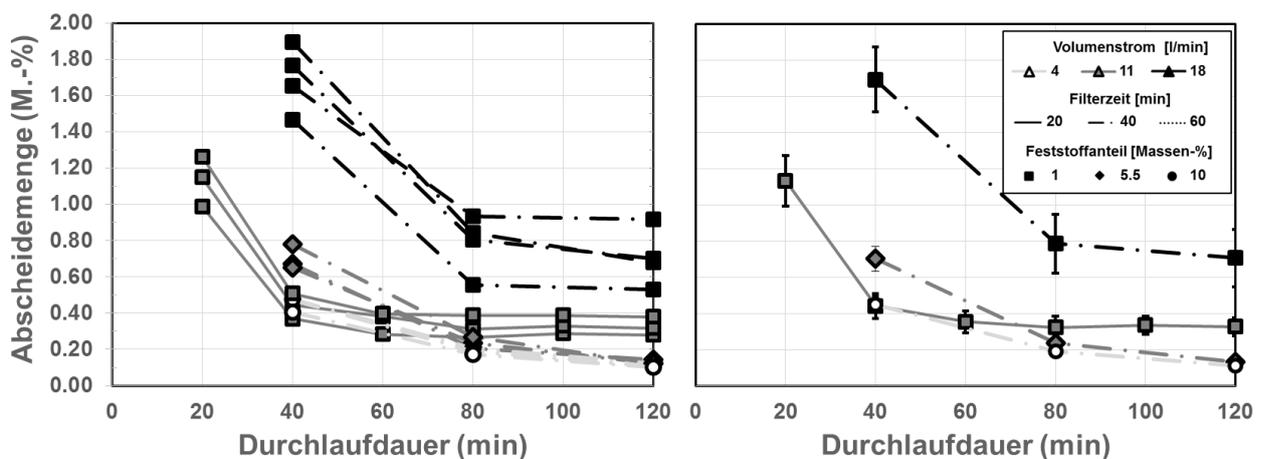


Abbildung V.3: Verteilung der experimentellen Ergebnisse mit Wiederholung

Um die Streuung quantifizieren zu können, wurde anhand der Ergebnisse die jeweilige Standardabweichung s gebildet. Diese ist wie folgt definiert [151]:

$$s^2 = \frac{\sum_{l=1}^k (A_l - \bar{A})^2}{k - 1} \tag{V.4}$$

Dabei entspricht die Laufkonstante k der Anzahl an wiederholten Messwerten A_l mit gleichen Parametern und somit der Anzahl an Wiederholungen, wobei der daraus ermittelte Mittelwert \bar{A} wie folgt gegeben ist [151]:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{l=1}^k A_l}{k} \tag{V.5}$$

Auch in diesem Zusammenhang ist ein Shapiro-Wilk-Test der einzelnen Werte durchgeführt worden, wobei durchgehende Signifikanzwerte (p-Wert) von nahe 1 erreicht wurden (0.98 – 1.0). Durch diese geltende Annahme einer Normalverteilung der Ergebnisse wird das Diagramm links in Abbildung V.3 durch das Bilden des jeweiligen Mittelwerts der Wiederholungen vereinfacht, was zum rechten Diagramm in der Abbildung führt. Um die Streuung der Ergebnisse dabei berücksichtigen zu können, wurde die aus den Wiederholungen ermittelte Standardabweichung als Fehlerbalken angegeben. Dabei sind Standardabweichung der Ergebnisse zwischen 0.01 Massen-% und 0.18 Massen-% ermittelt worden. Im Verhältnis zu den gemittelten Ergebnissen belaufen sich diese auf 9 bis maximal 23 % Abweichung. Die mittlere Standardabweichung aller gemessenen Abscheidemenge beläuft sich dabei auf 0.07 Massen-%. Die wiederholten Versuchsreihen mit der größten Abweichung untereinander haben als Parameter die geringste Partikelkonzentration und den höchsten Volumenstrom. Diese besitzen zeitgleich auch die größten

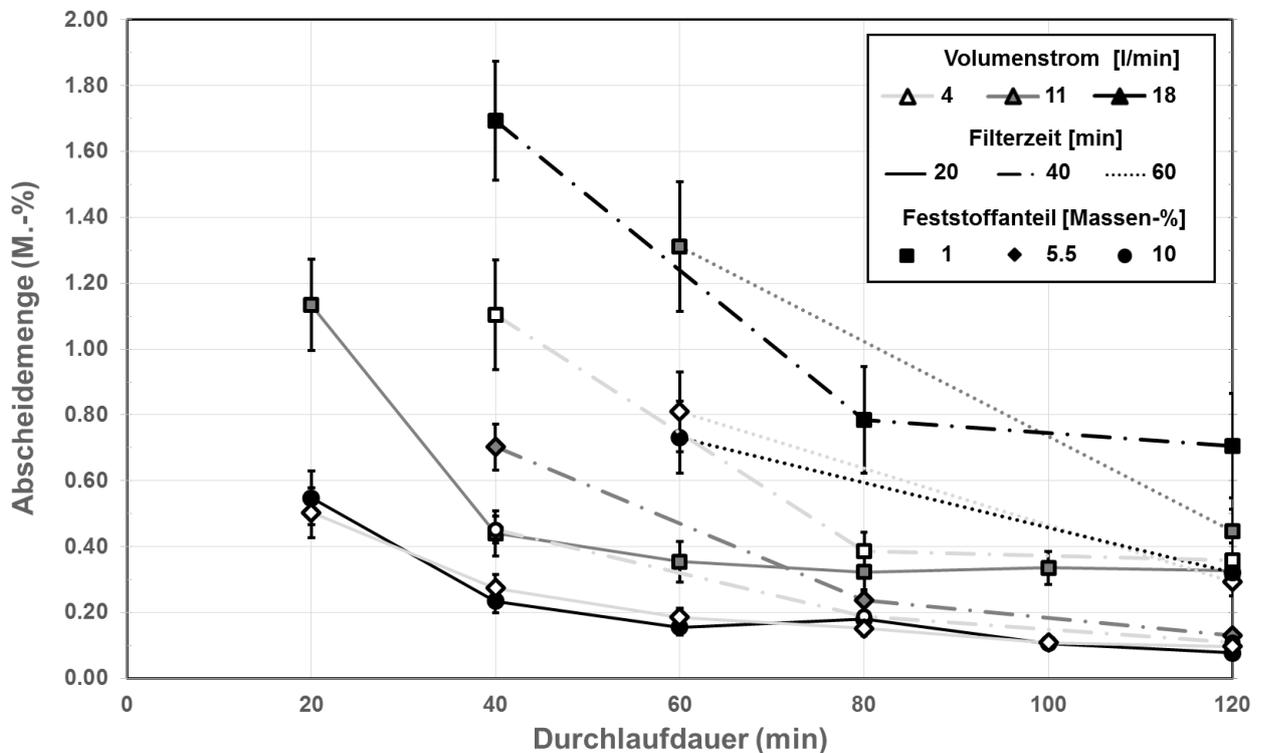


Abbildung V.4: Massenbezogene Darstellung aller experimentell ermittelten Ergebnisse

Abscheidemenge in Abhängigkeit von der Ausgangsmenge (siehe links in Abbildung V.3). Dabei weisen diese dreimal wiederholten Versuchsreihen (Versuchsnr. 4, 7, 14, 19 mit 18 l/min, 40 min Filterzeit und 1 Massen-% Feststoffanteil) als einzige Ausnahme eine starken Streuung der Ergebnisse auf. Dabei sind Standardabweichungen von 0.16 bis 0.18 Massen-% ermittelt worden. Die restlichen Wiederholungen liegen dabei zum Vergleich alle um ca. 0.01 bis maximal 0.07 Massen-%. Prozentuell gesehen ergibt sich für die Standardabweichung bezogen auf die erzielten Ergebnisse im Durchschnitt ein Betrag von ca. 13 % Abweichung. Es wird daher für die verbleibenden sechs nicht wiederholten Reihen eine konservative Fehlerabschätzung von 15 % der erhaltenen Messergebnisse getroffen [151]. Somit ergibt sich für die Darstellung der erzielten massenbezogenen Ergebnisse das Diagramm in Abbildung V.4.

V.1.1.1 Fazit der Untersuchungen

Bei der experimentellen Untersuchung der Anlage wurden 19 Versuchsreihen durchgeführt. Dabei haben zehn Reihen unterschiedliche Parametereinstellungen (siehe DOE in Abschnitt IV.4) wovon 4 Reihen jeweils 2- bis 3-mal wiederholt wurden. Die Ergebnisse zeigen je nach Parametereinstellung große Unterschiede, bezogen auf die damit erzielte Abscheidemenge. Es konnte dabei eine Normalverteilung der Ergebnisse nachgewiesen werden. Die Wiederholungen zeigen eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, wobei Abweichungen zwischen den wiederholten Reihen mit Zunahme der Abscheidemenge steigt.

V.1.2 Partikelgrößenbezogene Ergebnisse der Versuchsdurchführungen

Zur Bewertung der Zusammensetzung der Retentate aus den einzelnen Versuchsreihen wurden alle Retentate mit der Partikelmesstechnik aus Abschnitt II.2 untersucht. Die einzelnen Partikel-

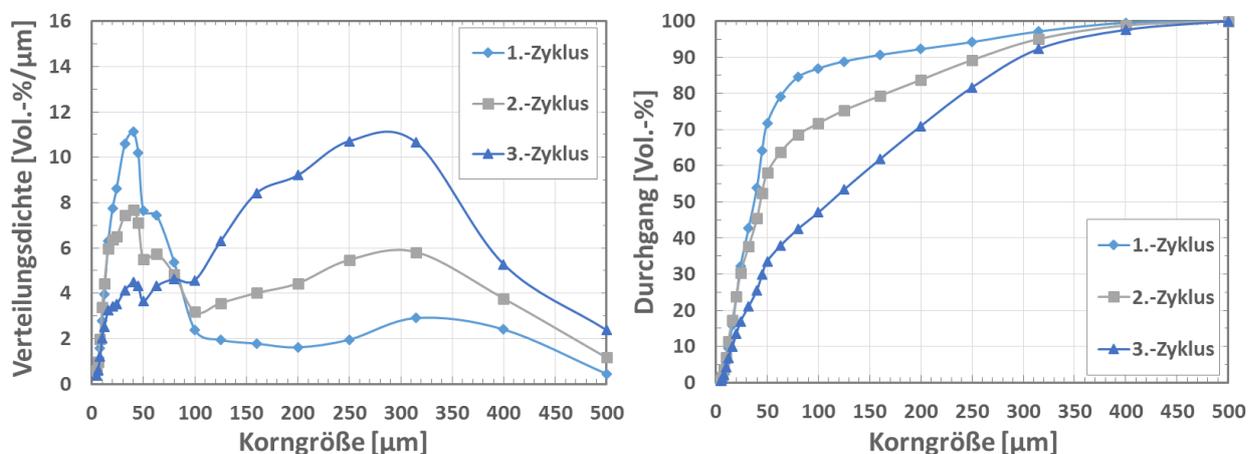


Abbildung V.5: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 2

größenverteilungen sind dabei der Vollständigkeit in Anhang C aufgelistet. Exemplarisch wird hier die Partikelgrößenverteilung der Versuchsreihe 2 in der Abbildung V.5 dargestellt.

Dabei wurden die Partikelverteilungen der Versuchsreihe 2 (5.5 Massen-%, 40 min und 11 l/min) ausgewählt, da sie in den Partikelgrößenverteilungen der Retentate aus den unterschiedlichen Filterzyklen große Unterschiede aufweist. Mit den Erkenntnissen aus Abschnitt III.3.3 ist dabei in der jeweiligen Partikelgrößenverteilung ersichtlich, dass sich in den Retentaten, insbesondere in dem 3. Zyklus, ein sehr großer Anteil an Abrasivpartikeln befindet. Dies wirkt sich auch auf die ermittelte mittlere Partikelgröße aus, wie aus dem Diagramm links in Abbildung V.5 abzulesen ist. Dieser Unterschied kann auch in den BSE-REM-Bilder der einzelnen Retentate in folgender Abbildung V.6 gesehen werden. Verglichen mit den Aufnahmen des Korngemisches rechts in Abbildung III.9 zeigt sich hier der deutliche Unterschied in der Partikelgröße zwischen den Retentaten und dem ursprünglichen Korngemisch. Durch die deutliche Konzentrationserhöhung an Stahlspänen sind diese in den folgenden Aufnahmen auch besser zu erkennen. Die Form ist dabei deutlich unterschiedlich zu den Abrasivpartikeln. Größere Stahlspäne haben dabei die klassische längliche und schmale Spanform, kleinere Partikel ähneln eher Fetzen. Diese unterschiedliche Form verglichen mit den Abrasivpartikeln führt auch dazu, dass der Extinktionszähler die Stahlspäne bei der Messung deutlich kleineren Äquivalentsdurchmessern zuweist. Somit heben sich die Stahlpartikel deutlicher in der Partikelgrößenverteilung ab, indem sie kleineren Äquivalentsdurchmessern zugeordnet werden. Damit ist letztendlich auch eine Unterscheidung der Fraktionen durch diese Methode möglich. Dies ist für die Untersuchung der Zusammensetzung des Gemisches im Retentat zwar von Vorteil, muss aber bei der Bewertung der Partikelgrößenverteilung des Korngemisches berücksichtigt werden.

Obwohl bei der Einwiegung mit bloßem Auge in den Retentaten fasst nur Stahlpartikel zu erkennen sind, zeigen die BSE-REM-Bilder, dass auch eine Vielzahl an Abrasivpartikeln im Retentat zu finden ist. Neben den großen Partikeln, die auch ohne Vergrößerung leicht zu erkennen sind, befindet sich auch eine Vielzahl an kleineren Fragmenten des Abrasivs im Gemisch. Mit zunehmender Zykluszahl werden dabei größere Partikelgrößen in den vorliegenden Aufnahmen ersichtlich. Im Gegensatz zu den Mikroskopaufnahmen der Fraktionen aus dem Frantz-Scheider (siehe Abschnitt III.3.1) ist hier optisch leider keine Zuordnung der einzelnen Mineralien möglich. Dies verdeutlicht jedoch, dass durch die Überlappung der Größenverteilung der Stahlspäne und der Abrasivpartikel sowie durch die naheliegende Suszeptibilität der hier untersuchten paramagnetischen Elemente eine magnetische Separation von einem Teil der beiden Fraktionen (Abrasiv und Stahl) erreicht wird. Im Retentat des ersten Filterzyklus überwiegt jedoch eindeutig der Stahlan teil, der dann zunehmend abnimmt.

Die Partikelgrößenanalyse erlaubt dabei zwar eine schnelle und unkomplizierte Deutung der Zusammensetzung des Korngemisches aus den Retentaten, wobei aber keine genaue Quantifizie-

zung des Stahlgehalts in der Mischung ermittelt werden kann. Es wurden daher die Retentate aus den drei Filterzyklen zusätzlich einer ICP-EOS-Analyse unterzogen. Analog zu der Bestimmung des Stahlgehalts im Korngemisch in Abschnitt III.3 erfolgte auch hier die Ermittlung der Stahlmenge in den Retentaten durch den Nickelgehalt im Gemisch. Das erste Retentat, links in Abbildung V.5, beinhaltet dabei ca. 71 Massen-% an Stahlgehalt, wobei das zweite und dritte Retentat jeweils ca. 38 Massen-% bzw. ca. 19 Massen-% besitzt. Um einen Vergleich mit den Ergebnissen der Partikelgrößenverteilung erlauben zu können, wird aus den Größenverteilungen der Retentate jeweils der mittlere Durchmesser d_{50} ermittelt. Dies erfolgt mit der vorgestellten Vorgehensweise am Schluss von Abschnitt III.1 (siehe Gleichung (III.1) und (III.2)). Die somit ermittelten mittleren Partikelgrößen ergeben jeweils 37,0, 43,2 bzw. 111,0 μm . Der Vergleich dieser Werte mit den Stahlgehalten aus der ICP-EOS-Analyse zeigen eindeutig, dass die Schlussfolgerungen, die in Abschnitt III.3.3 gezogen wurden, schlüssig sind und somit eine Zuordnung des Stahlge-

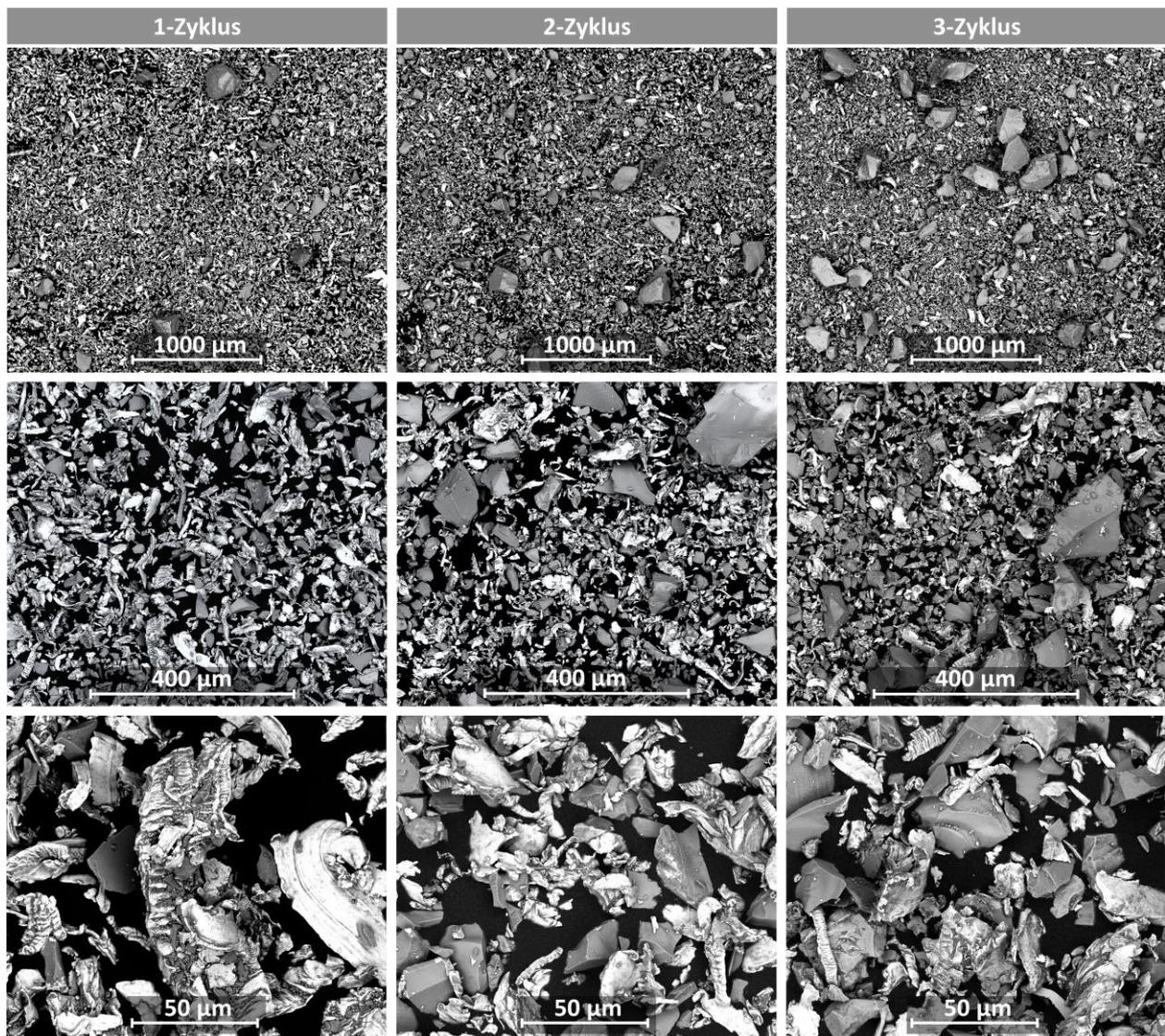


Abbildung V.6: BSE-REM-Aufnahmen des Retentats aus dem 1. Zyklus (links), 2. Zyklus (mittig) und 3. Zyklus (rechts) der Versuchsreihe 2 in steigender Auflösung

halts durchaus mithilfe der Partikelgrößenverteilung für das WASS-Korngemisch möglich ist.

Zur Bewertung der Reinheit des Retentats wird daher aus allen ermittelten Partikelgrößenanalysen jeweils die mittlere Partikelgröße ermittelt. Die damit erhaltenen Messwerte sind der Vollständigkeit halber in Anhang D zu finden. Sie ermöglichen die Darstellung aller Ergebnisse analog zu der massenbezogenen Bewertung in Abbildung V.4. Dabei wurde aus den Wiederholungen analog zu der Vorgehensweise der massenbezogenen Ergebnisse die Standardabweichung als Fehlerbalken gebildet. Das resultierende Diagramm ist in Abbildung V.7 zu sehen. Auch in dieser Bewertung zeigt sich, dass eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu beobachten ist. Die Standardabweichung der Ergebnisse ist dabei vergleichbar mit denen in den massenbezogenen Bewertungen, wobei eine mittlere Abweichung über alle Wiederholungen von 15 % ermittelt wurde. In Anhang D sind der Vollständigkeit halber auch die einzelnen Retentate der unterschiedlichen Filterzyklen der Wiederholungen verglichen worden. Insbesondere in den Versuchsreihen 8, 12 und 17 ist eine bemerkenswerte Übereinstimmung der Partikelgrößenverteilung der einzelnen Retentate erkennbar.

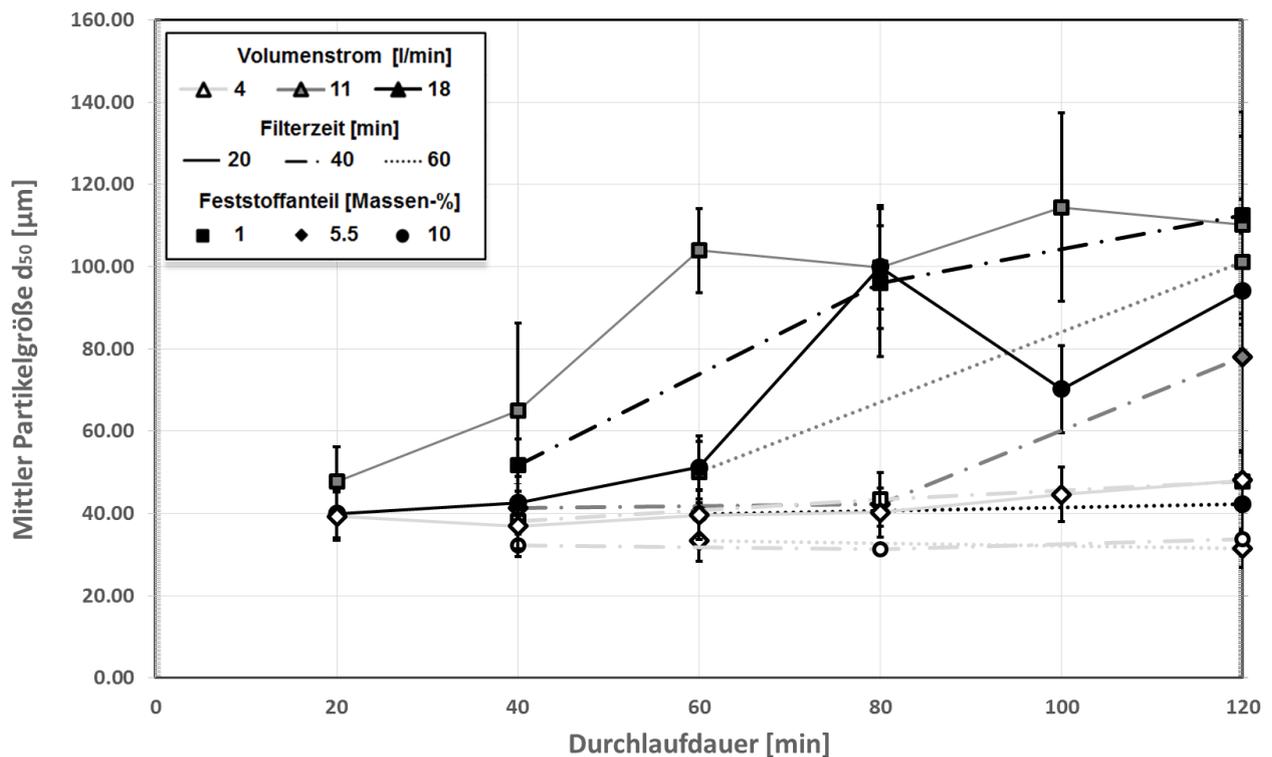


Abbildung V.7: Mittlere Partikelgröße d_{50} der Retentate aus den einzelnen Versuchsreihen inklusive Standardabweichung aus den Wiederholungen

Das Diagramm in Abbildung V.7 zeigt somit, dass bei allen Versuchsreihen im ersten Filterzyklus ein Retentat mit sehr kleiner mittlerer Partikelgröße erreicht wird, was auf einen hohen Stahlgehalt deutet und bei der Einwaage der Retentate nach der Trocknung auch beobachtet werden konnte. Auffällig im Diagramm in Abbildung V.7 ist, dass bei Versuchsreihen mit erhöhtem Volumenstrom

(teilweise 11 *l/min* und 18 *l/min*) eine relativ starke Zunahme der mittleren Partikelgröße erkenntlich ist. Versuchsreihen mit geringem Volumenstrom weisen im Gegensatz eine fast konstante mittlere Größe der abgeschiedenen Partikel über die Filterzyklen auf.

Um die Versuchsreihen bezogen auf die Partikelgröße besser bewerten zu können, wird analog zu der massenbezogenen Bewertung ein Vergleich über die gesamte Filterzeit von 120 *min* durchgeführt. Hierfür wird ein repräsentativer Wert für die gesamte Versuchsreihe durch Mittelung der einzelnen mittleren Partikelgrößen erreicht. Um dabei die abnehmende Menge an Retentat über die Zyklen berücksichtigen zu können, sind diese wie folgt über die Abscheidemenge gewichtet worden:

$$\overline{d_{50}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A_{ges}} d_{50_i} \quad (\text{V.6})$$

wobei A_{ges} aus Gleichung (V.2) folgt. Die resultierenden Werte sind bereits in Tabelle V.1 bzw. zur weiteren Analyse der Versuchsreihen, unter Berücksichtigung der Wiederholungen, mit dem resultierenden Mittelwert in Tabelle V.2 enthalten.

V.1.2.1 Fazit der Untersuchungen

Gewonnene Retentate aus Versuchsreihe 2 wurden quantitativ durch ICP-EOS-Analysen und qualitativ durch BSE-REM Aufnahmen untersucht. Es kann dabei ein Zusammenhang mit der jeweiligen Partikelgrößenverteilung der Retentate festgestellt werden (siehe. Abschnitt III.3.3). Durch die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung aller gewonnenen Retentate lassen sich, wie in dem vorherigen Abschnitt, große Unterschiede je nach Parameterkonstellation der Versuchsreihe feststellen, wobei Wiederholungen auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse schließen lassen. Abweichungen der Ergebnisse steigen dabei mit der Zunahme der mittleren Partikelgrößenverteilung der Retentate.

V.2 Numerische Untersuchungen

Um eine bessere Bewertung der experimentellen Ergebnisse durchführen zu können, werden im Rahmen einer numerischen Simulation die Strömungsverhältnisse im Stabmagnetfilter untersucht. Dabei kommt die kommerzielle Software STAR-CCM+ [156] zur Anwendung.

Um eine Verifizierung der Anwendung der Simulationssoftware erlauben zu können, wird eine experimentell untersuchte Mehrphasen-Rohrströmung simuliert. Dabei werden die modellierten Ergebnisse der Simulation mit gemessenen Werten aus der Literatur verglichen und bewertet. Im Anschluss erfolgt mit den gewonnenen Erkenntnissen die numerische Modellierung des Stab-

magnetfilters.

V.2.1 Numerische Untersuchung einer Mehrphasen-Rohrströmung

Zur Verifikation des Vorgehens der numerischen Simulation des Stabmagnetfilters wird zunächst eine Mehrphasenrohrströmung untersucht. Dies hat den Hintergrund, dass der Zulauf des Stabmagnetfilters über ein Rohr erfolgt, das mit dem angebrachten Flansch verbunden ist. Darüber hinaus konnte in der Literatur eine experimentelle Untersuchung einer partikelbeladenen Rohrströmung gefunden werden, die den Charakteristika der Suspension des Korngemisches der experimentellen Untersuchungen sehr nahe ist. Im Folgenden wird kurz auf den experimentellen Aufbau dieses Experiments von Kameyama et al. [157] eingegangen.

Die Untersuchungen von Kameyama et al. verfolgen das Ziel, ein besseres Verständnis für die Partikel- und Fluid-Interaktion in Suspensionen gewinnen zu können. Insbesondere wird dabei der Einfluss der Schwerkraft auf Partikel und somit auf die Strömung untersucht. Hierzu kommt die einfache Geometrie eines Rohres und Wasser als Trägermedium zur Anwendung, wobei im selben Aufbau die Strömung der Suspension jeweils in Richtung der Schwerkraft und entsprechend einmal entgegen erfolgt. Hierbei werden sowohl die Geschwindigkeit der Partikel in Suspension als auch das Trägermedium Wasser gemessen. Zur Anwendung kommt ein System zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeit („Particle Tracking Velocimetry (PTV)“). Hierzu wird im Rohr ein 2 mm breiter Laserstrahl genutzt. Die Geschwindigkeit der Suspension wird mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Geschwindigkeit des Fluids wird dabei durch Zugabe von sehr kleinen Glaspartikeln mit der gleichen Dichte des Wassers und einem Fluoreszenzmittel visualisiert. Für die disperse Phase werden jeweils Glaspartikel mit einem Durchmesser von $d_p = 625 \mu\text{m}$ verwendet, die eine Dichte von $2.59 \text{ kg}/\text{dm}^3$ besitzen. Die abwärts- und aufwärtsgerichtete Teststrecke beträgt jeweils 1500 mm mit einem Rohrdurchmesser von $D = 26 \text{ mm}$. Der experimentelle Aufbau wird in der Abbildung V.8 gezeigt.

Aus einem mechanischen Zugabesystem **(1)** und **(2)** werden die Partikel kontrolliert in den oberen Tank **(3)** zugeführt. Dabei wird eine Partikelkonzentration von $c = 0.6 \text{ Volumen-\%}$ konstant gehalten. Wie beim Aufbau zur Partikelmessung (siehe Abschnitt II.2) wird die Strömung in der Anlage durch die geodätische Höhendifferenz von zwei Behältern realisiert. Dabei werden die Partikel kurz vor dem Auslauf aus dem oberen Tank **(3)** dem Wasser injiziert, wodurch die Suspension in der Teststrecke erzeugt wird. Zur Gewährleistung einer eingelaufenen Strömung erfolgt die Geschwindigkeitsmessung des Fluids und der Partikel nach einer Strecke von $x/D = 35$, wobei x der Abstand zum Anfang des geraden Rohrstücks und D der Durchmesser des Rohres ist.

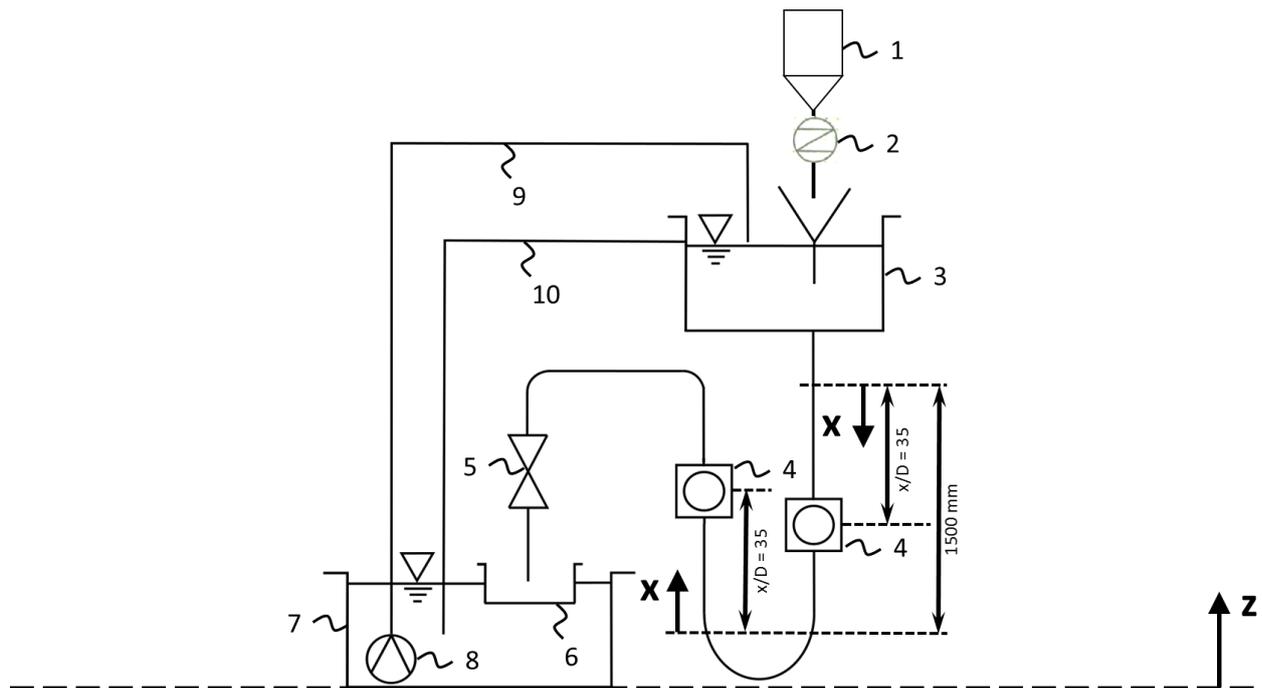


Abbildung V.8: Versuchsaufbau von Kameyama et al. zur Geschwindigkeitsermittlung einer Zweiphasenströmung [157]

Die Geschwindigkeit im Rohr wird durch ein Ventil **(5)** geregelt, wobei eine Geschwindigkeit von 0.75 m/s im Rohrinnen ($r/R = 0$) konstant gehalten wird. Dabei beträgt $R = D/2$ und r stellt die Laufkonstante zwischen Rohrmittelpunkt und Rohrwand mit den Werten 0 bis R dar. Innerhalb des unteren Tanks **(7)** ist ein Auffangbehälter **(6)** für die Partikel angebracht. Das Wasser wird somit partikelfrei durch eine Tauchpumpe **(8)** wieder in den oberen Tank **(3)** mit einer höheren Strömungsgeschwindigkeit gefördert ($v > 0.75 \text{ m/s}$). Dadurch wird der Wasserstand im oberen Tank mithilfe eines Überlaufschlauchs konstant gehalten.

Zur Modellierung des Aufbaus kommt das kommerzielle Softwareprogramm StarCCM+ zur Anwendung [158]. Die Modellierung beschränkt sich dabei nur auf die Teststrecke, womit eine reine Rohrströmung simuliert wird. Die Rohrlänge wird gleich der Rohrlänge des Versuchs belassen und die Auswertung der Ergebnisse erfolgt analog an der Stelle $x/D = 35$. Hierzu ist eine Auswerteebene bei 910 mm nach Rohreinlass in das Modell integriert worden. Die Dichte, der Partikeldurchmesser sowie die Konzentration werden aus dem Versuchsaufbau übernommen. Die Wassertemperatur wird mit 293 K angegeben, was eine Dichte von 0.997 kg/dm^3 und einer dynamischen Viskosität von $1.002 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ des Wassers entspricht [159]. Der Umgebungsdruck wird dabei mit $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ angenommen. Eine mittlere Rohrgeschwindigkeit wird durch Kameyama et al. leider nicht gegeben.

Um eine mittlere Geschwindigkeit \bar{u} berechnen zu können, die für die numerische Untersuchung als Randbedingung am Rohreinlass benötigt wird, wird auf das Potenzgesetz des zeitgemittelten

turbulenten Geschwindigkeitsprofils für Rohrströmungen zurückgegriffen [160]:

$$\frac{u(r)}{u_{max}} = \left[1 - \frac{r}{R}\right]^{\frac{1}{n}} \quad (V.7)$$

wobei u_{max} die höchste Geschwindigkeit in der Rohrmitte darstellt. Diese wird im Experiment von Kameyama et al. mit $u_{max} = 0.75 \text{ m/s}$ angegeben. Durch die Haftbedingung an der Rohrwand stellt sich ein Geschwindigkeitsprofil in Abhängigkeit zum Abstand zur Rohrmitte ein, der durch den Quotienten aus dem radialen Abstand r und dem Radius R des Rohres beschrieben wird. In Rohrmitte ($r/R = 0$) ist somit $u(r) = u_{max}$, wobei an der Wand ($r/R = 1$) die Haftbedingung mit $u(r) = 0$ erfüllt wird. Der Exponent n hängt von der Reynolds-Zahl und der Rauigkeit der Rohrinnenoberfläche ab. Für eine Reynolds-Zahl von 10^5 nimmt der Exponent den Wert von $n = 7$ an [161]. Dieser nimmt mit zunehmender Rauigkeit und abnehmender Reynolds-Zahl ab. Mit Angaben aus [160] und der Geschwindigkeitsangabe u_{max} von Kameyama et al. wurde der Exponent für die vorliegende Strömung auf $n = 6.6$ bestimmt.

Mit diesen Angaben lässt sich die zeitlich gemittelte mittlere Rohrgeschwindigkeit \bar{u} durch Integration des Geschwindigkeitsprofils wie folgt berechnen:

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int_0^r U \cdot u(r) dr \quad (V.8)$$

wobei $A = \pi R^2$ die durchströmte Fläche darstellt und $U = 2 \pi r$ für den Umfang steht, bei dem $u(r)$ aus Symmetriegründen konstant ist. Mithilfe von Gleichung (V.7) kann so mit Gleichung (V.8) \bar{u} bestimmt werden:

$$\bar{u} = u_{max} \cdot \frac{2 \cdot n^2}{(n + 1) \cdot (2n + 1)} \quad (V.9)$$

Mit $n = 6.6$ wird eine zeitlich gemittelte mittlere Geschwindigkeit von $\bar{u} = 0.605 \text{ m/s}$ berechnet, was ca. 80 % der maximalen Geschwindigkeit u_{max} ergibt. Mit dieser Angabe sind alle nötigen Randbedingungen für die numerische Untersuchung vorhanden. Die daraus resultierende Reynolds-Zahl ergibt sich zu $Re = 15660$, womit die Strömung als turbulent anzunehmen ist [162]. Für die numerische Simulation ist für die spätere Auswertung der Ergebnisse und aufgrund der geringen Partikelkonzentration und einer einzelnen Partikelgröße ein stationäres Euler-Euler-Verfahren ausgewählt worden. Zur Modellierung des Reynolds-Spannungstensors kommt das $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell zur Anwendung [163]. Weitere Details zu den getroffenen Einstellungen der numerischen Simulation können den Tabellen in Anhang J entnommen werden. Mit diesen Einstellungen lässt sich das Experiment von Kameyama et al. modellieren, was in der folgenden Abbildung V.9 dargestellt wird.

