

Experimentelle und numerische Untersuchungen eines Magnetfiltersystems zur Minimierung von Sekundärabfall beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTOR-INGENIEURIN

von der KIT-Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Phys. Carla-Olivia Krauß

geb. in Kassel

Tag der mündlichen Prüfung:

18.02.2021

Hauptreferent:
Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes
Prof. Dr.-Ing. Bodo Ruck

„Wer sich nicht bewegt, spürt seine Fesseln nicht“
- Rosa Luxemburg

Zusammenfassung

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen wird neben anderen Verfahren das Wasser-Abrasiv-Schneid-Verfahren (WAS-Verfahren) zum Zerlegen des Reaktordruckbehälters und seiner Einbauten verwendet, wobei diese Komponenten durch die Ioneneinstrahlung aktiviert sind. Dieses Verfahren bietet viele Vorteile im Vergleich zu anderen Zerlegetechniken. Es weist aber auch einen großen Nachteil auf. Bei der Anwendung dieses Verfahrens entsteht ein Partikelgemisch aus zwei Fraktionen. Zum einen besteht es aus den Stahlpartikeln der zu zerlegenden Stahlkomponente, zum anderen aus den Abrasivpartikeln des WAS-Verfahrens. Dieses Partikelgemisch muss derzeit als radioaktiver Abfall behandelt werden und wird als Sekundärabfall bezeichnet. Die Mengen an Sekundärabfall sind dabei enorm, sodass das WAS-Verfahren trotz seiner technischen Vorteile kaum noch eingesetzt wird.

In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt wurde eine Separationsanlage entwickelt, die die beiden Fraktionen, das Abrasiv und Stahlpartikel, voneinander trennen soll, um so den Sekundärabfall zu minimieren. Eine der wichtigsten Komponenten dieser Separationsanlage ist das Magnetfiltersystem.

In dieses Magnetfiltersystem wird das Partikelgemisch in Suspension mit Wasser befördert. Wenn dieses Partikelgemisch das Magnetfiltersystem durchläuft, werden die Stahlpartikel von dem in dem System bestehenden Magnetfeld angezogen. Die Abrasivpartikel wiederum passieren das Magnetfiltersystem. Es kommt somit zu einer Separation der Abrasiv- und Stahlpartikel.

In dieser Arbeit wurde der Abscheideprozess der Stahlpartikel im Magnetfiltersystem numerisch und experimentell untersucht. Bei den Untersuchungen wurden jedoch die Abrasivpartikel vernachlässigt, d.h. es wurde analysiert, was passiert, wenn ausschließlich die Stahlpartikel das Magnetfiltersystem passieren. Die Wirksamkeit der Separation wurde anhand des Abscheidegrads beurteilt, welcher angibt, wie viele Stahlpartikel vom Magnetfiltersystem separiert werden. Ziel dieser Untersuchungen ist es den Abscheideprozess besser zu

verstehen, diesen zu verbessern und damit eine höhere Reinheit der separierten Abrasivfraktion zu erhalten.

Abstract

When dismantling nuclear plants, a water-abrasive-cutting-method can be used to disassemble the reactor pressure vessel and its internals. This process offers many advantages compared to other dismantling techniques. But it has one major disadvantage. By using this cutting method a particle mixture of steel particles (from the dismantled steel component) and abrasive particles (from the water-abrasive-cutting-method) arises. This particle mixture currently has to be treated as radioactive waste, so-called secondary waste. The amount of secondary waste is enormous.

In a research project funded by the BMBF, a separation plant was developed and built. This plant separates the two fractions, the abrasive- and steel-particles. One of the most important components of this separation plant is the magnetic filter. The particle mixture is suspended in water. This suspension crosses the magnetic filter and the steel particles are getting separated from the magnetic field existing in this system. The abrasive particles get separated by the magnetic filter. There is a separation of the abrasive and the steel particles.

In this work the separation process of the steel particles in the magnetic filter is examined numerically and experimentally. During the examinations the abrasive particles were neglected. The separation was assessed based on the degree of separation. This indicates how many steel particles are separated from the magnetic filter. The aim of this thesis is to understand the separation process better and to improve the magnetic filter in order to reach a higher purity of the separated abrasive fraction.

Vorwort

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

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes bedanken für die Übernahme des Hauptreferates, das entgegengebrachte Vertrauen und die fachliche Unterstützung sowie den Humor. Danke, roter Pulli.

Weiter gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bodo Ruck mein besonderer Dank für seine fachlichen Anregungen und Hilfestellungen sowie die Übernahme des Korreferats. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl sowie Prof. Dr. Thorsten Schäfer danke ich für die Teilnahme an der Promotionskommission. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Kunibert Lennerts möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes in meiner Promotionskommission bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kolleg*innen am TMB für die fachliche und persönliche Unterstützung. Ein ganz besonderer Dank geht an dieser Stelle an meinen Zimmerkollegen und Freund Alexander für die tolle Arbeitsatmosphäre, den Spaß und die vielen Excel-Tabellen. Namentlich möchte ich mich noch bei Nadine, Sven, Sonja, Alena, Michele, Anke, Leo, Michi, Jürgen und Philipp bedanken.

Bei meinem MaSK-Projektteam möchte ich mich für die angenehme Zusammenarbeit bedanken, besonders bei Winfried.

Ein weiterer Dank geht an das italienische Restaurant "Pizzahaus" mit all seinen Mitarbeiter*innen. Eure Pasta al forno hat jeden Mittwoch besonders gemacht. Bei meinen Praktikant*innen, Masterand*innen und Hiwinen/Hiwis möchte ich mich auch bedanken. Ohne eure fachliche Unterstützung wäre mir diese Arbeit nicht gelungen. Danke Steffi, Janis, Minh und Marlene. Thank you, Pritvee.

An meine Freundinnen aus alten und neuen Tagen Fanny, Loui, Lisa und Sara: Ohne euch wäre ich nicht so mutig meinen eigenen Weg zu finden und zu gehen. Danke!!!

Vielen Dank auch an Maggie, Corinna, Christina, Christoph und alle anderen Freund*innen für die Aufmunterungen, das Zuhören, die Ablenkung,

Meiner Familie möchte ich auch sehr danken für die Liebe und Zuneigung, die Diskussionen, das gemeinsamen Durchstehen von schweren Zeiten, erwähnen möchte ich hier meine Mutter Karin, meinen Bruder Tim und meine Schwiegermutter Gunde.

Zum Schluss möchte ich mich noch bei meinem Partner Philipp und meiner Tochter Elsa bedanken. Ihr macht mein Leben jeden Tag etwas bunter, schöner, turbulenter, Ich liebe euch, ihr Bohrmäuse.

Diese Arbeit widme ich meiner Cousine Lisa Friedrich †14.01.2019.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	v
Vorwort	vii
Abkürzungen und Symbole	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Problematik: Sekundärabfall	2
1.3 Motivation und Ziel der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Wasser-Abrasiv-Schneid-Verfahren	5
2.1.1 Eigenschaften Abrasiv	5
2.2 Entwickelte Separationsanlage	6
2.2.1 Magnetfiltersystem	9
2.3 Magnetfeld	11
2.3.1 Maxwell'sche Gleichungen	11
2.3.2 Magnetische Materialeigenschaften	12
2.3.3 Permanentmagneten	14
2.4 Strömung	15
2.4.1 Grundlagen der Strömungslehre	15
2.4.2 Grundgleichungen der Strömungslehre	18
2.4.3 Rohrströmung	19
2.4.4 Prallströmung	20
2.4.5 Ausflussgeschwindigkeit	23

2.5	Partikelbewegung	25
2.6	Abscheidegrad	25
2.7	Numerische Strömungssimulation	26
2.7.1	Diskretisierung	26
2.7.2	Turbulenzmodellierung	28
2.7.3	Reynolds Averaged Navier Stokes	28
2.7.4	Mehrphasenströmung	30
2.7.5	OpenFOAM	31
2.8	Messinstrumente	32
2.8.1	Magnetometer	32
2.8.2	Extinktionszähler	32
2.9	Homogene Suspension	34
2.9.1	1-Sekunden-Kriterium	34
2.9.2	90-%-Schichthöhenkriterium	35
2.10	Partikelgrößenverteilung	35
2.10.1	Weibull-Verteilung	35
3	Experimentelle Untersuchungen	37
3.1	Magnetfeldmessung	37
3.1.1	Versuchsaufbau	37
3.1.2	Durchgeführte Messungen	38
3.1.3	Ergebnisse	39
3.2	Experimente zur Abscheidegradbestimmung	44
3.2.1	Versuchsaufbau	44
3.2.2	Disperse Phase	49
3.2.3	Erzeugung einer Strömung	52
3.2.4	Erzeugung und Nachweis einer homogenen Suspension	53
3.2.5	Abscheidegradbestimmung	57
3.2.6	Ergebnisse	58
4	Numerische Untersuchungen	63
4.1	Allgemeine Informationen zu den numerischen Untersuchungen	63
4.1.1	Geometrieerstellung	63
4.1.2	Netzgenerierung	65
4.1.3	MapFields	67

4.1.4	Generierung einer homogenen Suspension	68
4.1.5	Datenauswertung	69
4.2	Magnetfeld	70
4.2.1	Aufbau der Magnetstäbe	70
4.2.2	Ergebnisse	72
4.3	Strömung	75
4.3.1	Ergebnisse	76
4.4	Partikelsimulation	83
4.4.1	Vorarbeiten für die Partikelsimulation	83
4.4.2	Ergebnisse	87
4.4.3	Ergebnisse: Abscheidegrad	94
4.5	Abscheidegrad mit mehreren Magnetrosten	97
4.5.1	Abscheidegrad bei drei Magnetrosten	98
5	Wirtschaftliche Bedeutung	105
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	107
A	Separationsanlage	111
B	Entleerung des Behälters	115
C	CPP-Programm zur Generierung einer homogenen Sus- pension	117
	Literaturverzeichnis	127

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DNS	direkte numerische Simulation
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MaSK	Magnet-Separation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RDB	Reaktordruckbehälter
SST	Shear-Stress
WAS	Wasser-Abrasiv-Schneiden
WAIS	Wasser-Abrasiv-Injektions-Schneiden
WASS	Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneiden

Konstanten

A_H	Hall-Konstante
C	Curie-Konstante

λ	Lamé-Konstante
μ_0	magnetische Feldkonstante
π	Kreiszahl Pi: 3,14159 . . .

Lateinische Symbole und Variablen

Kleinbuchstaben

a_1	Koeffizient des $k - \omega$ -Turbulenzmodells
d	Dicke, Durchmesser
\vec{f}	Volumenkraftdichte
\vec{g}	Erdanziehung
h	Höhe
k	kinetische turbulente Energie, Formparameter
l	charakteristische Länge
m	Masse
p	Druck
r	Rohrradius
t	Zeit
t_0	Relaxationszeit
u^+	dimensionslose Geschwindigkeit
u_τ	Wandschubspannungsgeschwindigkeit
u_m	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
\vec{u}	Strömungsgeschwindigkeit
\dot{v}	Volumenstrom

\vec{x}	Ortskoordinate
y^+	dimensionsloser Wandabstand

Großbuchstaben

A	Fläche
AG_{MFS}	Abscheidegrad mit dem Magnetfiltersystem
\vec{B}	magnetische Flussdichte
\vec{D}	elektrische Flussdichte
\vec{E}	elektrische Feldstärke
F	Verschneidungsfunktion
\vec{F}_L	Lorentzkraft
\vec{H}	magnetische Feldstärke
I	Stromstärke
\vec{J}	elektrische Stromdichte
L	charakteristische Länge
\vec{M}	Magnetisierung
Re	Reynolds-Zahl
Re_τ	Reynolds-Zahl mit entdimensionierten Variablen
S	Schergeschwindigkeit
St	Stokes-Zahl
T	Temperatur
U	Spannung
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom

Griechische Symbole und Variablen

β	Koeffizient des $k - \omega$ -Turbulenzmodells
χ	magnetische Suszeptibilität
ϵ	isotrope Dissipationsrate
φ	Phasenverschiebung
γ	Koeffizient des $k - \omega$ -Turbulenzmodells
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
λ	inverser Skalenparameter
λ_t	Druckverlustbeiwert
μ	dynamische Viskosität
μ_r	relative Permeabilität
ν	kinematische Viskosität
ω	spezifische Dissipation
ϕ_{RP}	Partikelkonzentration im Rührbehälter
ψ	Skalarpotential
ρ	Dichte
ρ_L	elektrische Ladungsdichte
σ_ω	Koeffizient des $k - \omega$ -Turbulenzmodells
σ_k	Koeffizient des $k - \omega$ -Turbulenzmodells
τ	Schubspannung
τ_{ij}	Reynolds'scher Spannungstensor

Operatoren und mathematische Symbole

Δ	Laplace-Operator
$\frac{d}{dx_i}$	totaler Ableitungsoperator
$\frac{\partial}{\partial x_i}$	partieller Ableitungsoperator
$\vec{\nabla}$	Nabla-Operator

Allgemeine Tiefindizes

a	Außen
EXP	Experiment
EZ	Extinktionszähler
FH	Füllhöhe
ges	Gesamt
H	Hallsonde, Hall-
MFS	Magnetfiltersystem
P	Partikel
RB	Rührbehälter
S	Suspension
T	Turbulent
W	Wasser (Fluid)

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen gewinnt weltweit zunehmend an Bedeutung, da es immer mehr Anlagen gibt, die aus wirtschaftlichen, technischen oder politischen Gründen abgeschaltet und rückgebaut werden. In Deutschland spielt der Rückbau eine noch zentralere Rolle, da die deutsche Bundesregierung im Jahr 2011 nach dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima in Japan den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 beschloss.

Eine Herausforderung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen stellt die Zerlegung des Reaktordruckbehälters (RDB), sowie seiner Einbauten dar, da diese Komponenten durch die jahrelange Bestrahlung aktiviert sind. Es gibt verschiedene Verfahren, um diese Komponenten zu zerlegen. Eine Möglichkeit der Kategorisierung dieser Verfahren ist die Unterteilung in thermische und mechanische Verfahren. Es gibt auch noch einige weitere Verfahren, die gerade entwickelt werden und sich nicht in diese beiden Kategorien einordnen lassen. Thermische Zerlegetechniken zerteilen die Komponente mittels Energieübertragung, z.B. anhand eines Lasers, der das Material zum Schmelzen bringt. Das abgetragene Material wird durch ein Medium oder die Schwerkraft aus der entstandenen Fuge transportiert. Der Nachteil dieser Verfahren ist, dass beim Schnitt Aerosole und Hydrosole freigesetzt werden. Bei der Zerlegung einer aktivierten Komponente bedeutet dies, dass diese Partikel sehr klein (*nm*-Bereich) und ebenfalls radioaktiv sind. Da bei der Anwendung eine vollständige Absaugung nicht möglich ist, findet eine Kontaminationsverschleppung statt. Bei mechanischen Verfahren wird die zu zerlegende Komponente durch mechanisches Abtragen zerteilt. Bei diesen Verfahren entstehen auch Partikel, diese können aber leicht aufgefangen werden, da sie deutlich größer (*mm*-Bereich) sind. Eine Art der mechanischen Verfahren ist Sägen. Mit diesem Verfahren ist das Zerlegen von komplexen Strukturen schwer und in manchen Fällen unmöglich, unter anderem verkeilen sich die Sägeblätter häufig.

Eine spezielle mechanische Zerlegetechnik ist die Wasser-Abrasiv-Schneide-Technik (WAS-Technik). Dabei verwendet dieses Verfahren mineralische Partikel (Abrasive) und Wasser zum Zerteilen der Komponente. Zum einen kann dieses Verfahren komplexe Strukturen zerlegen, zum anderen entstehen keine Aerosole und Hydrosole bei der Anwendung. Doch bei der Zerlegung der Komponenten (Stahl) mit dieser Technik kann sich die Menge des radioaktiven Abfalls, je nach Struktur der Komponente und Schnittplan, verdoppeln, da sich die Abrasivpartikel mit radioaktiven Stahlpartikeln der zu zerlegenden Komponente vermischen. Durch die erheblichen Entsorgungskosten radioaktiver Abfälle wird die WAS-Technik trotz ihrer technischen Vorteile wegen wirtschaftlicher Gesichtspunkte benachteiligt. [TS09, KGGea17b, KGGea17a, HG-Gea17, KGGea18, HGGea18, HGGea19]

1.2 Problematik: Sekundärabfall

Beim Einsatz des WAS-Verfahrens an Stahlkomponenten entsteht ein Gemisch aus Abrasiv- und Stahlpartikeln. Beim Zerlegen des RDBs und seiner Einbauten ist diese Komponente aktiviert, sodass auch das entstandene Partikelgemisch radioaktiv ist. Derzeit wird dieses anfallende Partikelgemisch als radioaktiver Abfall behandelt.

In einem vom BMBF-geförderten Forschungsprojekt „Magnet-Separation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (MaSK)“ wurden WAS-Schnitte durchgeführt. Das dabei entstandene Partikelgemisch wurde mittels chemischer Analysen und Massenbetrachtungen (Masse der Stahlkomponente vor und nach dem WAS-Schnitt und Masse des verwendeten Abrasivs) analysiert und es wurde ermittelt, dass die Stahlkonzentration unter 2 Massen-% liegt, siehe Abbildung 2.1 rechts. Dieses Massenverhältnis erklärt auch die erhebliche Menge an Sekundärabfall.

1.3 Motivation und Ziel der Arbeit

In dem Projekt MaSK wurde eine Separationsanlage entwickelt, die dieses Partikelgemisch behandelt. Dabei wird eine Abrasivfraktion separiert, die für einen erneuten Schnitt mit der WAS-Anlage genutzt werden kann. Mit dieser

Separationsanlage kann also der Sekundärabfall beim Rückbau kerntechnischer Anlagen verringert werden. Diese Anlage besteht unter anderem aus einem im Rahmen des Projekts entwickelten Magnetfiltersystem.

Dieses neue Magnetfiltersystem wird experimentell und numerisch untersucht, um den Abscheideprozess besser zu verstehen, diesen zu verbessern und damit eine höhere Reinheit der separierten Abrasivfraktion zu erhalten. Somit könnte das WAS-Verfahren häufiger beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt werden und die Vorteile des Verfahrens, allen voran der Schutz des in der kerntechnischen Anlage arbeitenden Personals, können genutzt werden. Zudem könnte beim Einsatz des WAS-Verfahrens das radioaktive Endlagervolumen und die damit verbundenen Kosten gesenkt werden.

2 Grundlagen

2.1 Wasser-Abrasiv-Schneid-Verfahren

In Abbildung 2.1 ist das Funktionsprinzip des WAS-Verfahrens vereinfacht abgebildet. Hierbei wird Wasser mit scharfkantigen Abrasivpartikeln gemischt und mit hohem Druck (800 – 4000bar) durch eine schmale Düse auf die zu zerschneidende Stahlkomponente gestrahlt. Am Auftreffpunkt trägt das Abrasiv den Stahl ab und es entsteht eine Schnittfuge. Bei diesem Schnitt entsteht ein Partikelgemisch aus Abrasiv- und Stahlpartikeln.

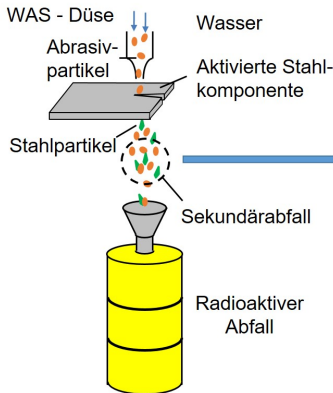
Es gibt zwei Methoden, diesen Wasser-Abrasiv-Strahl zu erhalten. Der Unterschied dieser beiden liegt in der Aufgabe des Abrasivs. Die eine Methode wird als Wasser-Abrasiv-Injektions-Verfahren (WAIS-Verfahren) bezeichnet. Hier wird das Wasser auf den gewünschten Druck gebracht und das Abrasiv kurz vor der Düse hinzugegeben. Dieses Verfahren wurde schon mehrmals zum Zerlegen des RDBs und seiner Einbauten unter anderem in den USA angewandt. [Pos13]

Bei der anderen Methode, dem Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneid-Verfahren (WASS-Verfahren), wird das Abrasiv dem Wasser vorher in einem Mischstück beigefügt. Das Wasser-Abrasiv-Gemisch wird dann über einen Schlauch unter dem gewünschten Druck zur Düse befördert. Diese Methode hat den Vorteil, dass die WAS-Vorrichtung außerhalb des Kontrollbereichs stehen kann, während der Schnitt im Kontrollbereich durchgeführt wird. Diese Art wurde bereits in Deutschland bei der Zerlegung des RDBs und seiner Einbauten in den Kernkraftwerken Würgassen und Stade eingesetzt. [Are, SK09]

2.1.1 Eigenschaften Abrasiv

Die Hauptbestandteile des beim WAS-Verfahren verwendeten Abrasivs sind mit 92% – 96% das zur Granatgruppe gehörende Almandin, sowie Pyro-

WAS-Verfahren:



Zusammensetzung des Partikelgemischs:

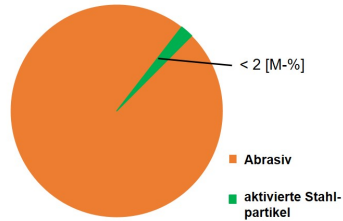


Abbildung 2.1: WAS-Verfahren, Links: Funktionsprinzip, Rechts: Bei dem Schneidprozess entstehende Partikelzusammensetzung

pe und Grossular. Die chemische Zusammensetzung des Almandins lautet $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$ und die von Pyrope $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$. Weitere mineralische Bestandteile des Abrasivs sind mit 4% – 8% Magnetit, Hornblende, Feldspat und Glimmer. Das Abrasiv weist somit eine Dichte von $3,9 - 4,1 \frac{g}{cm^3}$ und eine Mohshärte von 7,5 – 8,5 auf, d.h. dieses Mineral ist hart.