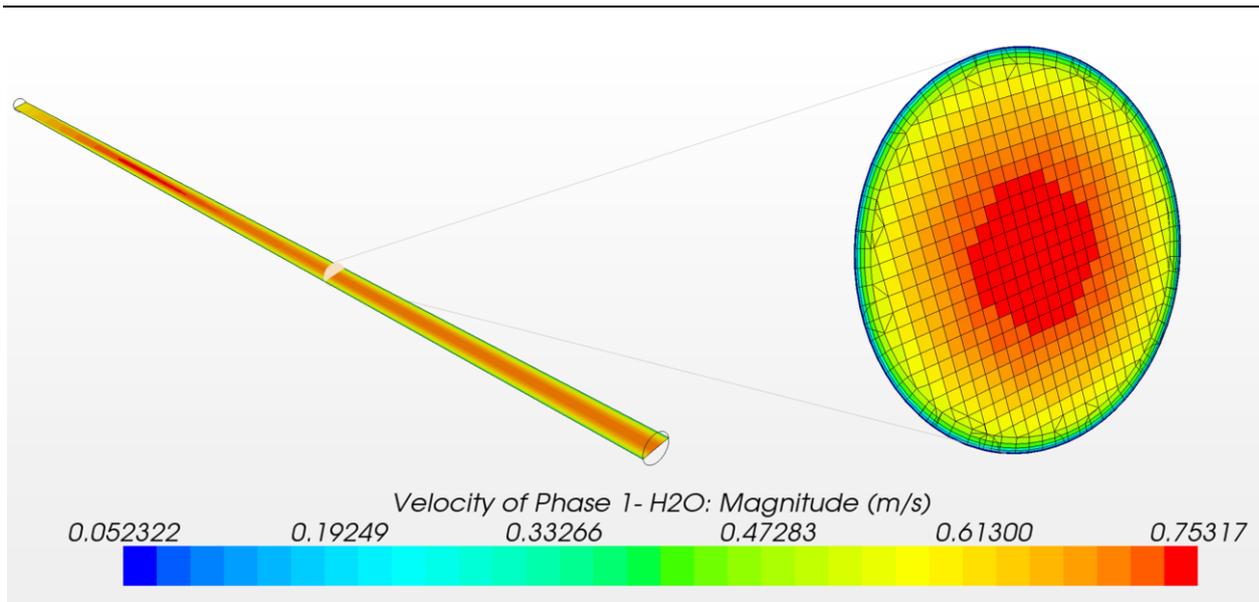


Abbildung V.9: Numerische Simulation des Mehrphasen-Experiments von Kameyama et al.

Links in Abbildung V.9 ist das Rohr der Länge nach für die abwärtsgerichtete Strömung zu sehen. Der Einlass des Rohres ist links oben, wobei hier über die komplette Fläche homogen die mittlere Geschwindigkeit $\bar{u} = 0.605 \text{ m/s}$ vorgegeben wird. Aufgrund der Haftbedingung ($u = 0$ an der Stelle $r/R = 1$) stellt sich im Verlauf des Rohres das Geschwindigkeitsprofil ein. Dies ist durch die Ebene quer durch das Rohr im linken Teil der Abbildung V.9 zu sehen. Hierbei wird die Geschwindigkeit des Wassers durch die Farbenskala wiedergegeben. Die Partikel werden dabei homogen über der Einlassfläche injiziert. Es ist zu erkennen, dass fast die Hälfte der Rohrlänge benötigt wird, bis sich eine gleichmäßige und sich nicht mehr verändernde Geschwindigkeitsverteilung einstellt. An der gleichen Stelle wie auch bei Kameyama et al. erfolgt die Messung bei 910 mm ($x/D = 35$), die rechts in Abbildung V.9 durch die farbliche Skala die Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt darstellt.

Das rechte Bild zeigt die Symmetrie der Geschwindigkeitsverteilung, die auch eine zwei dimensionale Untersuchung erlaubt hätte [66]. Da aber der Magnetfilter später dreidimensional untersucht wird, wurde auch hier die dreidimensionale Untersuchung angewendet. Gleichzeitig ist aus dem rechten Teil der Abbildung V.9 das angewendete strukturierte Netz zu entnehmen, das im wandnahen Bereich verfeinert wurde ($y^+ < 0.5$, siehe [164]). Somit können die großen Gradienten besser aufgelöst werden. Um die Geschwindigkeitsverteilung im Rohr mit den Ergebnissen von Kameyama et al. vergleichen zu können, werden diese entlang des Querschnitts vom Rohrinneren bis zur Wand herausgelesen und über den Abstand zum Rohrmittelpunkt über die Distanz r/R aufgetragen. Die dazugehörige Geschwindigkeit wird analog zu Kameyama et al. durch die maximale Geschwindigkeit des Fluids im Rohrinne $u_{max,f} = 0.75 \text{ m/s}$ normiert. Somit ergibt

sich die folgende Geschwindigkeitsverteilung für die jeweilige Phase im linken Diagramm in Abbildung V.10.

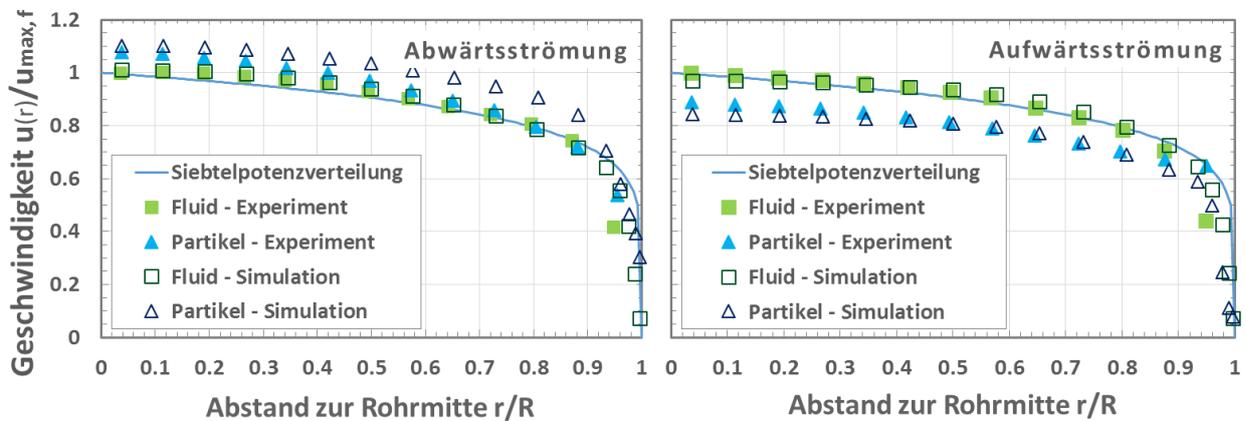


Abbildung V.10: Geschwindigkeitsverteilung der Phasen im Rohrquerschnitt, normiert auf die maximale Fluidgeschwindigkeit $u_{max,f} = 0.75 \text{ m/s}$

Durch die einfache Umkehrung der Erdbeschleunigung in der numerischen Simulation wurde die Strömungsgeschwindigkeit sowohl in der abwärts- als auch in der aufwärtsgerichteten Strömung simuliert. Die Ergebnisse für die abwärtsgerichtete Strömung sind im linken Diagramm in Abbildung V.10, die für die aufwärtsgerichtete Strömung im rechten Diagramm zu sehen. Als Referenz ist, analog zu der Ergebnisdarstellung von Kameyama et al., als kontinuierlicher Verlauf die Siebelpotenzverteilung der Strömung gegeben, die durch Gleichung (V.7) mit $n = 7$ erhalten wird. Dabei sind sowohl die Geschwindigkeitsverteilung für das reine Fluid sowie die disperse Phase als Symbole dargestellt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von Kameyama et al. sind hierbei mit ausgefüllten Symbolen gegeben, wobei die simulierten Ergebnisse als gerahmte Symbole überlagert sind. In beiden Fällen ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse für die jeweilige Phasen zu sehen. Allein in der Abwärtsströmung zeigt die disperse Phase eine leichte Diskrepanz im wandnahen Bereich, was ggf. auf eine zu hohe Turbulenzinduzierung des wandnahen Turbulenzmodells für die disperse Phase hindeutet. Hier sei zu erwähnen, dass keine Messgenauigkeit der experimentellen Ergebnisse vorliegt.

V.2.1.1 Fazit der Untersuchungen

Mit diesen numerischen Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die turbulenten Strömungseigenschaften des Mehrphasengemisches sehr gut mit der hier angewendeten numerischen Simulation abgebildet werden kann. Der Effekt der Be- und Entschleunigung, die die Schwerkraft auf die Partikel in Suspension bewirkt, wird sehr gut in der turbulenten Simulation berücksichtigt. Diese Untersuchungen erlauben somit durch analoge Vorgehensweise die folgende numerische Analyse des Stabmagnetfilters.

V.2.2 Numerische Untersuchung des Stabmagnetfilters

Die erworbenen Erkenntnisse der Anwendung von StarCCM+ zur Modellierung der Mehrphasen-Rohrströmung werden im Folgenden zur Modellierung des Stabmagnetfilters angewendet. Ziel dieser Untersuchung ist, ein Verständnis der Strömungsbedingungen im Filter zu erlangen, wodurch ein besseres Verständnis für die Abscheidung gewonnen wird. Dies dient unterstützend der Bewertung der experimentellen Untersuchungen in Abschnitt VI.

Aus diesem Grund wurden die numerischen Untersuchungen des Filters, die parallel zu der experimentellen Durchführung liefen, in dieser Arbeit auf wesentliche Parameter beschränkt. Aufgrund des numerischen Aufwands ist nur eine disperse Phase mit einer Partikelgröße betrachtet worden. Durch die vorliegenden Partikelgrößenverteilungen wird der für die Separation interessante Korngrößenbereich (vgl. Abschnitt III.3.2) auf kleinere Korngrößen konzentriert. Hierfür wurde die Partikelgröße von $100\ \mu\text{m}$ gewählt. Die Partikelkonzentration wurde, wie bereits bei den experimentellen Vorversuchen angewendet, auf 1 *Massen-%* festgelegt. Die vorhergehende numerische Untersuchung hat gezeigt (siehe Abschnitt V.2.1), dass die Erdbeschleunigung durchaus einen Einfluss auf die Strömungseigenschaften hat. Voruntersuchungen zeigten, dass dieser Einfluss auch auf den Strömungsverlauf im Filter von Bedeutung ist [165]. Die Erdbeschleunigung ist somit entsprechend des Einbaus des Filters berücksichtigt worden. Die Strömung wird von oben in den Filter geleitet und folgt somit der abwärtsgerichteten Richtung. Aufgrund der geringen Stahlkonzentration in der Mischung wurde für diese grundlegende numerische Untersuchung die für das Korngemisch (Stahl und Abrasivmischung) ursprünglich bestimmte Dichte für das Gemisch von $3.95\ \text{kg}/\text{dm}^3$ [131] gewählt. Der Volumenstrom entspricht

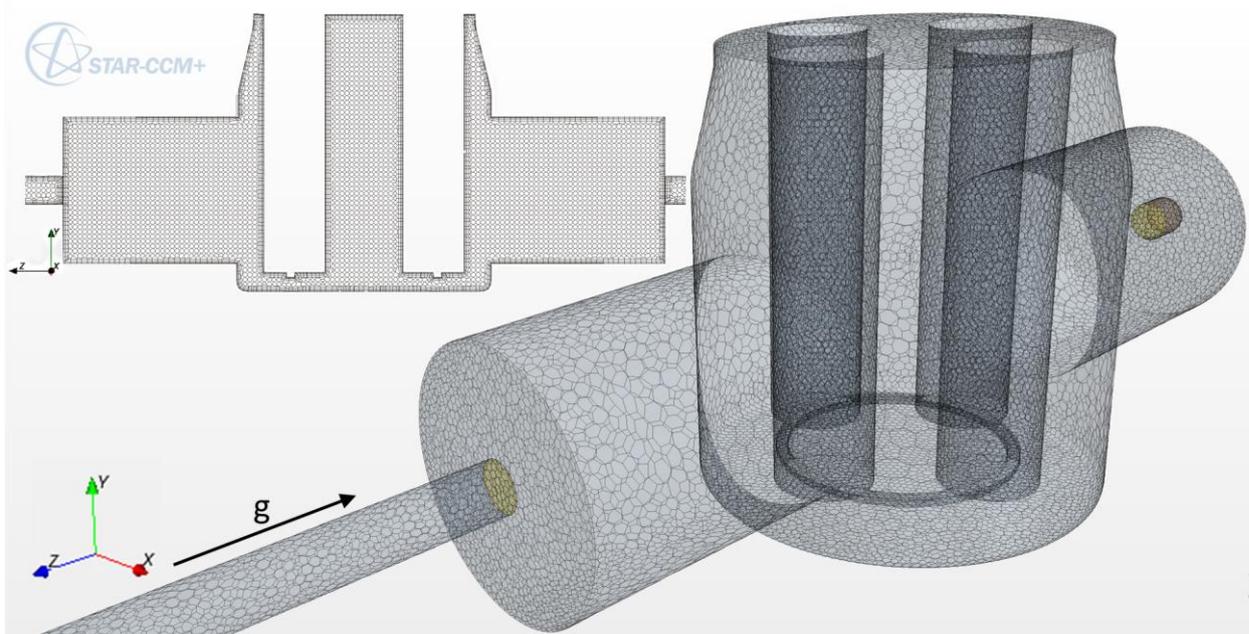


Abbildung V.11: Geometrie und angewendetes Netz für die numerische Untersuchung des Stabmagnetfilters

dem Mittelwert der experimentellen Untersuchungen von 11 l/min . In der Abbildung V.11 ist die Geometrie des Stabmagnetfilters dargestellt, die auch das dabei angewendete Netz zeigt.

Der Einlass der Strömung in das diskretisierte Volumen des Filterraums erfolgt durch die Anbringung eines Rohres mit den gleichen geometrischen Dimensionen wie die der Schläuche im Versuchstand. Die Partikel und das Fluid Wasser werden analog zu der Rohrströmung homogen über die Einlassfläche des Rohres injiziert. Um dabei jedoch eine eingelaufene Strömung mit entsprechender Geschwindigkeitsverteilung erreichen zu können, ist die Einlaufstrecke durch Verlängerung des Rohrstücks auf $x/D = 30$ gewählt worden, wobei $D = 12 \text{ mm}$ beträgt. Das innere Volumen des Filterraums wurde durch die Anwendung eines CAD-Programms erstellt, wodurch eine sehr genaue Abbildung des Stabmagnetfilters erreicht wurde. Es sind somit sehr gut die vier Hüllrohre der Stabmagnete im Zentrum der Geometrie erkennbar. Dabei ist auch der am unteren Ende angeschweißte Ring zur Verstärkung mit modelliert worden. In der Realität erfolgt das Einführen der Permanentmagnetstäbe durch die Öffnungen (in Abbildung V.11 auf der oberen Seite des Volumenkörpers). Diese sind jedoch nicht weiter in der numerischen Betrachtung berücksichtigt worden, da das kommerzielle Softwareprogramm StarCCM+ hierfür bisher keine Kopplung der strömungsmechanischen Berechnung mit der Auswirkung eines angelegten magnetischen Feldes bietet. Um den Einfluss des Strömungsverlaufs am Auslass des Filters entsprechend berücksichtigen zu können, ist analog zum Einlass auch am Auslass ein Rohr ($D = 12 \text{ mm}$) angebracht worden. Zur Diskretisierung des kompletten numerischen Raums wurde dieser in ca. 360 000 Zellen geteilt, wie in Abbildung V.11 zu erkennen ist.

Obwohl die Reynolds-Zahl mit ca. 21150 im ähnlichen Bereich liegt wie bei den Untersuchungen von Kameyama et al., zeigt sich durch die Durchmessererweiterung im Filterraum sowie durch die orthogonal zur Strömungsrichtung angeordneten Hüllrohre, dass sich in den Untersuchungen keine stationäre Lösung einstellt. Die gewählte Strömungsgeschwindigkeit führt am ersten mittig angeordneten Zylinder zu einer abwechselnden Ablösung, was einer Kármánschen Wirbelstraße entspricht [166]–[168]. Eine Netzstudie zeigte dabei, dass dieses Phänomen nicht netzabhängig ist. Nur eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führte zu einer Stabilisierung der Ablösung, wobei durch den erzeugten Widerstand sich das Phänomen am dahinterliegenden Hüllrohr wiederholt. Diese erhöhten Geschwindigkeiten lagen jedoch mehr als eine Größenordnung über der maximalen Leistung der im experimentellen Aufbau verwendeten Pumpen. Aus diesem Grund ist die numerische Untersuchung des Magnetfilters zeitabhängig betrachtet worden. In der Abbildung V.12 wird eine Momentaufnahme nach 2.0 s physikalischer Strömungszeit gezeigt. Hierfür ist ein Zeitschritt von 0.001 s mit fünf Iterationen pro Zeitschritt gewählt worden. Dabei wurde berücksichtigt, dass die maximale Courant-Zahl 0.35 nicht übersteigt.

In Abbildung V.12 wird die Geschwindigkeitsverteilung der flüssigen Phase innerhalb des Stabmagnetfilters gezeigt. Dabei ist diese im oberen Teil der Abbildung als Geschwindigkeitsbetrag

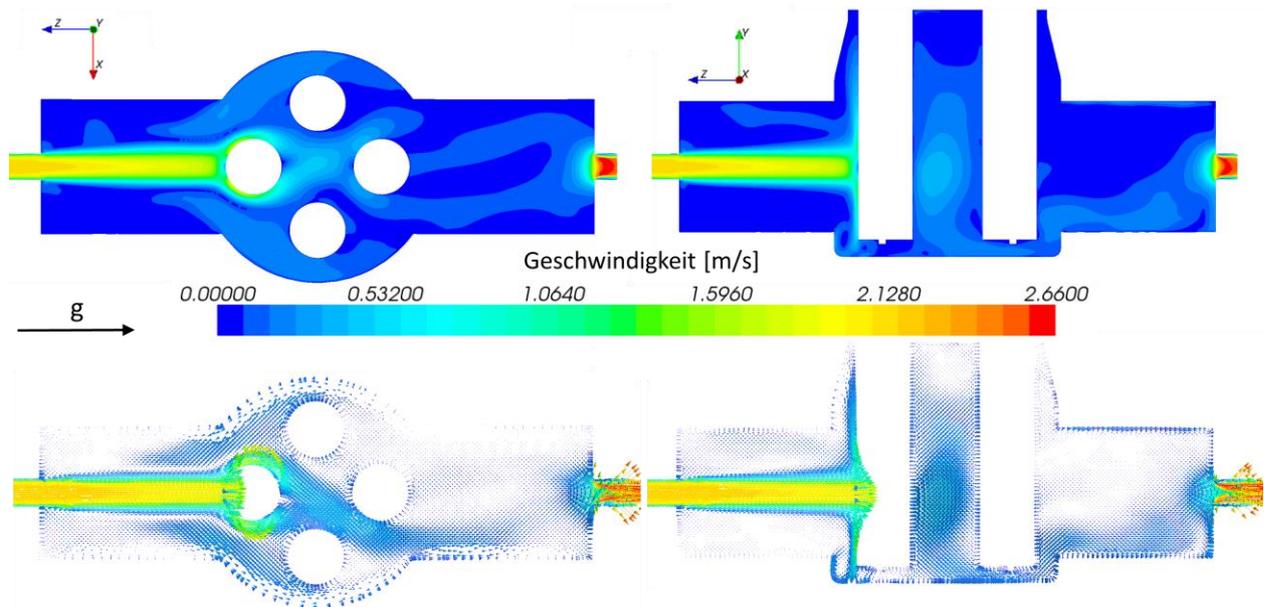


Abbildung V.12: Geschwindigkeitsverteilung im Stabmagnetfilter nach 2.0 s (10 000 Iterationen) gegeben, in unterschiedlicher Darstellungsweise und Ansicht

in der Skalar- und im unteren Teil als Vektordarstellung wiedergegeben. Die jeweiligen Betrachtungsebenen auf der linken und rechten Seite der Abbildung entsprechen der Drauf- bzw. der Seitenansicht, wobei die Ebenen mittig durch das Einlass- bzw. Auslassrohr gelegt wurden. Die Richtungen sind durch die Koordinatensysteme links oben in der jeweiligen Skaldarstellung gegeben. Die Schwerkraft verläuft jeweils in negativer z -Richtung (vgl. Abbildung V.11). Alle Bilder (auch die folgenden) sind auf einer Geschwindigkeitsskala im Bereich von 0 bis 2.66 m/s dargestellt worden, die die maximale Geschwindigkeit am Auslassrohr durch die signifikante Querschnittsverringering darstellt.

In beiden Darstellungen ist das asymmetrische Verhalten der Strömung deutlich ersichtlich, welche sich aufgrund der instabilen Ablösung abwechselnd über die Zeit in unterschiedliche Richtungen hinter dem ersten Hüllrohr ergibt. In der Aufnahme bei 2.0 s, insbesondere in der vektoriellem Darstellung, ist dies sehr deutlich zu sehen. Das führt zu einer abwechselnden Umströmung des unteren Hüllrohrs, wobei gleichzeitig eine abwechselnde Annäherung der Strömung an den seitlich befindlichen Hüllrohren erfolgt. Dieses Phänomen würde eine mögliche Abscheidung von Partikeln durch die Nähe zu den magnetischen Polen begünstigen. Der Hauptstrahl, der durch die Anbringung des Flansches mittig auf das obere Hüllrohr trifft, wird durch die Querschnittserweiterung leicht abgebremst und entsprechend durch das obere Hüllrohr rechts und links sowie auch der Länge nach abgelenkt (siehe auch Abbildung V.14). Durch dieses Strömungsphänomen werden größere Wirbel induziert, was zu einer aufwärtsgerichteten Strömung an den Wänden des Filterkörpers führt. Somit werden Partikel, die am unteren Hüllrohr abgelenkt wurden, zum Teil wieder außen an den seitlichen Hüllrohren aufwärts vorbeigeführt und im Filterkörper zirku-

liert. Dies kann aus dem Strömungsverlauf links unten in Abbildung V.12 entnommen werden (vgl. auch Abbildung V.14). Zur besseren Veranschaulichung wurde die Simulation mit dem Euler-Lagrange-Verfahren wiederholt, wobei alle anderen Einstellungen und Randbedingungen gleichbehalten wurden.

Es lassen sich somit die Partikelverteilungen innerhalb des Stabmagnetfilters visualisieren, die in Abbildung V.13 über die physikalische Zeit von 0.22 bis 2.56 s in Zeitschritten von 0.26 s dargestellt wird. Dabei werden die Partikel zum Zeitpunkt 0 s am Einlass des Rohrstücks in die Strömung injiziert und erreichen das erste Hüllrohr nach ca. 0.20 s. Das Einlassrohr sowie der zeitliche Verlauf seiner Durchströmung wurde jedoch zur besseren Veranschaulichung in den Aufnahmen in Abbildung V.13 weggelassen. Es zeigt sich, dass der Hauptstrom genau mittig auf das obere Hüllrohr trifft und folglich, wie oben beschrieben, zerstreut wird. Der große Teil der Strömung umströmt das obere Hüllrohr und trifft auf das darunterliegende Hüllrohr. Durch diese beiden Hindernisse wird ca. die Hälfte der kinetischen Energie dissipiert und die Geschwindigkeit halbiert. Ein Großteil der am unteren Hüllrohr abgelenkten Strömung wird an die Wand des Gehäuses des Filters geführt. Durch die runde Form und die Restkinetik des Fluids und der Partikel wird die nach oben gerichtete Strömung induziert. Wie in den Aufnahmen zu sehen, werden die Partikel an der Wand nach oben geleitet, wobei sie die äußeren Hüllrohre passieren. Je nach Geschwindigkeit werden diese dabei wieder in den Sog der nach unten gerichteten Strömung des Hauptstrahls ins Innere des Filters gezogen und umrunden die äußeren zwei Hüllrohre. Partikel mit höherer nach oben gerichteter Geschwindigkeit folgen der Wandung des Filters und erreichen den oberen Teil des Filters, bei der sie letztendlich der durch den Hauptstrahl induzierten Abwärtsströmung im Zentrum folgen. Die Zerstreung des Hauptstrahls auch längs des oberen Hüllrohrs, zusammen mit der aufwärtsgerichteten Strömung an den Wandungen, führt zu einer sehr guten Verteilung der Partikel im Filterinnenraum, wie den Aufnahmen ab 2.0 s zu entnehmen ist. Gleichzeitig wird eine gute Dissipation der kinetischen Energie des Hauptstrahls erreicht, durch die eine signifikante Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt. Diese Verteilung um die jeweiligen Hüllrohre sowie die Verringerung der Geschwindigkeit tragen positiv zur vorgesehenen Abscheidung bei.

Eine detaillierte Darstellung der oben beschriebenen dreidimensionalen Strömungsphänomene ist in Bildern leider nur bedingt möglich. Die Betrachtung der Partikelverteilung nach 1.0 s in der folgenden Abbildung V.14 liefert jedoch einen guten Eindruck der Strömungsverteilung im Stabmagnetfilter. Dabei wird eine detaillierte Aufnahme von vorne (negative y -Richtung), seitlich (positive x -Richtung) sowie von oben entlang des Einlassrohres (negative z -Richtung) gezeigt. Da sich hier noch nicht so viele Partikel im Filter angesammelt haben, ist eine Zerstreung am oberen Hüllrohr auf der rechten Seite sowie die aufwärtsgerichtete Strömung eines Teils der Partikel

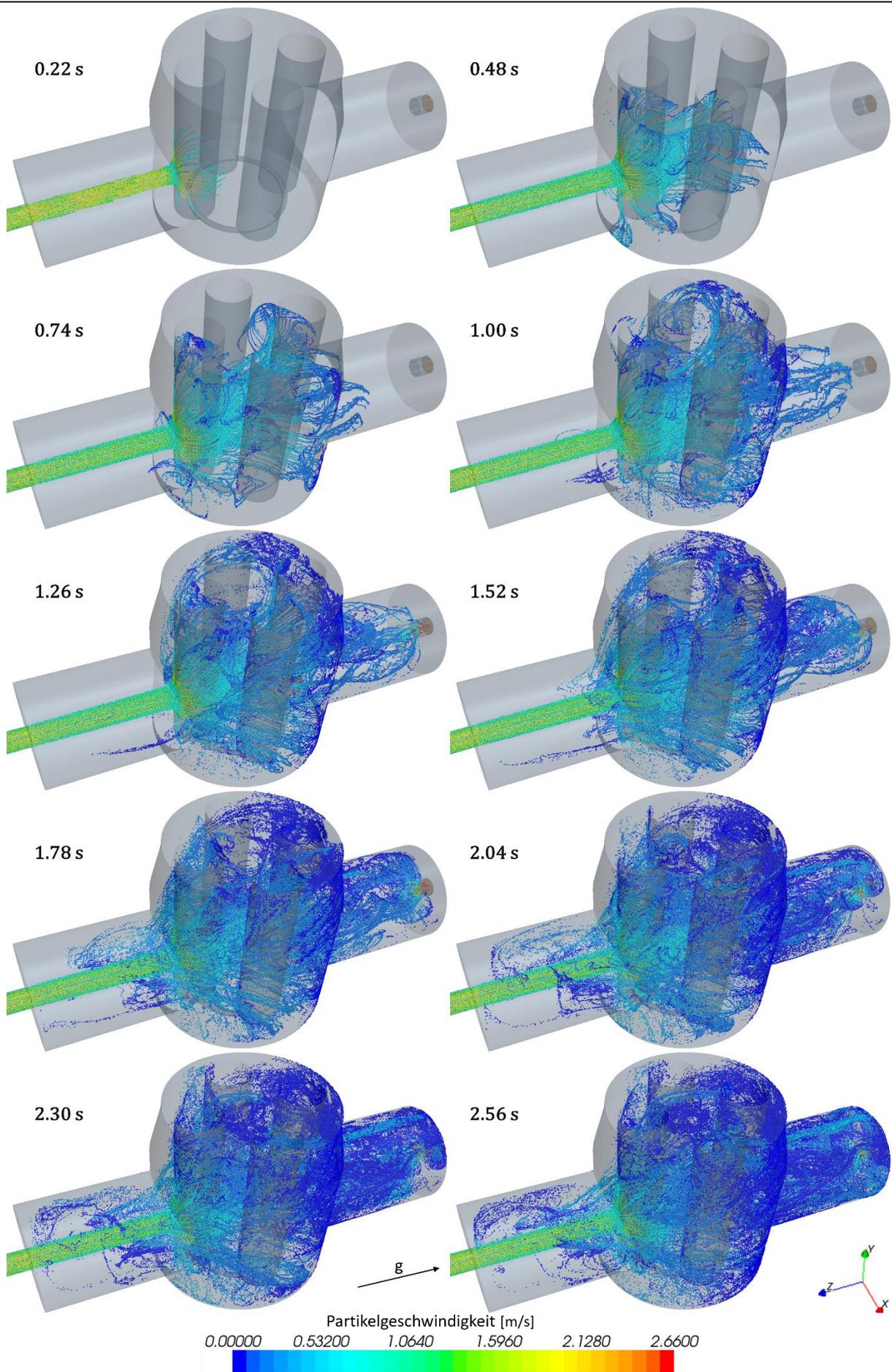


Abbildung V.13: Verteilung der Partikel im Stabmagnetfilter

nach dem unteren Hüllrohr links in Abbildung V.14 ersichtlich. An der farblichen Geschwindigkeitsskalierung ist auch die Dissipation der kinetischen Geschwindigkeit erkennbar. Damit wird eine gute Verteilung der Partikel im Filterraum erreicht, die sowohl vertikal (Betrachtung von vorne) als auch horizontal (Betrachtung von oben) erfolgt. Die durch den Hersteller gewählte Form des Filterkörpers ist unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Einschränkungen daher für die vorliegende Anwendung gut geeignet. Die großen Standardflansche, die eine Filterung von Gemischen mit eisenhaltigen Verunreinigungen mit bis zu 10 mm Partikelgröße (siehe Anhang I) erlauben, bietet genug Raum für die Ausbreitung der Partikel in der vorliegenden Anwendung. Durch die zusätzliche mittige Anbringung der 12 mm Schläuche über den eigens konstruierten Flanschen (vgl. Abbildung II.6) erlaubt die Induzierung der beschriebenen aufwärtsgerichteten Strömungsphänomene im wandnahen Bereich des Filters. Damit wird in dem kommerziell erhältlichen Filterraum eine sehr gute Verteilung der Partikel entlang der Hüllrohre (und somit entlang der Permanentmagnetstäbe) erreicht.

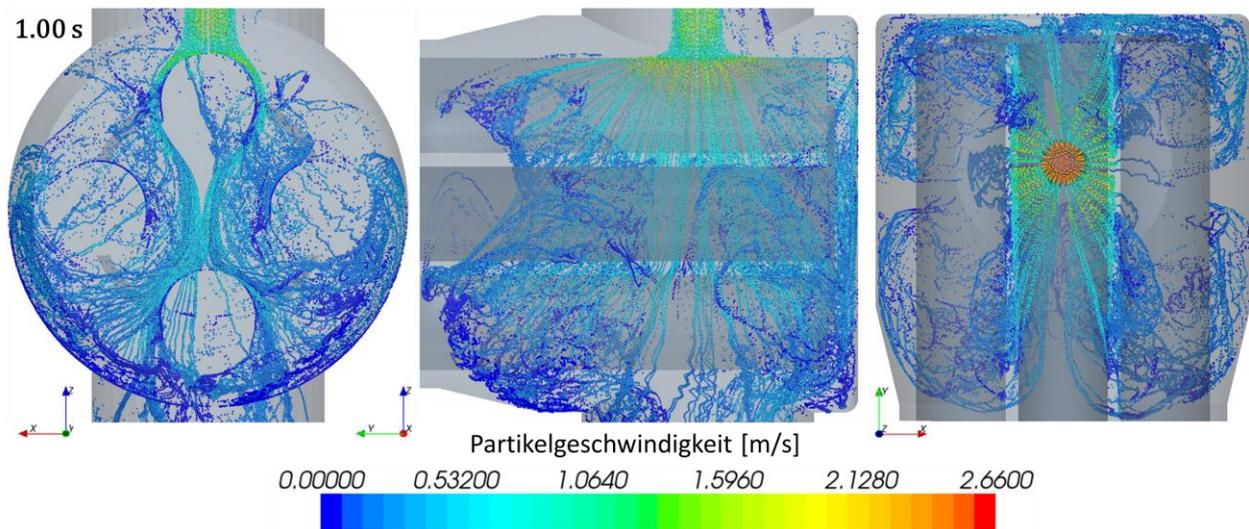


Abbildung V.14: Partikelverteilung im Stabmagnetfilter nach 1.0 s von vorne (links), seitlich (mittig) und von oben betrachtet (rechts)

Die konische Form des vorderen Teils des Filterraums, der rechts in Abbildung V.14 bei der Betrachtung von oben zu sehen ist, verhindert dabei eine Anhäufung von Partikeln durch Sedimentation innerhalb des Filters. In Abbildung V.13 ist dabei mit zunehmender Simulationszeit eine klare Zunahme an Partikeln im unteren Bereich des Filterraums zu sehen. Der dreidimensionalen Betrachtung der Simulation ist zu entnehmen, dass sich die Partikel zwar im unteren Bereich absetzen, durch die konische Form jedoch eine kontinuierliche Mitnahme der Partikel erfolgt. Die gesammelten Partikel rieseln somit an der Wand entlang nach unten, was beschränkt in der zweidimensionalen Darstellung als türkiser Partikelstrahl im vertikalen Zylinderteil an der vorderen Seite bei 2.30 und 2.56 s in Abbildung V.13 zu sehen ist. Die so erzielte Mitnahme der Partikel führt zu keiner Anhäufung von Partikeln innerhalb des Filterraums, was auch in den folgenden

Aufnahmen in Abbildung V.15 zu entnehmen ist. Die runde Fase am hinteren Teil des horizontalen Zylinderteils (links in Abbildung V.15) verhindert auch hier Materialanhäufungen. Es bleiben nur einzelne Abrasivkörner im vorderen Teil nach der Durchströmung zurück, die bei der Bewertung der Güte der Separation durch Beimischung im Spülvorgang allerdings berücksichtigt werden müssen.

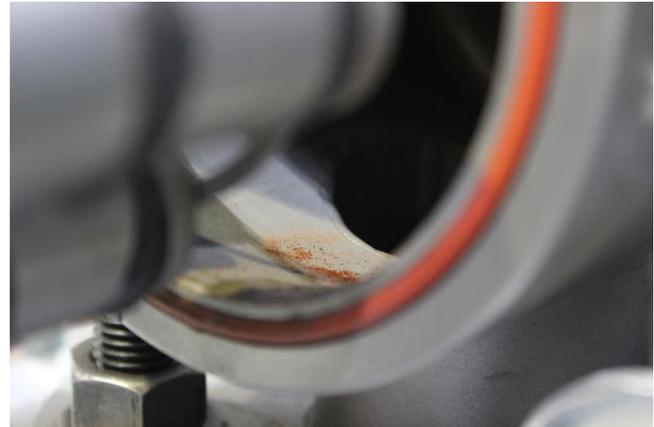


Abbildung V.15: Aufnahmen des Filterraums zur Inspektion von Partikelablagerungen nach der Versuchsdurchführung

Der Simulationen ist in diesem Zusammenhang zu entnehmen, dass sich die Form des unten als Auslass angebrachten Flansches mit dem mittig platzierten Schlauch als unvorteilhaft darstellt. Durch die flächige Abdeckung werden zwangsläufig Toträume erzeugt, in denen keine ausreichend starke Strömung erreicht wird, um die Partikel zum Schlauchauslass zu befördern. Die Simulation zeigt eine Akkumulation von Partikeln in diesem Bereich, die jedoch in den experimentellen Untersuchungen nicht weiter verifiziert werden konnte. Dies muss jedoch zukünftig beachtet werden, da Partikelansammlungen im Filter bei der Spülung dem Retentat beigemischt werden, wodurch die Abscheidemenge steigt und die Konzentration an Stahl sinkt. Für die Hauptzielsetzung, das Filtrat weitestgehend von den Stahlspänen zu reinigen, spielt dieser beigemischte Anteil jedoch eine vernachlässigbare Rolle.

Die durch die numerische Simulation erzielten Erkenntnisse des Strömungsverhaltens im Stabmagnetfilter erlauben eine bessere Deutung der Abscheidemuster der Retentate an den Permanentmagnetstäben, wie in Abbildung V.16 zu sehen ist. Es zeigt die Verteilung des Retentats axial und radial an den Hüllrohren der Permanentmagnetstäbe. Aufgrund der Durchströmung in Richtung der Schwerkraft ist eine überwiegend radiale Verteilung der Partikel im Nachlauf an der unteren Seite der Hüllrohre zu erkennen. Die Retentate folgen somit der hydrodynamischen Kraft und sammeln sich aufgrund der radial gleichmäßig wirkenden magnetischen Kraft im Nachlauf des Hüllrohrs. Diese Verteilung ist dabei an den mittig zum Hauptstrahl angeordneten Hüllrohren am deutlichsten zu sehen.

Das Einlassrohr des Hauptstrahls befindet sich dabei mit einem Abstand von 73 mm vom Deckel aus gesehen, was im Bild links mit einem weißen Pfeil gekennzeichnet ist. Wie in den numerischen Analysen zu sehen, werden hier die größten Strömungsgeschwindigkeiten im Filter erreicht (siehe Abschnitt I.2.1.3). Dadurch werden zwar die Stahlpartikel sehr nahe am Permanentmagnetstab vorbeigeführt, jedoch überwiegen dabei die hydrodynamischen Kräfte. Gleichzeitig kann die abrasivbeladene Suspension zu einem Mitreißen bzw. sogar Ablösen bereits abgeschiedener Stahlpartikel führen. Durch die Dissipation der Strömungsgeschwindigkeit wird am unteren Hüllrohr die Geschwindigkeit signifikant gedrosselt, was zu einer Zunahme der abgeschiedenen Stahlpartikel führt, wie das linke Bild zeigt. Aus der mittleren Aufnahme in Abbildung V.14 ist zu entnehmen, dass der Hauptteil der aufwärtsgerichteten Strömung durch die Formgebung des Filters im vorderen Teil des Filters erzeugt wird. Durch die verringerte Geschwindigkeit werden somit gute Bedingungen zur magnetischen Abscheidung erreicht (vgl. Abschnitt I.2.1.3), was in Abbildung V.16 gut zu sehen ist. Im Gegenteil dazu wird durch die geringe geometrische Tiefe im hinteren Teil des Filterkörpers weniger aufwärtsgerichtete Strömung induziert, wodurch an den Magnetstabspitzen vergleichsweise wenig abgeschieden wird. Auch hier spielt die Nähe zum Hauptstrahl eine große Rolle für die Abscheidung, wie aus der Aufnahme links in Abbildung V.16 zu entnehmen ist.

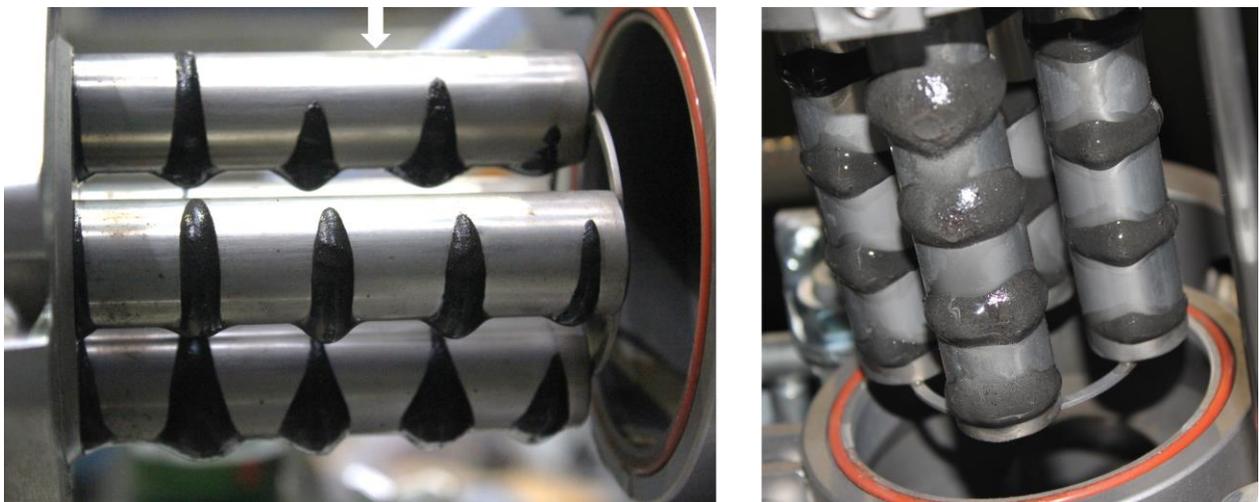


Abbildung V.16: Seitenansicht (links) und Ansicht von unten (rechts) der abgeschiedenen Restentate nach 40 min Filterzeit, bei $1\text{-Massen}\%$ und 11 l/min ; Pfeil im linken Bild kennzeichnet die Stelle des Hauptstrahls des Einlasses

Dadurch, dass die seitlichen Stabmagneten nicht direkt der Strömung ausgesetzt sind, sondern nur am Rand durch den Hauptstrahl sowie durch aufströmende Partikel umströmt werden, ist hier die Abscheidung geringer, verglichen mit dem unteren Stabmagneten, wie in der Aufnahme rechts in Abbildung V.16 zu erkennen ist.

Durch die geringe Menge an 20 magnetischen Polen, an denen innerhalb des Filters eine Ab-

scheidung erfolgen kann, ist nur in diesen Bereichen eine genügend starke Magnetflussdichte (inkl. Gradient) vorhanden. Durch die hohe Geschwindigkeit des Hauptstrahls findet eine Abscheidung aufgrund der hydrodynamischen Kraft am oberen und somit direkt ausgesetzten Magnetstab nur bedingt statt, was eine genügende Verteilung der Partikel im Filterraum notwendig macht. Wie die numerische Simulation zeigt, wird dies auch durch die Strömungsführung und die Form des Filters erreicht. Nichtsdestotrotz stellt die Abscheidung der Partikel ein probabilistisches Ereignis dar. Untersuchungen zur Abscheidungswahrscheinlichkeit von Partikeln sind bereits im Zusammenhang mit Hochgradienten-Magnetseparatoren durchgeführt worden [169]. Im vorliegenden Stabmagnetfilter spielt dies aufgrund der großen Geometrie und der geringen Anzahl an Polstellen durchaus noch eine größere Rolle. Längere Filterzeiten und die mehrmalige Rezirkulation von Partikeln durch den Filter erhöhen somit die Wahrscheinlichkeit einer genügenden Näherung der Stahlpartikel an die Magnetfeldpole, was zu einer statistischen Abscheidung der magnetischen Partikeln beiträgt. Diese Erkenntnisse sind im Folgenden bei der Bewertung der experimentellen Ergebnisse zu berücksichtigen.

V.2.2.1 **Fazit der Untersuchungen**

Die Mehrphasenströmung-Simulation des Stabmagnetfilters erlaubt einen wichtigen Einblick in die Strömungsverhältnisse innerhalb des Filters. Die Wahl des Flansches am Einlass führt zu einer Rezirkulation der Partikel im äußeren Bereich des Filters, was eine Abscheidung der Partikel begünstigt. Gleichzeitig zeigt dies, dass die Form des Filters zwar zu wenigen Ablagerungsmöglichkeiten von Partikeln innerhalb des Filters führt, jedoch die Form des Auslasses zu einem Totwinkel führt und somit Partikelansammlungen in diesem Bereich bewirkt.

VI Auswertung und Analyse der Ergebnisse

Mit den in Kapitel I erzielten experimentellen Ergebnissen sowie den erhaltenen Erkenntnissen aus der numerischen Simulation wird eine Auswertung und Analyse der Ergebnisse in diesem Kapitel durchgeführt. Dabei wird konsequent auf die in Abschnitt IV.1 definierten Zielgrößen eingegangen.

VI.1 Massenbezogene Bewertung der Versuchsergebnisse

Um einen besseren Vergleich der experimentellen Ergebnisse aus Tabelle V.2 bzw. aus Abbildung V.4 ermöglichen zu können, wird im folgenden Diagramm in Abbildung VI.1 die ermittelte Abscheidemenge nach 120 *min* zusammen mit den Einflussgrößen über die jeweilige Versuchsreihe dargestellt. Die entsprechende Versuchsreihe ist dabei entsprechend auf der Abszisse zu sehen und bezieht sich auf die Zuordnung aus Tabelle V.2. Für jede Versuchsreihe sind dabei vier Balken aufgetragen. Die ersten drei Balken stellen die Einflussgrößen dar, wobei die Reihenfolge Partikelkonzentration, die Filterzeit und der Volumenstrom eingehalten wurde. Der Betrag der Einflussgrößen wurde dabei normiert und durch eine Skala zwischen 0 und 1 angegeben. Dabei steht 0.33 (1/3) für die niedrigste Stufe (1 *Massen-%*, 20 *min* bzw. 4 *l/min*), 0.66 (2/3) für die mittlere Stufe (5.5 *Massen-%*, 40 *min* bzw. 11 *l/min*) und 1.00 (3/3) für die höchste Stufe (10 *Massen-%*, 60 *min* bzw. 18 *l/min*). Der vierte Balken in Schwarz zeigt dabei die untersuchte Zielgröße (siehe Abschnitt IV.1). Diese Darstellung erlaubt eine übersichtliche Betrachtung der Ergebnisse in Bezug auf die in der experimentellen Untersuchung eingestellten Parameter. Wieder-

holte Versuchsreihen sind dabei mit * gekennzeichnet. Das Diagramm erleichtert somit die Diskussion der Ergebnisse und wird auch in den folgenden Abschnitten VI.2 und VI.3 verwendet.

Für die massenbezogene Bewertung der experimentellen Versuchsergebnisse wird im folgenden Diagramm die gesamte Abscheidemenge [Massen-%] nach der Filterzeit von 120 min für die jeweilige Parametereinstellung aufgeführt.

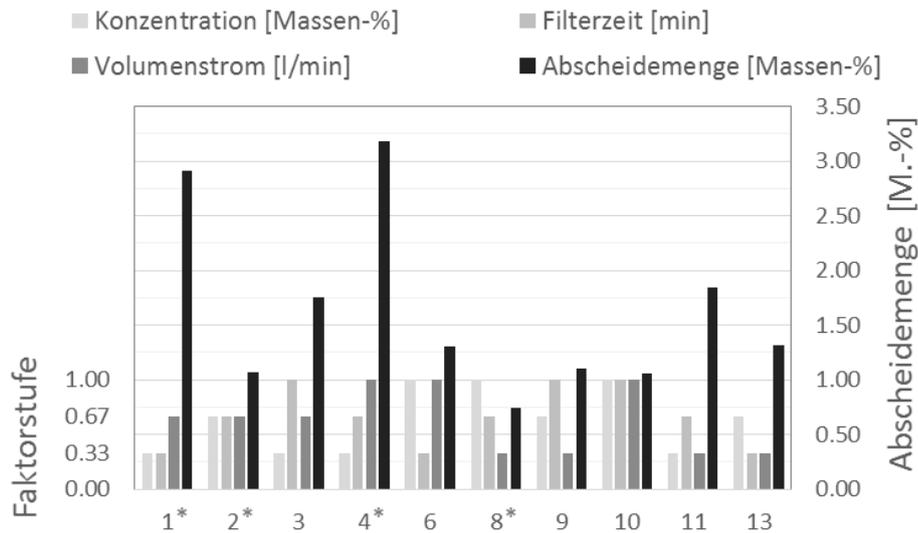


Abbildung VI.1: Vergleich der Abscheidemenge (schwarz) nach 120 min mit den dazugehörigen Einflussgrößen, normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne)

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wird im Folgenden die Reihenfolge der Versuchsreihen variiert. Zunächst wird die Zielgröße Abscheidemenge von links nach rechts aufsteigend dargestellt, was links in Abbildung VI.2 dargestellt ist. Dabei wird deutlich, wie groß der Unterschied der Ergebnisse durch die Variation der Parameter in dieser Untersuchung ist. Die kleinste Abscheidemenge beträgt dabei nicht einmal 25 % des erreichten größten Wertes. Gleichzeitig zeigen sich deutliche Wechselwirkungen zwischen den variierten Faktoren. Dies ist beispielsweise zwischen den Versuchen 10, 2 und 9 zu erkennen. Dabei werden bei unterschiedlichen Konstellationen an Parametereinstellungen kaum Unterschiede bei der Abscheidemenge bewirkt. Deutlich wird jedoch der starke Einfluss einer geringen Partikelkonzentration auf die Abscheidemenge (siehe Versuchsreihen 3, 11, 1, und 4). Explizit ist dies in der Darstellung rechts von Abbildung VI.2 zu erkennen. Die Ergebnisse sind nach steigender Partikelkonzentration aufgetragen. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die höchsten Abscheidemengen bei geringer Partikelkonzentration erreicht werden. Eine Erhöhung der Partikelkonzentration (in dem Diagramm ab Versuchsreihe 2) führt zu einer signifikanten Reduktion der erzielten Abscheidemengen. Durch den teilfaktoriellen Versuchsplan werden nicht alle Parameterkonstellationen abgedeckt (siehe Abschnitt IV.4), weshalb

nur wenige direkte Vergleiche einer einzelnen Parametervariation möglich sind. Im Fall der Partikelkonzentration bietet sich hier zum Beispiel nur eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den Versuchsreihen 11 und 8 an. Bei gleichbleibender Filterzeit (40 min) und gleichbleibendem Volumenstrom (4 l/min) wird die Abscheidemenge durch alleinige Erhöhung der Partikelkonzentration (von 1 auf 10 Massen-%) um ca. 60 % verringert.

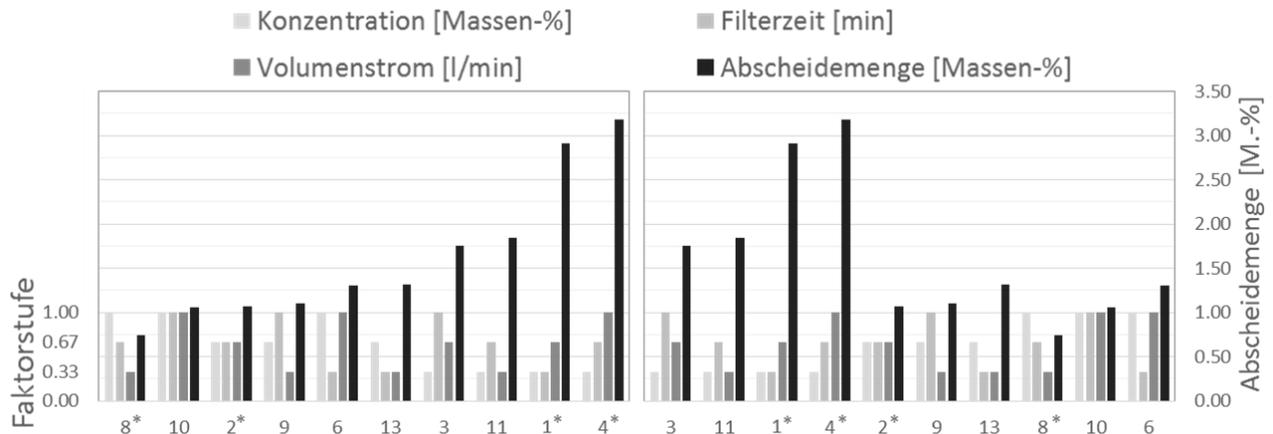


Abbildung VI.2: Diagramm aus Abbildung VI.1, geordnet nach steigender Abscheidemenge (links) und nach steigender Partikelkonzentration (rechts)

Wird das Diagramm nach steigender Filterzeit geordnet, wie links in Abbildung VI.3 zu sehen, ist keine so deutliche Signifikanz der Ergebniszuordnung wie bei der Sortierung anhand der Partikelkonzentration erkennbar. Dennoch können in diesem Fall einige direkte Vergleiche der Variation der Parameter gezogen werden. Bei gleichbleibender Partikelkonzentration und gleichbleibendem Volumenstrom bieten die Versuchsreihen 6 und 10, 13 und 9 sowie 1 und 3 einen direkten Vergleich der zunehmenden Filterzeit an. In allen drei Fällen hat eine Steigerung der Filterzeit einen negativen Einfluss auf die erzielte Abscheidemenge. Hauptsächlich zeigt sich dies zwischen den Versuchsreihen 1 und 3 (1 Massen-%, 20 min bzw. 60 min, 11 l/min), wobei sich die Menge nahezu halbiert. Dies stellt sich insbesondere als interessant dar, da diese Parameterkombination (1 Massen-%, 11 l/min) in den Voruntersuchungen zu der Zusetzung des Filters bei 90 min Filterzeit führte [25]. Die dabei erzeugte signifikante Steigerung der Abscheidemenge mit der Zusetzung des Filters ist bei genauerer Betrachtung der Retentate der einzelnen Filterzyklen durchaus ersichtlich. Wird das erste Retentat aus der jeweiligen Versuchsreihe betrachtet, zeigt sich durch die zunehmende Filterzeit eine Steigerung der Abscheidemenge von 15 %. Bei dem Vergleich der Versuchsreihen 13 und 9 ist sogar eine Steigerung von 60 % des ersten Retentats erzielt worden; von 0.50 Massen-% in Versuchsreihe 13 auf etwas über 0.80 Massen-% in Versuchsreihe 9 (vgl. Diagramm in Abbildung V.1 sowie Tabelle XII.1 und Tabelle XII.3). Je nach Einstellung kann daher die Filterzeit einen signifikanten Einfluss auf die Abscheidemenge durch mögliche Agglomerationen bis zu Zusetzungen des Filters haben. Dieser Zustand ist jedoch für

die Separation nicht zielführend und wurde gezielt durch die Einschränkung des Untersuchungsbereichs auf maximal 60 *min* Filterzeit vermieden.

Im untersuchten Parameterbereich von 20 bis 60 *min* Filterzeit zeigt sich, dass in Bezug auf das erste Retentat die höchsten Abscheidebeträge in den Versuchsreihen mit 40 *min* zu finden sind (vgl. die einzelnen Retentate im Diagramm in Abbildung V.1). Die Aufstellung der Gesamtabscheidemengen nach 120 *min* rechts in Abbildung VI.3 zeigt jedoch, dass die Gegenüberstellung der Versuchsreihenkombinationen mit Filterzeiten von 20 bzw. 40 *min* kaum Unterschiede bei der erzielten Abscheidemenge über 120 *min* zeigen. Zur Verdeutlichung dieser Beobachtung sei nochmals auf das Diagramm rechts in Abbildung VI.2 hingewiesen, bei der die Neuordnung der Versuchsreihen nach steigender Partikelkonzentration zu einer sehr klaren Gruppierung der höchsten Abscheidemengen im linken Bereich des Diagramms führt. Diese signifikanten Unterschiede sind in Bezug auf die Filterzeit nicht erkennbar, auch wenn mit 60 *min* Filterzeit die geringsten Mengen erzielt werden. Unter dem Aspekt, dass kürzere Filterzeiten zu einem längeren Stillstand führen und somit zu der Verlängerung des Separationsverfahrens beitragen, lässt sich daraus schließen, dass eine geeignete Filterzeit zur Steigerung der Abscheidemenge zwischen 20 und 40 *min* liegt. Eine genaue Tendenz lässt sich in dieser Betrachtung der Ergebnisse jedoch nicht bestimmen.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Bezug auf den zunehmenden Volumenstrom im Diagramm rechts in Abbildung VI.3, ist bei zunehmendem Volumenstrom eine Tendenz der Steigerung der Menge zu sehen. Dieser Verlauf ist zwar nicht so deutlich wie bei der Partikelkonzentration, aber trotzdem gut ersichtlich. Ein direkter Vergleich wird dabei zwischen den Versuchsreihen 11 und 4 ermöglicht (1 *Massen-%*, 40 *min*, 4 *l/min* bzw. 18 *l/min*). Die Steigerung des Volumenstroms bewirkt dabei eine Steigerung der Abscheidemenge in diesem Vergleich von etwas über 70 %. Die Steigerung bezogen auf das erste Retentat erfolgt dabei auf ca. 53 % (vgl. Tabelle XII.2). Versuchsreihe 4 scheidet somit auch über die weiteren zwei Filterzyklen mehr Retentate verglichen mit Versuchsreihe 11 ab. Dadurch stellt die Versuchsreihe 4 auch insgesamt durch ihre Parameterkonstellation das beste Ergebnis der teilfaktoriellen Untersuchung in Bezug auf die Abscheidemenge dar. Zur Steigerung der Abscheidemenge sind daher die Einstellungen mit niedriger Partikelkonzentration (1 *Massen-%*), geringer Filterzeit (20 – 40 *min*) sowie hohem Volumenstrom (18 *l/min*) zu bevorzugen.

Durch die Anwendung des kommerziellen Programms JMP [149] wird durch eine statistische Bewertung anhand des t-Tests [170] die Signifikanz der einzelnen Faktoren durch die ermittelten experimentellen Ergebnisse bewertet. Die Erkenntnisse aus den geschilderten Bewertungen mittels der Diagramme aus Abbildung VI.2 sowie aus Abbildung VI.3 werden dabei bekräftigt. Den einzelnen Faktoren wird hierbei eine steigende Signifikanz zugeordnet, wobei der Partikelkon-

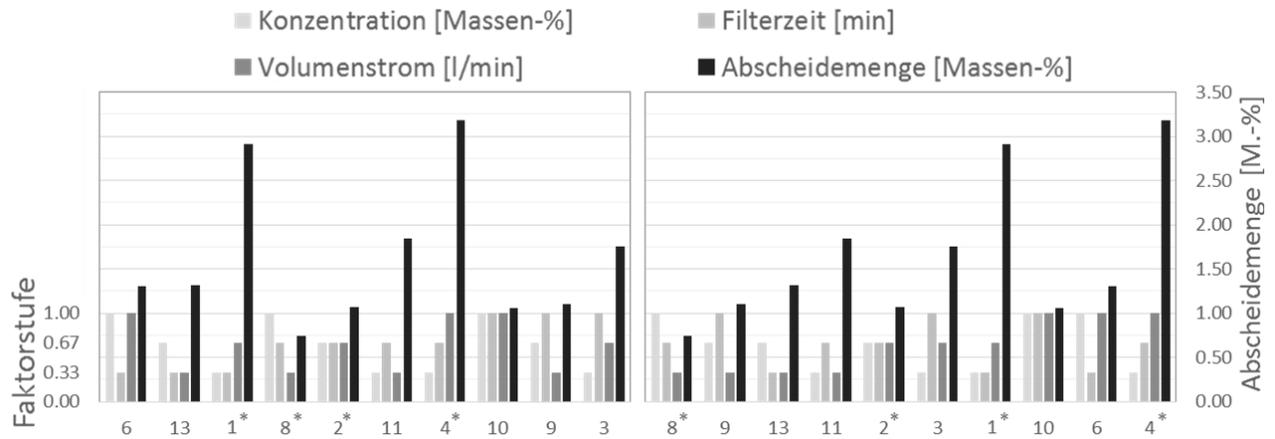


Abbildung VI.3: Diagramm aus Abbildung VI.1, geordnet nach steigender Filterzeit (links) und nach steigendem Volumenstrom (rechts)

zentration die höchste und der Filterzeit die geringste Signifikanz zugeordnet wird.

Anhand einer Wirkungsflächenanalyse [171] mittels des Programms lassen sich des Weiteren die einzelnen Wechselwirkungen der Faktoren grafisch besser darstellen, wie Abbildung VI.4 zeigt. Die Gegenüberstellung der Faktorengrößen in Bezug auf die Abscheidemenge wird dabei dreidimensional auf der linken Seite dargestellt. Um ein gezieltes Ablesen der höchsten Abscheidemenge in den Diagrammen ermöglichen zu können, sind diese nochmal in zweidimensionaler Darstellung rechts in Abbildung VI.4 entsprechend dargestellt. Die blauen Linien stellen dabei die Isolinien der Abscheidemenge dar.

Wie den Diagrammen Abbildung VI.2 sowie Abbildung VI.3 bereits zu entnehmen war, wird hier grafisch nochmals sehr deutlich die Wechselwirkung durch die abnehmende Partikelkonzentration bei steigendem Volumenstrom zur Steigerung der Abscheidemenge dargestellt. Dies ist im mittlerem Diagramm in Abbildung VI.4 zu erkennen. Aus dem ersten Diagramm ist der Einfluss der Filterzeit bei geringen Partikelkonzentrationen zu sehen. Die geringe Signifikanz der Filterzeit gegenüber dem Volumenstrom ist im dritten Diagramm durch die kleineren Gradienten ersichtlich.

Die Wirkungsflächenanalyse erlaubt, obwohl durch die teilfaktorielle Versuchsplanung nur einzelne Faktorenkonstellationen untersucht worden sind, eine Abschätzung des Verhaltens der Separationsanlage bei Variation der Faktoren in Bezug auf die Abscheidemenge. Anhand der aus der teilfaktoriellen Versuchsdurchführung erhaltenen Ergebnisse können mit den Diagrammen in Abbildung VI.4 Abschätzungen der verbleibenden Faktorenkombinationen getroffen werden. Somit wird aufgrund der bereits oben diskutierten Erkenntnisse sehr deutlich, dass eine geringe Partikelkonzentration, ein hoher Volumenstrom und eine geringe Filterzeit die höchste Abscheidemenge liefert. Gleichzeitig wird gezeigt, dass sich mit abnehmender Partikelkonzentration der Einfluss des Volumenstroms sowie der Filterzeit verstärkt, wie den Gradienten in den oberen

(Konzentration/Filterzeit) und mittleren (Konzentration/Volumenstrom) Diagrammen zu entnehmen ist.

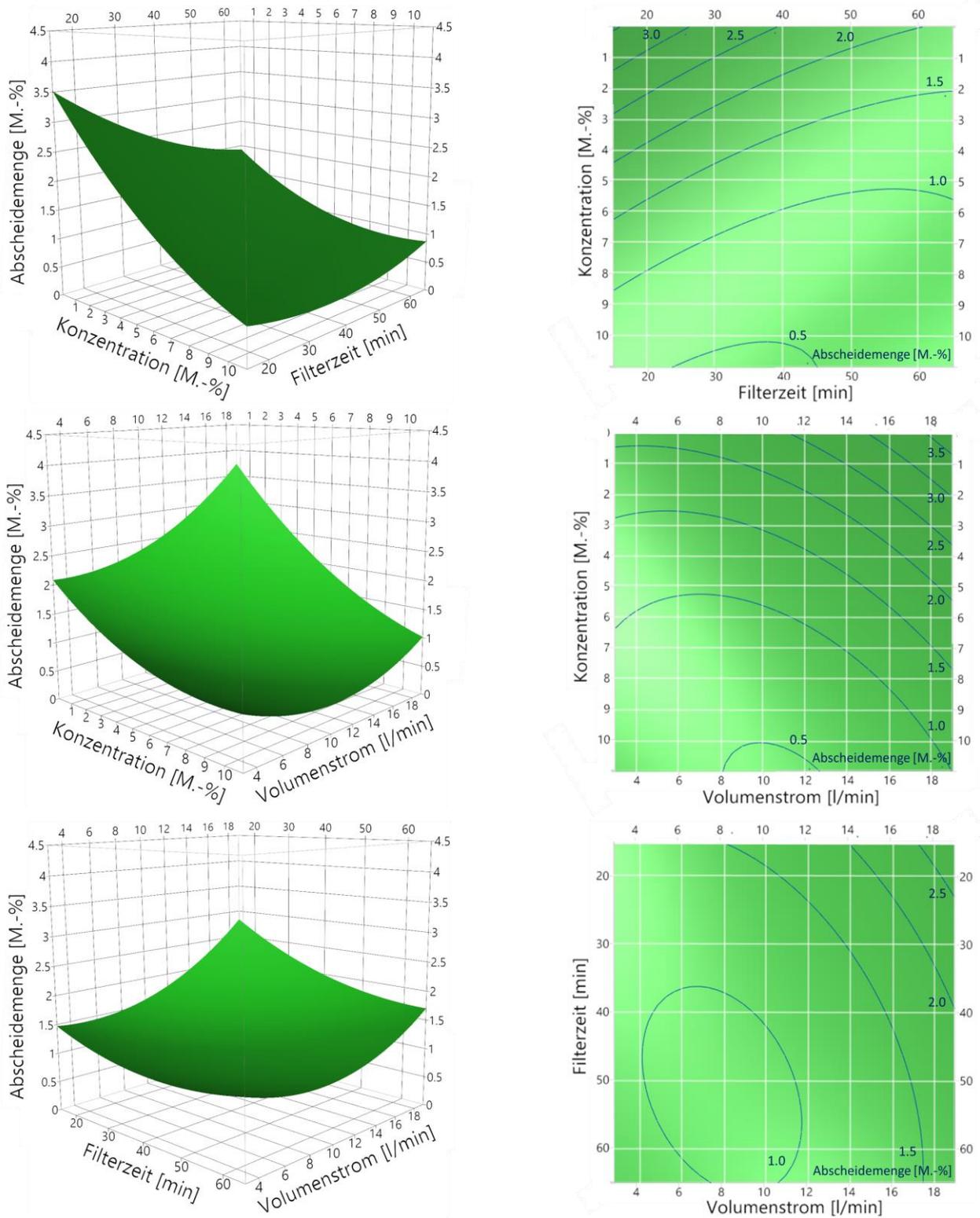


Abbildung VI.4: Wirkungsflächenanalyse der untersuchten massenbezogenen Faktoren, dreidimensional links und zweidimensional rechts.

VI.2 Partikelgrößenbezogene Bewertung der Versuchsergebnisse

Die gemittelten mittleren Partikelgrößen $\overline{d_{50}}$ der einzelnen Versuchsreihen sind in Tabelle V.1 bzw. zur weiteren Analyse für die wiederholten Reihen gemittelt in Tabelle V.2 gegeben. Dies ermöglicht, analog zu der massenbezogenen Auswertung, die Bewertung der Versuchsreihen bezüglich der Reinheit der Retentate anhand der gemittelten mittleren Partikelgröße $\overline{d_{50}}$. Die Ergebnisse sind im Diagramm der folgenden Abbildung VI.5 aufgetragen. Wiederholte Versuchsreihen sind entsprechend mit * gekennzeichnet, wobei hier die gemittelten Ergebnisse dargestellt werden.

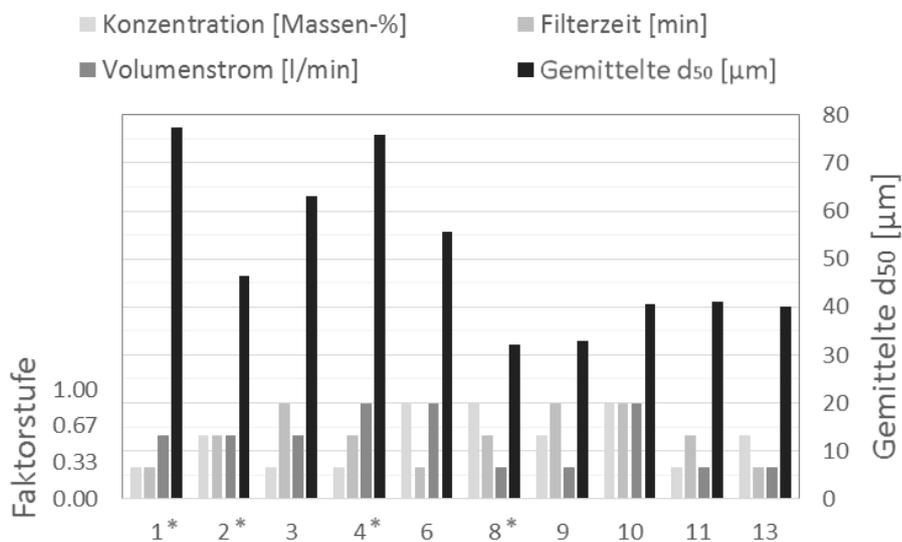


Abbildung VI.5: Vergleich der gemittelten mittleren Partikelgröße $\overline{d_{50}}$ (schwarz) nach 120 min sowie die dazugehörigen Einflussgrößen normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne)

Analog zu der vorhergegangenen Bewertung werden zunächst die Ergebnisse nach dem aufsteigenden $\overline{d_{50}}$ geordnet und in dem Diagramm links in Abbildung VI.6 dargestellt. Entgegengesetzt zur Bewertung der Abscheidemenge sind hier nicht die höchsten, sondern die geringsten Werte anzustreben. Damit werden in den Versuchsreihen kleinere Partikel in den Retentaten erreicht, die auf einen höheren Anteil an Stahlpartikeln und somit eine höhere Reinheit des Retentats schließen lassen (siehe Abschnitt III.3.3 sowie V.1.2). Wie in der massenbezogenen Bewertung lässt sich auch hier ein maßgebender Faktor identifizieren. Mit Ausnahme der Versuchsreihe 10 sind im linken Bereich Versuchsreihen mit niedrigem Volumenstrom zu finden. Die Ausnahme der Reihe 10 zeigt jedoch, dass auch bei dieser Bewertung deutliche Wechselwirkungen der Faktoreinstellungen zu beobachten sind. Aus diesem Grund werden im folgenden Schritt die Ergebnisse nach steigender Partikelkonzentration bewertet.

Im Diagramm rechts in Abbildung VI.6 ist zu erkennen, dass eine geringe Partikelkonzentration zu

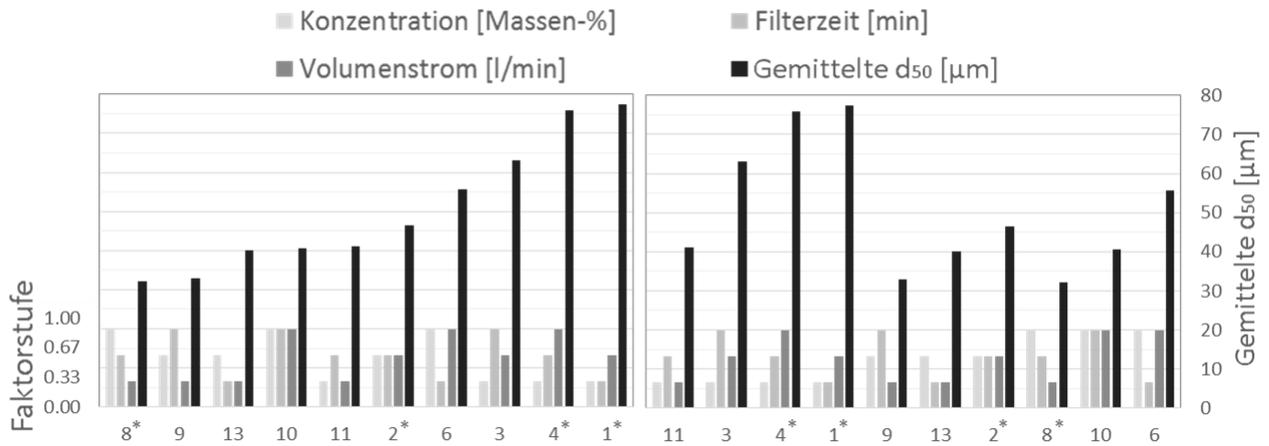


Abbildung VI.6: Gemittelte Partikelgröße $\overline{d_{50}}$ der Versuchsreihen, geordnet nach steigender $\overline{d_{50}}$ (links) und nach steigender Partikelkonzentration (rechts)

einer verstärkten Zunahme der mittleren Partikelgröße führt. In dieser Analyse ist im Zuge dessen mit einer Zunahme des Abrasivanteils im Retentat mit geringerer Partikelkonzentration zu rechnen. Der direkte Vergleich des Partikelkonzentrationseinflusses mit gleichbleibender Filterzeit sowie gleichbleibendem Volumenstrom ermöglicht dabei wieder die Gegenüberstellung der Versuchsreihen 11 und 8 (1 Massen-% bzw. 10 Massen-%, 40 min, 4 l/min). Dabei ist die Abnahme von $\overline{d_{50}}$, bezogen auf die Partikelkonzentration mit ca. 20 %, deutlich niedriger als in der massenbezogenen Bewertung (ca. 60 %). In diesem Fall ist aber in Bezug auf die Reinheit des Retentats die Einstellung von Versuchsreihe 8 zu bevorzugen.

Um eine Bewertung des Einflusses der Filterzeit zu erlauben, werden im Diagramm links in Abbildung VI.7 die Ergebnisse nach steigender Filterzeit geordnet. Hierbei ergibt sich ein sinkender Wert von $\overline{d_{50}}$ mit zunehmender Filterzeit, was die Reinheit des Retentats begünstigt. Der direkte Vergleich, der durch Gegenüberstellung der Versuchsreihen 6 und 10, 13 und 9 sowie 1 und 3 ermöglicht wird, bestätigt diese Beobachtung. Dabei wird durch Erhöhung der Filterzeit eine Senkung von $\overline{d_{50}}$ von etwa 20 % bei den letzten zwei Gegenüberstellungen erreicht, zwischen Versuchsreihe 6 (20 min Filterzeit) und 10 (60 min Filterzeit) sogar knapp 30 %.

Der verbleibende Vergleich des Einflussfaktors Volumenstrom im rechten Diagramm von Abbildung VI.7 bestätigt die Beobachtung, die schon links in Abbildung VI.6 zu erkennen war. Dabei ist der Einfluss des Volumenstroms viel deutlicher zu erkennen als bei den anderen Faktoren, womit dieser für die Reinheit des Retentats den signifikantesten Parameter darstellt.

Um die Annahmen der gemittelten mittleren Partikelgröße $\overline{d_{50}}$ zur Bewertung der Reinheit der Retentate weiter überprüfen zu können, wurden zu den bereits untersuchten Proben aus Abschnitt V.1.2 noch weitere Stichproben mittels ICP-EOS untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle VI.1 zusammengefasst. Dabei wurden pro Retentatfraktion jeweils zwei Stichproben unter-

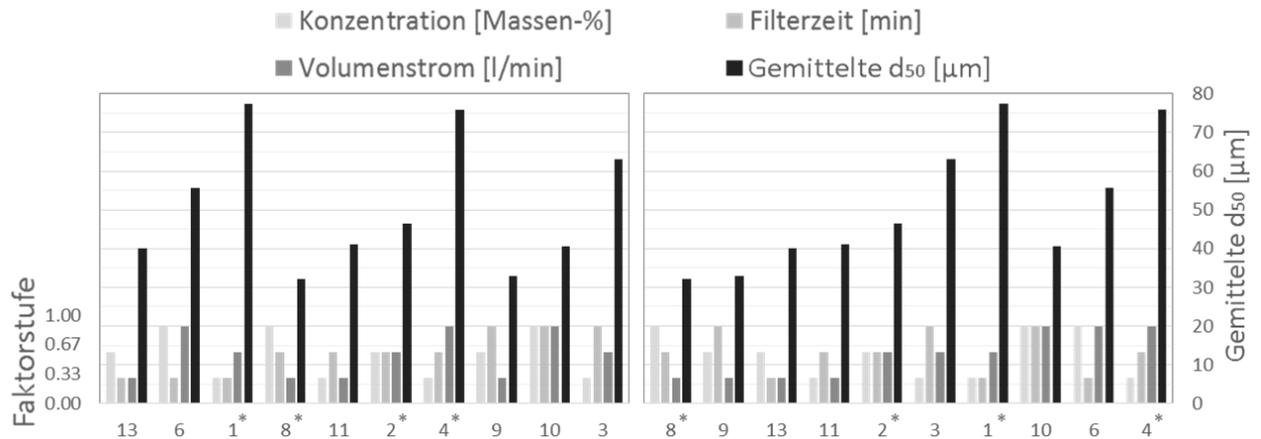


Abbildung VI.7: Gemittelte Partikelgröße $\overline{d_{50}}$ der Versuchsreihen, geordnet nach steigender Filterzeit (links) und nach steigendem Volumenstrom (rechts)

sucht und daraus der Mittelwert gebildet. Die Standardabweichung aller so ermittelten Ergebnisse in Tabelle VI.1 liegt im Mittel bei ca. 3 %, wobei sich der minimale Wert bei 0.15 % und der maximale bei 16 % befindet. Diese Abweichungen korrelieren dabei mit dem abnehmenden gemessenen Stahlgehalt in den jeweiligen Proben und nehmen somit mit der Anzahl an Filterzyklen zu.