2.2 Entwickelte Separationsanlage

Im Rahmen des Forschungsprojekts MaSK wurde eine Anlage entwickelt, die zwei zentrale Aufgaben erfüllt. Zum einen werden die beiden Fraktionen, das Abrasiv und die Stahlpartikel, voneinander getrennt, zum anderen wird die separierte Abrasivfraktion zur Wiederverwendung nutzbar gemacht. Dies führt zu einer Reduktion des Sekundärabfalls beim Einsatz des WAS-Verfahrens in kerntechnischen Anlagen.

Um diese Separationsexperimente durchführen zu können, wurde ein Abrasiv-Stahl-Gemisch hergestellt. Dazu wurde eine Auswahl an Edelstählen mit dem WASS-Verfahren geschnitten und das dabei entstandene Partikelgemisch aufgefangen. Anhand verschiedener Analysemethoden wurde das Partikelgemisch

charakterisiert. Abbildung 2.2 zeigt ein Rückstreuелеktronenbild des Partikelgemischs, dabei sind die großen grauen Partikel die Abrasivpartikel und die kleinen hellen weißen Partikel die Edelstahlpartikel. Ein Edelstahlpartikel ist grün umrandet. Die Edelstahlpartikel weisen eine längliche Form auf.

In Abbildung 2.3 ist das Prinzip dieser Separationsanlage graphisch abgebildet. Zuerst wird das Stahl-Abrasiv-Partikelgemisch gesiebt. Die Fraktion mit den feinen Partikeln besteht hauptsächlich aus Stahlpartikeln und Abrasivbruchstücken. Diese Bruchstücke entstehen beim Aufprall der Abrasivpartikel auf die zu zerschneidende Komponente bei der Anwendung des WAS-Verfahrens. Diese Fraktion wird als radioaktiver Abfall behandelt. Die grobe Fraktion besteht hauptsächlich aus intakten Abrasivpartikeln und großen Stahlpartikeln. Um die Stahlpartikel aus dem Partikelgemisch zu separieren, wird das Partikelgemisch weiter mit der Separationsanlage durch ein Magnetfiltersystem behandelt. Aufgrund der unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften der Stahl- und Abrasivpartikel können die Stahlpartikel aus dem Partikelgemisch gefiltert werden. Die mit dem Magnetfiltersystem separierten magnetischen Partikel werden ebenfalls als radioaktiver Abfall entsorgt. Die Fraktion, die das Magnetfiltersystem passiert, besteht nun hauptsächlich aus intakten Abrasivpartikeln und wird der WAS-Anlage zu einem erneuten Schnitt hinzugefügt. Die chemischen Analysen ergaben, dass die Stahlkonzentration in der Fraktion, die zur Wiederverwendung in der WAS-Anlage benutzt werden soll, zwischen 0.02 – 0.05 *Massen – %* liegt. Abhängig von den Parametern, wie z.B. der Maschenweite des Siebs, kann somit der Sekundärabfall um 50% bis 75% reduziert werden. Die Reduktion hängt von der Reinheit des wiederverwendbaren Abrasivs (Stahlkonzentration), sowie von der Aktivität der zu zerlegenden Komponente ab. Der Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv kann durch die Verwendung von Sieben mit größerer Maschenweite erhöht werden. Dies hat aber zur Folge, dass der Massenanteil von Stahlpartikeln und damit die Aktivität des wiederverwendbaren Abrasivs steigt. Die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv kann aber ebenfalls mit dem Magnetfiltersystem gesenkt werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Separationsanlage ist in Anhang A zu finden.

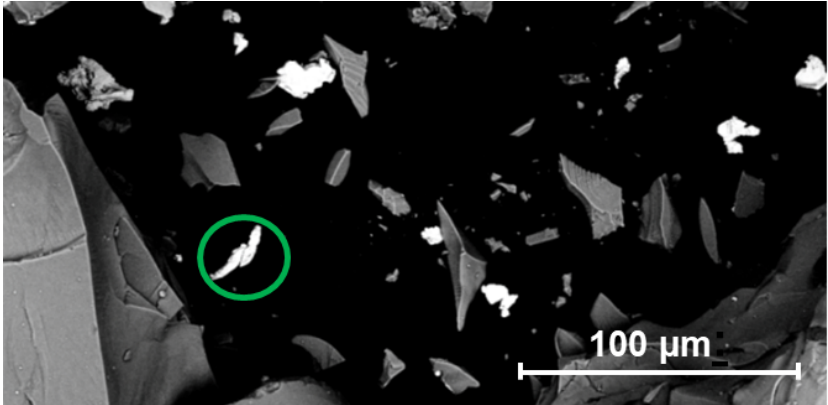


Abbildung 2.2: Rückstreuelektronenbild des verwendeten Partikelgemischs

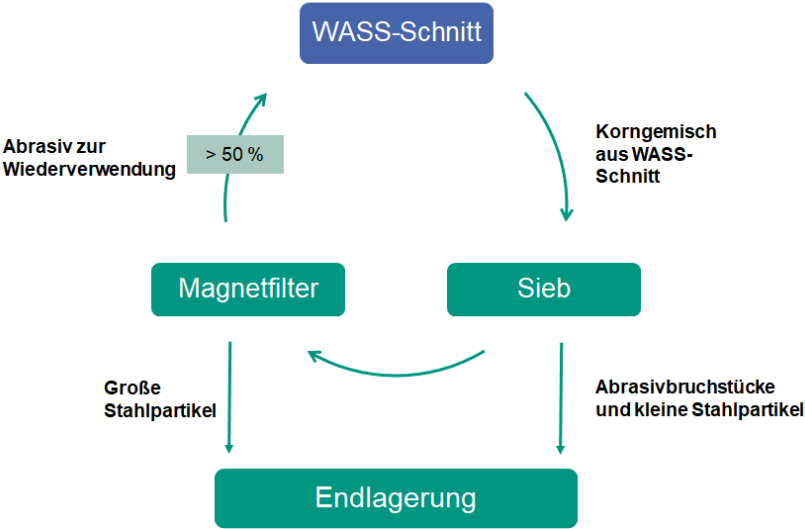


Abbildung 2.3: Grundprinzip der entwickelten Anlage

2.2.1 Magnetfiltersystem

Ein wichtiger Teil dieser Separationsanlage ist das Magnetfiltersystem, das direkten Einfluss auf die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv und somit auch auf die Aktivität hat. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts wurde mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen ein Magnetfiltersystem entwickelt.

Das Funktionsprinzip dieses Magnetfiltersystems wird in Abbildung 2.4 gezeigt. Dabei wird das Partikelgemisch aus Abrasiv- und Stahlpartikeln in Suspension mit Wasser in das Magnetfiltersystem befördert. Durch das Magnetfeld innerhalb des Magnetfiltersystems lagern sich die Stahlpartikel aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften ringförmig um die Magnetstabgehäuse an. Die Abrasivpartikel werden nicht von dem Magnetfeld im Magnetfiltersystem angezogen, sondern passieren dieses. Durch diesen Prozess werden die beiden Fraktionen voneinander getrennt.

In Abbildung 2.5 links ist eine Fotografie des Magnetfiltersystems zu sehen. Es besteht aus verschiedenen Komponenten und ist, außer am Einlass, der Entlüftung und dem Auslass, ein geschlossenes System. Der obere Teil ist ein Zylinder aus Plexiglas, der es ermöglicht den Separationsprozess zu beobachten. An diesem Plexiglaszylinder ist oben rechts ein Entlüftungsrohr angebracht. Dies ermöglicht die vollständige Befüllung des Magnetfiltersystems mit Wasser. Gegenüber der Entlüftung ist der Einlass. Unter dem Plexiglas-Bereich befinden sich zwei um 90° zueinander gedrehte Magnetrost. Eine detaillierte Darstellung ist rechts in Abbildung 2.5 zu sehen. Diese Magnetrost bestehen aus zwei Komponenten. Die eine sind die fest installierten Hüllrohre und die andere sind die daraus herausnehmbaren Magnetstäbe. Durch das Rein- und Rausnehmen der Magnetstäbe ist die Möglichkeit gegeben das Magnetfeld innerhalb des Magnetfiltersystems an- und auszuschalten. Unter diesen Magnetrosten befindet sich der konische Bereich, der zum Auslass führt. Diese Form wurde gewählt, weil diese kaum Störstellen aufweist und somit bei den Experimenten eine Ansammlung von Abrasivpartikeln, die eine große Haftreibung aufweisen, möglichst verhindert wird.

Bei der Durchführung eines Filtervorgangs wird in der Separationsanlage in einem Rührbehälter mit einem Rührer eine homogene Suspension generiert und diese mit Hilfe von Membranpumpen zum Magnetfiltersystem befördert. Hier passiert nun das Partikelgemisch in Suspension mit Wasser das Magnetfiltersystem. Dabei sammeln sich die Stahlpartikel ringförmig um die Magnet-

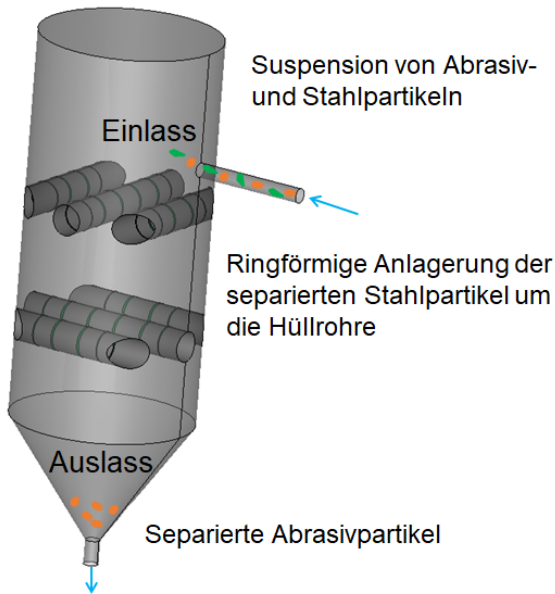


Abbildung 2.4: Funktionsprinzip des Magnetfiltersystems

stabhüllrohre an. Die ringförmige Ansammlung entsteht durch den Aufbau der Magnetstäbe, siehe Kapitel 3.1. Die Abrasivpartikel wiederum passieren das System. Danach wird die Separationsanlage abgeschaltet und die Partikel im Rührbehälter setzen sich ab. Nach dem Absetzen werden die Magnetstäbe aus den Hüllrohren gezogen, sodass die Stahlpartikel sich von den Hüllrohren lösen. Mit klarem Wasser aus dem Wasserüberstand im Rührbehälter wird das Magnetfiltersystem dann von den Stahlpartikeln gereinigt.

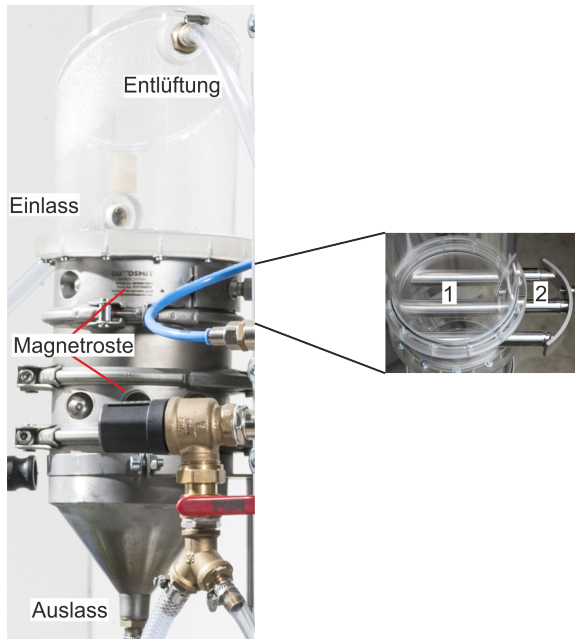


Abbildung 2.5: Magnetfiltersystem; Links: Fotografie des Magnetfilters, Rechts: Fotografie eines Magnetrosts mit Hüllrohren (1) und Magnetstäben (2)

2.3 Magnetfeld

2.3.1 Maxwell'sche Gleichungen

Die Maxwell'schen Gleichungen sind die Grundgleichungen, die die elektromagnetischen Phänomene beschreiben. Diese werden in der partiellen Schreibweise wie folgt beschrieben

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_L, \quad (2.4)$$

wobei \vec{H} die magnetische Feldstärke, \vec{J} die elektrische Stromdichte, \vec{D} die elektrische Flussdichte, \vec{B} die magnetische Flussdichte, \vec{E} die elektrische Feldstärke und ρ_L die elektrische Ladungsdichte beschreibt.

Gleichung 2.1 sagt aus, dass elektrische Ströme ein magnetisches Wirbelfeld erzeugen. Die darauffolgende Gleichung 2.2 wird als Gauß'sches Gesetz für Magnetfelder bezeichnet. Dies besagt, dass das Feld der magnetischen Flussdichte quellenfrei ist, was bedeutet, dass es keine magnetischen Monopole gibt. Gleichung 2.4 erklärt, dass die Ladung mit ihrer Ladungsdichte die Quelle des elektrischen Felds ist. Dies wird als Gauß'sches Gesetz bezeichnet. Die letzte Gleichung 2.3 ist das Induktionsgesetz. Dieses besagt, dass jede zeitliche Änderung eines Magnetfelds zu einem elektrischen Gegenfeld führt. Das bedeutet, dass die Wirbel des elektrischen Felds abhängig von den Änderungen der magnetischen Flussdichte sind. [Max65, GM03, Nol06, Dem06, Jac13]

2.3.2 Magnetische Materialeigenschaften

Sobald die Materie in ein Magnetfeld gebracht wird, wird diese beeinflusst, bzw. magnetisiert. Es gilt dann folgende Beziehung

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}, \quad (2.5)$$

dabei ist μ_0 die magnetische Feldkonstante und \vec{M} die Magnetisierung, die die Dichte der magnetischen Dipolmomente ist. Für die Magnetisierung gilt

$$\vec{M} = \chi \vec{H}. \quad (2.6)$$

χ heißt magnetische Suszeptibilität und ist über

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.7)$$

mit der relativen Permeabilität μ_r verknüpft. Wird Gleichung 2.6 und 2.7 in 2.5 eingesetzt, ergibt sich folgende Beziehung

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}. \quad (2.8)$$

Unterschiedliche Stoffe haben unter unterschiedlichen Bedingungen, wie z.B. der Temperatur, unterschiedliche Verhaltensweisen in einem Magnetfeld. Diese werden in diamagnetisch, paramagnetisch und ferromagnetisch eingeordnet. In dieser Arbeit wurden Partikel mit paramagnetischen Eigenschaften betrachtet, so dass diese im Folgenden ausführlicher beschrieben werden.

Paramagnetismus

Stoffe mit paramagnetischen Eigenschaften werden ins Magnetfeld hineingezogen. Die magnetische Suszeptibilität ist positiv unabhängig vom äußeren Magnetfeld, jedoch abhängig von der Temperatur T . So gilt

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (2.9)$$

dabei ist C die Curie-Konstante.

Paramagnetische Stoffe zeigen ohne ein äußeres Magnetfeld keine magnetische Ordnung auf.

Die in dieser Arbeit betrachteten Edelstahlpartikel mit paramagnetischen Eigenschaften werden in ein so starkes Magnetfeld gebracht, dass diese von diesem angezogen werden und nicht durch die Strömung des Fluids (Wasser) abgespült werden.

Ferromagnetismus

Stoffe mit ferromagnetischen Eigenschaften (meist Festkörper) erzeugen entweder selbst ein dauerhaftes Magnetfeld oder werden von einem Pol eines äußeren Magnetfelds stark angezogen. Dieses Verhalten wird quantenmechanisch damit erklärt, dass sich die magnetischen Spinmomente (Eigendrehimpuls der Elektronen) über einen größeren Bereich im Kristallgitter (sogenannte Weiß'sche Bezirke) parallel ausrichten. Bei Stoffen mit ferromagnetischen Eigenschaften gilt $\mu_r \gg 1$.

Diamagnetismus

Beim Diamagnetismus erfährt die Materie, die in ein Magnetfeld gebracht wird, eine Kraft, die entgegen der Magnetfeldstärke wirkt. Das heißt, die relative Permeabilität μ_r ist kleiner als eins. [GM03, Nol06]

2.3.3 Permanentmagneten

Ein Magnetfeld kann mit einem elektrischen Stromfluss erzeugt werden (siehe 2.3.1). Diese Art von Magneten werden als Elektromagneten bezeichnet. In dieser Arbeit wurden Permanentmagneten verwendet. Die Permanentmagneten weisen auch ohne angelegten elektrischen Strom ein Magnetfeld auf und besitzen dabei einen Nord- und einen Südpol. Permanentmagneten werden aus ferromagnetischen Stoffen, die eine großflächige Hysteresekurve aufweisen, unter Einfluss eines starken äußeren Magnetfelds erzeugt. Materialien, die diese Eigenschaft besitzen, sind z.B. Legierungen aus Eisen, Cobalt, Nickel oder bestimmten Ferriten.

Die in dieser Arbeit verwendeten Permanentmagneten heißen Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Dieses Magnetmaterial ist derzeit das stärkste, ist aber nicht sehr temperaturbeständig. [Gou]

Bei Permanentmagneten wird die erste Maxwell'sche Gleichung 2.1 zu

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0, \quad (2.10)$$

da bei dieser kein elektrisches Feld vorhanden ist. Wenn die Rotation der magnetischen Feldstärke gleich Null ist, gibt es die Möglichkeit die magnetische Feldstärke durch ein magnetisches Skalarpotential ψ zu beschreiben. Es gilt

$$\vec{H} = \vec{\nabla}\psi. \quad (2.11)$$

Mit der zweiten Maxwell'schen Gleichung 2.2 und der Beziehung zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte aus Gleichung 2.5 ergibt sich für das magnetische Skalarpotential folgender Zusammenhang

$$\mu_0(\Delta\psi + \vec{\nabla}\vec{M}) = 0. \quad (2.12)$$

Das magnetische Kraftgesetz besagt, dass für die magnetische Kraft F_m bei einem homogenen Magnetfeld zwischen zwei Teilchen mit bekannten Flächen A_1 und A_2 und bekannter Flussdichte B_1 und B_2 folgender Zusammenhang gilt

$$F_m = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{B_1 A_1 B_2 A_2}{r^2}, \quad (2.13)$$

r gibt dabei den Abstand zwischen den zwei Teilchen an. [Stö10, Hof18]

2.4 Strömung

2.4.1 Grundlagen der Strömungslehre

Die Strömungslehre ist die Lehre von den Bewegungen der Materie, die sich in einem flüssigen und gasförmigen Zustand befinden. In der makroskopischen Längenskala wird das Fluid als Kontinuum angesehen, d.h. es werden die molekularen Interaktionen innerhalb des Fluids vernachlässigt.

Der Volumenstrom \dot{V} gibt an, wie viel Volumen V eines Fluids pro Zeitspanne durch einen festen Querschnitt A transportiert wird. Es gilt

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt}. \quad (2.14)$$

Der Volumenstrom kann auch über die Strömungsgeschwindigkeit \vec{u} mit

$$\dot{V} = |\vec{u}|A \quad (2.15)$$

berechnet werden.