Tabelle VI.1 : Ergebnisse für Stahlgehalt [Massen-%], bestimmt durch ICP-EOS-Analyse

Nr.	1*	2*	3	4*	6	8*	9	10	11	13
1.-Filterzyklus	50	71	49	47	67	73	71	66	65	
2.-Filterzyklus		38			42				29	
3.-Filterzyklus		19			26				11	
4.-Filterzyklus					14					
5.-Filterzyklus					10					
6.-Filterzyklus					16					

Die Werte in Tabelle VI.1 verdeutlichen nochmals die Abnahme des Stahlgehalts in den jeweiligen Retentaten mit zunehmendem Filterzyklus. Dabei sind die Versuchsreihen 2, 6 und 11 komplett untersucht worden. Bei den restlichen Reihen, mit Ausnahme von 13, ist aufgrund des hohen Aufwands dieser Analysen nur jeweils das erste Retentat untersucht worden. Wie bereits in der massenbezogenen sowie partikelgrößenbezogenen Bewertung spiegeln sich auch hier die großen Schwankungen der Werte zwischen den Retentaten bezogen auf die gewählten Faktorenkonstellationen wider. Werden dabei die hier ermittelten Ergebnisse aus Tabelle VI.1 mit den mittleren Partikelgrößen d_{50} aus Tabelle XIV.1, Tabelle XIV.2 sowie Tabelle XIV.3 verglichen, lässt sich folgender Zusammenhang in Abbildung VI.8 feststellen.

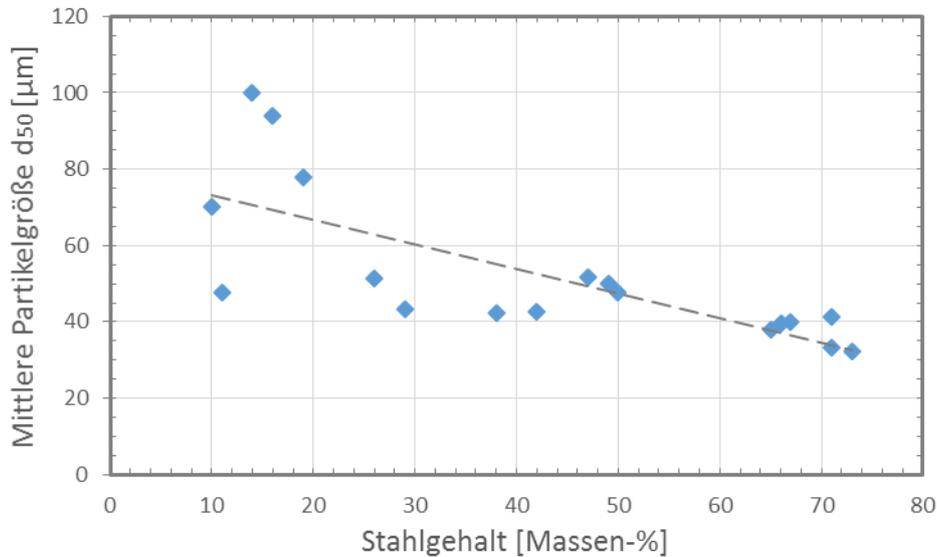


Abbildung VI.8: Mittlere Partikelgröße der Retentate, bezogen auf den ermittelten Stahlgehalt mittels ICP-EOS

Mit der Gegenüberstellung der mittels Extinktionszähler bestimmte mittlere Partikelgröße und der durch ICP-EOS gemessene Stahlgehalt in Abbildung VI.8 zeigt, dass hierbei eine gewisse Korrelation besteht. Insbesondere im Bereich des hohen Stahlgehalts wird mit der Partikelmesstechnik ein sehr guter Richtwert ermöglicht. Nach der Reduktion des Stahlgehalts durch den ersten Filterzyklus wird mit abnehmender Stahlkonzentration in Suspension das Messverfahren mit der Partikelmesstechnik immer ungenauer, wie Werte für Stahlgehalt < 40 Massen-% zeigen. Insbesondere kann aber damit eine sehr schnelle Deutung der Reinheit des ersten Retentats erreicht werden, was eine weitaus schnellere Aussage auf die Zusammensetzung des Retentats, verglichen mit der ICP-EOS Methode, zu lässt.

Damit kann für die Bewertung der Versuchsreihen in Bezug auf die Reinheit des Retentats festgehalten werden, dass eine Bewertung der Zusammensetzung der Fraktionen mittels Partikelgrößenverteilung qualitativ möglich ist. Es erlaubt zwar keine genaue Quantifizierung des wahren Stahlgehalts in der Mischung, zeigt aber eindeutig die Tendenz der Zusammensetzung. Dies ist von großer Bedeutung, da die Messung sehr schnell und einfach durchzuführen ist, und – zwar mit etwas Aufwand – durchaus in die Separationsanlage direkt integriert werden kann. Damit wären zukünftige Bewertungen der Anlage noch schneller durchzuführen, was im Gegensatz zur ICP-EOS-Analyse deutlich schneller, kostengünstiger und im Betrieb möglich wäre, wobei gleichzeitig keine besonders vertieften Fachkenntnisse zur Bedienung vorausgesetzt werden. Mit der partikelgrößenbezogenen Bewertung lässt sich somit zeigen, dass, um die Zielsetzung überwiegend stahlhaltiges Retentat zu erreichen (Reinheit des Retentats), die Parametereinstellungen prinzipiell gegenläufig zu der Erhöhung der Abscheidemenge liegen. Die Erkenntnis ist jedoch nach den gezeigten Analysen nachvollziehbar, da eine Erhöhung der Abscheidemenge,

unter der Voraussetzung der gleichen Korngemischzusammensetzung, nur durch die zusätzliche Abscheidung von Abrasivpartikeln möglich ist.

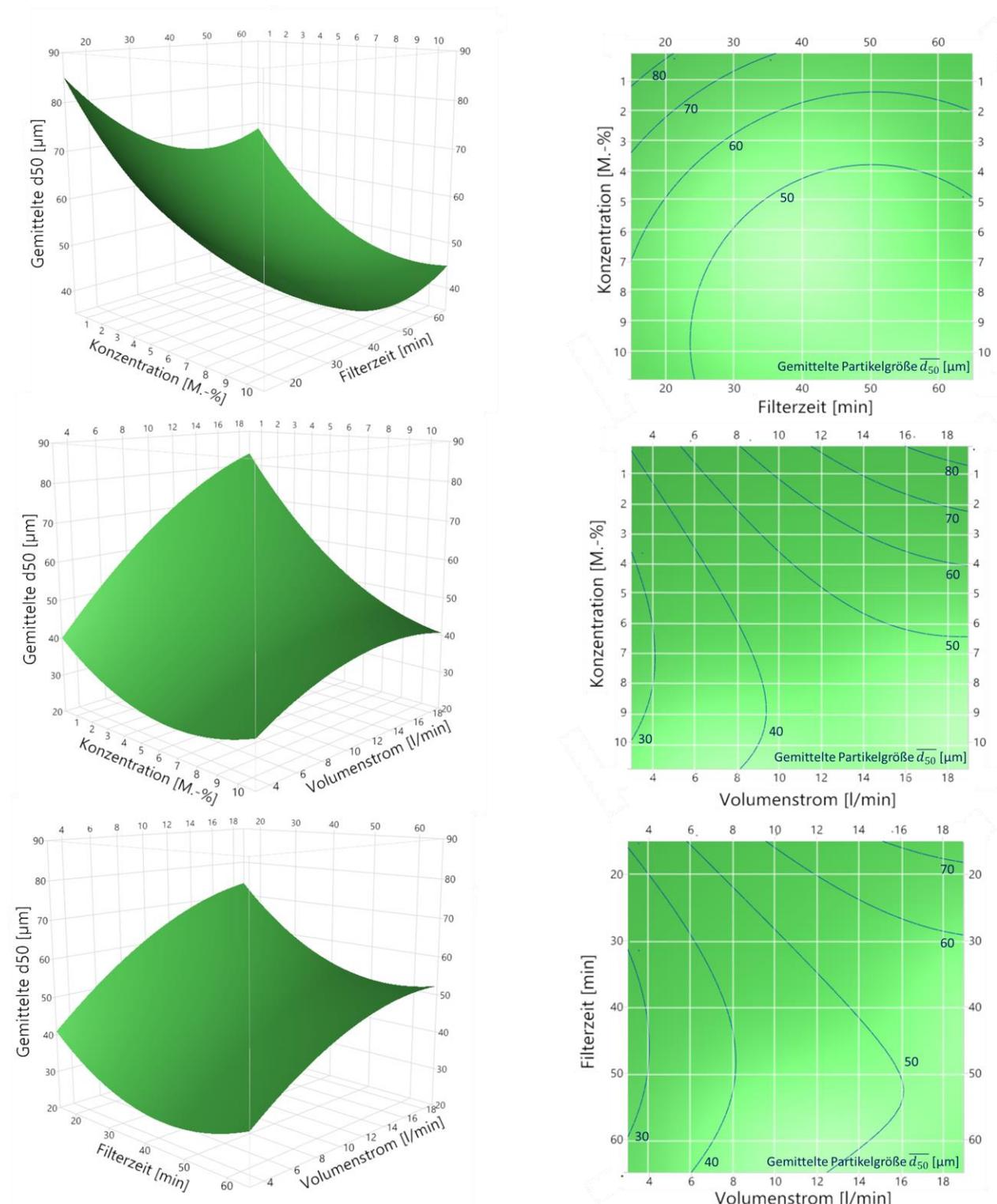


Abbildung VI.9: Wirkungsflächenanalyse der untersuchten partikelgrößenbezogenen Faktoren

Mittels des Softwarepakets JMP lässt sich, analog zur massenbezogenen Bewertung, eine Signifikanzanalyse der Faktoren mittels eines t-Tests bestimmen. Wie die Auswertungen in Abbil-

dung VI.6 sowie Abbildung VI.7 bereits zeigten, wird mit dem Test die hohe Signifikanz des Volumenstroms bestätigt, gefolgt von der Partikelkonzentration. Ähnlich zur massenbezogenen Bewertung wird der Faktor Filterzeit mit der geringsten Signifikanz eingestuft. Auch hier erlaubt JMP eine Bewertung der Wechselwirkung der Faktoren mittels einer Wirkungsflächenanalyse. Die damit erzeugten Diagramme werden in der Abbildung VI.9 gezeigt.

Durch die Diagramme mittig und unten in Abbildung VI.9 wird die Signifikanz des Volumenstroms grafisch nochmals sehr deutlich durch den starken Gradienten in den Wirkungsflächen gezeigt. Gleichzeitig sind, wie bei der massenbezogenen Bewertung, Wechselwirkungen der Parameter ersichtlich. Ein hoher Volumenstrom hat viel deutlichere Auswirkungen auf die gewonnene mittlere Partikelgröße der Retentate und führt damit durch geringe Filterzeit sowie Partikelkonzentration zu einer Zunahme des Abrasivanteils im Retentat.

Wie Abschnitt I.2.1.3 zu entnehmen ist, wird durch sinkenden Volumenstrom die Wirkung der hydrodynamischen Kraft gesenkt, was eine Abscheidung der Stahlpartikel begünstigt. Die Partikelkonzentration besitzt bei geringem Volumenstrom zwar keine so große Signifikanz, hat aber einen signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Retentats, wenn der Volumenstrom erhöht wird. Die Steigerung der Partikelkonzentration bewirkt dabei eine Erhöhung der Reinheit der Retentate. Eine lange Filterzeit trägt des Weiteren positiv zur Reinheit der Retentate bei. Dies wird in Abbildung VI.10 veranschaulicht. Bei einer Versuchsdurchführung mit 1-Massen % und 11 l/min nach jeweils 5 sowie 60 min wird dabei das Retentat am Stabmagnetfilter miteinander verglichen. Es ist zu sehen, dass bei kürzerer Filterzeit sehr klar Abrasivpartikel im Filterbett vorhanden sind. Wie dem Diagramm unten in Abbildung VI.9 zu entnehmen ist, sind diese Ablagerungen auch den Ergebnissen der teilfaktoriellen Versuchsdurchführung zu entnehmen, die mit steigender Filterzeit eine geringere mittlere Partikelgröße aufweisen.

Die Abrasivablagerungen im Filterbett nach kurzer Filterzeit sind auf die geringe Menge an Retentat an den Polen der Magnetstäbe zurückzuführen. Das geringe abgelagerte Filterbett erlaubt, dass Partikel näher an die Staboberfläche gelangen. Werden dabei die Messungen der Magnetfelder in Abbildung II.11 bzw. Abbildung II.12 betrachtet, ist ersichtlich, dass exponentiell die Magnetflussdichte sowie der Gradient an den Polen zunehmen. Damit wird eine magnetische Abscheidung der Abrasivpartikel mit der größten Suszeptibilität, in dem Fall Almandin (vgl. Tabelle III.3), begünstigt. Mit der Zunahme der Stahlablagerungen wird der Abstand zu den Polen durch das Filterbett erhöht, wodurch die Abscheidewahrscheinlichkeit dieser Partikel abnimmt. Diese Partikel sind bei zunehmender Filterzeit daher nicht mehr im Filterbett erkennbar. Zum Teil werden sie im Filterbett verdeckt bzw. – je nach Strömungseigenschaft – auch wieder ausgetragen.

Vorversuche haben gezeigt, dass es bei höherem Volumenstrom auch zu einer zunehmenden Ablagerung von Abrasivpartikeln im Filterbett kommen kann, was bei sehr langen Filterzeiten

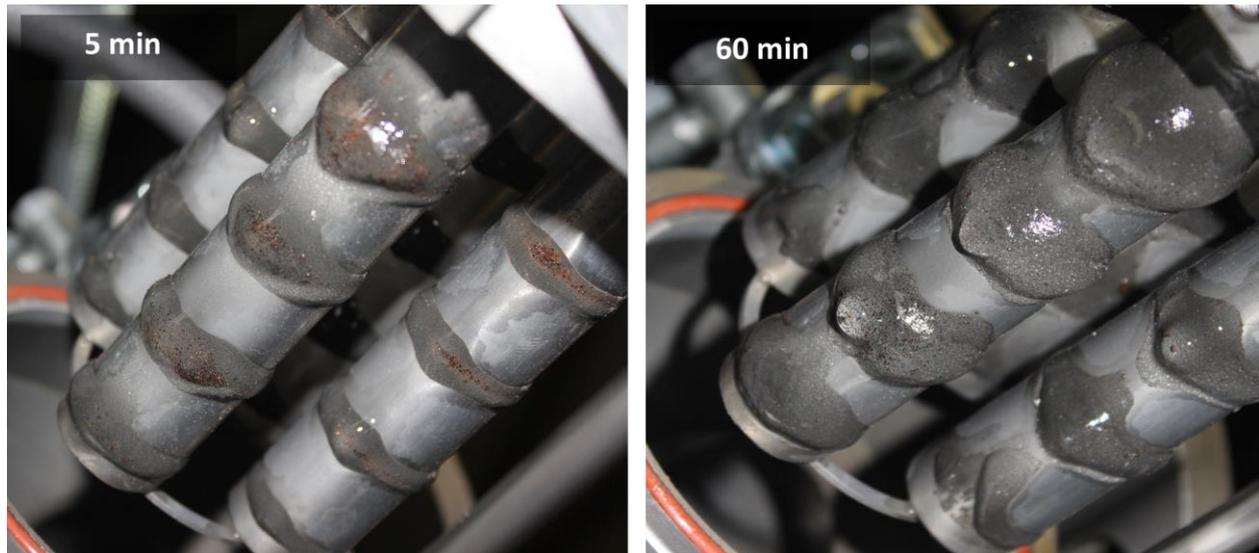


Abbildung VI.10: Abrasiveinlagerung in Abhängigkeit von der Filterzeit (5 min: links; 60 min: rechts) bei 1-Massen % und 11 l/min (40 min: siehe Abbildung V.16)

auch zum Zusetzen des Filters führen kann. Der geringe Volumenstrom liefert nicht nur eine Verringerung der hydrodynamischen Kräfteeinwirkung, sondern trägt auch durch die angewendete Membranpumpe zur Steigerung der Pulsation der Strömung bei. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine pulsierende Strömung einen positiven Beitrag zur Reinheit der magnetischen Sortierung hat [34], [78]. Dies wird in den Skizzen in Abbildung VI.11 veranschaulicht.

Ähnlich wie die Nutzung von wechselnden Polen in Magnetseparatoren (siehe Abschnitt I.2.3) führt die pulsierende Strömung zur dynamischen und kontinuierlichen Bewegung des Filterbetts.

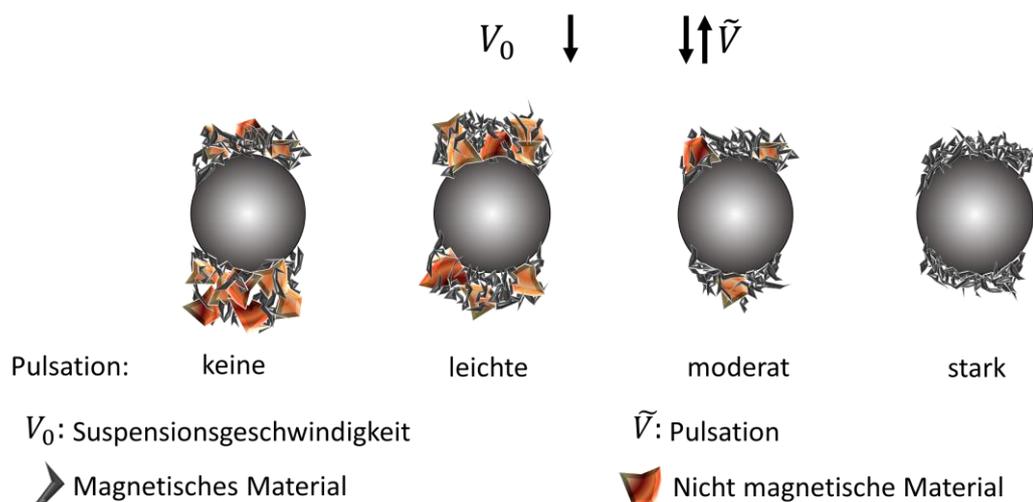


Abbildung VI.11: Einfluss einer pulsierenden Strömung auf die magnetische Separation (angepasst aus [34])

Dadurch werden abgelagerte Partikel mit geringerer Suszeptibilität aus dem Filterbett gedrängt und von der Strömung mitgetragen. In der vorliegenden Anwendung wird dies durch die Anwen-

dung der Membranpumpe begünstigt. Durch die Verringerung des Volumenstroms wird sich dem unteren Bereich der Förderleistung der Membranpumpe genähert, wobei bei der Faktoreinstellung von 4 l/min eine Pulsation in der Strömung von bis zu $\pm 20 \%$ erreicht wird (siehe Abschnitt II.1.2). Die Wechselwirkung dieser Effekte trägt daher zur Erhöhung der Retentat-Reinheit mit zunehmender Filterzeit bei geringem Volumenstrom bei.

VI.3 Bewertung der Separationseffizienz

Die Hauptzielsetzung dieser Untersuchung ist die Steigerung der Effizienz der Separation. Dabei werden die Faktoreneinstellungen gesucht, die die höchste Reduktion an Stahlgehalt im Filtrat nach der Separation erreichen. Hierzu können bereits die massenbezogene sowie partikelgrößenbasierte Bewertung verwendet werden. Um eine signifikante Reduktion des Stahlanteils im Filtrat erreichen zu können, muss zum einen eine hohe Abscheidemenge erzielt werden, wobei zum anderen ein hoher Reinheitsgrad der Retentate erreicht werden sollte (Trennschärfe). Mit diesen Kriterien werden hohe Abscheideraten der Stahlspäne angestrebt. Hierfür werden die Diagramme der massenbezogenen sowie partikelgrößenbezogenen Bewertung herangezogen, wie die folgende Abbildung VI.12 zeigt. Dabei sind von links nach rechts die Versuchsreihen jeweils nach abnehmender Abscheidemenge sowie nach zunehmender mittlerer Partikelgröße sortiert. Dieser Vergleich erlaubt somit das Ausfindigmachen von Versuchsreihen, die beide Kriterien der Abscheidemenge mit Retentat-Reinheit vereinen. Hierbei ist zu sehen, dass durch die gegenläufigen Faktoreneinstellungen in den beiden Bewertungen viele der Versuchsreihen entsprechend gute Eigenschaften lediglich in einer der Disziplinen aufweisen. Im Mittelfeld zeigt sich insbesondere die Versuchsreihe 11 als günstige Faktorenkombination, die gleichzeitig beiden Kriterien in entsprechendem Maße gerecht wird. Mit den Einstellungen einer geringen Partikelkonzentration, einer mittleren Filterzeit und einem geringen Volumenstrom wird sowohl eine hohe Abscheidemenge erreicht als auch eine relativ geringe mittlere Partikelgröße.

Mit den Angaben aus Tabelle VI.1 sowie Tabelle XII.1, Tabelle XII.2 und Tabelle XII.3 lässt sich die Stahlmenge [g] in den Retentaten des ersten Filterzyklus durch den gemessenen Stahlgehalt und der Abscheidemenge berechnen. Dabei wird durch die Versuchsreihe 11 eine der höchsten Mengen an Stahlspänen erreicht, die nur durch Versuchsreihe 4, aufgrund der großen Menge an unreinem Retentat, übertroffen wird. Auch im Vergleich des Retentats des zweiten und dritten Filterzyklus wird der höchste Wert in den vorliegenden Stichproben der Versuchsreihe 11 erzielt, wobei der Stahlgehalt der Retentate der Versuchsreihe 4 hier zum Vergleich nicht vorliegt.

Um quantitativ eine Aussage über die Abscheideeffizienz treffen zu können, wurde an den gereinigten Filtraten auch eine ICP-EOS-Analyse durchgeführt. Die hierbei anhand des Nickelgehalts ermittelten Ergebnisse für die Filtrate sind in Tabelle VI.2 in der zweiten Zeile gegeben. Da das

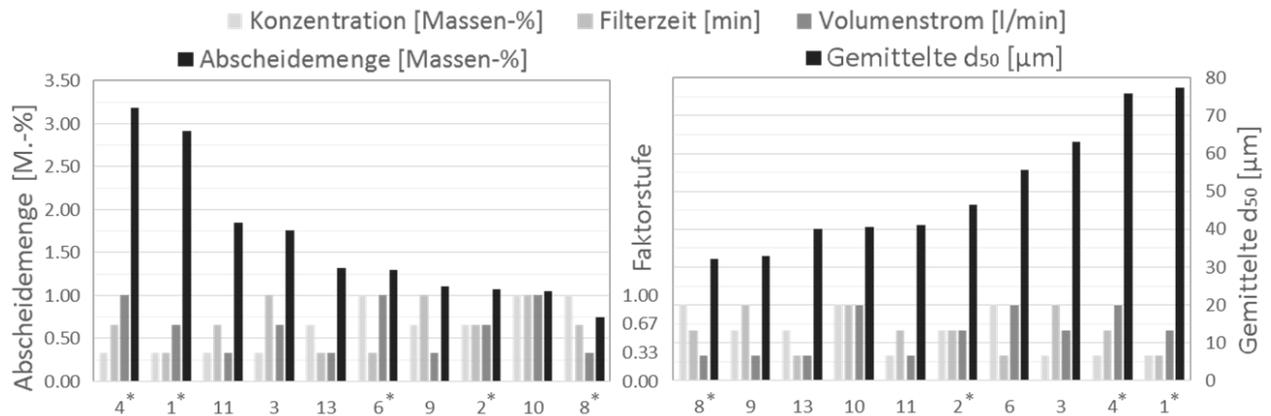


Abbildung VI.12: Versuchsreihen geordnet nach fallender Abscheidemenge (links) und nach steigender mittleren Partikelgröße (rechts)

reine Abrasiv auch Spuren an Nickel enthält (siehe Abschnitt III.3) wurden die gemessenen Werte, unter der Annahme, dass nur ein geringer Anteil an Abrasiv durch die Retentate abgetrennt wird, um den gemessenen Nickelbetrag im reinen Abrasiv nach unten korrigiert. Mit dem Ausgangswert von $c_0 = 0.343$ Massen-% Stahlgehalt in dem Korngemisch wird mit Gleichung (IV.1) die Effizienz der Separation in der letzten Zeile der Tabelle wiedergegeben.

Tabelle VI.2 : Ergebnisse für Stahlgehalt [Massen-%], bestimmt durch ICP-EOS Analyse

Nr.	1*	2*	3	4*	6	8*	9	10	11	13
Stahlgehalt im Filtrat [Masse-%]	0.064	0.089	0.078	0.103	0.188	0.122	0.322		0.034	0.18
Effizienz der Separation E [%]	81.2	73.9	77.1	69.6	45.1	64.3	6.1		90.0	47.2

Die chemische Analyse zeigt dabei eindeutig, dass die Separation des Stahlanteils aus dem Korngemisch mit der entwickelten Separationsanlage möglich ist. Wie bereits in den anderen Bewertungen sind auch hier wieder eindeutig Schwankungen in den Ergebnissen aufgrund der Wechselwirkung der Faktoren in der teilfaktoriellen Versuchsplanung zu sehen. Werden die Ergebnisse mit der bereits durchgeführten Bewertung anhand von Abbildung VI.12 berücksichtigt, zeigt sich, dass die mit der ICP-EOS erzielten Ergebnisse mit den erhaltenen Erkenntnissen sehr gut korrelieren. Insbesondere sticht dabei die Versuchsreihe 11 heraus, die durch die geeignete Wahl der Faktoreneinstellung eine sehr gute Effizienz der Separation von 90 % erreicht. Auch die restlichen Ergebnisse lassen darauf hindeuten, dass durch das hier entwickelte Separationsverfahren eine Reduktion des radiologischen Inventars im Korngemisch um mindestens die Hälfte möglich ist bzw. durch die Anwendung der geeigneten Faktoreneinstellung sogar eine Reduktion

um eine Größenordnung ermöglicht wird. Eine Bewertung analog zu den vorherigen Abschnitten in der folgenden Abbildung VI.13 zeigt die klaren Tendenzen einer guten Separationseffizienz. Dabei zeigen sich eine geringe Partikelkonzentration, ein geringer Volumenstrom sowie eine mittlere Filterzeit als vorteilhaft zum Erreichen einer Separationseffizienzsteigerung. Diese Kombination entspricht dabei genau den Einstellungen von Versuchsreihe 11 mit 1-Massen % an Partikelkonzentration, einer Filterzeit von 40 min sowie einem Volumenstrom von 4 l/min.

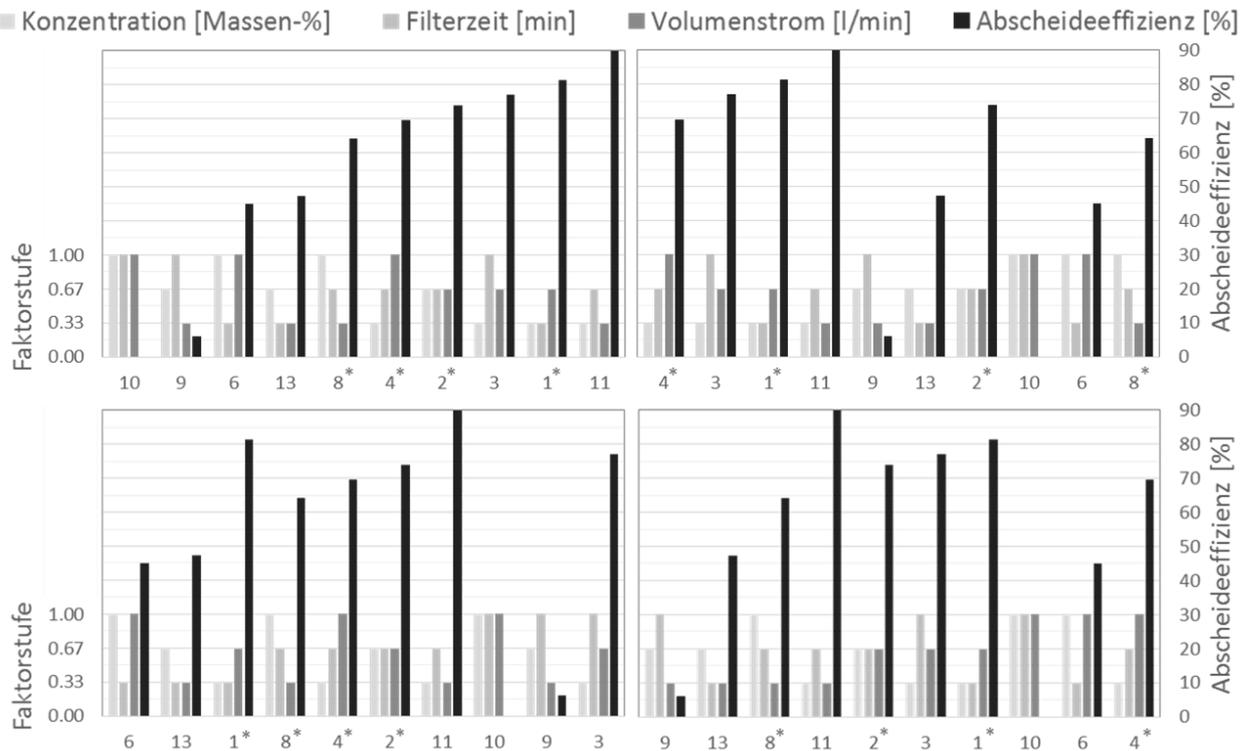


Abbildung VI.13: Abscheideeffizienz E der Versuchsreihen, geordnet nach steigendem Wert (links oben), nach steigender Partikelkonzentration (rechts oben) sowie nach steigender Filterzeit (links unten) und nach steigendem Volumenstrom (rechts unten)

Werden in diesem Zug aus Abschnitt I.2.1.3 die Einflüsse der auf die Separation wirkenden Parameter aufgegriffen, können hieraus folgende Schlüsse gezogen werden: Der eindeutigste Einfluss aus Gleichung (I.18) bezieht sich auf die Reynolds-Zahl. Wie bereits gezeigt, geht diese reziprok der Abscheidung einher, was durch die Reduzierung des Volumenstroms erreicht wird und somit die Separation begünstigt. Die Reduktion des Volumenstroms wirkt sich gleichzeitig positiv auf die Auswirkung der Stokes-Zahl aus. Durch die Reduktion des Volumenstroms (auf 4 l/min) wird die Abscheidung der Partikel durch die Reduktion der hydrodynamischen Kräfte erreicht. Somit wird die Abscheidung der sehr kleinen Stahlpartikel begünstigt und die Effizienz des Verfahrens erhöht. Die magnetische Druck-Kraft wirkt mit steigender magnetischer Flussdichte B positiv auf die Abscheidung der magnetischen Partikel. Durch den statischen Aufbau

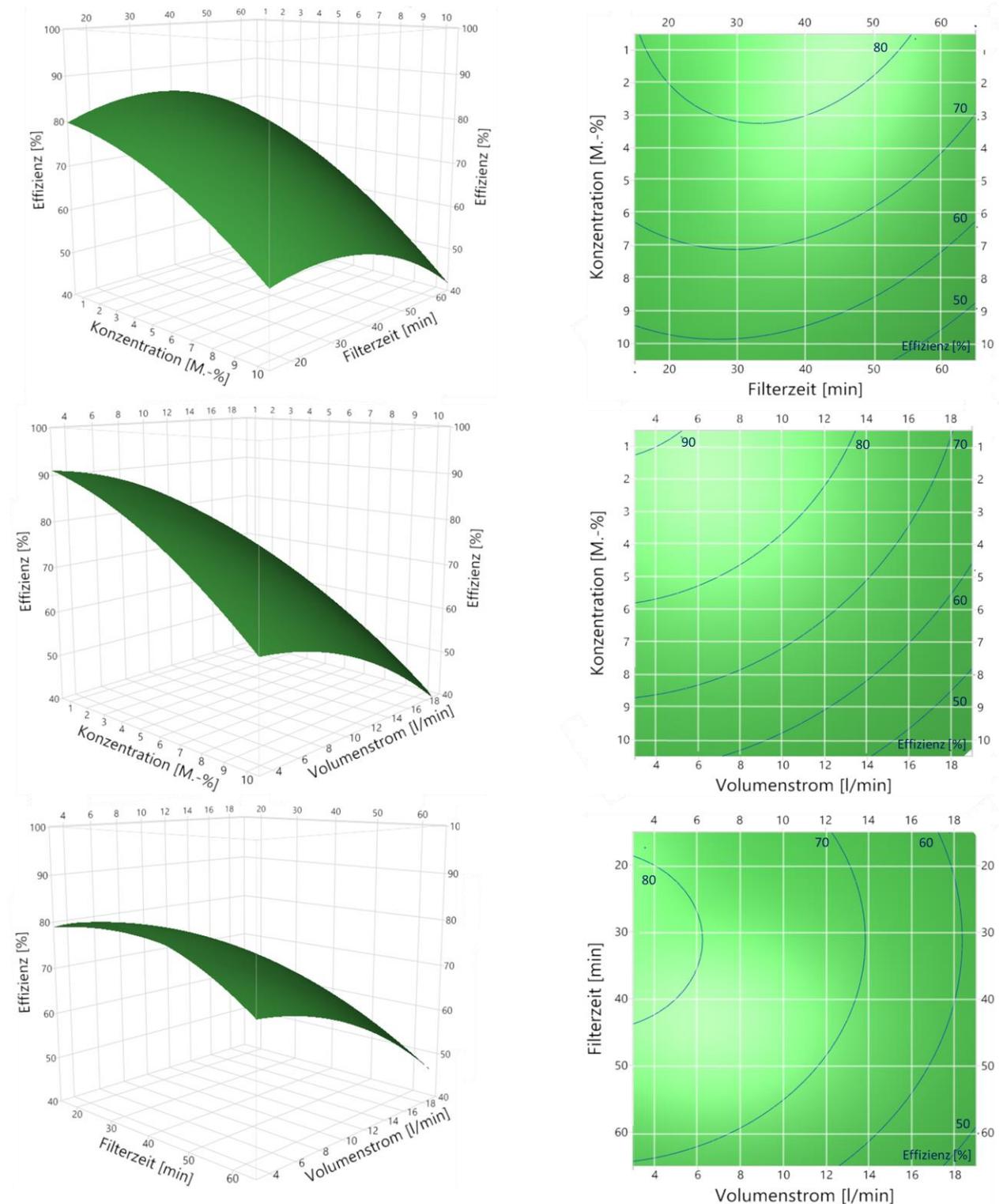


Abbildung VI.14: Wirkungsflächenanalyse der Effizienz der Separation

des Permanentmagnetfilters ist eine direkte Variation der magnetischen Flussdichte nicht möglich. Hier greift jedoch das Phänomen, das in Abbildung VI.10 gezeigt wurde, wo insbesondere in der Anfangszeit der Separation durch ein geringes Filterbett eine Abscheidung der Abrasivpartikel

mit höherer Suszeptibilität (insbesondere Almandin, vgl. Tabelle III.3) durch die exponentiell ansteigende Magnetflussdichte nahe des Pols begünstigt wird. Mit zunehmendem Filterbett wird der Abstand zu den Magnetpolen erhöht, womit die magnetische Flussdichte exponentiell sinkt und somit eine schärfere Trennung des paramagnetischen Stahls und des Abrasivs erfolgt. Überlagert wird dies des Weiteren durch die Nutzung der Membranpumpen, die durch die pulsierende Strömung zu einer Bereinigung des Filterbetts führen (vgl. Abbildung VI.11). Damit ist die Filterzeit genügend groß zu wählen, was mit 40 *min* Filterzeit erreicht wird. Die Zusammenhänge aus Gleichung (I.18) decken sich somit mit den hier erzielten Beobachtungen und beschreiben die gewünschte Steigerung der Separationseffektivität.

Die Wirkungsflächenanalyse der Ergebnisse, bezogen auf die Effizienz der Separation, belegen die getroffenen Beobachtungen der bisherigen Bewertungen. Diese sind folgender Abbildung VI.14 zu entnehmen. Somit bestätigt sich der optimale Betriebspunkt der Separationsanlage zur Steigerung der Separationseffizienz durch die Reduktion des Volumenstroms sowie der Partikelkonzentration, wobei die Filterzeit im mittleren Bereich anzustreben ist. Mittels der beiden Diagramme rechts oben und unten in Abbildung VI.14, die den Einfluss der Filterzeit zeigt, lässt sich ablesen, dass die besten Ergebnisse bei ca. 32 *min* Filterzeit zu erwarten sind.

Bei der qualitativen Bewertung der gereinigten Filtrate mittels BSE-REM zeigt sich sehr deutlich, dass eine nahezu komplette Abtrennung aller losen vorliegenden Stahlspäne im Korngemisch durch die Separation erreicht wird. Dies wird exemplarisch in der folgenden Abbildung VI.15 veranschaulicht. Dabei ist auf der linken Seite die Aufnahme des Korngemisches vor der Separation zu sehen. Durch entsprechende Bildbearbeitung können Materialien mit einer hohen Elektronenenergierückstrahlung, wie z. B. Stahl, im BSE-REM durch Anpassung der Helligkeit sowie des Kontrasts sehr deutlich sichtbar gemacht werden. In den beiden Bildern links sind damit die vorhandenen Stahlspäne sehr gut zu erkennen, wie exemplarisch durch einen umkreisten Stahlspan in beiden Bildern verdeutlicht wird. Werden die Bilder rechts in Abbildung VI.15 betrachtet, ist die sehr deutliche Abnahme an Stahlanteilen im unteren Bild rechts zu sehen. Die genaue Betrachtung der beiden Bilder links zeigt, dass durchaus einige eisenhaltige Substanzen in den großen Abrasivpartikeln enthalten sind. Diese machen auch im Bild unten rechts einen Großteil der verbleibenden aufgehellten Verunreinigungen aus. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass durchaus noch Stahlanhaftungen an den Schnittkanten der Abrasivpartikel vorzufinden sind. Einer dieser Funde ist in den Bildern rechts durch das Viereck entsprechend markiert.