Eine Strömung kann nun unterschiedliche Eigenschaften und Charakterisierungen besitzen. Die Wichtigsten werden im Folgenden beschrieben. [OPB08, SA07, Kuh07, SKV89]

Stationär

Eine Strömung wird als stationär bezeichnet, wenn die Strömungsgeschwindigkeit \vec{u} und die Querschnittsfläche A sich zeitlich nicht verändern. Für eine stationäre Strömung gilt also

$$\frac{d|\vec{u}|}{dt} = 0 \text{ und } \frac{dA}{dt} = 0. \quad (2.16)$$

Wenn eine dieser Bedingungen nicht gegeben ist, wird die Strömung als instationär bezeichnet. [SA07]

Viskosität

Die Viskosität eines Fluids beschreibt seine Zähflüssigkeit. Um diese Fluideigenschaft zu erklären, wird Folgendes angenommen: Der Strömungszustand eines Fluids wird durch sein Geschwindigkeitsfeld $\vec{u}(\vec{x}, t)$, das abhängig von der Ortskoordinate \vec{x} und der Zeit t ist, beschrieben. Das Fluid wird bei makroskopischer Betrachtung durch die Van-der-Waals-Kräfte an einer festen Wand gehalten. Es wird die Randbedingung angenommen, dass selbst, wenn sich die Wand bewegt, das Geschwindigkeitsfeld relativ zur Wand an der Wand gleich Null ist. Mit einer Taylorentwicklung des Geschwindigkeitsfelds ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand zur Wand steigt. Die Bewegung der Moleküle relativ zur benachbarten Fluidschicht wird im Mittel durch die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ beschrieben. Werden zwei Dimensionen (x, y) angenommen und, dass die Wand auf der x -Achse liegt, gilt

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}. \quad (2.17)$$

Für die Schubspannung τ gilt in vielen Fällen

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (2.18)$$

wobei μ die dynamische Viskosität ist. Fluide, die diese Eigenschaften besitzen, werden als newtonsche Fluide bezeichnet.

Im Gegensatz zum newtonschen Fluid bleibt die Viskosität eines nichtnewtonschen Fluids nicht konstant, wenn sich die auf dies Fluid einwirkenden

Scherkräfte verändern.

Die dynamische Viskosität steht mit der Dichte ρ im Zusammenhang mit der kinematischen Viskosität ν über

$$\mu = \rho\nu. \quad (2.19)$$

Die Viskosität ist sehr temperaturabhängig, da mit steigender Temperatur auch die Bewegungsenergie der einzelnen Moleküle zunimmt. Je höher die Temperatur, desto kleiner die Viskosität. [OPB08, SA07, Kuh07, SKV89]

Kompressibilität

Kompressibilität beschreibt die Eigenschaft von Materie, unter Einwirkung von Druckkräften ihr Volumen zu verringern. Dabei weisen hauptsächlich Gase eine große Kompressibilität auf, da die Moleküle sich in diesem Aggregatzustand weit voneinander entfernt befinden und so durch einen äußeren Druck ihren Abstand voneinander verkleinern. Die meisten Flüssigkeiten weisen eine äußerst geringe Kompressibilität auf, wodurch diese Eigenschaft vernachlässigt werden kann. So kann diese näherungsweise als inkompressibel angesehen werden. Das bedeutet auch, dass sich die Dichte der Materie nicht ändert. [OPB08, SA07, Kuh07, SKV89]

Reynolds-Zahl, bzw. laminare und turbulente Strömung

Eine weitere Eigenschaft von Fluiden ist, ob diese laminar, bzw. turbulent sind. Es wird angenommen, dass ein Fluid in einzelne Bewegungsschichten eingeteilt wird. Wenn sich nun die einzelnen Schichten nicht miteinander mischen, ist die Strömung laminar. Je größer die Mischung der Schichten untereinander, desto turbulenter wird die Strömung. Um beurteilen zu können, wie sich eine Strömung hinsichtlich dieser Eigenschaften verhält, wurde die dimensionslose Kennzahl, die Reynolds-Zahl Re , als Beurteilungskriterium eingeführt.

Die Reynoldszahl wird über

$$Re = \frac{|\vec{u}|L}{\nu} \quad (2.20)$$

berechnet, dabei ist \vec{u} die Geschwindigkeit des Fluids und L die charakteristische Länge des durchströmten Körpers. [OPB08, SA07, Kuh07, SKV89]

2.4.2 Grundgleichungen der Strömungslehre

Die Strömungslehre kann durch unterschiedliche Gleichungen, die häufig nach ihren Entdecker*innen benannt wurden, beschrieben werden. Dabei muss vorausgesetzt werden, dass das betrachtete Fluid als Kontinuum angenommen werden kann, die Bilanzgrößen sich, außer an den Phasenübergängen, nur kontinuierlich ändern und, dass es ein Newton'sches Fließverhalten aufweist. Diese Gleichungen wurden unter Annahme der Erhaltung der Energie, des Impulses und der Masse entwickelt. [OPB08, SA07, Kuh07, SKV89]

Navier-Stokes-Gleichung

Die Navier-Stokes-Gleichung ist eine Ergänzung der Euler-Gleichung um die Reibungsterme und lautet

$$\underbrace{\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} \right)}_{\text{Trägheit}} = \underbrace{-\vec{\nabla} p}_{\text{Druck}} + \underbrace{\mu \Delta \vec{u}}_{\text{Reibung, inkompr.}} + \underbrace{(\lambda + \mu) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})}_{\text{zus. Reibung, kompr.}} + \underbrace{\rho \vec{f}}_{\text{ext. Kraft}}, \quad (2.21)$$

dabei ist p der Druck, λ die Materialkonstante, diese wird als Lamé-Konstante bezeichnet, und \vec{f} beschreibt die Volumenkraftdichte. Die Volumenkraft kann die Erdanziehung \vec{g} mathematisch beschreiben.

Für eine inkompressible Strömung gilt durch die Massenerhaltung

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0. \quad (2.22)$$

Ist die Dichte des Fluids zudem konstant, ergibt sich für die Navier-Stokes-Gleichung

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \nu \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + \vec{f}. \quad (2.23)$$

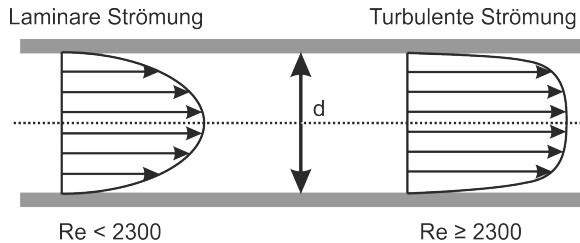


Abbildung 2.6: Geschwindigkeitsprofil bei einer Rohrströmung, Links: laminar, Rechts: turbulent

2.4.3 Rohrströmung

Eine laminare Rohrströmung kann mit der Hagen-Poiseuille-Gleichung beschrieben werden. Diese lässt sich aus der Navier-Stokes-Gleichung in Zylinderkoordinaten herleiten. Es wird angenommen, dass es sich hier um eine stationäre, ausgebildete, ebene Strömung handelt. In Abbildung 2.6 links zu sehen, stellt sich hier ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil ein.

In Abbildung 2.6 rechts ist ein turbulentes Rohrströmungsbild zu sehen. Das zweidimensionale Geschwindigkeitsprofil wird kastenförmiger, je turbulenter die Strömung wird.

Turbulente Grenzschicht

In der Strömungslehre beschreibt die Grenzschicht den Wandbereich in einem strömenden Fluid. Die turbulente Grenzschicht lässt sich in drei Bereiche einteilen. Dies ist graphisch in Abbildung 2.7 dargestellt, dabei wurde hier der dimensionslose Wandabstand y^+ (siehe Gleichung 2.28) über die dimensionslose Geschwindigkeit u^+ (siehe Gleichung 2.29) aufgetragen. Wandnah im Bereich der viskosen Unterschicht werden die Fluktuationen stark gedämpft, d.h. die turbulenten Scheinkräfte sind vernachlässigbar. Das Geschwindigkeitsprofil ist linear. Im Übergangsbereich werden die Fluktuationen aufgrund der Nähe zur Wand immer noch gedämpft, aber die turbulenten Scheinkräfte können nicht mehr vernachlässigt werden. Im logarithmischen Bereich werden die Fluktuationen kaum noch durch die Wand gedämpft, d.h. die turbulenten Scheinkräfte dominieren. Es stellt sich ein logarithmisches Geschwindigkeits-

profil ein.

Zur Entdimensionalisierung wird die Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ eingeführt. Für sie gilt

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad (2.24)$$

dabei ist τ die Wandschubspannung (siehe Gleichung 2.18). Diese ist durch

$$\tau = \frac{1}{2} \rho u_m^2 \frac{\lambda_t}{4} \quad (2.25)$$

gegeben, wobei u_m die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und λ_t der Druckverlustbeiwert ist und über

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{\frac{1}{4}}} \quad (2.26)$$

definiert ist.

Wegen der Linearität in der viskosen Unterschicht ergibt sich

$$u_\tau = \sqrt{\nu \frac{u_1}{y_1}}, \quad (2.27)$$

dabei sind in einer numerischen Simulation y_1 und u_1 die Breite und die berechnete Geschwindigkeit der ersten Zelle von der Wand weg.

Es gilt für die Berechnung der dimensionslosen Größen folgender Zusammenhang

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (2.28)$$

und

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (2.29)$$

zu den dimensionsbehafteten Größen Wandabstand y und Strömungsgeschwindigkeit u . [Oer15]

2.4.4 Prallströmung

In Abbildung 2.8 ist ein Prallstrahl graphisch dargestellt. Dabei strömt ein Fluid aus einer Öffnung (Düse) in eine ruhende Umgebung. Das ruhende Fluid wird in diesen Strahl hineingesaugt und beschleunigt sich, wodurch sich