Werden daher die Filtrate näher mithilfe einer BSE-REM Aufnahme betrachtet, findet sich ein Großteil des verbleibenden Stahls im Filtrat in Form von Anhaftungen an den Abrasivpartikeln. Diese sind um Größenordnungen kleiner als die bisher betrachteten Stahlspäne. Dabei sind insbesondere zwei Formen an Anhaftungen zu beobachten. In der folgenden Abbildung VI.16 sind

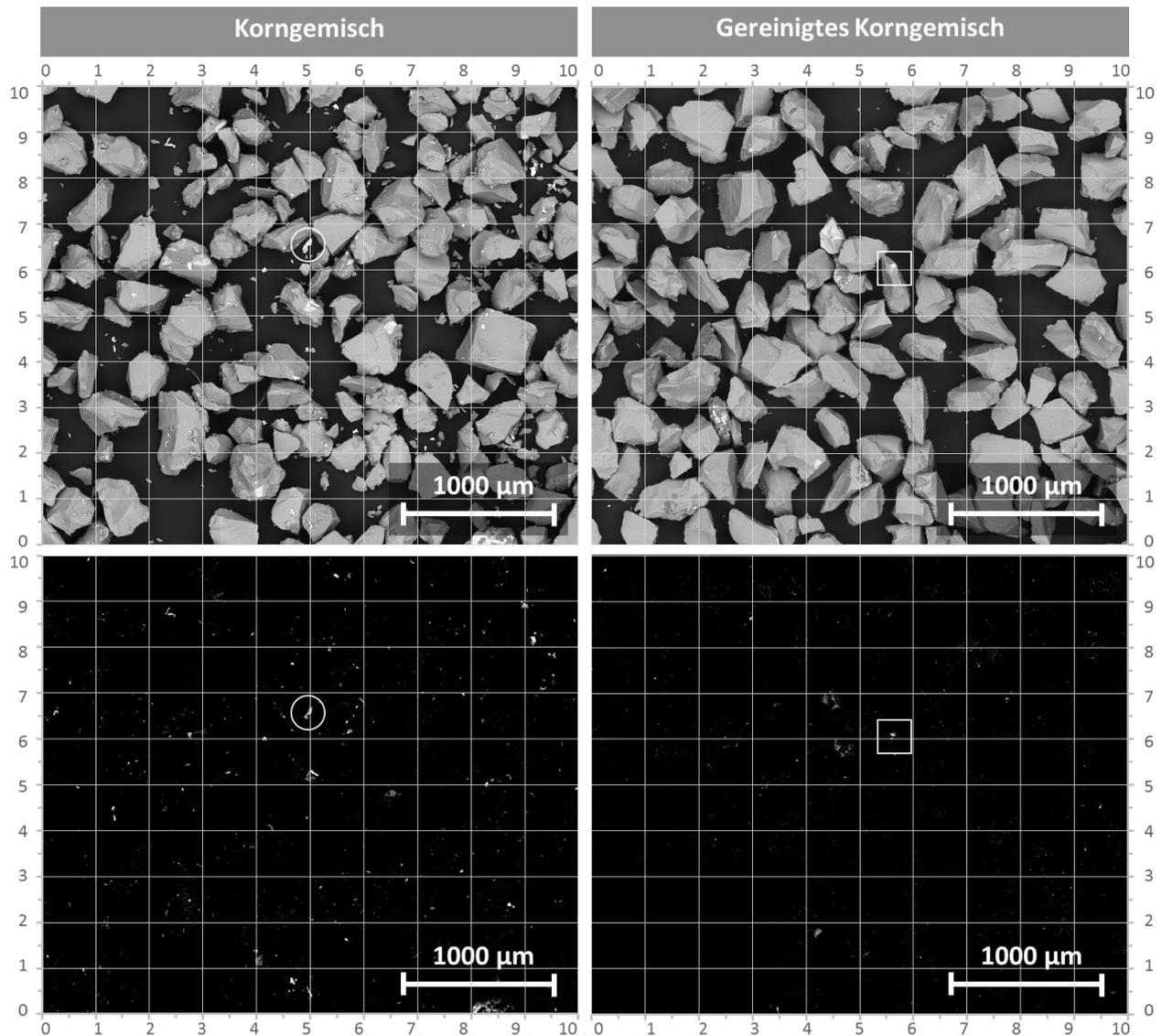


Abbildung VI.15: BSE-REM-Aufnahmen des Korngemisches vor (links) und nach (rechts) der Separation mit visualisierten Eisenanteilen durch Bildaufbereitung (unten) aus Versuchsreihe 11

Ablagerungen in Fugen von Abrasivpartikeln zu finden, sogenannte Zwickelfüllungen. Darin enthalten sind Abrasivfragmente sowie kleinere Stahlspäne, die sich selbst nach der Behandlung in der Separationsanlage nicht lösen und somit im Filtrat verbleiben.

Bei der zweiten Anhaftungsform handelt es sich um Aufbauschneiden [172], die bei der Zerspannung des Stahls an dem Abrasiv während des Schnitts anhaften, wie links in Abbildung VI.17 sehr gut zu sehen ist. Dabei wird während des Schnittvorgangs ein Teil des Stahls durch die hohe Wucht des Aufpralls am Abrasivkorn aufgestaut, der durch Pressschweißung daran haften bleibt. Ein Indiz für die sehr hohen Temperaturen, die während des Schnittvorgangs entstehen, zeigt das Bild rechts in Abbildung VI.17. Auch hier sind Anhaftungen an der Kante zu sehen, die bis ca. $30\ \mu\text{m}$ an der Oberfläche des Abrasivs hineinreichen. Dies deutet auf die Erzeugung eines

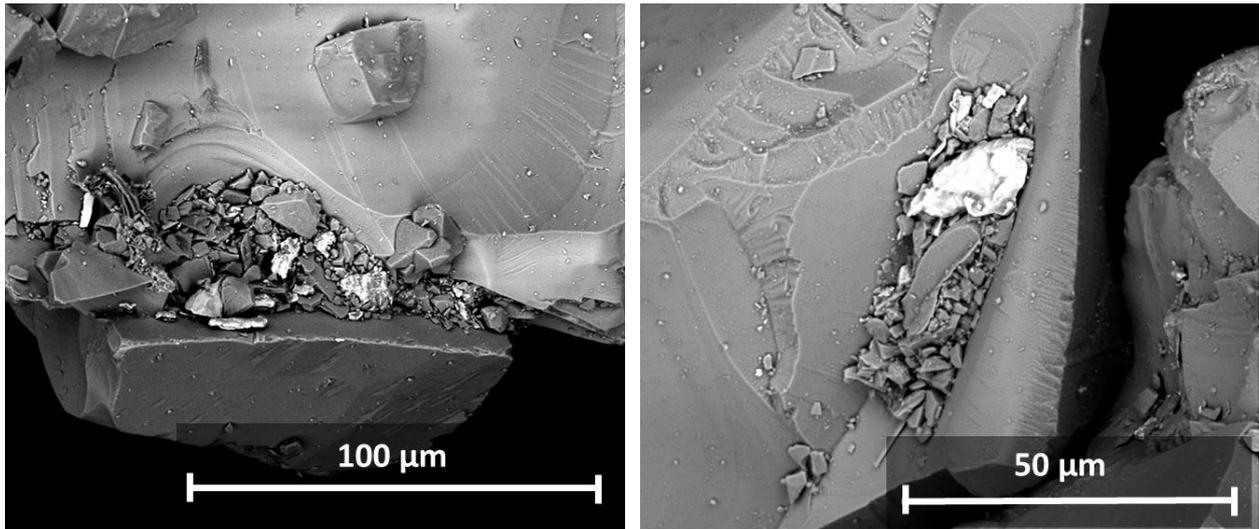


Abbildung VI.16: BSE-REM-Aufnahmen von Abrasivpartikeln mit Zwickelfüllungen

größeren Spans hin, wovon hier nur Restspuren zurückgeblieben sind. Die Spuren, die rechts oben im Detail hervorgehoben sind, zeigen eine Benetzung der Oberfläche durch eine leichte rekristallisierte Stahlschicht. Der Schmelzpunkt des hier betrachteten Edelstahl liegt bei ca. $1325 - 1530 \text{ } ^\circ \text{C}$, der deutlich durch die Partikel, mit einer Geschwindigkeit von ca. 600 m/s , erreicht wird. Eine Überschlagsrechnung mit Abrasivpartikeln von einem Durchmesser von ca. $450 \text{ }\mu\text{m}$ führt zu einer kinetischen Energie von 3 mJ pro Partikel, die in kürzester Zeit während des Aufpralls dissipiert wird.

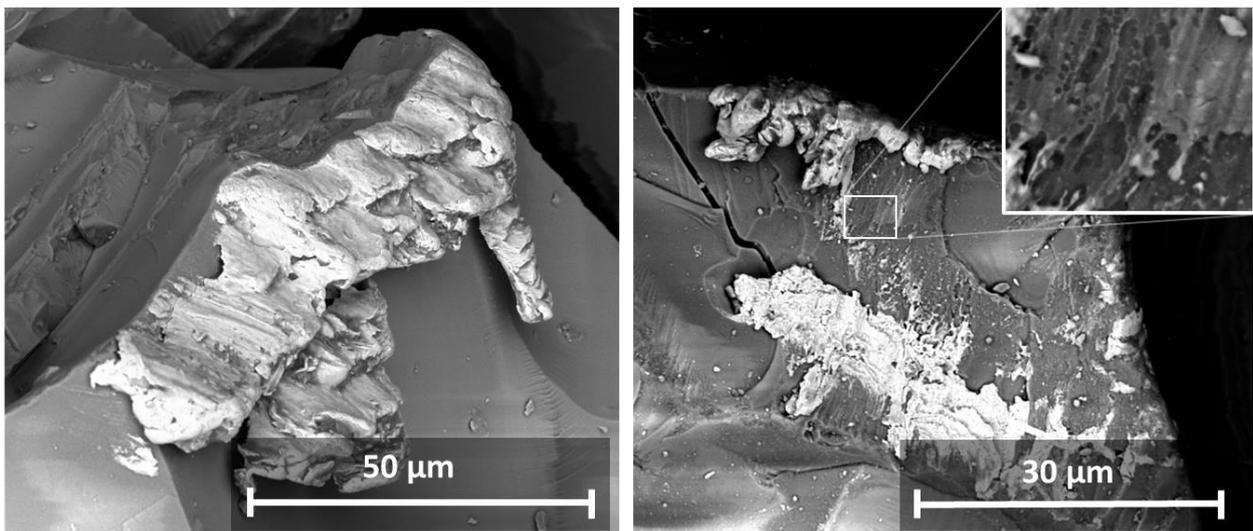


Abbildung VI.17: BSE-REM-Aufnahmen von Abrasivpartikeln mit Stahlanhaftungen

Die hohen Spannungen, die während der Zerspanung erzeugt werden, führen zur Teilmitnahme von Abrasivstücken, wie die Kerbe rechts von der hervorgehobenen Stelle zeigt. Auch größere Risse sind durch die Wucht im Abrasivkorn erzeugt worden, wie links oben im Bild zu sehen ist. Diese Erkenntnisse lassen auch bei der genaueren Betrachtung der Aufbauschneide am Abrasivkorn im linken Bild einen Bruch der vorderen Kante vermuten. Die Stelle an der oberen Kante

weist eine sehr unregelmäßige Oberfläche auf, die auf einen trümmerhaften Bruch hindeutet. Diese Art von Anhaftungen sind in allen vorliegenden BSE-REM-Aufnahmen der Filtrate vorzufinden, die in Anhang L zu finden sind.

VI.4 Fazit der Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen des Stabmagnetfilters zur Anwendung von Korngemischen aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik lassen folgende Aussagen zu:

- Die maximale Abscheidemenge gilt nicht als zielführende Größe zur Steigerung der Separationseffizienz. Sie ist jedoch, im Zusammenhang mit der mittleren Partikelgröße der Retentate, eine wichtige Größe zur Beurteilung der Separation.
- Die mittlere Partikelgröße der Retentate erlaubt mit der Partikelmesstechnik eine schnelle und einfache Bewertung des Stahlanteils in den Retentaten.
- Durch Kombination aus der massenbezogenen und partikelgrößenbezogenen Bewertung wird gezeigt, dass das beste Ergebnis mit einer geringen mittleren Partikelgröße bei gleichzeitig hoher Abscheidemenge erreicht wird.
- Die quantitative Bewertung dieses Ergebnisses anhand ICP-OES bestätigt diese Feststellung.
- Das hier entwickelte Separationsverfahren erlaubt eine Reduktion des Stahlgehalts innerhalb des Korngemisches von ca. 90 %, womit nahezu alle losen Partikel aus dem Gemisch getrennt worden sind.
- Die verbleibenden 10 % Stahl im Korngemisch belaufen sich überwiegend auf Anhaftungen an den Abrasivpartikeln in Form von Zwickelfüllungen oder Aufbauschneiden.
- Die beste Separation wurde bei Versuchsreihe 11 mit einer Partikelkonzentration von 1 Massen-%, einer Filterzeit von 40 min und einem Volumenstrom von 4 l/min erzielt.
- Die Wirkungsflächenanalyse der Anwendung des Stabmagnetfilters zur magnetischen Separation von Korngemischen zeigt, dass die Separationseffizienz durch die Minimierung des Volumenstroms und der Partikelkonzentration gesteigert wird.
- Partikelkonzentration und Volumenstrom stellen dabei die Faktoren mit der höchsten Signifikanz dar (in der Reihenfolge).
- Die Filterzeit spielt aufgrund der pulsierenden Strömung eine Rolle, wobei längere Filterzeiten zur Reinheit der Retentate beitragen, und – bis zu einem gewissen Grad – zur Steigerung der Effizienz führt.
- Eine zu lange Filterzeit führt jedoch wiederum zur Abnahme der Effizienz, womit ein Mittelwert von 32 min Filterzeit durch die Wirkungsflächenanalyse bei einer Partikelkonzentration von 1 Massen-% und einem Volumenstrom von 4 l/min bestimmt werden kann.

VII Zusammenfassung und Ausblick

Der Rückbau der kerntechnischen Anlagen in Deutschland und weltweit stellt eine große Herausforderung dar. Ein wichtiges Merkmal des sicheren und nachhaltigen Rückbaus ist der Schutz der Umwelt, wobei die Reduzierung von radioaktiven Abfällen zu einer sicheren und langfristigen Lagerung beiträgt. Durch die hier entwickelte und untersuchte magnetische Sortierung der Korngemische aus der WASS-Technik wird ein wichtiger Beitrag zur Behandlung der problematischen Sekundärabfallerzeugung bei der Zerlegung von hochaktivierten Bauteilen geleistet.

Die Separation der vorliegenden Korngemische basiert dabei auf der unterschiedlichen Suszeptibilität der Fraktionen im Gemisch. Das Abrasiv, das zum Schnitt dem Wasserstrahl beigemischt wird, besteht zum Großteil aus geringfügig paramagnetischen Silikaten und Granaten. Eine detaillierte Analyse konnte dabei zeigen, dass der geschnittene austenitische Edelstahl durch erhöhte Nickelanteile magnetisch vom Abrasiv getrennt werden kann. Durch verfahrenstechnische Einschränkungen der Anwendung in einer kerntechnischen Umgebung kommt ein unkonventioneller Stabmagnetfilter für die Behandlung des Korngemisches zum Einsatz. Fehlende Kenntnisse über diese Art von Magnetfiltern machten eine genauere Untersuchung im Zusammenhang mit der vorliegenden Anwendung unabdingbar.

Eine Variation der Anlagenparameter und somit der Betriebspunkte des Stabmagnetfilters zeigten, dass große Schwankungen in den erzielten Separationsergebnissen entstehen können. Um daher die Einflüsse der Parameter auf die Separation quantifizieren und die Wechselwirkungen ausfindig machen zu können, sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Zur Auswertung der jeweiligen Separationsergebnisse kommt unter anderem ein Extinktionszähler in einer eigens dafür aufgebauten Messeinrichtung zum Einsatz. Dazu werden die unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen des Abrasivs und der Stahlpartikel, die sich aus der

Bruch- und Spanmechanik ergeben, genutzt. Es zeigt sich, dass anhand der Partikelgrößenverteilung eine gute qualitative Aussage über die Zusammensetzung des magnetisch abgeschiedenen Materials gemacht werden kann. Damit ist eine erste schnelle und unkomplizierte Bewertung des separierten Materials ohne weitere Fachkenntnisse möglich. Ergänzt werden die experimentellen Untersuchungen durch eine numerische Mehrphasenströmungssimulation, um die Strömungsverhältnisse während der Separation im Stabmagnetfilter feststellen zu können.

Durch die Bewertung der erhaltenen Ergebnisse kann eine umfängliche Charakterisierung der Eigenschaften des Stabmagnetfilters gewonnen werden, wodurch ein wichtiger Beitrag zur Nutzung des Stabmagnetfilters zur Fest/Fest-Sortierung, auch im nicht kerntechnischen Bereich, geleistet wird. Die geringe Partikelgröße sowie die paramagnetischen Eigenschaften der Stahlpartikel führen zu einer sehr großen Varianz der erzielten Ergebnisse. Durch geschickte Strömungseinleitung über einen Flansch wird eine gute Verteilung der Partikel anhand von Rezirkulationen im äußeren Bereich des Filters erreicht, durch welche die statistische Abscheidung der magnetischen Partikel begünstigt wird. Mit der Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit auf 4 l/min wird die Wirkung der entgegenwirkenden hydrodynamischen Kraft verringert. Hohe Partikelkonzentrationen tragen dabei zur Erhöhung der interpartikulären Kräfte bei, wodurch sich zwar die Reinheit der Retentate erhöht, gleichzeitig aber die Separationseffizienz durch Mitnahme der kleinsten magnetischen Partikel mindert. Bei geringen Volumenströmen wird dieser Effekt verringert, durch die eine höhere Effizienz bei geringem Partikelanteil von 1 Massen-\% erreicht wird. Die Filterzeit spielt unter den Faktoren die geringste Signifikanz, trägt jedoch durch die pulsierende Strömung der eingesetzten Membranpumpen zur Steigerung der Reinheit des Retentats bei. Abgesehen davon, dass kürzere Filterzyklen zur Verlängerung der Behandlung durch regelmäßiges Spülen führen, wird gezeigt, dass eine Filterzeit von ca. $30 - 40 \text{ min}$ zur Steigerung der Effizienz beiträgt.

Die erreichten Ergebnisse der Parametereinstellung (1 Massen-\% , $30 - 40 \text{ min}$ und 4 l/min) erlauben nun einen effizienten Betrieb des Stabmagnetfilters, wobei die Erkenntnisse auch auf andere Anwendungen des Filters übertragbar sind. Somit ist im Zusammenhang der Sekundärabfallbehandlung der WASS Technik ein wichtiger Beitrag geliefert worden. Allerdings sind weitere Untersuchungen der Behandlung unabdingbar und werden auch bereits gegenwärtig weitergeführt. Mit der bestehenden Anlage ist bereits eine signifikante Reduktion des Stahlverbleibs im Filtrat von nahezu 90% erreicht worden. Verbleibende Stahlpartikel, Anhaftungen und Zwickelfüllungen setzen jedoch Untersuchungen von weiter verbesserten Techniken voraus. Dabei kann unter anderem die unterschiedliche Sinkgeschwindigkeit der Fraktionen zur Vorklassierung herangezogen werden. Des Weiteren ist eine Weiterbehandlung der Filtrate durch (Eigen-)/Abrasion bzw. durch Zusatztechniken wie beispielsweise Ultraschall zum Lösen der Anhaftungen vorstellbar. Weitere Verbesserungsvorschläge liegen in der Verfeinerung der Partikelgrößenverteilungsmesstechnik sowie deren direkte Integrierung in die Separationsanlage. Dabei spielen auch die

Vermeidung von Partikelablagerungen im System (insbesondere im Auslassbereich des Filters), eine genauere Untersuchung des Einflusses der Pulsation auf die Separation, vertiefte Vergleichsuntersuchungen der magnetischen Separation von reinem Abrasiv sowie Techniken zur Erhöhung der Homogenität und Probenahme der Mischungen eine wichtige Rolle.

VIII Literatur

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Operational & Long-Term Shutdown Reactors*,” 2016. .
<https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>.
[Zugriff: 18-April-2016].
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Status of the Decommissioning of Nuclear Facilities Around the World*,” Wien, Austria, 2004.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Permanent Shutdown Reactors*,” 2016.
<https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ShutdownReactorsByCountry.aspx>.
[Zugriff: 18-April-2016].
- [4] World Nuclear Association, “*Decommissioning Nuclear Facilities*,” Paper, January, 2016.
<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx>.
[Zugriff: 18-April-2016].
- [5] G. Schmidt, V. Ustohalova, and A. Minhans, “*Nuclear Decommissioning: Management of Costs And Risk*,” European Parliament: Directorate General for Internal Policies Policy Department D: Budgetary Affairs, Brussels, Belgium, 2013.
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Disposal Aspects of Low and Intermediate Level Decommissioning Waste*,” 2007.
- [7] S. Thierfeldt and F. Schartmann, “*Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen - Erfahrungen und Perspektiven*,” Aachen, Germany, 2012.
- [8] R. W. Henderson and L. Eickelpasch, “*Cutting Reactor Pressure Vessels and their Internals – Trends on Selected Technologies – 10247*,” 36th Annual Radioactive Waste Management Symposium 2010, Poenix, USA, 2010.
- [9] R. Thomas, “*Decommissioning : Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation*,” Electric Power Research Institute (EPRI), Nr.1003029, Palo Alto, California, USA, 2001.
- [10] H. Louis, F. Pude, C. Rad, and R. Verseemann, “*Abrasive Water Suspension Jet Technology Fundamentals, Application and Developments*,” *Weld. World*, vol. 51, no. 9, pp. 11–16, 2013.
- [11] V. N. Pi, “*Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting*,” Technische Universiteit Delft, 2008.
- [12] U. Kraps and P. Duwe, “*Zerlegung und Konditionierung des Reaktordruckgefäßes im Kernkraftwerk Würgassen*,” KONTEC, Dresden, Germany, 2010.
- [13] S. Bushart, “*Reactor Internals Segmentation Experience Report - Detailed Experiences 1993–2006*,” Palo Alto, California, USA, 2007.
- [14] J. H. Bruhn, H. S. Müller, and S. Gentes, “*Minimierung von Sekundärabfall aus der Wasser-Abrasive-Suspensions-Schneidtechnik*,” Annual Meeting on Nuclear Technology, Stuttgart, Germany, 2012.
- [15] M. Kantha Babu and O. V. Krishnaiah Chetty, “*A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining*,” *Wear*, vol. 254, no. 7–8, pp. 763–773, Apr. 2003.
- [16] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes*,” Technical Reports Series No. 389, Vienna, 1998.

-
- [17] P. Brennecke, "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014) - Endlager Konrad," The Federal Office for Radiation Protection (BfS), Germany, 2014.
- [18] T. A. Barker, "Improved Techniques for Packaging Irradiated Metal Segmentation Wastes," Annual Radioactive Waste Management Symposium 2001, Tucson, Arizona, 2001.
- [19] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), "Bericht über Kosten und Finanzierung der Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle," 2015.
- [20] E.ON Kernkraft GmbH, "Kernkraftwerk Würgassen - 12 Jahre erfolgreicher Rückbau," Beverungen, Deutschland, 2009.
- [21] S. Gentes, H. S. Müller, U. Kraps, M. Brandauer, S. Stiefel, J.-D. Eckhardt, M. Haist, C.-O. Krauß, U. Arnold, D. Schneider, and J. H. Bruhn, "Abschlussbericht - Neuartige Entsorgungswege für Abrasivmittel aus der Wasserstrahl- Schneidtechnik (NENAWAS)," BMBF Abschlussbericht, Karlsruhe, Deutschland, 2015.
- [22] S. Gentes, H. Geckeis, and et al., "Abschlussbericht - Magnet-Separation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (MASK)," BMBF Abschlussbericht, Karlsruhe, Deutschland, voraussichtliche Publikation in 2019.
- [23] M. Brandauer, J. Starflinger, and S. Gentes, "Entwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik," KONTEC, Dresden, Germany, 2015.
- [24] M. Brandauer, J. Starflinger, and S. Gentes, "Secondary Waste Treatment in the Decommissioning of German Nuclear Facilities," American Nuclear Society (ANS), Reno, Nevada, 2014.
- [25] M. Dölker, "Untersuchung eines magnetischen Filtersystems und Erstellung eines statistischen Versuchsplans," Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2015.
- [26] S. Zofka, "Inbetriebnahme eines Messsystems zur Partikelgrößenuntersuchung mittels Lasersensorik," Diplomarbeit, KIT, Karlsruhe, 2015.
- [27] H. Schubert, *Aufbereitung fester Stoffe Band II: Sortierprozesse*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1996.
- [28] D. Meschede, *Gerthsen Physik*, no. 1. Bonn: Springer-Lehrbuch, 2015.
- [29] E. Hering, R. Martin, and M. Stohrer, *Physik für Ingenieure*. 2012.
- [30] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*, vol. 2nd. 1998.
- [31] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 1. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2009.
- [32] H. Lindner, *Physik für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, 2010.
- [33] J. Svoboda, *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [34] B. Wills and J. A. Finch, *Mineral Processing Technology*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [35] K. E. Waters, N. A. Rowson, R. W. Greenwood, and A. J. Williams, "Characterising the effect of microwave radiation on the magnetic properties of pyrite," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 9–17, 2007.
- [36] W. Raith, *Lehrbuch der Experimentalphysik*. de Gruyter, 2006.

-
- [37] J. D. Livingston, *Driving Force*. Harvard University Press, 1996.
- [38] K.-H. Müller, G. Krabbes, J. Fink, S. Groß, A. Kirchner, G. Fuchs, and L. Schultz, "New permanent magnets," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 226–230, pp. 1370–1376, 2001.
- [39] M. Albrecht and A. Liebig, *Magnetismus: Grundlagen und Anwendungen*. Technische Universität Chemnitz, 2003.
- [40] E. P. Furlani, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices - Materials, Analysis, and Applications*. Academic Press, 2001.
- [41] M. Bartelmann, B. Feuerbacher, T. Krüger, D. Lüst, A. Rebhan, and A. Wipf, *Theoretische Physik*. Springer Spektrum, 2015.
- [42] A. Albrecht, "Grundlagen einer magnetischen Manipulation von Partikeln für Anwendungen in der miniaturisierten kombinatorischen chemischen Reaktionstechnik," pp. 1–141, 2004.
- [43] H. Schubert, E. Heidenreich, F. Liepe, and T. Neeße, *Mechanische Verfahrenstechnik*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1990.
- [44] J. Svoboda and T. Fujita, "Recent developments in magnetic methods of material separation," *Miner. Eng.*, vol. 16, no. 9, pp. 785–792, 2003.
- [45] G. I. Mathieu and L. L. Sirois, "Advances in technology of magnetic separation," Proc. XVIth Int. Mineral Process Congr., Stockholm, 1988.
- [46] J. Svoboda, "The Effect of Magnetic Field Strength on the Efficiency of Magnetic Separation," *Miner. Eng.*, vol. 7, no. 5/6, pp. 747–757, 1994.
- [47] E. Laurila, "Materials, Zurackenen magnetischen Aufbereitung des feinverteilten stark magnetischen," *Annales Academia Scientiarum Fennicae, Ser. A, I. Mathematica-Physica*, Nr. 171, Helsinki, 1954.
- [48] N. L. Weiss, *SME Mineral Processing Handbook*. N. L. Weiss Ed., 1985.
- [49] J. A. Oberteuffer, "Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-10, no. 2, pp. 223–238, 1974.
- [50] J. Zeng, Y. Deng, P. Vedantam, T. R. Tzeng, and X. Xuan, "Magnetic separation of particles and cells in ferrofluid flow through a straight microchannel using two offset magnets," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 346, pp. 118–123, 2013.
- [51] P. Grassmann, *Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik*. Otto Sale Verlag GmbH & Co., 1983.
- [52] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Springer-Verlag, 1994.
- [53] L. Raasch, *Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn VerlagsgesellschaftmbH, 1992.
- [54] G. H. Jirka, *Einführung in die Hydromechanik*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2007.
- [55] E. Ortega-Rivas, *Unit Operations of Particulate Solids - Theory and Practice*. 2012.
- [56] H. Herwig, *Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Physik und die mathematische Modellierung von Strömungen*. Springer-Verlag, 2006.
- [57] J. H. Spurk, *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Springer-Verlag, 1992.
- [58] D. Boucher, *Dimensionslose Kennzahl Sammlung*. 1972.
- [59] B. Noll, *Numerische Strömungsmechanik Grundlagen*. 1993.
- [60] J. F. Wendt, *Computational fluid dynamics - an introduction*. Springer, 2009.

-
- [61] C. T. Crowe, *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press.
- [62] A. R. Paschedag, *CFD in der Verfahrenstechnik - Allgemeine Grundlagen und mehrphasige Anwendungen*. Willey-VCH, 2004.
- [63] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2002.
- [64] A. Sokolichin, G. Eigenberger, A. Lapin, and A. Lübbert, "Dynamic numerical simulation of gas-liquid two-phase flows Euler / Euler versus Euler / Lagrange," vol. 52, no. 4, pp. 611–626, 1997.
- [65] D. Papoulias and S. Lo, "Advances in CFD Modelling of Multiphase Flows in Cyclone Separators," CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 43, 2015.
- [66] M. Brandauer, "RANS-Simulations of Turbulent Convective Flows at Supercritical Pressure," Diplomarbeit, KIT, Karlsruhe, 2011.
- [67] J. H. Ferziger and M. Peric, *Numerische Strömungsmechanik*. 2008.
- [68] C. G. Gunther, "Electro-magnetic ore separation," Hill Publishing Company, New York, 1909.
- [69] H. Schubert, *30 Jahre Entwicklung der Aufbereitungstechnik*. 1989.
- [70] S. J. Collocott, J. B. Dunlop, H. C. Lovatt, and V. S. Ramsden, "Rare-Earth Permanent Magnets: New Magnet Materials And Applications," 2007.
- [71] P. C. Dent, "Rare earth elements and permanent magnets (invited)," vol. 721, no. November 2011, pp. 1–6, 2012.
- [72] A. Jordens, "The beneficiation of rare earth element-bearing minerals," 2016.
- [73] A. Jordens, R. S. Sheridan, N. a. Rowson, and K. E. Waters, "Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation," *Miner. Eng.*, vol. 62, pp. 9–18, 2014.
- [74] R. D. Ambashta and M. Sillanpää, "Water purification using magnetic assistance: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 180, no. 1–3, pp. 38–49, 2010.
- [75] C. T. Yavuz, A. Prakash, J. T. Mayo, and V. L. Colvin, "Magnetic separations: From steel plants to biotechnology," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 10, pp. 2510–2521, 2009.
- [76] L. Borlido, A. M. Azevedo, A. C. A. Roque, and M. R. Aires-Barros, "Magnetic separations in biotechnology," *Biotechnol. Adv.*, vol. 31, no. 8, pp. 1374–1385, 2013.
- [77] W. R. A. Vauck and H. A. Müller, *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 2000.
- [78] S. Tarleton, *Progress in Filtration and Separation*. 2015.
- [79] K. Ishida and T. Pretz, "Efficient Approach to Fine Particle Separation Using Mechanical Stirring by Fluctuating Magnetic Field Iron Ore , Coke , Lime Pre-treatment Cement industry Road constructor Pre-treatment slag De [Si], De [P], De [S] Roadbed Civil engineering Refinin," pp. 1–18.
- [80] K. H. Unkelbach, *Magnetabscheider - Wirkungsweise und Anwendungen zur Trennung von Stoffen*. KHD Humboldt Wedag AG, 1990.
- [81] H. Masuda, *Powder Technology - Handling and Operations, Process Instrumentation, and Working Hazards*. CRC Press.
- [82] H. D. Wasmuth, K. H. Unkelbach, and C. Hahn, "Permos - A new medium intensity drum type permanent magnetic separator with special structure of NdFeB-magnets," *Int. Mineral Process. Congr.*, Dresden, 1991.

-
- [83] S. Kumar and T. Veerendra, "Prediction of Separation Performance of Dry High Intensity Magnetic Separator for Processing of Para-Magnetic Minerals," J. Inst. Eng. Ser. D, vol. 96, no. December, pp. 131–142, 2015.
- [84] F. Fraas, "Alternating current matrix-type magnetic separator," US Bureau of Mines Report of Investigations 7746, 1973.
- [85] C. E. Timothy, "Concentration of useful minerals from asteroids," JBIS - J. Br. Interplanet. Soc., vol. 54, no. 7–8, pp. 277–288, 2001.
- [86] M. Franzreb, "Magnettechnologie in der Verfahrenstechnik wässriger Medien," 2003.
- [87] K. Menzel, "Anwendung der Hoch-Gradienten Magnetfiltration und apparative Weiterentwicklung für den Einsatz in der Schmierölsreinigung und Bioprozesstechnik," 2015.
- [88] S. Huang, X. Zhang, M. Tafu, T. Toshima, and Y. Jo, "Study on subway particle capture by ferromagnetic mesh filter in nonuniform magnetic field," Sep. Purif. Technol., vol. 156, pp. 642–654, 2015.
- [89] M. Cerff and et al., "Harvesting fresh water and marine algae by magnetic separation: Screening of separation parameters and high gradient magnetic filtration," Bioresour Technologies 118, 2012.
- [90] S. K. Baik, D. W. Ha, J. M. Kwon, Y. J. Lee, and R. K. Ko, "Magnetic force on a magnetic particle within a high gradient magnetic separator," Phys. C Supercond., vol. 484, pp. 333–337, 2013.
- [91] P. A. Augusto, P. Augusto, and T. Castelo-Grande, "Magnetic classification," Miner. Eng., vol. 15, no. 1–2, pp. 35–43, 2001.
- [92] C. A. M. Afonso and J. G. Crespo, *Green Separation Processes - Fundamentals and Applications*. Willey-VCH.
- [93] E. Förster, K. Menzel, and H. Nirschl, "Development of a High Gradient Magnetic Separator for the," FILTECH 2015, Köln, 2015.
- [94] V. Zezulka, P. Straka, and P. Mucha, "A magnetic filter with permanent magnets on the basis of rare earths," vol. 268, pp. 219–226, 2004.
- [95] K. Menzel, J. A. Lindner, H. Soltner, and H. Nirschl, "Design and application of a longitudinal field Aubert permanent magnet composed of identically-shaped blocks for large-scale Magnetic Separation," Sep. Purif. Technol., vol. 134, pp. 220–231, 2014.
- [96] J. Lindner and H. Nirschl, "A hybrid method for combining High-Gradient Magnetic Separation and centrifugation for a continuous process," Sep. Purif. Technol., vol. 131, pp. 27–34, 2014.
- [97] M. C. Song and K. J. Lee, "A study on a magnetic separation of radioactive corrosion products from NPP using permanent magnets," Nucl. Eng. Des., vol. 229, no. 1, pp. 101–111, 2004.
- [98] P. a Beharrell, "Applications of Superconducting Magnetic Separation," vol. m.
- [99] P. Kampeis, M. Bewer, and S. Rogin, "Einsatz von Magnetfiltern in der Bioverfahrenstechnik Teil 1: Vergleich verschiedener Verfahren zum Rückspülen der Magnetfilter," Chemie-Ingenieur-Technik, vol. 81, no. 3, pp. 275–281, 2009.
- [100] S. Zeng, W. Zeng, L. Ren, D. An, and H. Li, "Development of a high gradient permanent magnetic separator (HGPMs)," Miner. Eng., vol. 71, pp. 21–26, 2015.
- [101] K. Sutherland, *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier Inc., 2008.
- [102] H. Gasper, D. Oechsle, and E. Pongratz, *Handbuch der industriellen Fest/Flüssig-*

- Filtration*. Willey-VCH.
- [103] Eriez Magnetics, “*Ferrous Traps (Permanent Magnet)*,” 2005. <http://www.eriez.com>. [Zugriff: 21-Mai-2016]
- [104] Nippon Magnetic Inc., “*Magnetic Separators*,” 2013. http://www.kanetec.co.jp/en/pdf/120_138.pdf. [Zugriff: 21-Mai-2016]
- [105] Goudsmit Magnetic Systems B.V., “*Schnellreinigende Magnetfilter*.” www.goudsmit-magnetics.nl. [Zugriff: 21-Mai-2016]
- [106] Eriez Magnetics, “*Grate Magnets*,” 2011. <http://www.eriez.com>. [Zugriff: 21-Mai-2016]
- [107] M. Mayer, C. Fabian, and M. Brandl, “*Simulation of Accumulation and Movement of Ferromagnetic Microparticles in Streaming Liquid within a Magnetic Trap*,” COMSOL Users Conference, no. 3, pp. 2–3, 2006.
- [108] G. P. Hatch and R. E. Stelter, “*Magnetic design considerations for devices and particles used for biological high-gradient magnetic separation (HGMS) systems*,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 225, no. 1–2, pp. 262–276, 2001.
- [109] M. Brandl, M. Mayer, J. Hartmann, T. Posnicek, C. Fabian, and D. Falkenhagen, “*Theoretical analysis of ferromagnetic microparticles in streaming liquid under the influence of external magnetic forces*,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322, no. 17, pp. 2454–2464, 2010.
- [110] U. Ilg, G. König, and M. Erve, “*Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasserreaktoren – Beitrag zur Anlagensicherheit, Wirtschaftlichkeit und Schadensvorsorge*,” *INFORUM: atw Nr. 53*, 766 - 780, Berlin, Germany, 2008.
- [111] H. Wagner, *Verfahrenstechnik*. Vogel Buchverlag, Würzburg: Vogel Fachbuch, 2004.
- [112] S. Hoffmann, “*Konzepterarbeitung zur Rühr- und Behältertechnik zur Umsetzung eines Suspensionsmischers*,” Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2014.
- [113] Deutsches Institut für Normung e.V., “*DIN28131 - Rührer und Stromstörer für Rührbehälter*,” Beuth Verlag GmbH, 1992.
- [114] Deutsches Institut für Normung E.V., “*DIN28011 - Gewölbte Böden - Köpperform*,” Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [115] R. Sieber, “*Numerische Simulation technischer Strömungen mit Fluid-Struktur-Kopplung*,” 2002.
- [116] Leman, *Rührer - Rührbehälterkonstruktionen : Grundlagen und Anwendungshilfen für Verfahrenstechniker*. 1998.
- [117] U. Harten, *Physik: Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag, 2014.
- [118] Goudsmit Magnetic Systems B.V., “*Datenblatt Neoflux schnellreinigender Magnetfilter SSFN005038*,” Waalre, Niederlande, 2012.
- [119] M. Rothkopf, “*Experimentelle Untersuchung der physikalischen Separation eines Strahlmittelgranulats aus dem Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneide-Verfahren*,” Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2014.
- [120] G. Verkant, “*Konzepterarbeitung und Realisierung einer Steuerung zur Automatisierung des Filtrationsprozesses von Stahlmittelgranulat aus dem WAS-Verfahren*,” Masterarbeit, KIT, Karlsruhe, 2014.

-
- [121] Hentrich, *Handbuch der Rührtechnik : Grundlagen, Auslegung, Rührer und Rührsysteme, Mechanik, Konstruktion, Dichtungstechnik, Betriebssicherheit, Anwendungsgebiete*. 2000.
- [122] H. L. Nguyen, "Experimentelle Untersuchungen eines Messsystems zur Partikelgrößenbestimmung mittels Lasersensorik," Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2016.
- [123] L. D. Carver, "Light blockage by particles as a measurement tool," *Issue Ann. New York Acad. Sci.*, vol. 158, pp. 710–721, 1969.
- [124] K. Schwister, *Taschenbuch der Verfahrenstechnik*. Carl Hanser Verlag, München: Carl Hanser Verlag, 2005.
- [125] M. O. Kurd, "The Material and Energy Flow Through the Abrasive Waterjet Machining and Recycling Processes," Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2004.
- [126] ANT Applied New Technologies AG, "Produktdatenblatt: AMU 2000-40," Stand: 22.04.2022, Lübeck.
- [127] K. K. Kuo and R. Acharya, *Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion*. University Park, Pennsylvania, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [128] Barton International, "Material safety data sheet - Garnet Abrasive Grains and Powders," New York, USA, 2012.
- [129] J. W. Anthony, R. A. Bideaux, K. W. Bladh, and M. C. Nichols, *Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America. Mineral Data Publishing, Tucson, Arizona: Mineral Data Publishing, 2001.
- [130] S. Rosenblum and I. K. Brownfield, "Magnetic Susceptibilities Of Minerals," U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 1999.
- [131] M. Brandauer, M. Haist, J.-D. Eckhardt, J. H. Bruhn, U. Arnold, H. S. Müller, and S. Gentes, "Separation von Sekundärabfall aus der Wasser-Abrasive-Suspensions-Schneidtechnik," KONTEC, Dresden, Germany, 2013.
- [132] W. Batel, *Einführung in die Korngrößenmeßtechnik*. Springer, 1971.
- [133] Deutsche Edelstahlwerke GmbH, "1.4307 - Nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt," 2007.
- [134] D. Fofanov and D. Risch, "Merkblatt 827 - Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle," Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Düsseldorf, Germany, 2013.
- [135] Deutsches Institut für Normung e.V., "DIN EN 10088-1, Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle," 2005.
- [136] Compagnie Industrielle des Lasers (CILAS), "Particle Size Analyzer CILAS 1180," <http://www.cilas.com>, Orleans, France.
- [137] G. G. Stokes, "Mathematical and Physical Paper III," Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1891.
- [138] M. C. Paul Schmidt, Rolf Körber, *Sieben und Siebmaschinen: Grundlagen und Anwendung*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2003.
- [139] J. McAndrew, "Calibration of a frantz isodynamic separator and its application to mineral separation," *Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy*, 181: 59-73, 1957.
- [140] Carpco Inc., "Magnetic and Electrostatic Separation Characteristics of Selected Minerals," Jacksonville, USA.
- [141] I. G. Description, "II. OPERATION I. General Description and Principles."

-
- [142] K. Siebertz, D. van Bebber, and T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung : Design of Experiments (DoE)*. Springer, 2010.
- [143] W. Kleppmann, *Taschenbuch Versuchsplanung : Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser, 2009.
- [144] C. Le, "Experimentelle Untersuchung eines magnetischen Filtersystems," Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2015.
- [145] B. Wills, "Mineral Processing Technology (Seventh Edition)," Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [146] R. L. Mason, R. F. Gunst, and J. L. Hess, *Statistical Design and Analysis of Experiments*. Willey-VCH, 1989.
- [147] W. Kleppmann, *Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*. Carl Hanser Verlag, 2011.
- [148] J. Goupy and C. Lee, *Introduction to Design of Experiments With JMP Examples*. 2007.
- [149] SAS Institute Inc., "JMP 12.2.0," <http://www.jmp.com>, 2015.
- [150] H. C. Thode, *Testing For Normality*. Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [151] J. Bortz and C. Schuster, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7.*, vollst. Berlin: Springer, 2010.
- [152] M. GERSON, "The Techniques and Uses of Probability Plotting," 1975.
- [153] N. M. Razali and Y. B. Wah, "Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests," 2011.
- [154] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, "An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)," 1965.
- [155] K. Siebertz, D. Van Bebber, and T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung*, vol. 43, no. 1974. Springer-Verlag, 2010.
- [156] CD-Adapco, "STAR-CCM+ 8.002.008." <http://www.cd-adapco.com/products/star-ccm>. [Zugriff: 18-September-2016].
- [157] K. Kameyama, H. Kanai, H. Kawashima, and T. Ishima, "Evaluation of Particle Motion in Solid-Liquid Two-Phase Pipe Flow with Downward / Upward Flow Directions," no. 1982, pp. 7–10, 2014.
- [158] CD-Adapco, "User guide star-ccm+ version 8.02.008," www.cd-adapco.com.
- [159] H. Lemmon, Eric W., M. L. Uber, and M. O. McLinden, "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP)," Standard Reference Database 23, Ver.8.0, Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, 2007.
- [160] W. Bohl and W. Elmendorf, *Technische Strömungslehre : Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*. Vogel Fachbuch, 2014.
- [161] A. J. Ward-Smith, "Internal Fluid Flow - The Fluid Dynamics of Flow in Pipes and Ducts," Oxford University Press, 1980.
- [162] O. REYNOLDS, "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinous, and of the law of resistances in parallel channels.," Phil Trans Roy Soc London, 174 , 935- 982, 1883.
- [163] W. P. Jones and B. E. Launder, "The Prediction of Laminarization with a Two- Equation

-
- Model of Turbulence*,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314, 1972.
- [164] E. Laurien und O. jr. Herbert, „*Numerische Strömungsmechanik*,” 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, 2013.
- [165] E. von Fritsch, „*Numerische Untersuchungen einer dispersen Mehrphasenströmung in einem Separationsfilter*,” Bachelorarbeit, KIT, Karlsruhe, 2015.
- [166] T. von Kármán, „*Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. 1. Teil*,” Nachr. Ges. Wiss. Göttingen. Math.-Phys. Kl. 509–517, 1911.
- [167] T. von Kármán, „*Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. 2. Teil*,” Nachr. Ges. Wiss. Göttingen. Math.-Phys. Kl. 547–556, 1912.
- [168] Y. N. Chen, „*60 Jahre Forschung über die Kármánschen Wirbelstrassen - Ein Rückblick*,” Schweizerische Bauzeitung, Nr. 91, 1973.
- [169] J. Svoboda, „*A realistic description of the process of high-gradient magnetic separation*,” Miner. Eng., vol. 14, no. 11, pp. 1493–1503, 2001.
- [170] B. Rasch, W. Hofmann, M. Friese, and E. Naumann, *Quantitative Methoden*. Springer-Lehrbuch, 2010.
- [171] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley-VCH, 2002.
- [172] H. Opitz and M. Gappisch, „*Ursachen der Aufbauschneidenbildung*,” in *Die Aufbauschneidenbildung bei der spanabhebenden Bearbeitung*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1964, pp. 71–86.
- [173] Mettler Toledo AG, „*XS-S Präzisionswaagen - Datenblatt*,” Greifensee, Schweiz.

IX Abbildungsverzeichnis

Abbildung I.1:	Funktionsskizze der WASS-Schneidtechnik.....	- 3 -
Abbildung I.2:	Schnitterzeugung durch die WASS-Technik.....	- 4 -
Abbildung I.3:	Abrasivpartikel vor und nach dem Einsatz in der WASS-Technik.....	- 4 -
Abbildung I.4:	Einfluss diamagnetischer (a), paramagnetischer (b) und ferromagnetischer (c) Stoffe auf die magnetische Flussdichte [32].....	- 10 -
Abbildung I.5:	Schematische Magnetisierung der ferromagnetischen (χ_f), paramagnetischen (χ_p) und diamagnetischen (χ_d) Stoffe gegeben über eine angelegte Feldstärke [29], [35].....	- 12 -
Abbildung I.6:	Hysteresekurve der Magnetisierung von Magneten [29].....	- 13 -
Abbildung I.7:	Skizze zur Berechnung der Feldstärke sowie des Zusammenhangs zwischen Feldstärke H, Magnetisierung M und Magnetflussdichte B eines zylindrischen Permanentmagnets [31].....	- 15 -
Abbildung I.8:	Schematische Aufteilung des Stoffstroms einer magnetischen Sortierung.....	- 16 -
Abbildung I.9:	Darstellung der Vorgehensweise und Struktur der Arbeit zur Erreichung der Zielsetzung.....	- 26 -
Abbildung II.1:	Verfahrenstechnische Kette der Separationsanlage.....	- 32 -
Abbildung II.2:	Separationsprototyp zur magnetischen Sortierung der WASS-Korngemische.....	- 33 -
Abbildung II.3:	Suspensionsmischer als CAD-Zeichnung (links) und im Einsatz (rechts).....	- 34 -
Abbildung II.4:	Membranpumpen und Volumenstrommessgerät der Separationsanlage.....	- 35 -
Abbildung II.5:	Sedimentationsbehälter (1), pneumatisch gesteuertes 2/3-Wege-Ventil (2), Saugflasche mit Filtertrichter (3) und gewonnene magnetische Filterfraktion (4).....	- 36 -
Abbildung II.6:	Stabmagnetfilter [118].....	- 37 -
Abbildung II.7:	Separationsergebnis des WASS-Gemisches mittels Stabmagnetfilter vor (links) und nach (rechts) dem Entfernen der Magnetstäbe.....	- 38 -
Abbildung II.8:	Modifizierter Stabmagnetfilter zur fernhantierten Manipulation der Permanentmagnetstäbe als CAD-Zeichnung rechts [120] und Umsetzung links.....	- 39 -
Abbildung II.9:	Magnetfelder von Magnetketten.....	- 39 -
Abbildung II.10:	Versuchsaufbau zur Magnetflussdichtenmessung des Magnetstabes.....	- 40 -
Abbildung II.11:	Magnetflussdichtenmessung des Magnetstabes.....	- 41 -
Abbildung II.12:	Magnetflussdichtenmessung entlang und orthogonal zum Magnetstab.....	- 42 -
Abbildung II.13:	Verfahrenstechnische Kette der Partikelmesseinrichtung.....	- 44 -
Abbildung II.14:	Aufbau der Partikelmesseinrichtung.....	- 45 -
Abbildung II.15:	Funktionsprinzip des Extinktionszählers.....	- 46 -

Abbildung III.1:	Abrasivpartikel, die zum Schnitt in der WASS-Technik verwendet werden	- 50 -
Abbildung III.2:	Gemessene Partikelanzahl in den verschiedenen Korngrößen des Abrasivs	- 51 -
Abbildung III.3:	Dichteverteilungskurve (links) sowie Summenverteilungskurve (rechts) des Abrasivs	- 51 -
Abbildung III.4:	Ermittlung des 50 %-Quantils aus der Partikelgrößenverteilung	- 52 -
Abbildung III.5:	Erzeugtes Korngemisch [131]	- 54 -
Abbildung III.6:	Partikelgrößenverteilung des Korngemisches (links), wobei der Bereich der oberflächennahe Proben rechts hervorgehoben wird [131]	- 54 -
Abbildung III.7:	Setzverhalten des Korngemisches [131]	- 55 -
Abbildung III.8:	Dichteverteilung des Korngemisches im Vergleich zum frischen Abrasiv	- 56 -
Abbildung III.9:	BSE-REM-Aufnahmen des frischen Abrasivs (links) und des Korngemisches (mittig und rechts) in unterschiedlicher Auflösung	- 57 -
Abbildung III.10:	Funktionsprinzip des Frantz-Scheiders [49]	- 58 -
Abbildung III.11:	Magnetische Sortierung des Abrasivs (links) und des Korngemisches (rechts)	- 59 -
Abbildung III.12:	Zusammenstellung der mikroskopischen Aufnahmen des Korngemisches	- 61 -
Abbildung III.13:	Mikroskopaufnahme mit Durchlicht (links) und Auflicht (rechts) der sortierten Fraktion mit 38 – 106 μm Korngröße und 0.1 A erzeugten Feldstärke	- 63 -
Abbildung III.14:	Dichteverteilung der Fraktionen in den Größen 106 – 150 μm (links) und 38 – 106 μm (rechts) bezogen auf die unterschiedliche magnetische Suszeptibilität gegeben durch die angelegte Stromstärke	- 64 -
Abbildung III.15:	Skalierte Dichteverteilung der Fraktionen der Größe 38 – 106 μm auf den Bereich 0 – 220 μm	- 66 -
Abbildung III.16:	Retentat nach unterschiedlicher Filterzeit ($V = 10.4 \text{ l/min}$, $c_M = 1 \text{ Massen-\%}$)	- 67 -
Abbildung III.17:	Dichteverteilung des Retentats bei unterschiedlich langem Reinigungszyklus von 20 min (links) und 90 min (rechts) ($V = 10.4 \text{ l/min}$, $c_M = 1 \text{ M.-\%}$)	- 67 -
Abbildung III.18:	Dichteverteilung des ersten Retentats der Versuchsreihen aus Abbildung III.17	- 68 -
Abbildung III.19:	Dichteverteilung des Filtrats im Vergleich zum Ausgangskorngemisch sowie frischen Abrasiv	- 70 -
Abbildung III.20:	Mikroskopische Aufnahme eines Stahlspans im Korngemisch nach der smagnetischen Separation	- 71 -
Abbildung IV.1:	Grafische Darstellung des Versuchsplans für die drei untersuchten Faktoren mit jeweils drei Stufen (* Versuchsreihen mit Wiederholung)	- 80 -

Abbildung IV.2:	Grafische Abdeckung der zweifachen Wechselwirkung der Faktoren in der teilfaktoriellen Versuchsplanung (* Versuchsreihen mit Wiederholung)	- 81 -
Abbildung V.1:	Darstellung der experimentellen Ergebnisse	- 85 -
Abbildung V.2:	Normalverteilung und QQ-Plot der Ergebnisse aus Tabelle V.1	- 88 -
Abbildung V.3:	Verteilung der experimentellen Ergebnisse mit Wiederholung.....	- 89 -
Abbildung V.4:	Massenbezogene Darstellung aller experimentell ermittelten Ergebnisse.....	- 90 -
Abbildung V.5:	Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 2	- 91 -
Abbildung V.6:	BSE-REM-Aufnahmen des Retentats aus dem 1. Zyklus (links), 2. Zyklus (mittig) und 3. Zyklus (rechts) der Versuchsreihe 2 in steigender Auflösung	- 93 -
Abbildung V.7:	Mittlere Partikelgröße d_{50} der Retentate aus den einzelnen Versuchsreihen inklusive Standardabweichung aus den Wiederholungen.....	- 94 -
Abbildung V.8:	Versuchsaufbau von Kameyama et al. zur Geschwindigkeitsermittlung einer Zweiphasenströmung [157]	- 97 -
Abbildung V.9:	Numerische Simulation des Mehrphasen-Experiments von Kameyama et al.	- 99 -
Abbildung V.10:	Geschwindigkeitsverteilung der Phasen im Rohrquerschnitt, normiert auf die maximale Fluidgeschwindigkeit $u_{max,f} = 0.75$ m/s.....	- 100 -
Abbildung V.11:	Geometrie und angewendetes Netz für die numerische Untersuchung des Stabmagnetfilters	- 101 -
Abbildung V.12:	Geschwindigkeitsverteilung im Stabmagnetfilter nach 2.0 s (10 000 Iterationen) gegeben, in unterschiedlicher Darstellungsweise und Ansicht.....	- 103 -
Abbildung V.13:	Verteilung der Partikel im Stabmagnetfilter	- 105 -
Abbildung V.14:	Partikelverteilung im Stabmagnetfilter nach 1.0 s von vorne (links), seitliche (mittig) und von oben betrachtet (rechts).....	- 106 -
Abbildung V.15:	Aufnahmen des Filterraums zur Inspektion von Partikelablagerungen nach der Versuchsdurchführung	- 107 -
Abbildung V.16:	Seitenansicht (links) und Ansicht von unten (rechts) der abgeschiedenen Retentate nach 40 min Filterzeit, bei 1-Massen % und 11 l/min; Pfeil im linken Bild kennzeichnet die Stelle des Hauptstrahls des Einlasses.....	- 108 -
Abbildung VI.1:	Vergleich der Abscheidemenge (schwarz) nach 120 min mit den dazugehörigen Einflussgrößen, normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne)	- 112 -
Abbildung VI.2:	Diagramm aus Abbildung VI.1, geordnet nach steigender Abscheidemenge (links) und nach steigender Partikelkonzentration (rechts).....	- 113 -

Abbildung VI.3:	Diagramm aus Abbildung VI.1, geordnet nach steigender Filterzeit (links) und nach steigendem Volumenstrom (rechts)	- 115 -
Abbildung VI.4:	Wirkungsflächenanalyse der untersuchten massenbezogenen Faktoren, dreidimensional links und zweidimensional rechts.....	- 116 -
Abbildung VI.5:	Vergleich der gemittelten mittleren Partikelgröße d_{50} (schwarz) nach 120 min sowie die dazugehörigen Einflussgrößen normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne).....	- 117 -
Abbildung VI.6:	Gemittelte Partikelgröße d_{50} der Versuchsreihen, geordnet nach steigender d_{50} (links) und nach steigender Partikelkonzentration (rechts).....	- 118 -
Abbildung VI.7:	Gemittelte Partikelgröße d_{50} der Versuchsreihen, geordnet nach steigender Filterzeit (links) und nach steigendem Volumenstrom (rechts).....	- 119 -
Abbildung VI.8:	Mittlere Partikelgröße der Retentate, bezogen auf den ermittelten Stahlgehalt mittels ICP-EOS.....	- 120 -
Abbildung VI.9:	Wirkungsflächenanalyse der untersuchten partikelgrößenbezogenen Faktoren.....	- 121 -
Abbildung VI.10:	Abrasiveinlagerung in Abhängigkeit von der Filterzeit (5 min: links; 60 min: rechts) bei 1-Massen % und 11 l/min (40 min: siehe Abbildung V.16)	- 123 -
Abbildung VI.11:	Einfluss einer pulsierenden Strömung auf die magnetische Separation (angepasst aus [34])	- 123 -
Abbildung VI.12:	Versuchsreihen geordnet nach fallender Abscheidemenge (links) und nach steigender mittleren Partikelgröße (rechts).....	- 125 -
Abbildung VI.13:	Abscheideeffizienz E der Versuchsreihen, geordnet nach steigendem Wert (links oben), nach steigender Partikelkonzentration (rechts oben) sowie nach steigender Filterzeit (links unten) und nach steigendem Volumenstrom (rechts unten)	- 126 -
Abbildung VI.14:	Wirkungsflächenanalyse der Effizienz der Separation	- 127 -
Abbildung VI.15:	BSE-REM-Aufnahmen des Korngemisches vor (links) und nach (rechts) der Separation mit visualisierten Eisenanteilen durch Bildaufbereitung (unten) aus Versuchsreihe 11	- 129 -
Abbildung VI.16:	BSE-REM-Aufnahmen von Abrasivpartikeln mit Zwickelfüllungen.....	- 130 -
Abbildung VI.17:	BSE-REM-Aufnahmen von Abrasivpartikeln mit Stahlanhaftungen	- 130 -
Abbildung IX.1:	Zusammenstellung der mikroskopischen Aufnahmen des Abrasivs	- 153 -

X Tabellenverzeichnis

Tabelle III.1 :	Klassierung des Abrasivs und des Korngemisches durch Nasssiebung	- 57 -
Tabelle III.2 :	Umrechnung der Stromstärke des Frantz-Scheiders in Magnetflussdichte	- 60 -
Tabelle III.3 :	Magnetische Suszeptibilität des Korngemisches	- 63 -
Tabelle IV.1 :	Einflussgrößen der Separationsanlage.....	- 75 -
Tabelle IV.2 :	Versuchsplan für die Untersuchungen.....	- 79 -
Tabelle V.1 :	Erzielte Ergebnisse nach 120 min Filterzeit.....	- 86 -
Tabelle V.2 :	Erzielte Ergebnisse nach 120 min Filterzeit mit gemittelten Ergebnissen der Wiederholungen (mit * gekennzeichnet)	- 87 -
Tabelle V.3 :	a_{t+1-j} des Shapiro-Wilk-Tests für die Untersuchung von zehn Werten.....	- 89 -
Tabelle VI.1 :	Ergebnisse für Stahlgehalt [Massen-%], bestimmt durch ICP-EOS-Analyse	- 119 -
Tabelle VI.2 :	Ergebnisse für Stahlgehalt [Massen-%], bestimmt durch ICP-EOS Analyse	- 125 -
Tabelle X.1 :	Massenbezogene Ergebnisse [Massen-%] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit (Wiederholungen mit * gekennzeichnet)	- 154 -
Tabelle X.2 :	Massenbezogene Ergebnisse [Massen-%] der Versuchsreihen mit 40 min Filterzeit (Wiederholungen mit * und ' sowie " entsprechend gekennzeichnet)	- 154 -
Tabelle X.3 :	Massenbezogene Ergebnisse [Massen-%] der Versuchsreihen mit 60 min Filterzeit	- 154 -
Tabelle XII.1 :	Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser d_{50} (Wiederholte Versuchsreihen sind mit * gekennzeichnet).....	- 163 -
Tabelle XII.2 :	Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser d_{50} (Wiederholungen mit * und ' sowie " gekennzeichnet) ..	- 163 -
Tabelle XII.3 :	Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser d_{50}	- 163 -
Tabelle XVIII.1 :	Physikalische Eigenschaften der Phasen.....	- 173 -
Tabelle XVIII.2 :	Numerische Einstellungen.....	- 173 -
Tabelle XVIII.3 :	Relaxationsfaktoren	- 173 -
Tabelle XIX.1 :	Physikalische Eigenschaften der Phasen.....	- 174 -
Tabelle XIX.2 :	Numerische Einstellungen.....	- 174 -
Tabelle XIX.3 :	Relaxationsfaktoren	- 174 -

XI Anhang A

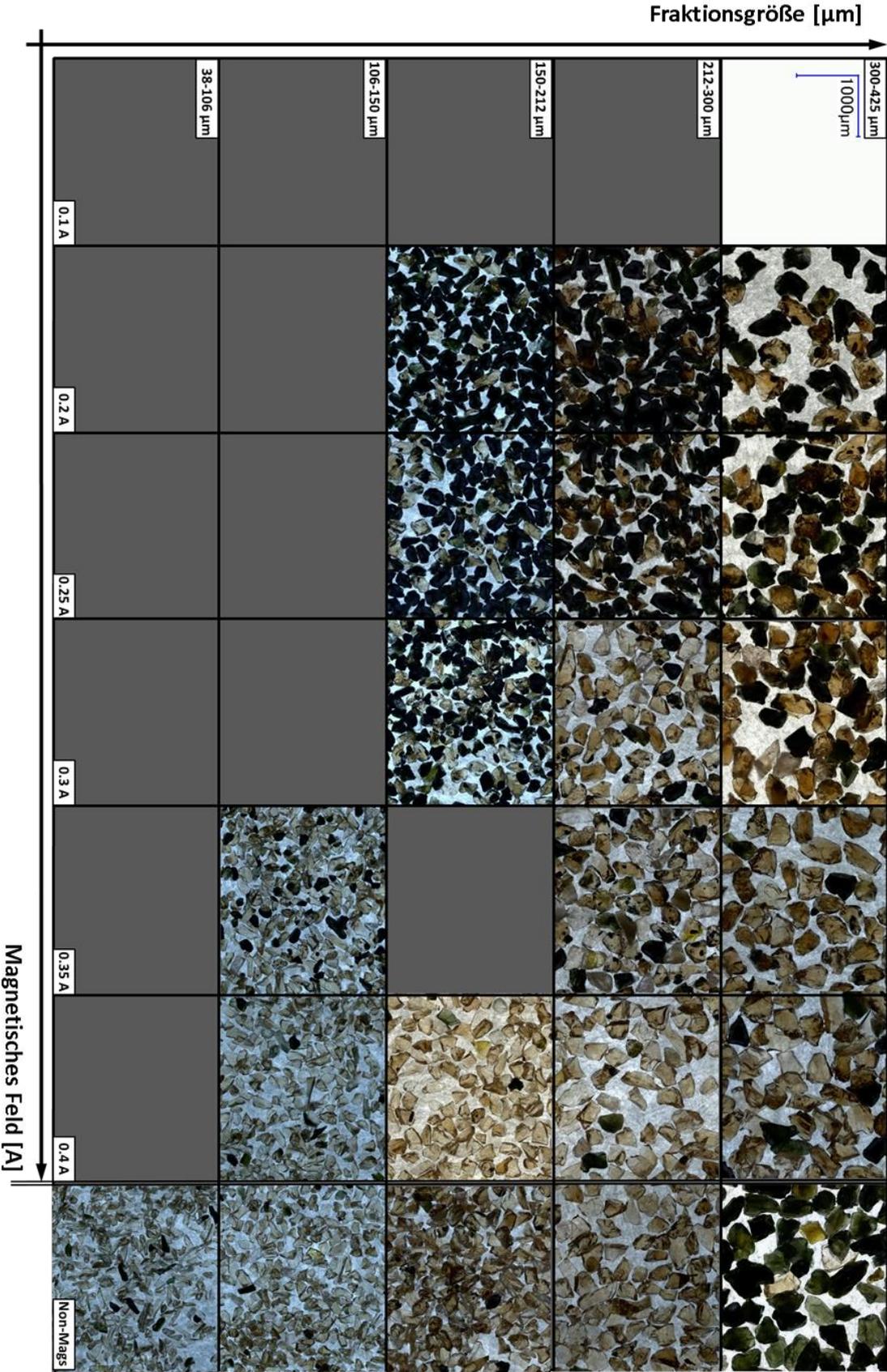


Abbildung XI.1: Zusammenstellung der mikroskopischen Aufnahmen des Abrasivs

XII Anhang B

Tabelle XII.1 : Massenbezogene Ergebnisse [*Massen-%*] der Versuchsreihen mit 20 *min* Filterzeit (Wiederholungen mit * gekennzeichnet)

Nr.	1*	6	13	16*	18*
20 min	1.15	0.55	0.50	0.99	1.26
40 min	0.44	0.23	0.27	0.37	0.51
60 min	0.38	0.16	0.19	0.28	0.40
80 min	0.31	0.18	0.15	0.27	0.39
100 min	0.33	0.11	0.11	0.29	0.39
120 min	0.32	0.08	0.10	0.28	0.38
Summe	2.93	1.30	1.32	2.48	3.32

Tabelle XII.2 : Massenbezogene Ergebnisse [*Massen-%*] der Versuchsreihen mit 40 *min* Filterzeit (Wiederholungen mit * und ' sowie " entsprechend gekennzeichnet)

Nr.	2*	4'	5*	7'	8"	11	12"	14'	15*	17"	19'
40 min	0.67	1.47	0.65	1.65	0.47	1.10	0.48	1.89	0.78	0.40	1.76
80 min	0.21	0.56	0.24	0.93	0.19	0.39	0.20	0.84	0.27	0.17	0.80
120 min	0.14	0.53	0.12	0.92	0.11	0.36	0.12	0.68	0.12	0.10	0.70
Summe	1.02	2.55	1.01	3.50	0.77	1.85	0.80	3.41	1.17	0.68	3.27

Tabelle XII.3 : Massenbezogene Ergebnisse [*Massen-%*] der Versuchsreihen mit 60 *min* Filterzeit

Nr.	3	9	10
60 min	1.31	0.81	0.73
120 min	0.45	0.29	0.32
Summe	1.76	1.10	1.05

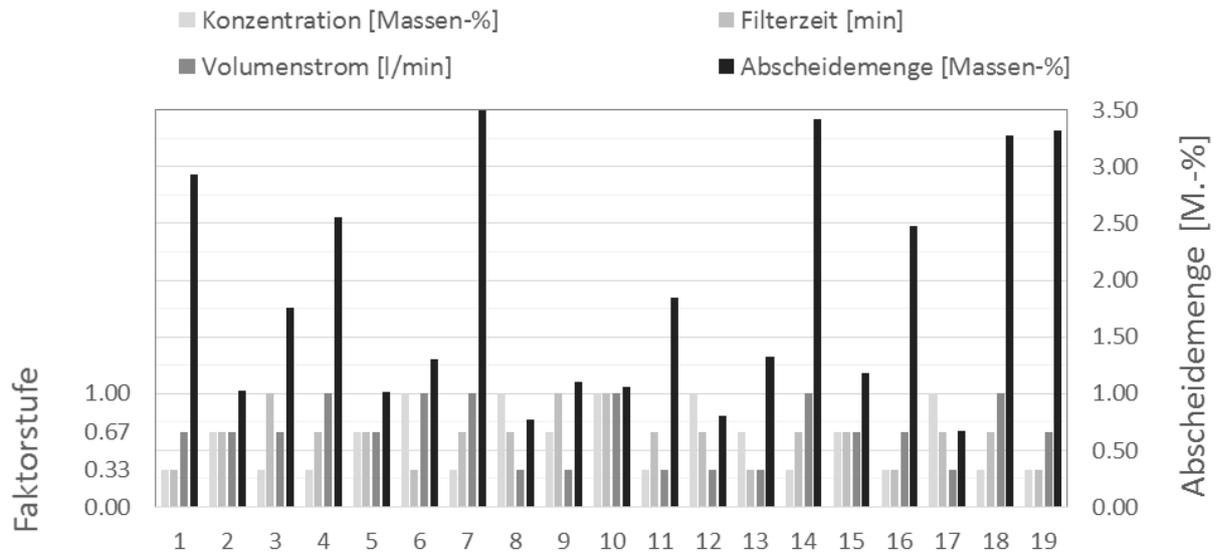


Abbildung XII.1: Vergleich der Abscheidemenge aller Versuchsreihen (schwarz) nach 120 min sowie die dazugehörigen Einflussgrößen normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne)

XIII Anhang C

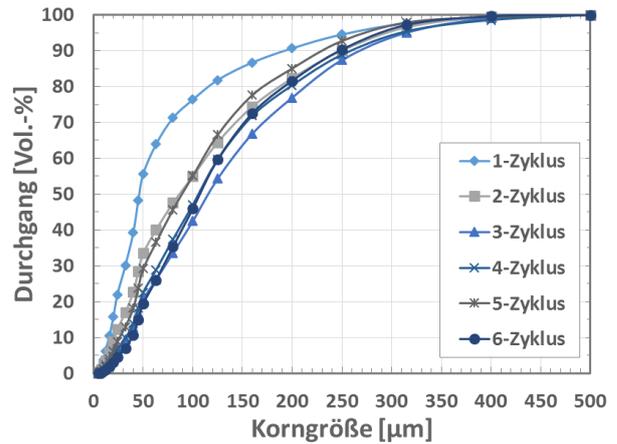
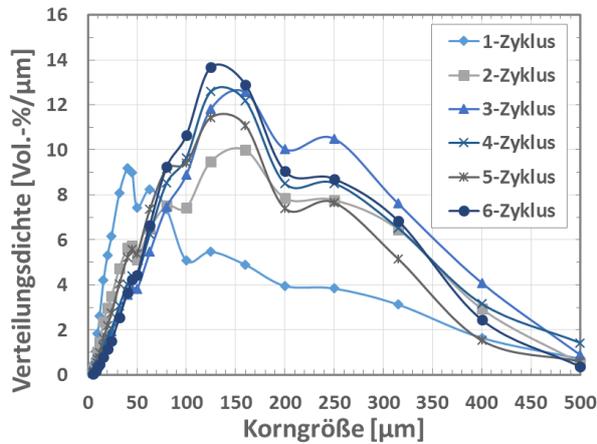


Abbildung XIII.1: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 1

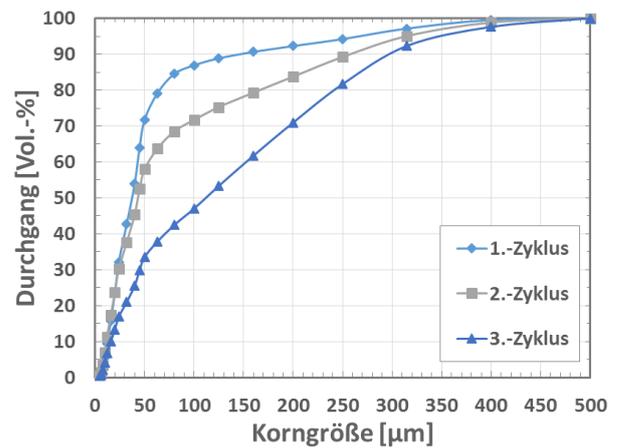
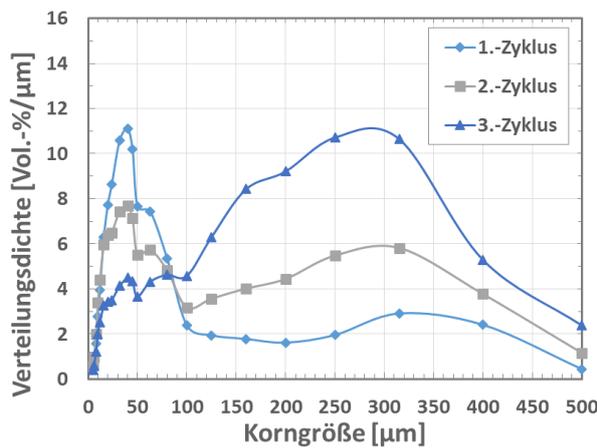


Abbildung XIII.2: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 2

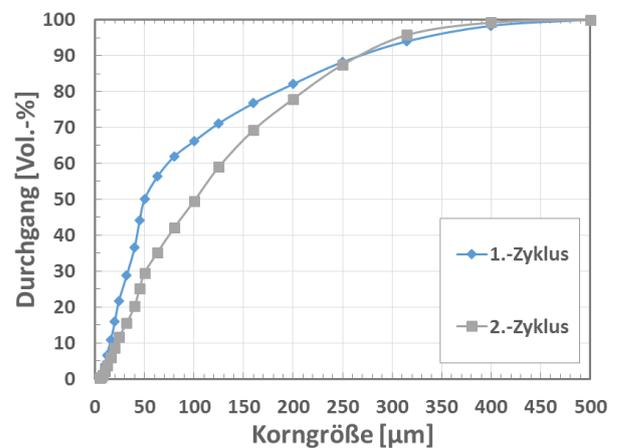
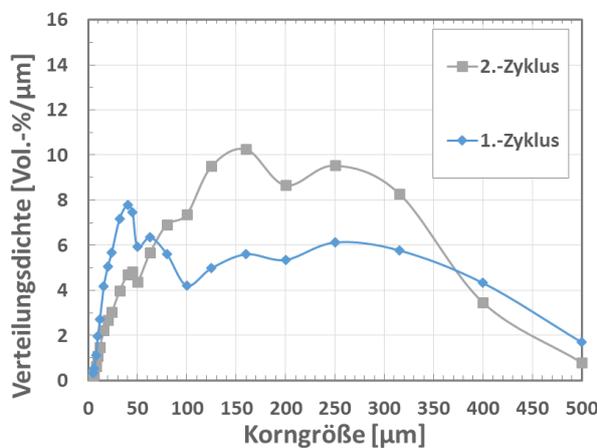