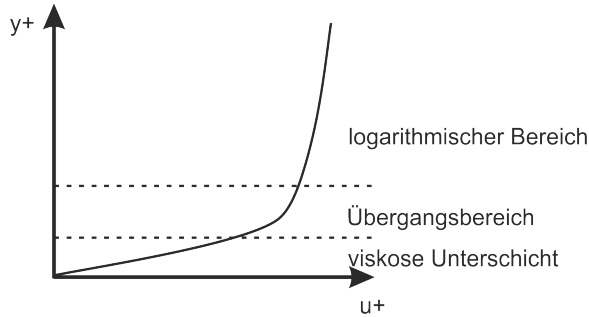


Abbildung 2.7: Bereichseinteilung einer turbulenten Grenzschichtströmung

der austretende Strahl verbreitert und sich die Geschwindigkeit im Strahlinneren vermindert. Dies ist der Einsaug-Effekt (Entrainement). Dieser Teil des Prallstrahls wird als Freistrahл bezeichnet. Bei Eintritt des Strahls bleibt bis zur Kernlänge x_k die Geschwindigkeit im Strahlmittelpunkt nahezu konstant ($u(x, 0) = u_D$ für $0 < x < x_k$). Diesen Bereich des Freistrahls wird als Kernstrahl bezeichnet. Die Kernlänge wird über einen Druckhöhenverlust von 95% zu ihrem Maximum bestimmt. Es gilt

$$\frac{u^2(x_k, 0)}{u_D^2} = 0,95. \quad (2.30)$$

Aus den experimentellen Daten wurde folgende Gleichung für die Geschwindigkeit $u(x, 0)$ entlang des Strahlmittelpunkts im Bereich des Freistrahls ($0 < x < H - x_g$) bestimmt

$$u(x, 0) = u_D \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{\sqrt{2}C} \right)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.31)$$

wobei D der Durchmesser der Einstrahlöffnung ist. Die Konstante C wird über

$$C = 0,102 \left(\frac{4D}{x_k} \right) \quad (2.32)$$

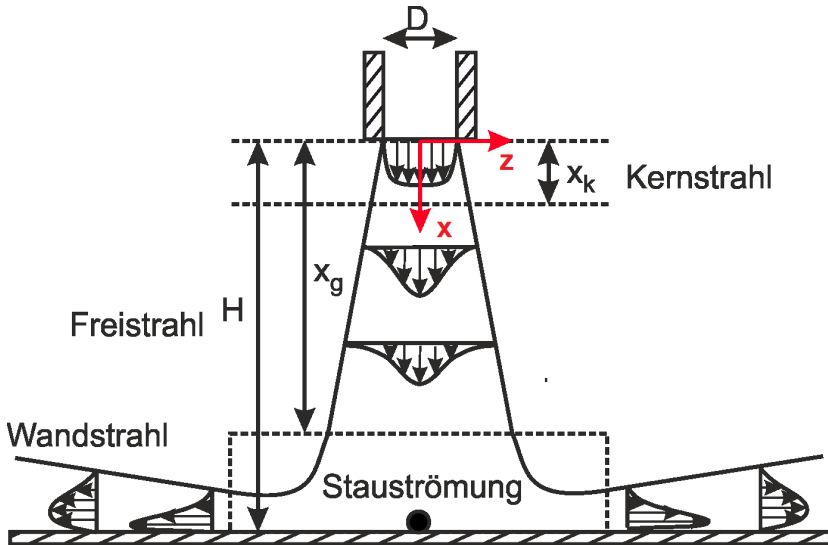


Abbildung 2.8: Graphische Darstellung eines Prallstrahls

berechnet.

Die Geschwindigkeitsprofile entlang der y -Achse (senkrecht zum Strahl) im Bereich des Freistrahls können durch Gauss-Kurven (Normalverteilungen) beschrieben werden.

Der Prallstrahl ist ein Strahl, der auf eine Wand trifft. Es gibt einen Bereich, in dem der Strahl nicht oder besser gesagt vernachlässigbar klein von der Wand beeinflusst wird, dieser Bereich ist der Freistrahlsbereich ($0 < x < H - x_g$). Danach folgt der Bereich, in dem die Wand den Strahl beeinflusst. Dieser Bereich ist der Staubereich. Dabei wird die Strömung des Strahls in axialer Richtung (x -Achse) abgebremst und in radialer Richtung (y - z -Ebene) beschleunigt. Der Bereich senkrecht gegenüber des Einlasses an der Wand wird als Staupunkt bezeichnet. Dort ist die Geschwindigkeit gleich Null. Wird der Abstand zu diesem Staupunkt vergrößert, steigt die Geschwindigkeit. In einem Abstand von 1-2 Düsendurchmessern erreicht diese dann ihr Maximum und fällt danach wieder ab. Dies ist der sogenannte Wandstrahl. [Mar77, SG06, Hof05]

2.4.5 Ausflussgeschwindigkeit

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Ausflussgeschwindigkeit bei einem Behälter mit einem Ausfluss berechnet wird. Es wird angenommen, dass die Durchflussfläche des Behälters viel größer ist als am Ausfluss.

In Abbildung 2.9 gilt mit der Energieerhaltung an Punkt 0 und Punkt 2

$$\frac{\rho}{2}u_0 + p_a + \rho gz_0 = \frac{\rho}{2}u_2 + p_2 + \rho gz_2, \quad (2.33)$$

dabei ist p_a der Druck der Umgebung, u_0 und u_2 sind die Geschwindigkeiten und z_0 und z_2 sind die Höhen an den Punkten 0 und 2.

Wird am Austritt ein Freistrahл angenommen, gilt

$$p_a = p_2. \quad (2.34)$$

Der Volumenstrom ist zudem konstant, dies bedeutet

$$u_0 A_0 = u_2 A_2, \quad (2.35)$$

dabei ist A_0 die Fläche des Behälters und A_2 die Fläche des Austritts.

Wird 2.34 und 2.35 in 2.33 eingesetzt, ergibt sich

$$\frac{u_2}{2} \left(1 - \frac{A_2}{A_0}\right) + g(z_0 - z_2) = 0. \quad (2.36)$$

Unter der Annahme, dass im Bereich von einer Wasserhöhe von Punkt 0 zu Punkt 1 der Behälterdurchmesser viel größer ist als der Ausflussschüssel, gilt

$$u_2 \approx \sqrt{2g(z_0 - z_2)}. \quad (2.37)$$

Mit 2.35 ergibt sich somit

$$u_0 = \frac{A_2}{A_0} \sqrt{2g(z_0 - z_2)}. \quad (2.38)$$

Da die Geschwindigkeit u_0 im Behälter die negative Geschwindigkeit der Füllhöhe ist, wird dies mit der ersten Ableitung der Zeit dargestellt. Es gilt

$$\frac{dh}{dt} = c\sqrt{h} \text{ mit } c = -\frac{A_2}{A_0} \sqrt{2g}. \quad (2.39)$$

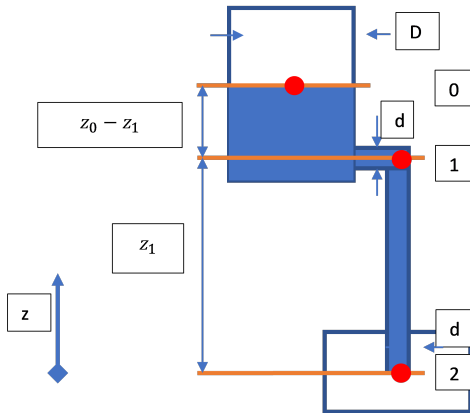


Abbildung 2.9: Graphische Darstellung eines Behälters und eines Auslassschlauchs mit der Länge z_1

Dies ist eine nichtlineare Differentialgleichung 1. Ordnung. Mit folgendem Ansatz wird diese zu

$$\int \frac{1}{\sqrt{h}} dh = c \int dt + C_1 \text{ mit } C_1 \in \mathbb{R}, \quad (2.40)$$

gelöst, dabei ist C_1 eine beliebige Konstante. Damit ist

$$h(t) = \frac{1}{4}(ct + C_1)^2. \quad (2.41)$$

Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist die Füllhöhe z_0 , damit ist

$$C_1 = 2\sqrt{z_0}. \quad (2.42)$$

Es gilt für die Abnahme der Füllhöhe im Behälter somit

$$h(t) = \frac{1}{2} \frac{A_2^2}{A_0^2} g t^2 - \sqrt{2gz_0} \frac{A_2}{A_0} t + z_0. \quad (2.43)$$

[Ts, Fab95]

2.5 Partikelbewegung

Die Stokes-Zahl St ist eine dimensionslose Zahl, die das Folgevermögen von Partikeln charakterisiert, die sich in Suspension eines Flüssigkeitsstroms befinden. Die Stokes-Zahl ist durch

$$St = \frac{t_0 u_0}{l_0} \quad (2.44)$$

gegeben, wobei t_0 die Relaxationszeit des Partikels ist, u_0 die Fluidgeschwindigkeit der Strömung und l_0 die charakteristische Abmessung des Hindernisses (typischerweise sein Durchmesser). Die Relaxationszeit ist durch

$$t_0 = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (2.45)$$

definiert, dabei ist ρ_p die Partikeldichte, d_p der Partikeldurchmesser und μ die dynamische Viskosität.

Ein Teilchen mit einer niedrigen Stokes-Zahl folgt Flüssigkeitsstromlinien, während ein Teilchen mit einer großen Stokes-Zahl von seiner Trägheit dominiert wird und seine ursprüngliche Bewegungsbahn fortsetzt. [Som19, Bre05]

2.6 Abscheidegrad

In der mechanischen Verfahrenstechnik ist das Abscheiden durch die komplette Abtrennung von Partikeln aus einem Fluid unabhängig von dem Durchmesser definiert. Die Abtrennung wird durch unterschiedliche Verfahren, wie z.B. das Sieben erreicht. Es gibt zudem die Definition des Trenngrads, der angibt, wie gut die Trennung in einem bestimmten Größenbereich ist.

Für den hier betrachteten Fall wird ein neuer Parameter, der Abscheidegrad AG_{MFS} , definiert. Für diesen gilt

$$AG_{MFS} = \frac{m_{MFS}}{m_A} \cdot 100. \quad (2.46)$$

Er gibt das Verhältnis in Prozent zwischen der durch ein Verfahren abgeschiedenen Menge m_{MFS} und der Anfangsmenge an Partikeln m_A an. In dieser Arbeit werden die Partikel mit Hilfe eines Magnetfiltersystems abgeschieden.

2.7 Numerische Strömungssimulation

Zur Beschreibung von Strömungen und Magnetfeldern in der Natur werden häufig partielle Differentialgleichungen verwendet. Diese können in einigen einfachen Fällen analytisch gelöst werden (exakte Lösung). In allen anderen Fällen müssen numerische Lösungsverfahren angewandt werden, dabei werden nur Näherungslösungen bestimmt.

2.7.1 Diskretisierung

Bei der numerischen Lösung werden Raum und Zeit mit Hilfe von Rechengittern in endliche Teile zerlegt und Ableitungen durch Differenzen approximiert, dies wird Diskretisierung genannt. Es gibt unterschiedliche Methoden zur Diskretisierung. Die Bekanntesten sind die Finite-Differenzen-Methode (FDM), die Finite-Volumen-Methode (FVM) und die Finite-Elemente-Methode. Die Finite-Elemente Methode kommt meistens nur in der Struktur- und Kontinuumsmechanik zum Einsatz [Bet97].

Finite-Differenzen-Methode

In diesem Fall wird das Lösungsgebiet mit einem Gitter überdeckt. Es wird an jedem Gitterpunkt die Differentialgleichung approximiert und berechnet. Ein Beispiel für eine zweidimensionale räumliche Diskretisierung mit der FDM ist in Abbildung 2.10 links dargestellt. Die äußeren schwarzen Punkte werden als Randpunkte und alle anderen als innere Stützstellen bezeichnet. Im eindimensionalen Fall wird also die Funktion $f(x)$ bestimmt, im zweidimensionalen Fall die Funktion $f(x,y)$. Dabei wird die partielle Ableitung durch den Differenzen bestimmt. Dieser Differenz wird über die Nachbarpunkte festgelegt. Hierbei gibt es unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Differenz, bei dem Zen-

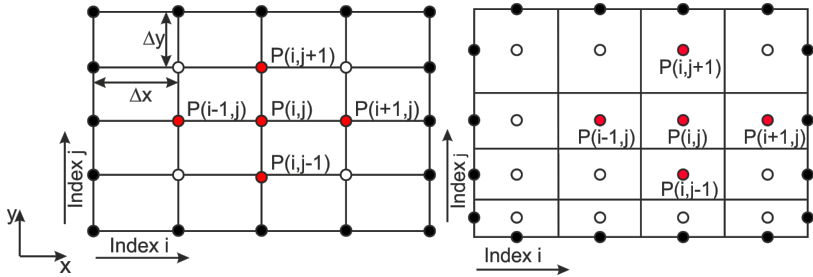


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung eines zweidimensionalen Rechengitters, Links: FDM, Rechts: FVM

traldifferenz wird dieser im eindimensionalen Fall über beide Nachbarpunkte generiert. [FP08, DR08, OL03, ZB91]

Finite-Volumen-Methode

Die FVM basiert auf der Bilanzierung der Flüsse innerhalb eines Kontrollvolumens, so beinhaltet diese Methode direkt die Erhaltung der Zustandsgrößen. Das ist auch der Vorteil dieser Methode.

Bei dieser Methode wird das Strömungsfeld in ein diskretes Rechengitter unterteilt, wobei in jeder Zelle die Grundgleichungen, wie auch im Gesamtvolumen gelten. Typischerweise werden bei dieser Methode die Rechenpunkte in den Mittelpunkt der Zellen gesetzt. Die einzelnen Zellen dürfen nicht überlappen, damit die Konservativität erhalten bleibt. In Abbildung 2.10 rechts ist eine schematische Darstellung eines Rechengitters für einen zweidimensionalen Fall dargestellt.

Dabei werden die partiellen Gleichungen in ihrer Erhaltungsform beschrieben und über das Kontrollvolumen (der Zelle) integriert. Die dadurch entstehenden Integrale über das Kontrollvolumen werden durch die Anwendung des Satzes von Gauß in Oberflächenintegralen umgeformt. Diese lassen sich dann in Summen überführen und sind numerisch lösbar. [FP08, DR08, OL03, ZB91]

2.7.2 Turbulenzmodellierung

Turbulenzen einzelner Strömungsschichten finden in den meisten Fällen auf sehr kleinen Skalen (Ort und Zeit) statt, so dass ein sehr feines Rechennetz und sehr kleine Rechenschritte benötigt werden, um diese aufzulösen. Die direkte numerische Simulation (DNS) löst diese Turbulenzen exakt auf. Das Verfahren ist aber nur bei sehr einfachen Strömungen möglich, da mit steigender Komplexität der Rechenaufwand unverhältnismäßig groß wird.

Aus diesem Grund wurden Modelle zur Vereinfachung der Turbulenzen entwickelt. Eine bekannte Methode ist die Grobstruktursimulation (englisch: Large Eddy Simulation). In diesem Fall werden die großen, energietragenden Wirbelstrukturen nicht modelliert, sondern explizit berechnet. Die weniger wichtigen, kleinskaligen Anteile werden modelliert, und zwar durch ein sogenanntes Feinstrukturmodell. [FP08, Frö06]

2.7.3 Reynolds Averaged Navier Stokes

Die meisten turbulenten, numerischen Simulationen verwenden eine statistische Modellierung (englisch: Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)-Modellierung). Bei dieser Methode werden die Strömungsgrößen, wie die Geschwindigkeit und der Druck, durch die Summe des Mittelwerts und der Varianz bestimmt. Dabei erfassen die Varianzterme die turbulenten Schwankungen der Strömung. Diese werden durch Turbulenzmodelle ersetzt. Die einzelnen Turbulenzen werden in diesem Modell nicht mehr aufgelöst, d.h. das Rechennetz kann gröber sein und minimiert somit den Rechenaufwand. [FP08, Lec11] Das Ersetzen der Strömungsgrößen durch die Summe ihres Mittelwerts und der Varianz in der Navier-Stokes-Gleichung hat zur Folge, dass diese um den sogenannten Reynold'schen Spannungstensor τ_{ij} (Einsteinsche Summenkonvention) erweitert wird. Dies führt dazu, dass die RANS-Gleichungen nicht mehr geschlossen sind. Um die Gleichungssysteme zu schließen, werden nun Annahmen getroffen und Modelle entwickelt. Die am häufigsten verwendete Annahme ist das Wirbelviskositätsprinzip von Boussinesq. Die durch den Boussinesq-Ansatz bedingten Parameter können mit Hilfe von Turbulenzmodellen bestimmt werden. [LS72, VHKVM07, Wil06]

In dieser Arbeit wurde ein Zweigleichungs-Turbulenzmodell verwendet. Bei

dieser Modellart besteht die Lösung aus zwei verschiedenen Transportgleichungen. Im Folgenden werden die drei bekanntesten Gruppen vorgestellt.

$k - \epsilon$ -Turbulenzmodell

Das $k - \epsilon$ -Turbulenzmodell besteht aus zwei Differentialgleichungen und es werden daraus die turbulente kinetische Energie k und die isotrope Dissipationsrate ϵ entwickelt. Zudem treten in den Differentialgleichungen noch andere unbekannte Koeffizienten auf. Diese wurden mit Hilfe von einfachen Strömungsfeldern bestimmt.

Dieses Modell ist aber durch seine Vereinfachungen nur beschränkt einsetzbar, so liefert es für Strömungen mit starker Stromlinienkrümmung, positivem Druckgradienten oder bei Staupunktströmungen schlechte bis nicht aussagekräftige Ergebnisse. Deshalb sind die Ergebnisse besonders im Wandbereich nicht ausreichend. [SLS⁺95]

$k - \omega$ -Turbulenzmodell

Auch das $k - \omega$ -Turbulenzmodell wird durch zwei Differentialgleichungen beschrieben. Das bekannteste ist das von Wilcox. Bei diesem Modell muss jedoch die turbulente kinetische Energie k und die spezifische Dissipation ω festgelegt werden. Die restlichen Koeffizienten wurden auch über bekannte Strömungsfelder bestimmt.

Dieses Modell kann gut die Strömungen im Wandbereich abbilden. [Wil06, Wil88]

$k - \omega - SST$ -Turbulenzmodell

Das $k - \omega$ -Shear-Stress-Turbulenzmodell (SST) ist das in dieser Arbeit verwendete Modell. Es wurde von Menter entwickelt und wird durch folgende Differentialgleichungen in der Einsteinschen Summenkonvention beschrieben

$$\frac{\partial}{\partial t}(k\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(k\rho u_i) = \rho\tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \beta^* \rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.47)$$

und

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\omega\rho u_i) = \rho \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \quad (2.48)$$

dabei sind γ , β , σ_k und σ_ω Koeffizienten, die durch bekannte Strömungsfelder bestimmt wurden. Die kinematische turbulente Viskosität wird über

$$\nu_T = \frac{\mu_T}{\rho} \quad (2.49)$$

berechnet, wobei die dynamisch turbulente Viskosität μ_T in diesem Modell durch

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (2.50)$$

beschrieben wird. Nun ist a_1 eine Konstante und S die Schergeschwindigkeit. Die beiden Verschneidungsfunktionen werden mit F_1 und F_2 bezeichnet. Diese ermöglichen, dass zwischen dem $k - \omega - SST$ -Turbulenzmodell und $k - \epsilon$ -Turbulenzmodell hin- und hergeschaltet werden kann. So wird im wandnahen Bereich das $k - \omega$ -Turbulenzmodell mit seinen Vorteilen verwendet und in der Kernströmung das $k - \epsilon$ -Turbulenzmodell. [Men93, Men94, MKL03]

2.7.4 Mehrphasenströmung

Eine Mehrphasenströmung besteht aus zwei oder mehreren Phasen, wobei eine Phase ein zum benachbarten Medium abgegrenzter Materiebereich ist, der fest, flüssig oder gasförmig sein kann. An der Phasengrenze ändern sich die Stoffwerte, wie Viskosität und Dichte, sprunghaft. Dabei gibt es in vielen Fällen eine kontinuierliche Phase (Fluid), die einen räumlich verbundenen Bereich einnimmt. Diese umgibt eine disperse Phase, die einen räumlich getrennten Bereich einnimmt.

Zur Berechnung von Mehrphasenströmungen gibt es unterschiedliche Modelle. Eines davon ist das Euler-Lagrange-Modell. Hierbei wird das Fluid, die kontinuierliche Phase, mit der Euler'schen Betrachtungsweise beschrieben, also ortsfest. In diesem Fall ist der Strömungszustand $\vec{u}(\vec{x}, t)$ eine Funktion von Ort und Zeit. Die Lagrange-Betrachtungsweise beschreibt die disperse Phase

(Partikel). Diese ist teilchenfest. Bei dieser Betrachtung sind der Partikelort und -zustand Funktionen der Zeit $X_P(t)$ und $V_P(t)$.

Zudem können die unterschiedlichen Phasen, kontinuierlich und dispers, miteinander wechselwirken. Bei einer Ein-Wege-Kopplung beeinflusst ausschließlich die kontinuierliche Phase die disperse, d.h. es gibt keine Partikel-Partikel Interaktion und die disperse Phase hat auch keinen Einfluss auf die kontinuierliche. Im Falle der Zwei-Wege-Kopplung beeinflussen sich die disperse und kontinuierliche Phase wechselseitig. Die Partikel-Partikel-Interaktion wird in diesem Falle jedoch nicht beachtet. Bei der Vier-Wege-Kopplung werden alle Wechselwirkungen miteinbezogen. [Wr06]

2.7.5 OpenFOAM

OpenFOAM ist ein Programm zur Berechnung von partiellen Differentialgleichungen. Diese Gleichungen können aus der Strömungslehre oder dem Magnetismus stammen. Mit diesem Programm lassen sich also physikalische Abläufe in der Natur simulieren. *OpenFOAM* ist quelloffen in der Programmiersprache C++ programmiert.