Abbildung XIII.3: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 3

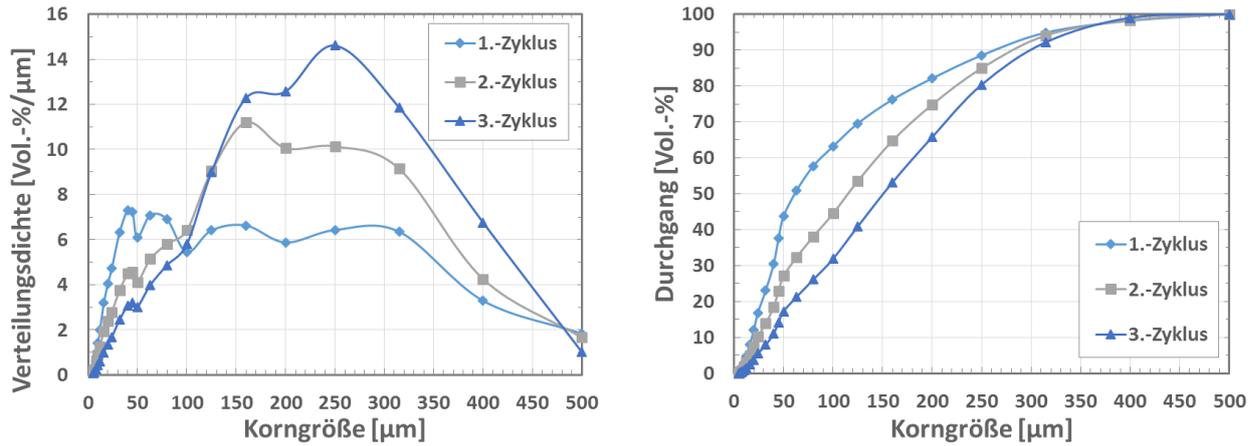


Abbildung XIII.4: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 4

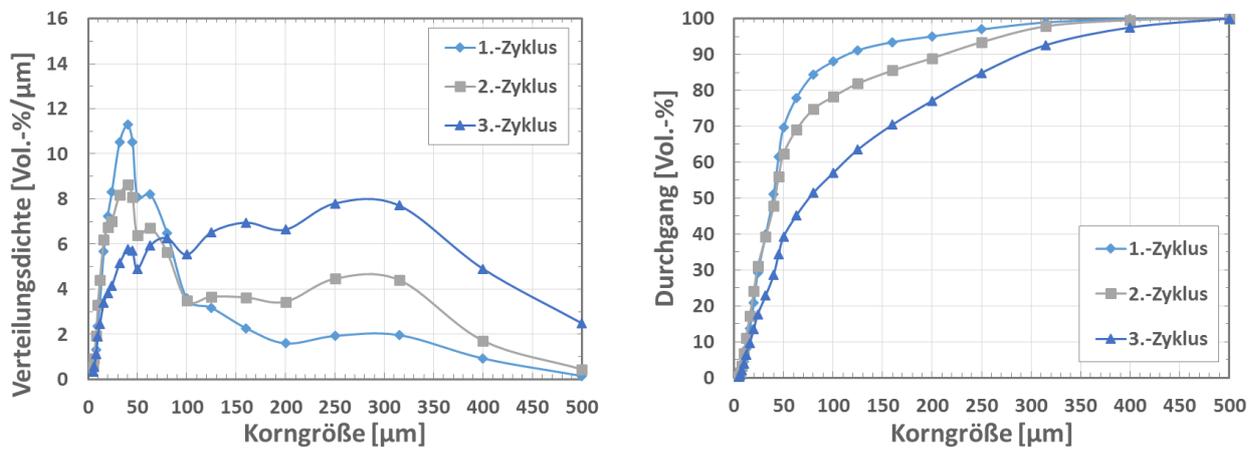


Abbildung XIII.5: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 5

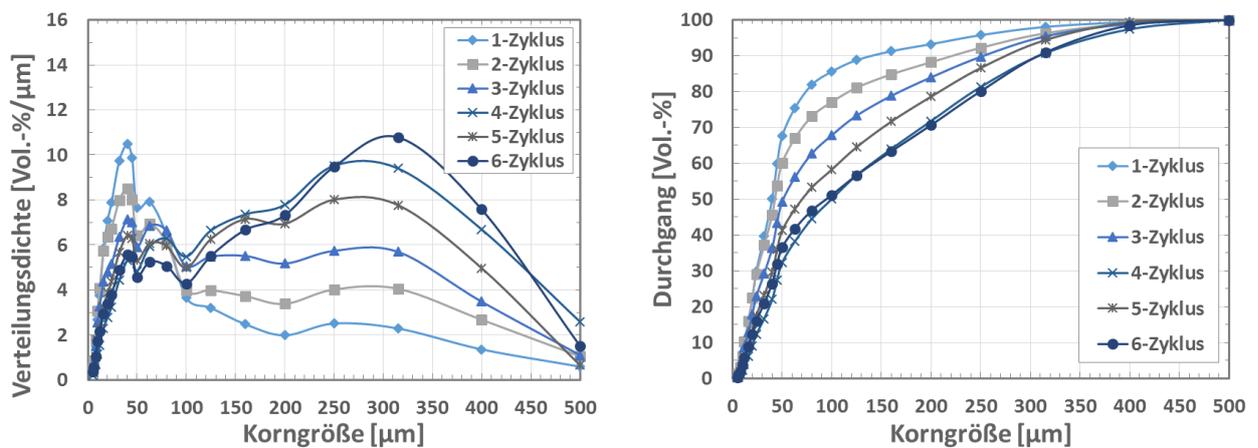


Abbildung XIII.6: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 6

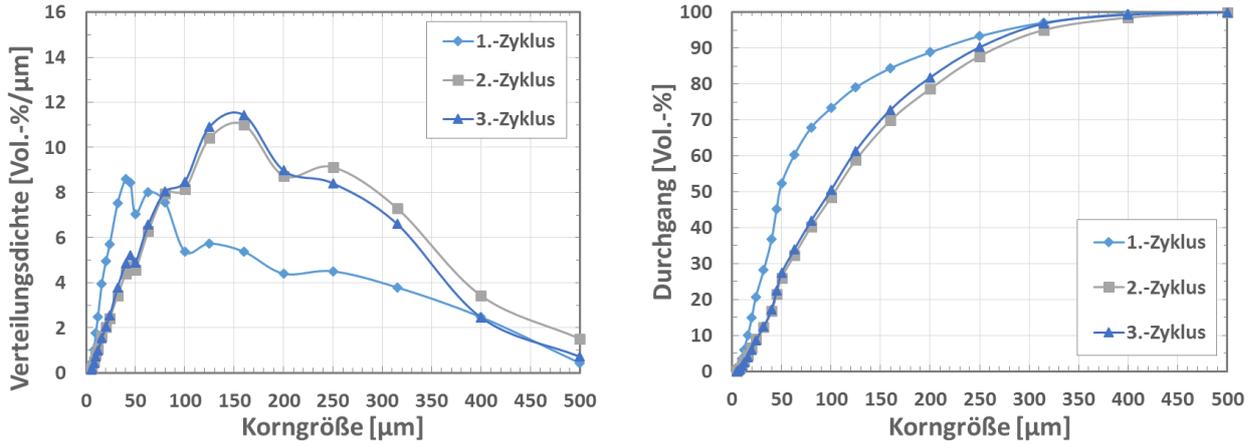


Abbildung XIII.7: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 7

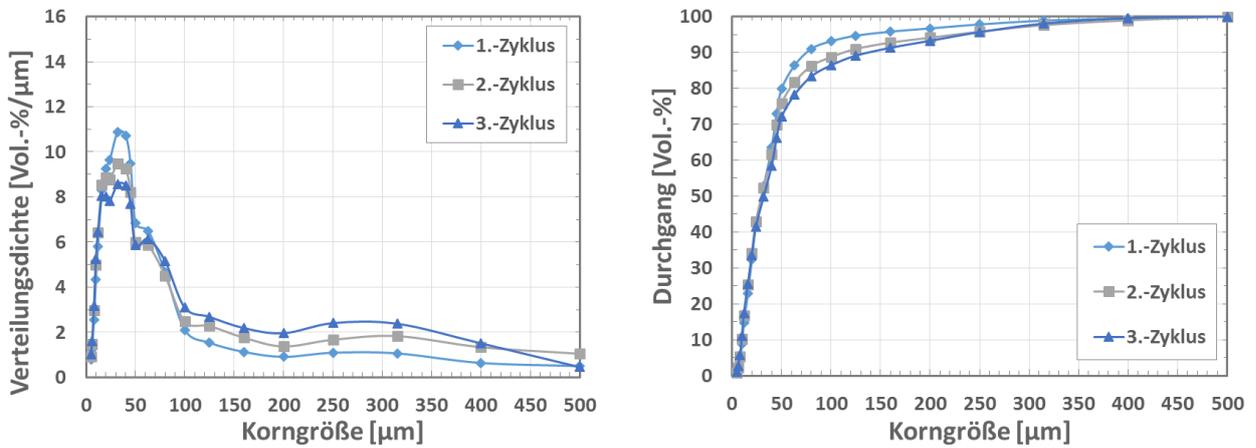


Abbildung XIII.8: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 8

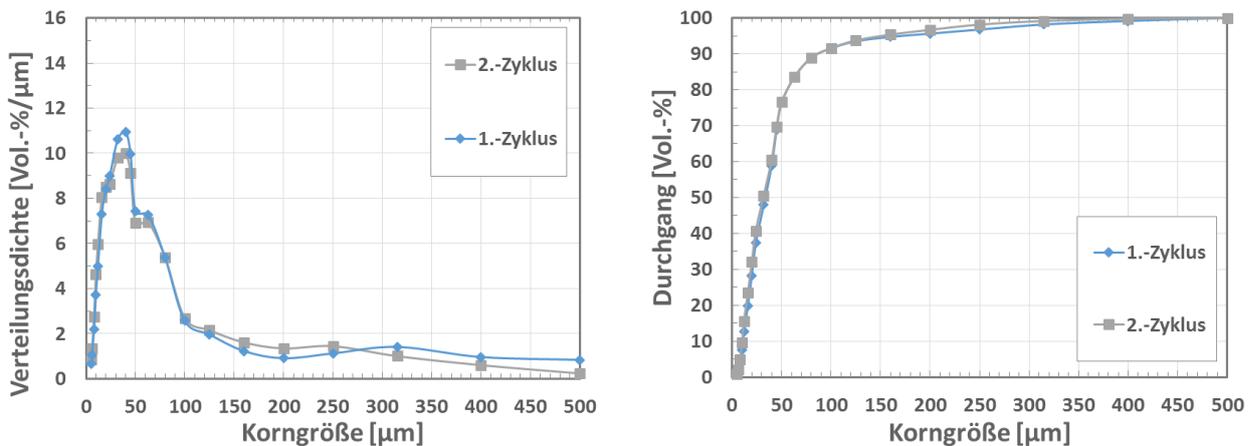


Abbildung XIII.9: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 9

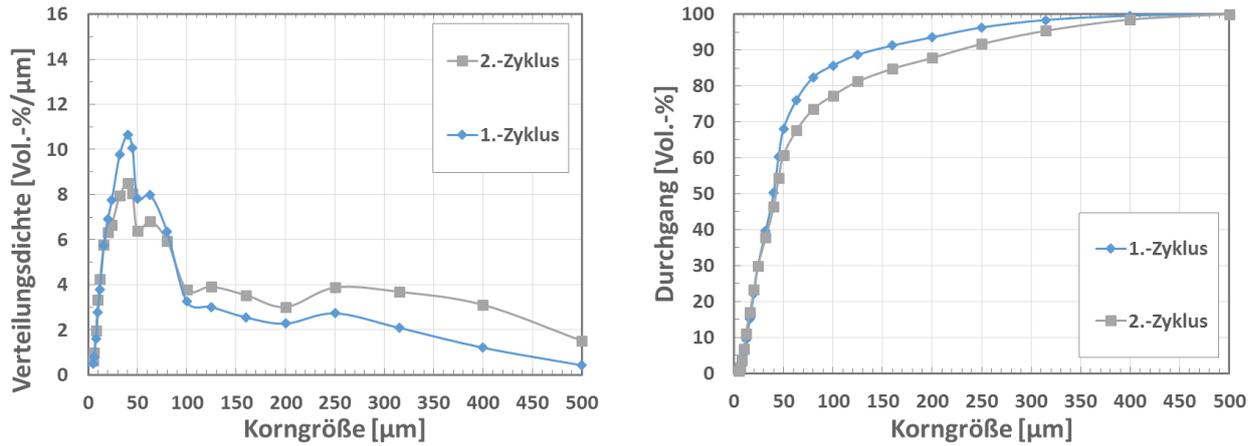


Abbildung XIII.10: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 10

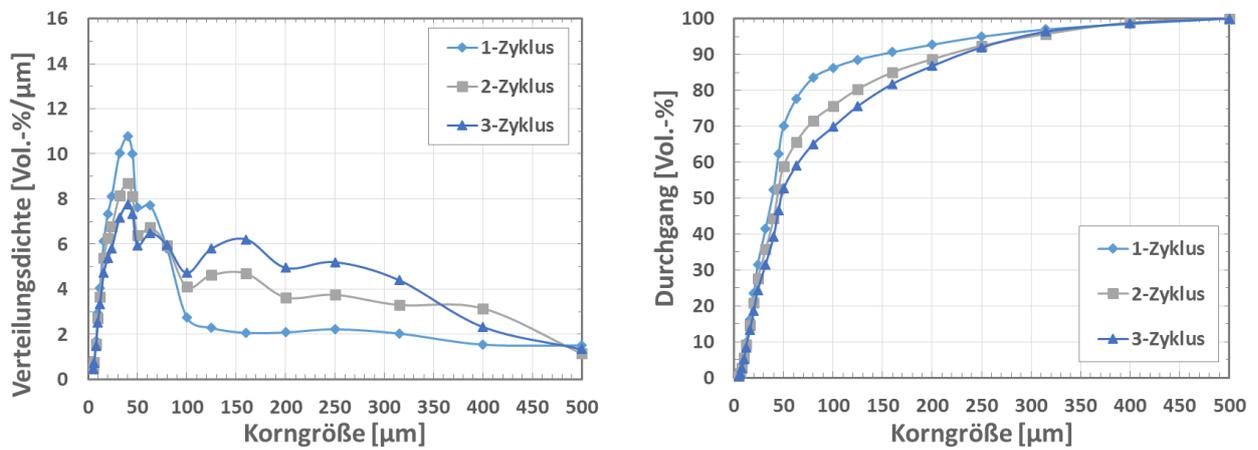


Abbildung XIII.11: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 11

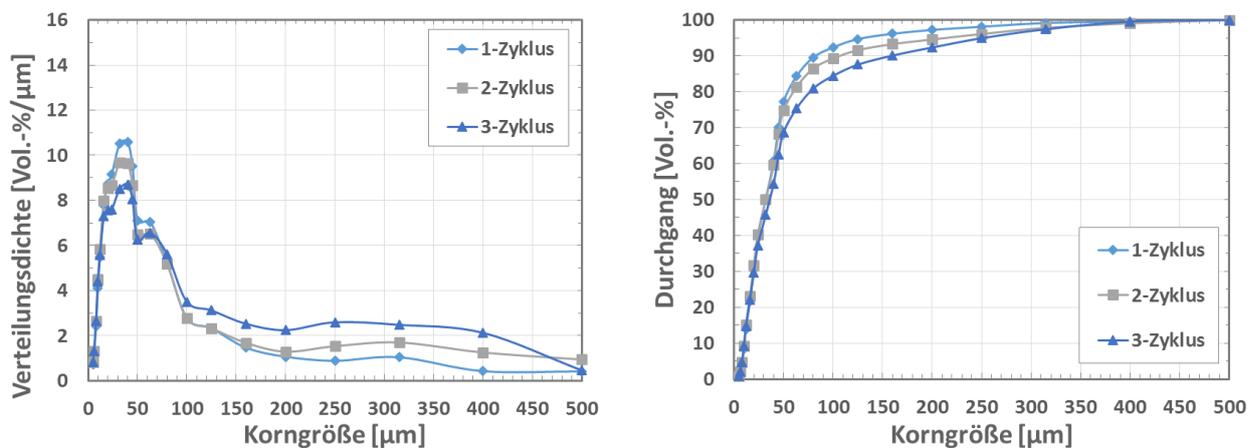


Abbildung XIII.12: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 12

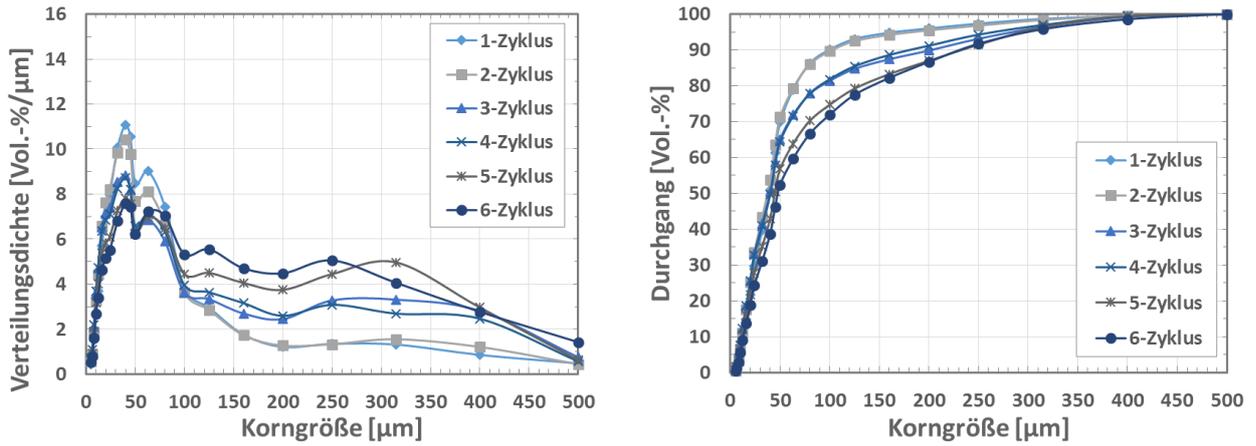


Abbildung XIII.13: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 13

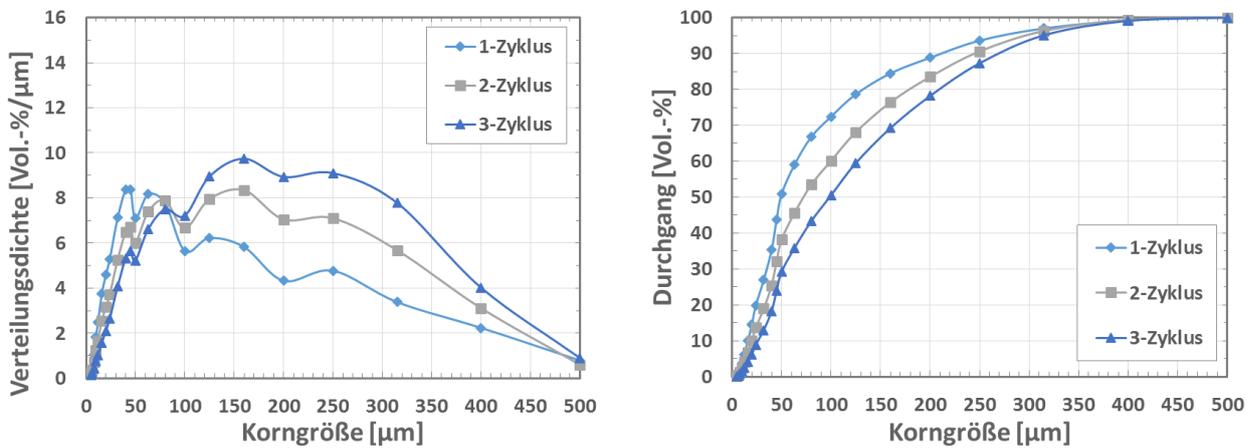


Abbildung XIII.14: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 14

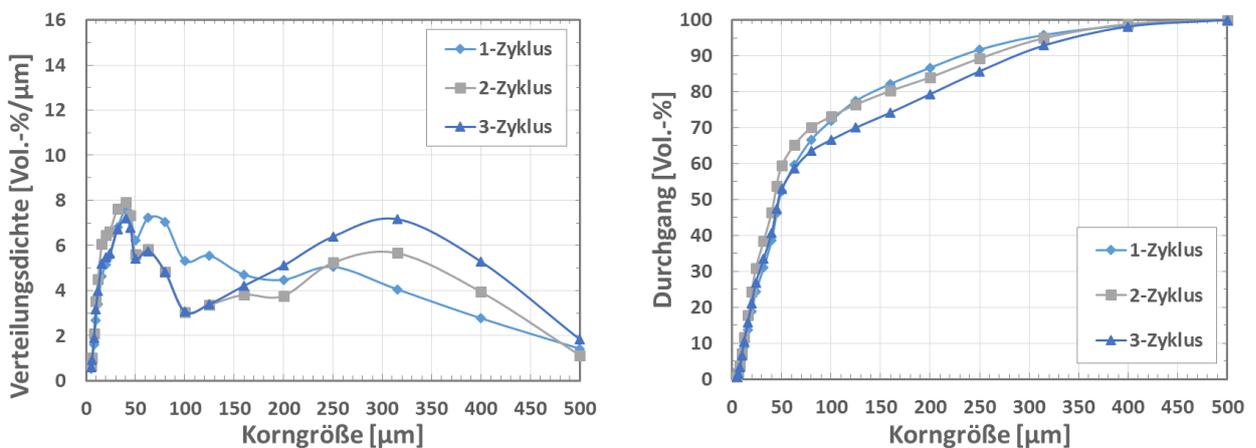


Abbildung XIII.15: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 15

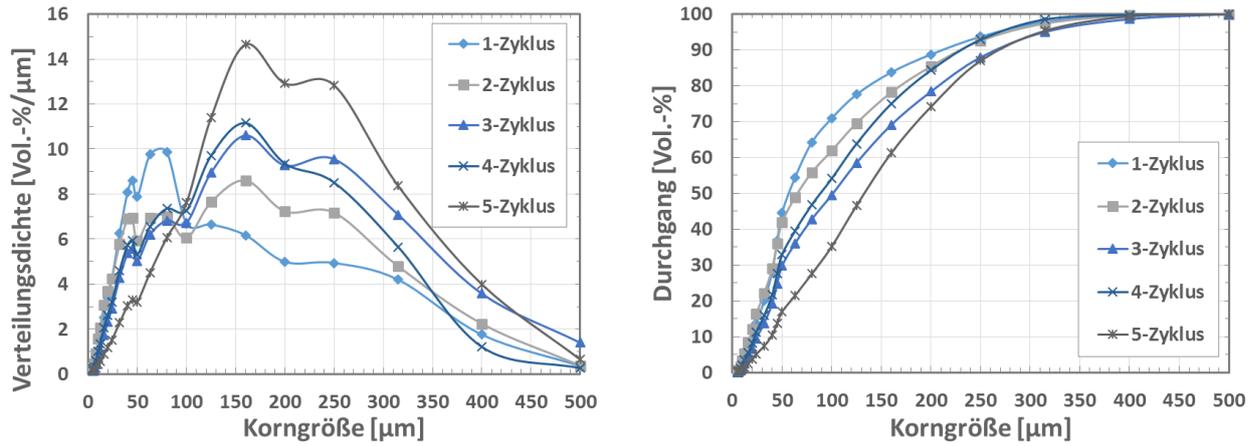


Abbildung XIII.16: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 16

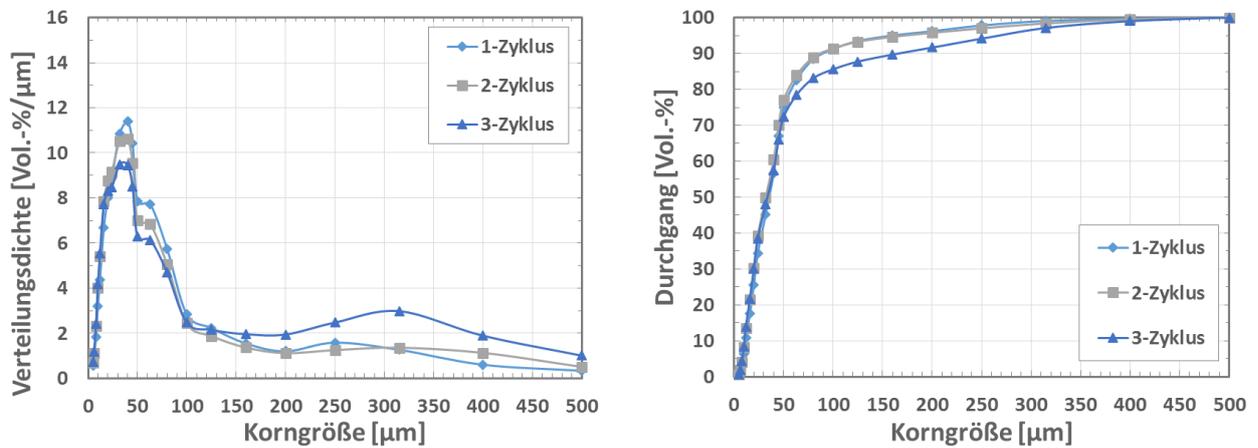


Abbildung XIII.17: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 17

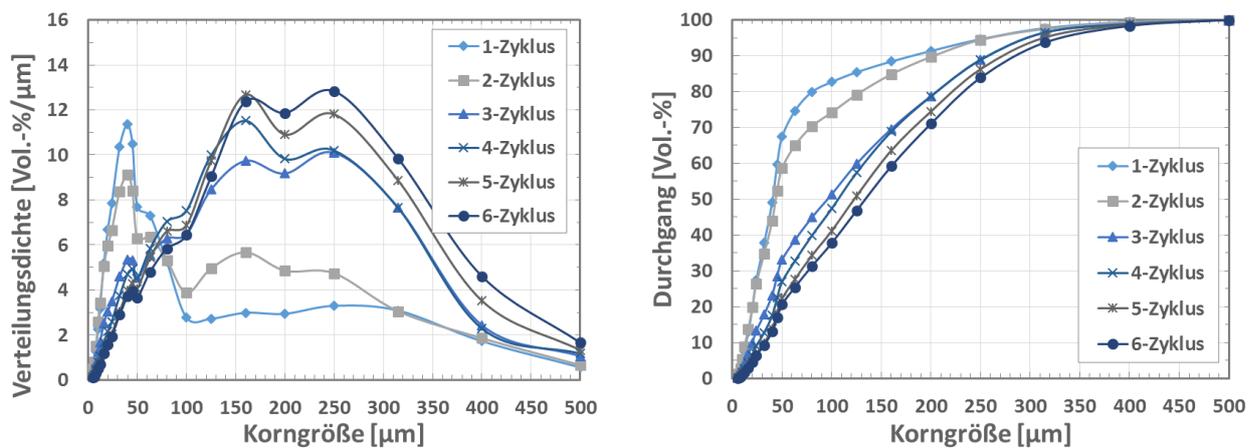


Abbildung XIII.18: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 18

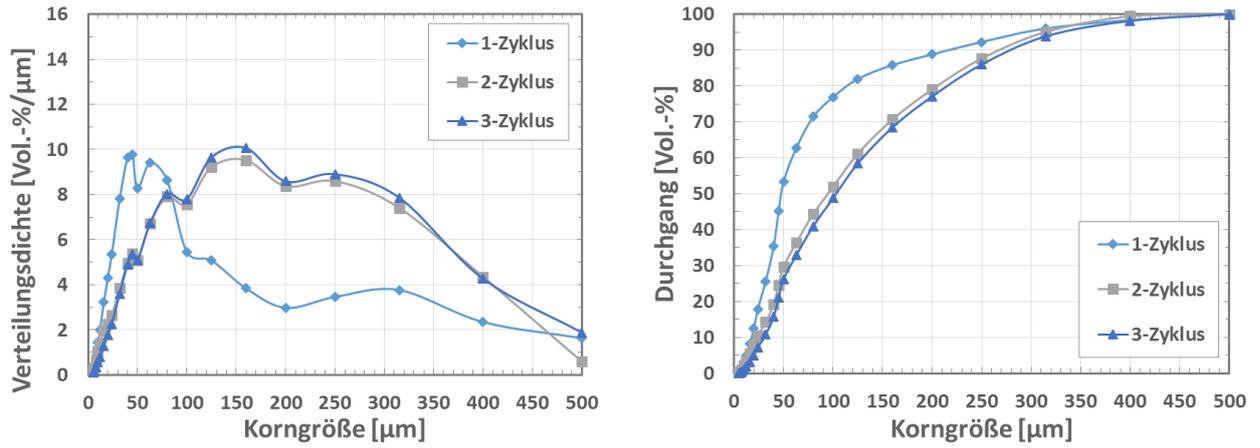


Abbildung XIII.19: Partikelgrößenverteilung der Retentate aus den einzelnen Filterzyklen der Versuchsreihe 19

XIV Anhang D

Tabelle XIV.1 : Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser $\overline{d_{50}}$ * (Wiederholte Versuchsreihen sind mit * gekennzeichnet)

Nr.	1*	6	13	16*	18*
20 min	46.1	39.9	39.3	56.8	40.4
40 min	86.1	42.6	36.9	65.5	43.5
60 min	115.2	51.2	39.6	101.1	95.4
80 min	105.3	99.9	40.2	88.1	106.1
100 min	88.6	70.2	44.6	132.4	122.4
120 min	106.8	94.1	48.0	90.5	133.2
$\overline{d_{50}}$	78.8	55.7	40.0	77.7	75.3

Tabelle XIV.2 : Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser $\overline{d_{50}}$ (Wiederholungen mit * und ' sowie " gekennzeichnet)

Nr.	2*	4'	5*	7'	8"	11	12"	14'	15*	17"	19'
40 min	37.0	61.3	39.1	48.3	29.7	38.1	31.9	49.4	48.0	35.1	47.9
80 min	43.2	114.5	41.2	103.3	29.8	43.4	32.0	72.0	42.3	32.1	94.5
120 min	111.0	150.1	75.7	98.7	32.0	47.7	35.7	98.3	47.2	33.5	102.8
$\overline{d_{50}}$	48.6	91.3	44.0	76.2	30.1	41.0	32.5	64.7	46.6	34.1	71.1

Tabelle XIV.3 : Ergebnisse bezogen auf den mittleren Durchmesser d_{50} [μm] der Versuchsreihen mit 20 min Filterzeit sowie den resultierenden mittleren Durchmesser $\overline{d_{50}}$

Nr.	3	9	10
60 min	50.0	33.4	39.8
120 min	101.1	31.5	42.2
$\overline{d_{50}}$	63.0	32.9	40.5

* Stellt den massengewichteten mittleren Durchmesser der Fraktionen dar (s. Abschnitt VI.2)

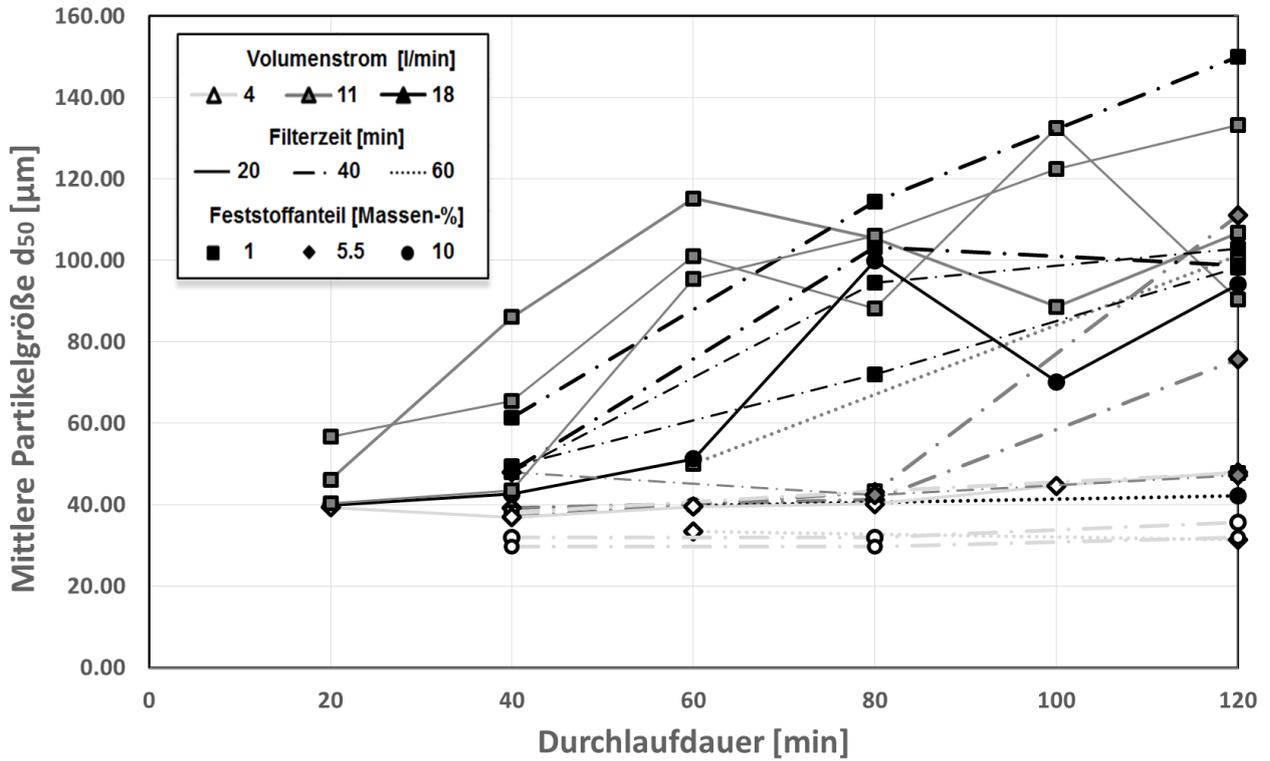


Abbildung XIV.1: Mittlere Partikelgröße d_{50} der Retentate aus den einzelnen Versuchsreihen

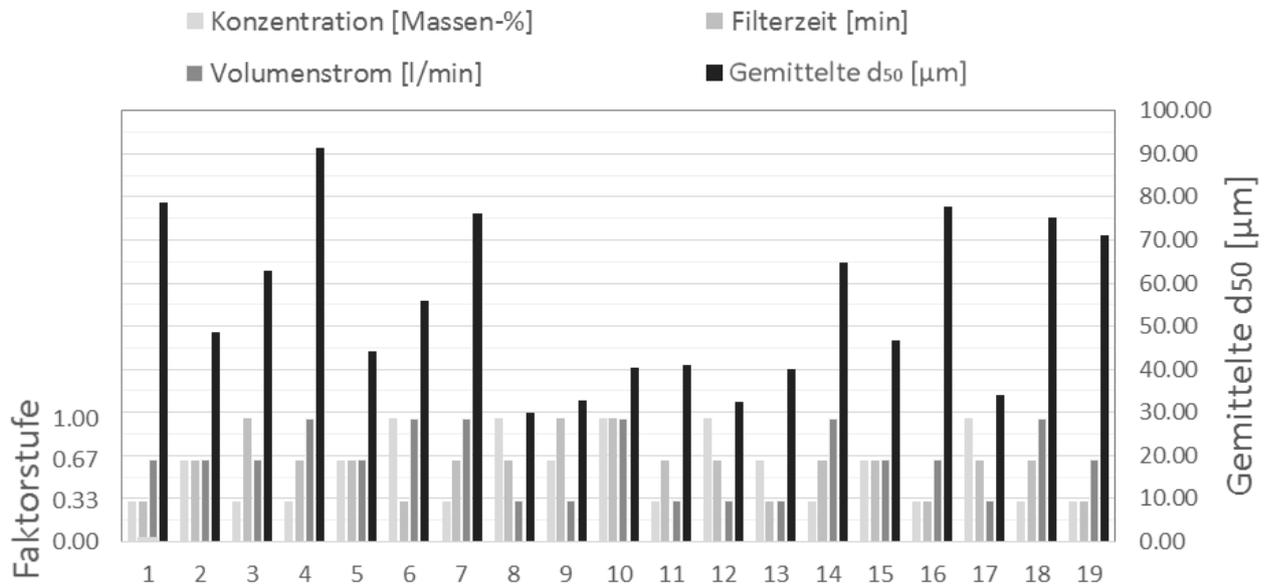


Abbildung XIV.2: Vergleich der mittleren Partikelgröße aller Versuchsreihen (schwarz) nach 120 min sowie die dazugehörigen Einflussgrößen normiert durch die Faktorstufen (unterschiedliche Grautöne)

Partikelverteilung der 1. Wiederholung:

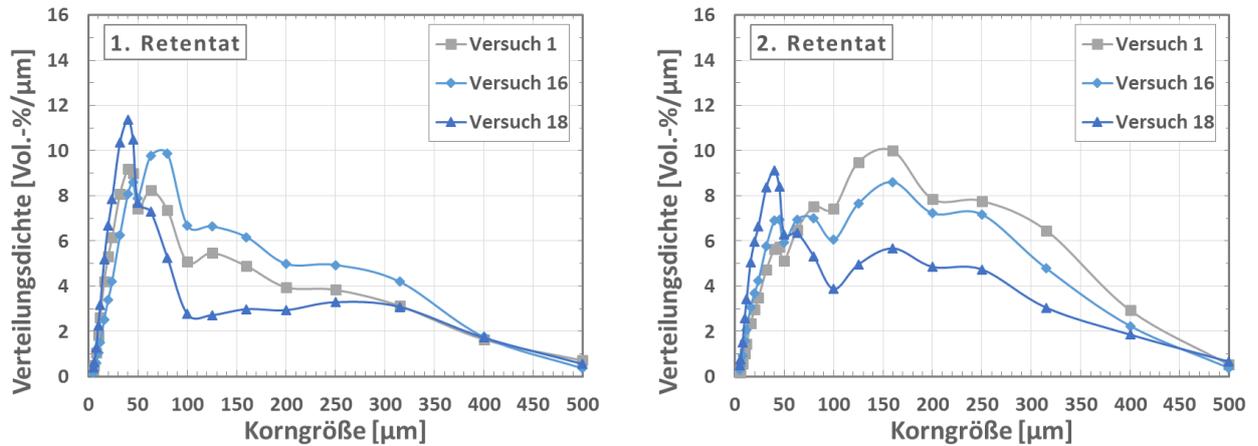


Abbildung XIV.3: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (1. und 2. Retentat) der Versuchsreihen 1, 16, und 18

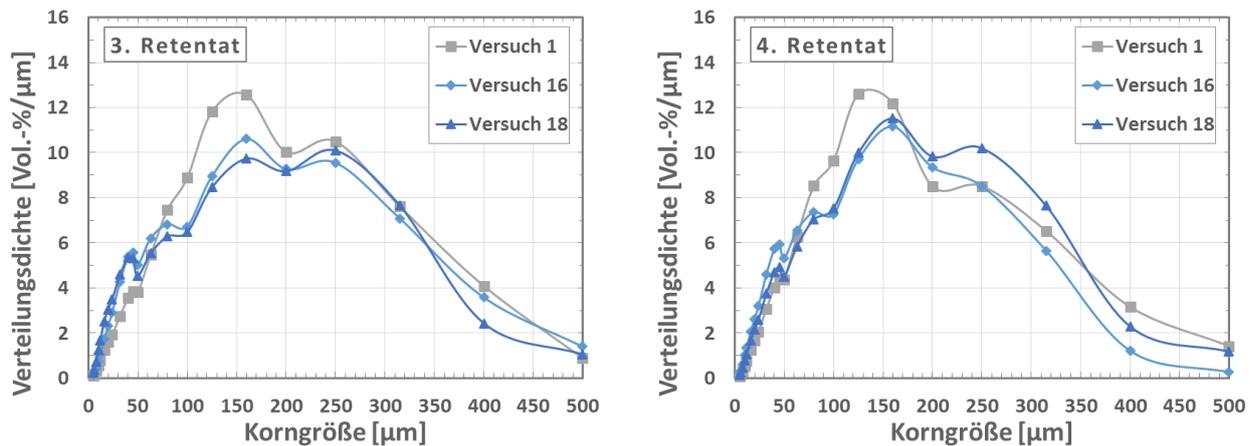


Abbildung XIV.4: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (3. und 4. Retentat) der Versuchsreihen 1, 16, und 18

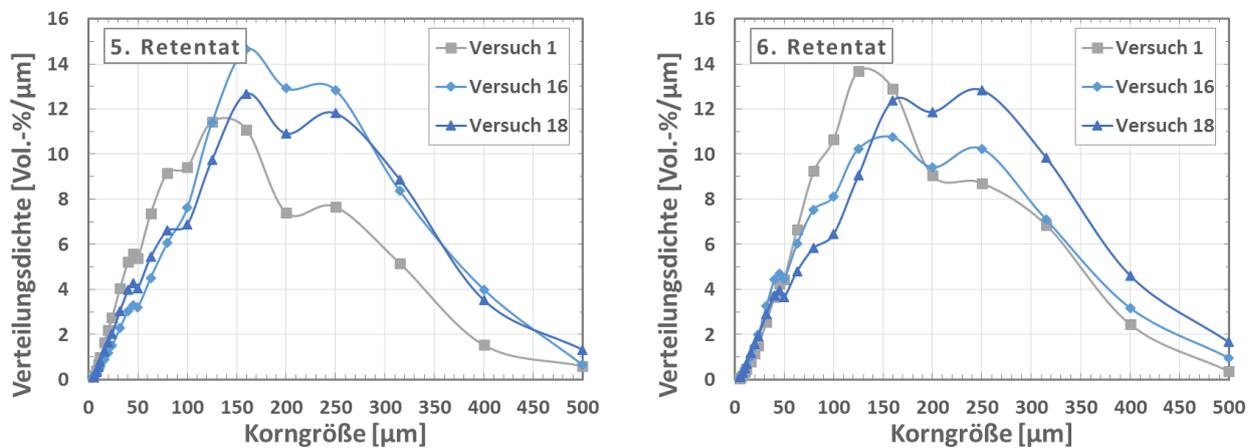


Abbildung XIV.5: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (5. und 6. Retentat) der Versuchsreihen 1, 16, und 18

Partikelverteilung der 2. Wiederholung:

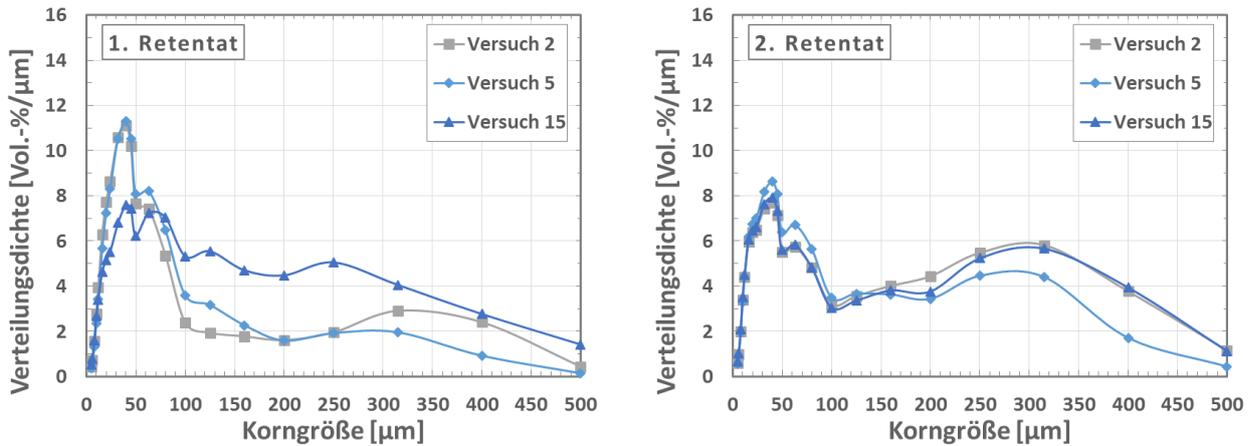


Abbildung XIV.6: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (1. und 2. Retentat) der Versuchsreihen 2, 5, und 15

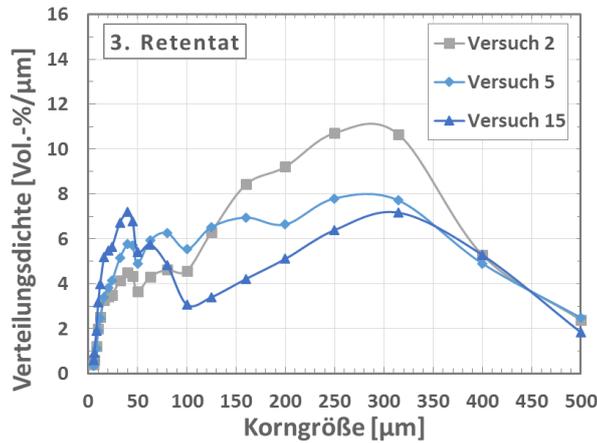


Abbildung XIV.7: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (3. Retentat) der Versuchsreihen 2, 5, und 15

Partikelverteilung der 3. Wiederholung:

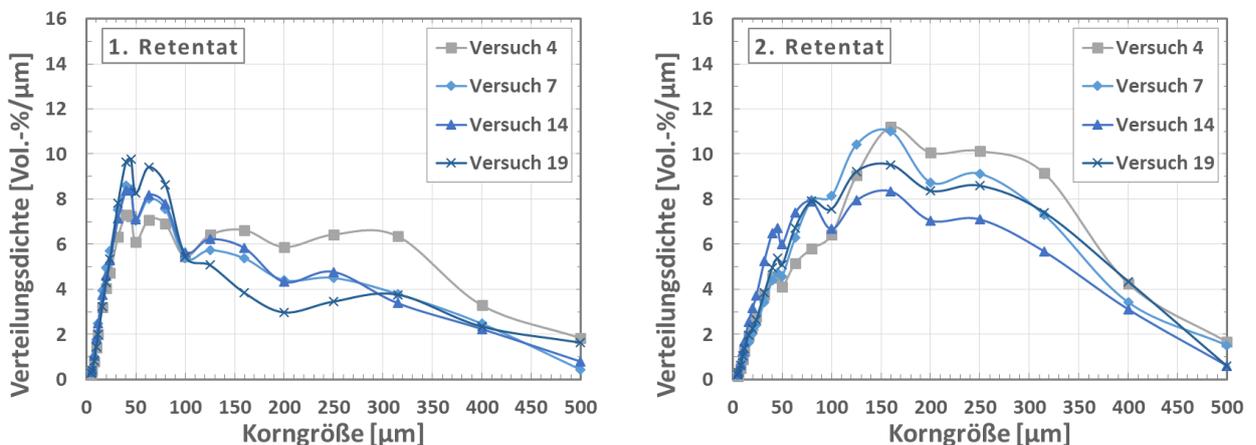


Abbildung XIV.8: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (1. und 2. Retentat) der Versuchsreihen 4, 7, 14 und 19

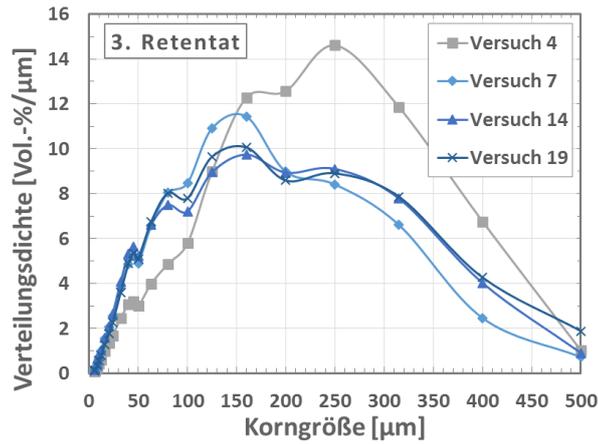


Abbildung XIV.9: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (3. Retentat) der Versuchsreihen 4, 7, 14 und 19

Partikelverteilung der 4. Wiederholung:

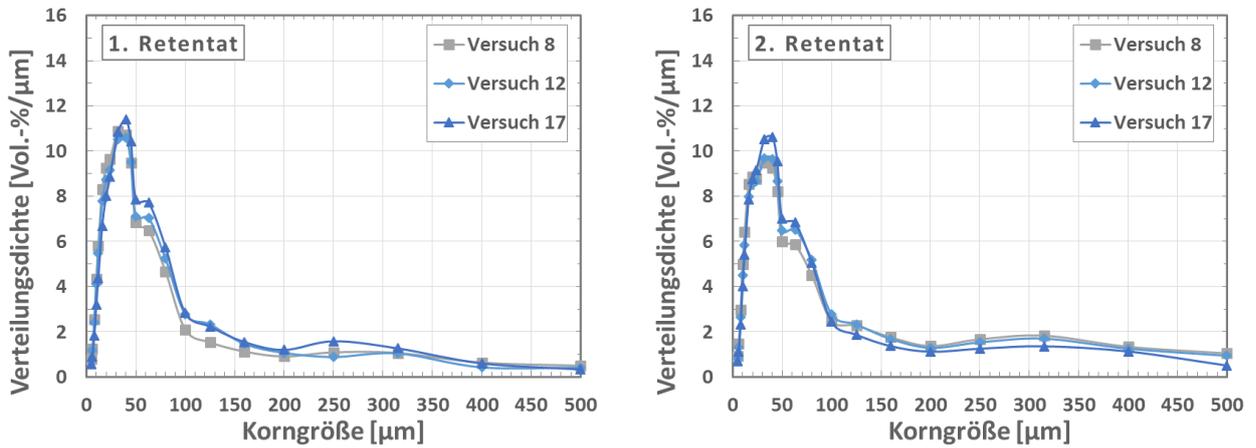


Abbildung XIV.10: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (1. und 2. Retentat) der Versuchsreihen 8, 12 und 17

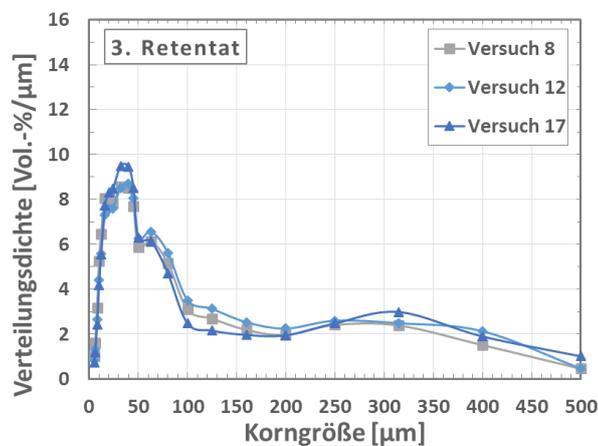


Abbildung XIV.11: Vergleich der Partikelgrößenverteilung der Wiederholungen mit zunehmendem Filterzyklus (3. Retentat) der Versuchsreihen 8, 12 und 17

XV Anhang E

Calibration Certificate

The calibration was done with Latexparticles conform to NIST-Standard with using a Multichannel Analyzer (4096 channels).

The following measuring devices were used for calibration:

Digital multimeter Hewlett Packard 34401 A cal. 8/2014
Digital Oscilloscope Hewlett Packard 54601 A cal. 8/2014

Counter: PCC-1.0
Sensor: LDS – 1/1 S/N **LDS 4033**
Measurement range : 5 – 500 μm Manufacturer:
Noise: 195 (210) mV M. Klotz GmbH
Flow rate: max 2000 ml/min Bad Liebenzell

Particle: For calibration particles from DUKE Scientific Corporation / Fa. Schied were used (Retractive index = 1.59 at $\lambda = 589 \text{ nm}$).

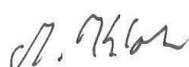
Classification: National Institute of Standards and Technology (NIST)
Community Bureau of Reference (CBR)

Certified particle diameter [μm]	Standard deviation [μm]	Cal. Puls [mV]	Cat. No.
4.991	0.035	240	4205A
9.975		413	4210 A
15.0		821	
25.0		1971	V228
51.0	1.0	4325	4250 A
100.0	1.0	5448	4305 A
140.0	1.2	5946	4310A
200.0	2.0	6823	4320A
400.0		8400	
500.0	8.0	9200	4340A

KIT
I=43,5mA
Calibration valid to : 02/2016

Calibrated by : M. Klotz

Unterhaugstett, 11.02.2015

Signature : 

XVI Anhang F

Excellence XS-S Präzisionswaagen

Technische Daten

Präzisionswaagen Excellence (kleine Plattform)

Schnelle und effiziente Arbeitsabläufe



Waagenmodell	XS203S	XS403S	XS603S
Bestell-Nr.	11130153	11130156	11130159
Grenzwerte			
Höchstlast, Feinbereich	210 g –	410 g –	610 g –
Ablesebarkeit, Feinbereich	1 mg –	1 mg –	1 mg –
Wiederholbarkeit ¹⁾ , Feinbereich	0,9 mg –	0,9 mg –	0,9 mg –
Lineartät, Abweichung	2 mg	2 mg	2 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	5 mg (200 g)	6 mg (400 g)	4,5 mg (600 g)
Typische Werte			
Wiederholbarkeit, Feinbereich	0,5 mg –	0,5 mg –	0,5 mg –
Lineartät, Abweichung	0,7 mg	0,7 mg	0,7 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	3,2 mg (200 g)	3,2 mg (400 g)	3 mg (600 g)
Mindesteinwaage ²⁾ , Feinbereich	1,5 g –	1,5 g –	1,5 g –
Mindesteinwaage ³⁾ , Feinbereich	100 mg –	100 mg –	100 mg –
Stabilisierungszeit	1,5 s	1,5 s	1,5 s
Abmessungen			
Abmessungen der Waage (BxTxH)	198x366x276 mm	198x366x276 mm	198x366x276 mm
Abmessungen der Waagschale (BxT)	127x127 mm	127x127 mm	127x127 mm

Waagenmodell	XS603SDR	XSI003S
Bestell-Nr.	11130162	11130165
Grenzwerte		
Höchstlast, Feinbereich	610 g, 120 g	1.010 g –
Ablesebarkeit, Feinbereich	10 mg; 1 mg	1 mg –
Wiederholbarkeit ¹⁾ , Feinbereich	6 mg; 1 mg	0,8 mg –
Lineartät, Abweichung	6 mg	2 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	9 mg (600 g)	5 mg (1.000 g)
Typische Werte		
Wiederholbarkeit, Feinbereich	4 mg; 0,6 mg	0,4 mg –
Lineartät, Abweichung	0,7 mg	0,7 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	6 mg (600 g)	3 mg (1.000 g)
Mindesteinwaage ²⁾ , Feinbereich	12 g; 1,8 g	1,2 g –
Mindesteinwaage ³⁾ , Feinbereich	800 mg; 120 mg	80 mg –
Stabilisierungszeit	1,5 s	1,5 s
Abmessungen		
Abmessungen der Waage (BxTxH)	198x366x276 mm	198x366x276 mm
Abmessungen der Waagschale (BxT)	127x127 mm	127x127 mm



Waagenmodell	XS802S	XS2002S	XS4002S
Bestell-Nr.	11130168	11130171	11130174
Grenzwerte			
Höchstlast, Feinbereich	810 g –	2,1 kg –	4,1 kg –
Ablesebarkeit, Feinbereich	10 mg –	10 mg –	10 mg –
Wiederholbarkeit ¹⁾ , Feinbereich	8 mg –	8 mg –	8 mg –
Lineartät, Abweichung	20 mg	20 mg	20 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	60 mg (800 g)	50 mg (2 kg)	60 mg (4 kg)
Typische Werte			
Wiederholbarkeit, Feinbereich	4 mg –	4 mg –	4 mg –
Lineartät, Abweichung	7 mg	7 mg	7 mg
Empfindlichkeitsabweichung (Prüfgewicht)	32 mg (800 g)	32 mg (2 kg)	32 mg (4 kg)
Mindesteinwaage ²⁾ , Feinbereich	12 g –	12 g –	12 g –
Mindesteinwaage ³⁾ , Feinbereich	800 mg –	800 mg –	800 mg –
Stabilisierungszeit	1,2 s	1,2 s	1,2 s
Abmessungen			
Abmessungen der Waage (BxTxH)	194x366x96 mm	194x366x96 mm	194x366x96 mm
Abmessungen der Wägplattform (BxT)	170x205 mm	170x205 mm	170x205 mm

¹⁾ bei Nennlast ²⁾ gemäss USP; ³⁾ U = 1 %, k = 2

XVII Anhang G

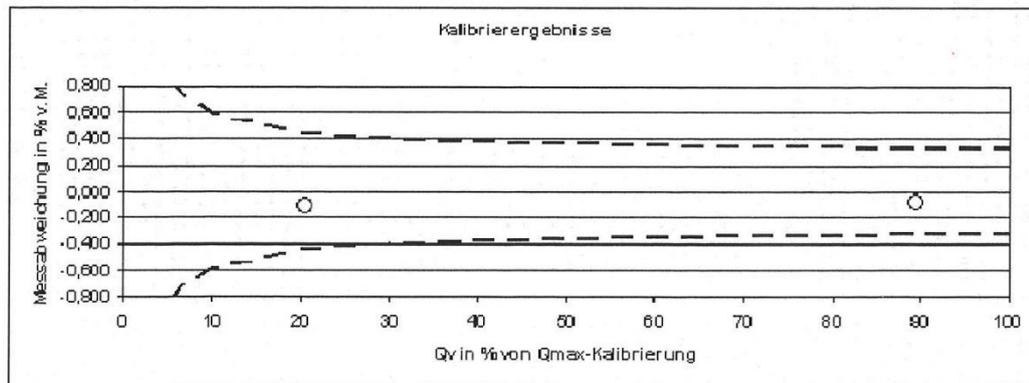


Kalibrierzertifikat

Kundenname:	-	Zertifikatsnummer:	242738310X001_091214
Kundenadresse:	-	Akkreditierung:	-
Tag-Nr.:	-	Kalibrierdatum:	09.12.2014
ABB Seriennummer:	8556936	Kalibrierort:	Göttingen
ABB Auftragsnummer:	242738310X001	Prüfstand:	PS 0001
Modell:	Induktiver Durchflussmesser ProcessMaster500	Medium:	Wasser
Modellnummer:	FEP511	Aufnehmer Qmax:	45,0 l/min
Nennweite (mm):	DN 10	Qmax-Kalibrierung:	31,5 l/min
Prozessanschluss:	Flansche DIN PN 40	Kalibrierung:	Standard Genauigkeit 0,3%
Flanschmaterial:	Nichtrostender Stahl	S-Faktor (Sz):	0,8319 mm/s
Ausklgd./Elektroden:	PFA / Edelstahl 1.4571 (316 Ti)	S-Faktor (Ss):	176,0900 %
Erregerfrequenz:	25 Hz	Genauigkeit:	+/- (0,30 % v.M. + 0,02 % v.E.)
Kundenmessbereich:	0 - 720 l/h	-	-

Nr.	Mediumtemp. °C	Messzeit (s)	Qv Soll (l/min)	Qv Ist (l/min)	Qv Soll in %	Messabw. in %
1	23,9	50,0	6,3550	6,3484	20,17	-0,10
2	23,9	50,0	6,3555	6,3492	20,18	-0,10
3	23,9	50,0	28,1450	28,1242	89,35	-0,07
4	23,9	50,0	28,1438	28,1207	89,35	-0,08
5	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-

Die o.a. Ergebnisse geben die Flüssigkeitskalibrierung unter Referenzbedingungen wieder.



Die bei der Kalibrierung ermittelten Messabweichungen liegen innerhalb der zulässigen Messabweichung. Dieses Kalibrierzertifikat dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

Rev: 3.1.5

Geprüft durch: C. Kadar

Datum: 09.12.2014

Dieses Zertifikat wurde automatisch erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

ABB Automation Products Dransfelder Str. 2 D-37070 Göttingen DEUTSCHLAND Tel: +49 (0) 551-9050 Fax: +49 (0) 551-905777 e-mail: flow@de.abb.com	ABB Limited Oldends lane, Stonehouse Glouchestershire, GL 10 3TA ENGLAND Tel: +44 (0) 1453-826661 Fax: +44 (0) 1453-821121 e-mail: flow@gb.abb.com	ABB Automation Inc. 125 East County Line Rd Warminster, PA 18974 USA Tel: +1 215 674-6000 Fax: +1 215 674-6394 e-mail: Flow@US.abb.com	ABB Australia Party Ltd. Bapaume Rd Moorebank NSW 2170 AUSTRALIEN Tel: +61-2-9821-0111 Fax: +61-2-9821-0950 e-mail: Flow@au.abb.com	ABB Canada 3450 Harvester Road Burlington, ON L7N 3W5 KANADA Tel: +1 905 333 7571 Fax: +1 905 639 8639 e-mail: Flow@ca.abb.com	ABB Engineering Ltd. 5 Lane 369 ChuangYe Road Nanhui District, Shanghai:201319 CHINA Tel: +86 (0) 21 50480101 Fax: +86 (0) 21 50483459 e-mail: Flow@cn.abb.com
--	--	--	---	--	--

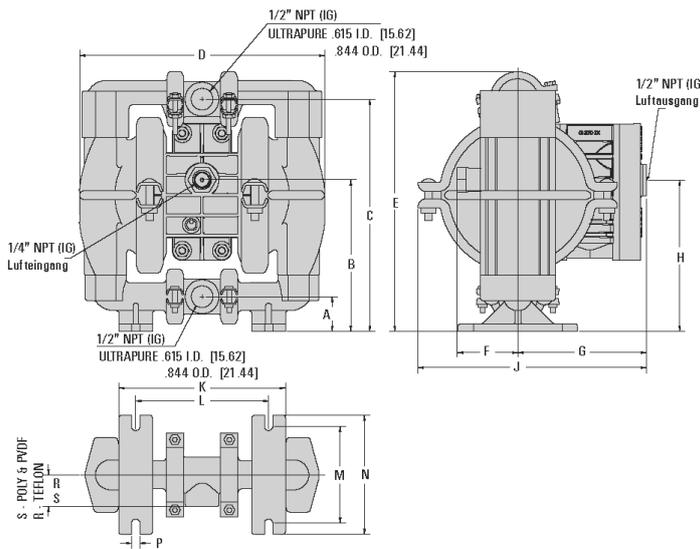
K 51
11. Dez. 2014

XVIII Anhang H

Fachberatung · Service · Lagerhaltung



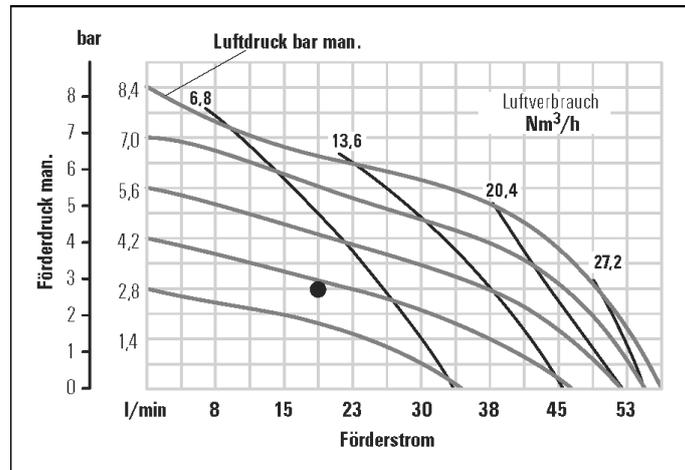
MODELL P1 KUNSTSTOFF/TPE - Ausführung CHAMP Maßblatt



Maße - P1 (Kunststoff)		
	METRISCH (mm)	STANDARD (inch)
A	29	1 5/32
B	130	5 1/8
C	195	7 11/16
D	208	8 3/16
E	219	8 5/8
F	55	2 5/32
G	115	4 17/32
H	127	5
J	204	8 1/32
K	144	5 21/32
L	114	4 1/2
M	83	3 1/4
N	102	4
P	7	9/32
R	21	27/32
S	28	1 3/32

Leistungskurve

- Höhe 219 mm (8 5/8")
- Breite 208 mm (8 3/16")
- Tiefe 204 mm (8 1/32")
- Gewicht Polypropylen 4 kg (9 lbs.)
- PVDF 5 kg (11 lbs.)
- Acetal graphitgefüllt 5 kg (10 lbs.)
- Teflon® PFA 6 kg (12 lbs.)
- Lufteinlaß 1/4" IG
- Saugstutzen 1/2" IG
- Druckstutzen 1/2" IG
- Saughöhe 5,8 m trocken (19')
- 9,75 m naß (32')
- Hubvolumen 0,11 l (0,030 gal.)
- Max. Fördermenge 56 l/m (15 gpm)
- Max. Korngröße 1,6 mm (1/16")



Förderstrom bezieht sich auf Wasser.

XIX Anhang I



Datenblatt Neoflux® schnellreinigendes Magnetfilter SSFN005038 (standard Ausführung)

Spezifikation	Umschreibung
<u>Allgemein</u>	
Umschreibung	: Neoflux® schnellreinigendes Magnetfilter
Zusammenfassung	: Anschluß DN50 - H230mm - 4 Magnetstäbe Ø25/23mm N42SH
Mögliche Optionen/Zubehör	: - (n.z.)
Anwendung	: Abscheiden von ferromagnetischen Teilchen aus Pulver und Flüssigkeit unter Druck
Funktionsprinzip	: Magnetische Ausscheidung von Fe-Teilchen aus Produktflüssen. Das Produkt passiert Magnetstäbe, die vorbeilaufende Fe-Teilchen abfangen.
Max Partikelgröße	: 10 mm
Min Fe-Partikelgröße die gefangen werden können	: 30 µm
Reinigung/Fe-Partikel Ausscheidung	: Manuelle Schnellreinigung mithilfe von Extraktorrohre
Volumen (leer)	: 1,14 dm ³
Einbaulänge	: 230 mm
Interface/Anschlußabmessungen	: DN50 nach DIN 2576 PN10 (2x)
Zusätzliche Anschlüsse	: - (n.z.)
Materialien - Produktberührt	: RS 1.4404 (AISI316L)
Material Gehäuse	: RS 1.4301 (AISI304) / RS 1.4404 (AISI316L)
Gehäuse-Ausführung	: - (n.z.)
Material Dichtung	: Silikone MVQ 'O'-Ring, 70° Shore, rot, 'Food Safe'
Oberflächenbehandlung	: Granulatgestrahlt, Ra 3 µm
Maximum Arbeits-/Produkttemperatur	: 140°C
Min/max Umgebungstemperatur	: -20°C bis 40°C
Arbeitsdruck	: Max 10 bar
Prüfdruck	: 15 bar
Sicherheit	: Hergestellt nach CE (Maschinenrichtlinie)
<u>Magnetinfo</u>	
Magnetfeldstärke (Flussdichte) (±10%)	: 10 700 Gauss auf Magnetstab / 8000 Gauss auf Extraktorrohr
Typ Magnetsystem	: Magnetstab in Extraktorrohr
Magnetabmessung	: Rohr Ø25 mm; Stab Ø23 mm
Anzahl Stäbe	: 4
Magnetqualität	: NdFeB GSN-42SH, Br 13 200 Gauss (bei 20°C), Tmax 150°C
<u>Physikalische Info</u>	
Länge	: 230 mm
Breite	: 188 mm
Höhe	: 221 mm
Gewicht	: 12.6 kg

GOUDSMIT
magnetic systems b.v.
 Postbus 18
 5580 AA Waalre
 Petunielaan 19
 5582 HA Waalre
 Nederland
 Tel. : +31 (0)40 221 32 83
 Fax : +31 (0)40 221 73 25
www.goudsmit-magnetics.nl
systems@goudsmit-magnetics.nl

Büro Deutschland
 Verkaufsbüro
 Schillingen Feld 34
 D-58300 Wetter
 Deutschland
 Tel. : +49 (0)2335 681906
 Fax : +49 (0)2335 681908
info@goudsmit.de

XX Anhang J

Hier werden alle Angaben zur numerischen Simulation aus Abschnitt V.2.1 gemacht.

Tabelle XX.1 : Physikalische Eigenschaften der Phasen

Größe	Einheit	H ₂ O	Glaspartikel
Dichte	[kg/m ³]	997.561	2590.0
Wärmeleitfähigkeit	[W/m·K]	0.62071	237.0
Dynamische Viskosität	[Pa·s]	0.001002	1.0E-6
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]	4181.72	903.0

Tabelle XX.2 : Numerische Einstellungen

Betrachtung	Stationär
Mehrphasen-Verfahren	Euler-Euler
Algorithmus	SIMPLE
Solver	„Segregated“
Turbulenz-Modell	Standard k - ε
Wandauflösung	“Two Layer All-y”-Modell
Phaseneigenschaft	Fest-Flüssig-Gemisch
Konvergenzgenauigkeit der Geschwindigkeit	Erster Ordnung
Konvergenzgenauigkeit des Phasenanteils	Erster Ordnung

Tabelle XX.3 : Relaxationsfaktoren

Gekoppelte Phasengeschwindigkeit	0.3
Druck	0.1
Energie-Solver für das Fluid	0.3
Energie-Solver für die Partikel	0.3
Phasenanteils	0.1
K - ε Turbulenz	0.3
K - ε turbulente Viskosität	0.3

XXI Anhang K

Hier werden alle Angaben zur numerischen Simulation aus Abschnitt V.2.1 gemacht.

Tabelle XXI.1 : Physikalische Eigenschaften der Phasen

Größe	Einheit	H ₂ O	Partikel
Dichte	[kg/m ³]	997.561	3950.0
Dynamische Viskosität	[Pa·s]	0.001002	-

Tabelle XXI.2 : Numerische Einstellungen

Betrachtung	Instationär
Mehrphasen-Verfahren	Euler-Lagrange
Algorithmus	SIMPLE
Solver	„Segregated“
Turbulenz-Modell	Standard $k-\varepsilon$
Wandauflösung	“Two Layer All y^+ “-Modell
Phaseneigenschaft	Fest-Flüssig-Gemisch
Konvergenzgenauigkeit der Geschwindigkeit	Zweiter Ordnung
Konvergenzgenauigkeit des Phasenanteils	Zweiter Ordnung
Zeitliche Diskretisierung	Erster Ordnung

Tabelle XXI.3 : Relaxationsfaktoren

Gekoppelte Phasengeschwindigkeit	1.0
Geschwindigkeit	0.8
Druck	0.2
K - ε Turbulenz	0.8
K - ε turbulente Viskosität	1.0

XXII Anhang L

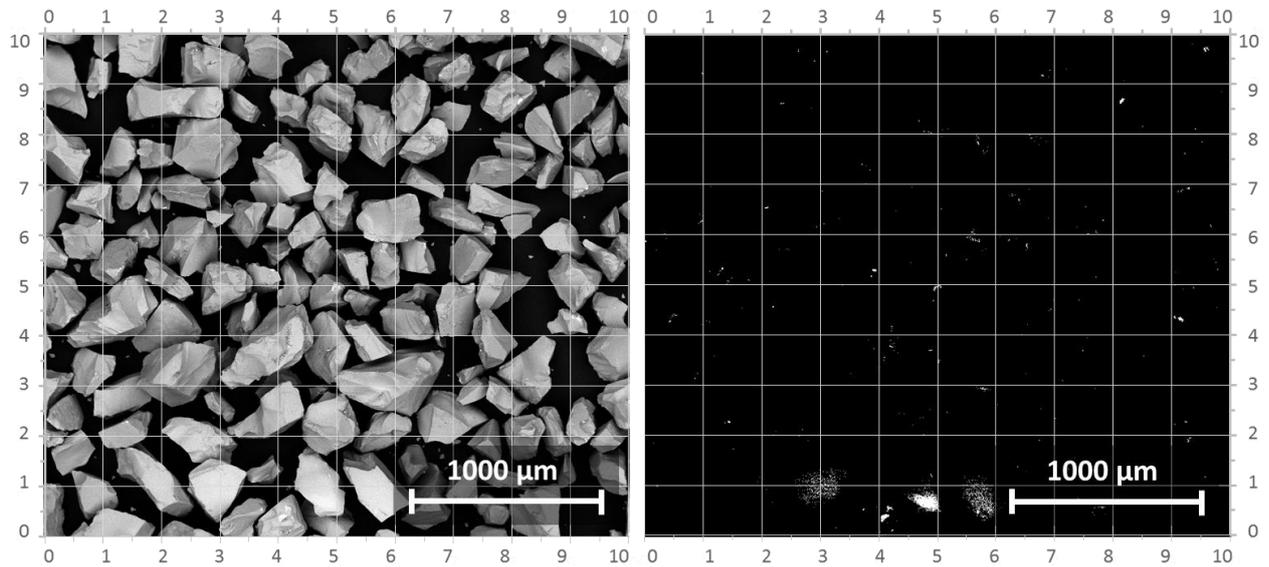


Abbildung XXII.1: BSE-REM-Aufnahme des Filtrats aus Versuchsreihe 2

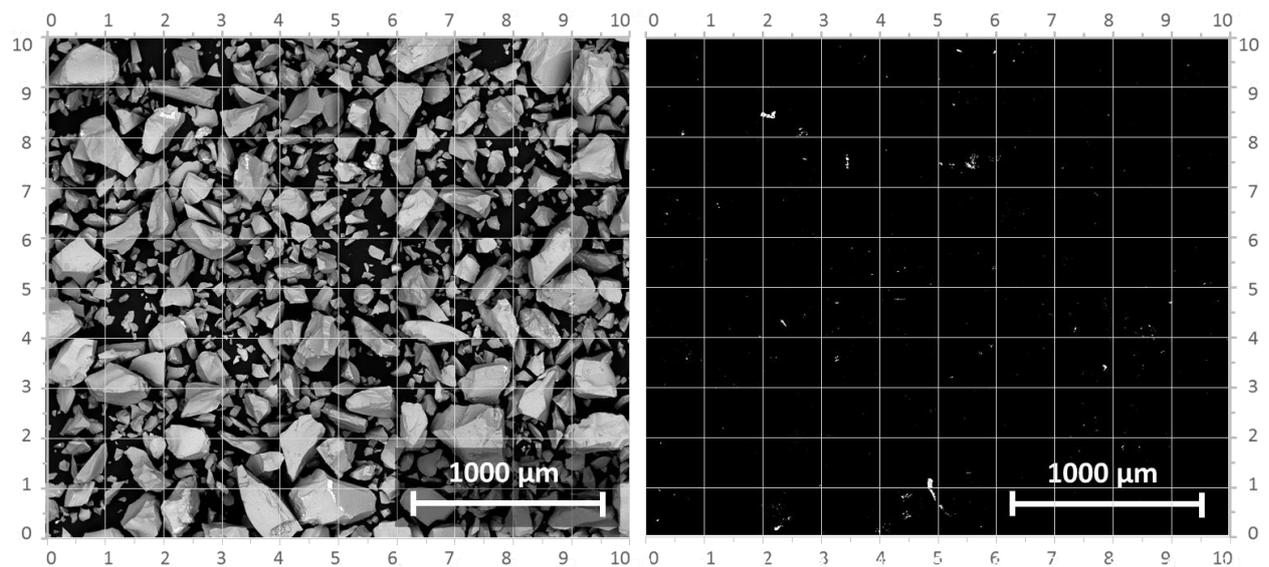


Abbildung XXII.2: BSE-REM-Aufnahme des Filtrats aus Versuchsreihe 4

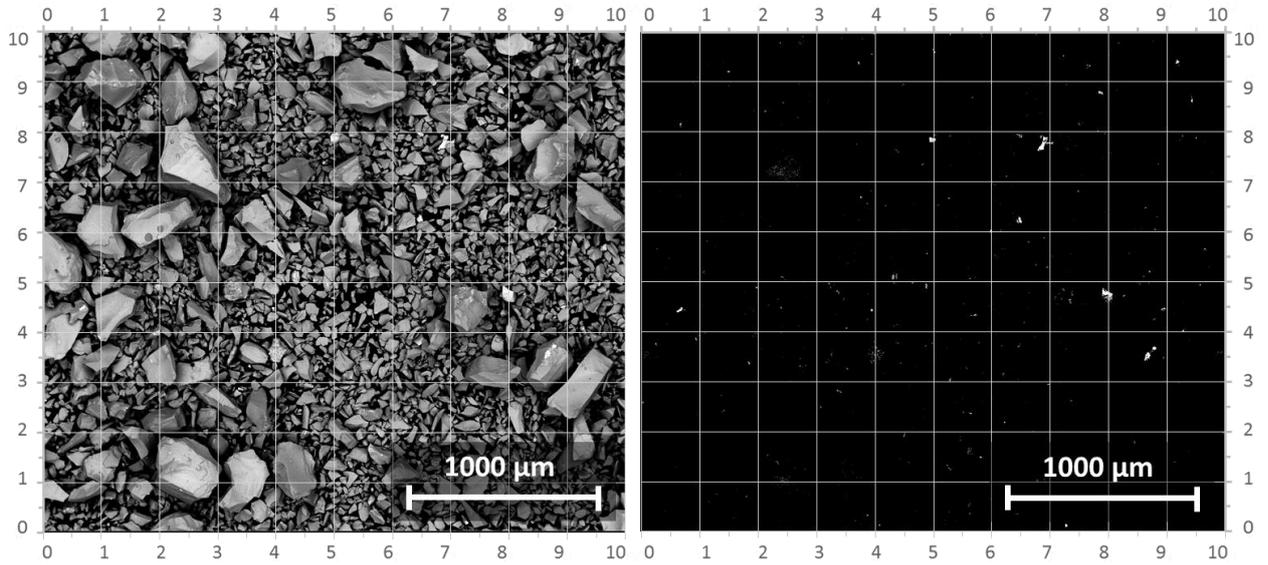


Abbildung XXII.3: BSE-REM-Aufnahme des Filtrats aus Versuchsreihe 7

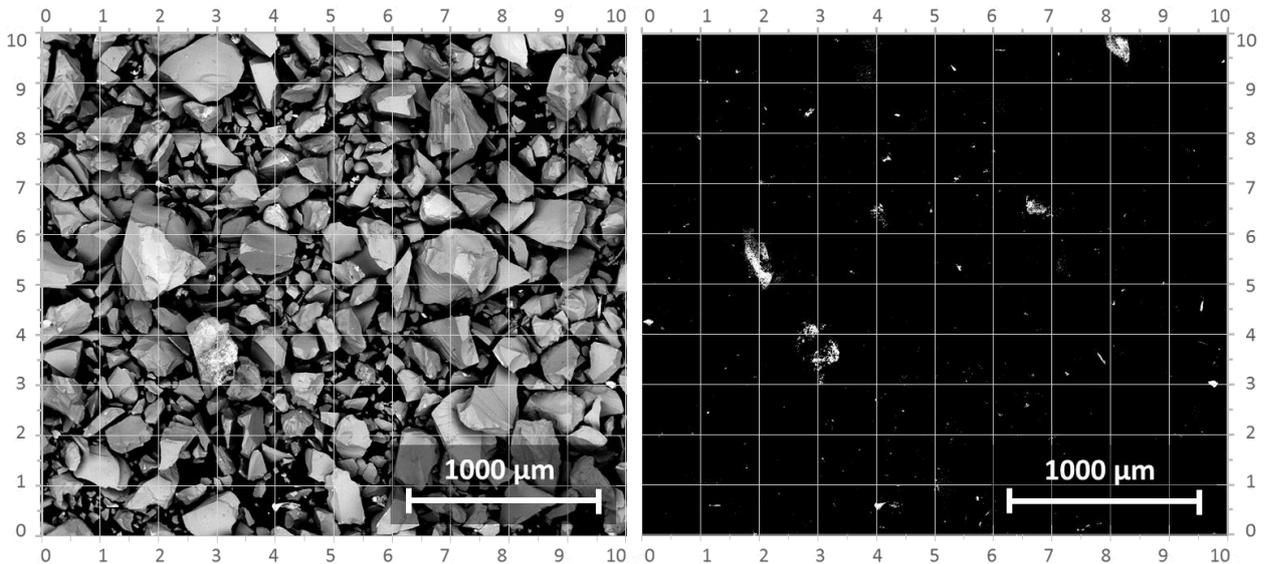


Abbildung XXII.4: BSE-REM-Aufnahme des Filtrats aus Versuchsreihe 17

Institut für Kernenergetik und
Energiesysteme

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 31

D- 70569 Stuttgart