OpenFOAM hat eine feste Ordnerstruktur, diese sind eingeteilt in „0“, „constant“ und „system“. Zur Berechnung eines Problems muss zu Beginn ein Rechengitter (mesh) erstellt werden. Dieses kann direkt in *OpenFOAM* erstellt werden oder eine mit einem anderen Programm erstellte Geometrie einlesen und in eine *OpenFOAM* verwendbare Geometrie mit einem Rechengitter umwandeln. Eine Anwendung, die dies ermöglicht, ist *snappyHexMesh*. Des Weiteren werden in dem Ordner „0“ die Anfangsbedingungen der einzelnen Berechnungsfelder festgelegt. So kann z.B. festgelegt werden, dass sich bei einem Quader mit sechs Wänden eine Wand mit einer Geschwindigkeit in eine Richtung bewegt, während die anderen ruhen. Im Ordner „constant“ werden die festen physikalischen Gegebenheiten definiert. Hier kann dem Programm z.B. vorgegeben werden, dass die Erdanziehung \vec{g} wirkt. Im Ordner „system“ wird definiert, wie die Berechnung des Programms abläuft. Dabei wird z.B. die Dauer der Berechnung definiert und mit welchem Berechnungsmodell das Problem gelöst werden soll. Nach Erstellung des Rechengitters und der Festlegung der einzelnen Einstellungen, wird die Berechnung gestartet. Der vorher definierte Löser (solver) berechnet dann das Problem.

Ist eine physikalische Eigenschaft oder eine andere Differentialgleichung noch

nicht in *OpenFOAM* implementiert, ist dem Bediener die Möglichkeit gegeben einen eigenen solver zu programmieren.

Nach der Berechnung folgt die Nachbereitung (postProcessing). Diese kann die Visualisierung mit Hilfe von *paraview* beinhalten, sowie die Ausgabe einzelner Datenbereiche. [Ope15]

2.8 Messinstrumente

2.8.1 Magnetometer

Zum Messen der magnetischen Flussdichte \vec{B} wurde ein Magnetometer verwendet, welches auf dem Verfahren beruht, das den Hall-Effekt zur Messung nutzt.

In Abbildung 2.11 wird das Prinzip des Hall-Effekts schematisch dargestellt. Dabei wird gezeigt, wie eine metallische Platte mit einem elektrischen Strom I durchflossen wird. Wird diese Platte in ein Magnetfeld gebracht, das in z-Richtung ausgerichtet ist, und stellt es so ein, dass die Magnetfeldlinien senkrecht zum Strom I stehen, erzeugt dies wiederum senkrecht zum Strom I und dem Magnetfeld eine sogenannte Hallspannung U_H . Diese Spannung kann gemessen werden und damit die magnetische Flussdichte \vec{B} bestimmt werden. Die Ursache für die entstehende Spannung liegt darin, dass auf die Leitungselektronen durch das Magnetfeld die Lorentzkraft \vec{F}_L wirkt. So kommt es auf der einen Seite der metallischen Platte zu einer Anreicherung der Elektronen und auf der anderen zu einer Verarmung an Elektronen. Für die Hallspannung gilt

$$U_H = \frac{A_H I B_z}{d_H}, \quad (2.51)$$

dabei ist A_H die Hall-Konstante und d_H die Dicke der Hallsonde.

2.8.2 Extinktionszähler

Ein Extinktionszähler ist ein Einzelpartikelzähler, der die Anzahl und den Durchmesser eines Partikels bestimmt.

Der in dieser Arbeit verwendete Extinktionszähler ist mit einer Halbleiterlaser-

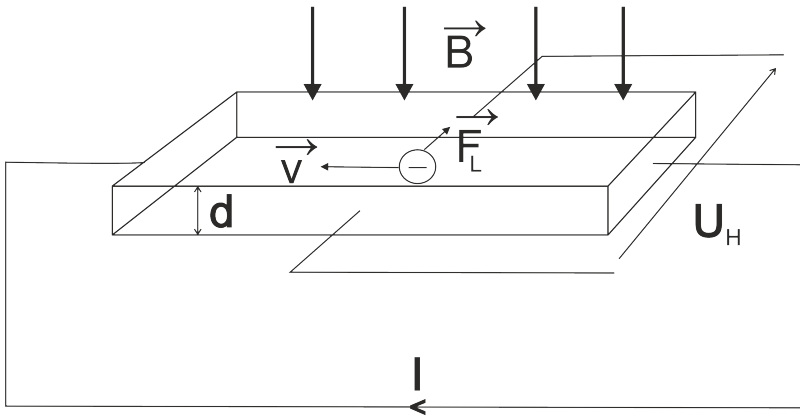


Abbildung 2.11: Prinzip des Hall-Effekts

diode ausgestattet, die ein monochromatisches Licht mit einer Wellenlänge von 230 nm aussendet. Die Größe des Messbereichs beträgt $2 \times 1000 \times 1000 \mu\text{m}^3$.

In Abbildung 2.12 ist das Funktionsprinzip eines Extinktionszählers dargestellt. Dabei wird mit Hilfe eines Laserstrahls und einer Fotodiode gemessen. Wie links in Abbildung 2.12 zu sehen, strahlt ein Laserstrahl auf eine Fotodiode und erzeugt dort eine Spannung U . Wenn nun ein Partikel diesen Lichtstrahl durchläuft, wirft dieser einen Schatten auf die Fotodiode, was zu einem Spannungsabfall in der Fotodiode führt. Der gemessene Spannungsabfall ist exemplarisch in Abbildung 2.12 rechts abgebildet. Je größer das Partikel ist, desto tiefer und breiter ist der Spannungsabfall.

Der Spannungsabfall kann graphisch mit einem Oszilloskop dargestellt werden. Zusätzlich gibt es ein Dateneinlese- und Verarbeitungsprogramm, was die Spannungsdaten verarbeitet. Dieses Programm weist auf, wie viele Partikel in einem bestimmten Größenbereich, in einer bestimmten Zeit das System passiert haben. Dabei wird die Form der Partikel als rund angenommen und der Durchmesser des Partikels ausgegeben.

Der bei den Experimenten verwendete Extinktionszähler kann Partikel mit einem Durchmesser von 5 bis $500 \mu\text{m}$ messen. Der Extinktionszähler wurde mit monodispersen Latexpartikeln kalibriert. [Bra17, Men15]

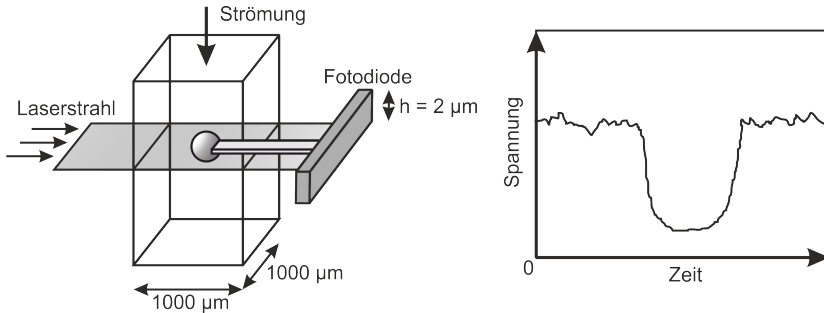


Abbildung 2.12: Graphische Darstellung des Funktionsprinzips des Extinktionszählers

2.9 Homogene Suspension

Eine Suspension bezeichnet ein heterogenes Stoffgemisch aus einer Flüssigkeit und darin fein verteilten Festkörpern (Partikeln). Dabei tendiert die disperse Phase (Partikel) zur Sedimentation und Phasentrennung. Eine Suspension ist homogen, wenn die disperse Phase gleichmäßig in der ganzen Flüssigkeit verteilt ist. Dieser Zustand ist aber schwer experimentell zu erreichen, sodass Kriterien entwickelt wurden, die eine homogene Suspension in einem gewissen Bereich der Flüssigkeit annehmen. Diese werden im Folgenden beschrieben. Bei diesen Kriterien wird eine Suspension mit einem Rührer und einem Behälter erzeugt.

2.9.1 1-Sekunden-Kriterium

Ein zeitliches Kriterium ist das 1-Sekunden-Kriterium, bei dem sich ein Teilchen maximal 1 Sekunde am Behälterboden aufhalten darf, bevor es wieder aufgewirbelt wird. Die Erfassung des Zustands erfolgt rein visuell, dabei ist der Behälterboden durchsichtig und wird von der Durchführenden des Experiments kontrolliert und hängt somit auch von ihrer subjektiven Wahrnehmung ab. Die Genauigkeit dieser Bestimmung einer homogenen Suspension liegt im Bereich von 2 – 5%. Das Kriterium gilt aber nur dann, wenn angenommen werden kann, dass die Partikel nicht agglomerieren. [Zwi58, Dec05, AK14]

2.9.2 90%-Schichthöhenkriterium

Ein weiteres visuelles Verfahren ist das 90%-Schichthöhenkriterium, wobei hier eine Trennung zwischen den unteren 90% des Behälters, in denen eine homogene Suspension herrscht, und den oberen 10%, in denen sich kaum Partikel aufhalten, erfolgt. Diese Trennlinie zwischen den beiden Bereichen kann besonders bei hohen Beladungen erkannt werden.

Aus experimentellen Daten konnte nachgewiesen werden, dass der Konzentrationsanteil von Feststoffen in den oberen 10% nahezu Null ist, d.h. wenn eine homogene Suspension in einem zylindrischen Rührbehälter erzeugt werden soll, wird davon ausgegangen, dass diese sich nur bis zu 90% der Füllhöhe ausbildet. [Sti08, Zlo99, Dec05]

2.10 Partikelgrößenverteilung

2.10.1 Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung mit zwei Parametern.

Die Verteilungsfunktion ist durch

$$F(x) = 1 - e^{-(\lambda x)^k} \text{ für } \{x \in \mathbb{R} : x \geq 0\} \quad (2.52)$$

gegeben. Daraus ergibt sich folgende Dichtefunktion

$$f(x) = \lambda k (\lambda x)^{k-1} e^{-(\lambda x)^k}. \quad (2.53)$$

Der inverse Skalenparameter λ und der Formparameter k sind positiv. Durch geeignete Wahl der Parameter ähnelt dies einer Normalverteilung, einer Exponentialverteilung oder anderen asymmetrischen Verteilungen.

In Abbildung 2.13 sind die Dichtefunktionen unten und Verteilungsfunktionen oben für unterschiedliche Formparameter dargestellt, wobei λ gleich eins ist. [Lin65, HEK05, Wil10]

Die Weibull-Verteilung wird benötigt, um die Partikelgrößenverteilung bei der numerischen Untersuchung zu generieren. Genauere Angaben zur Partikelgrößenverteilung sind in Kapitel 4.4.1 zu finden.

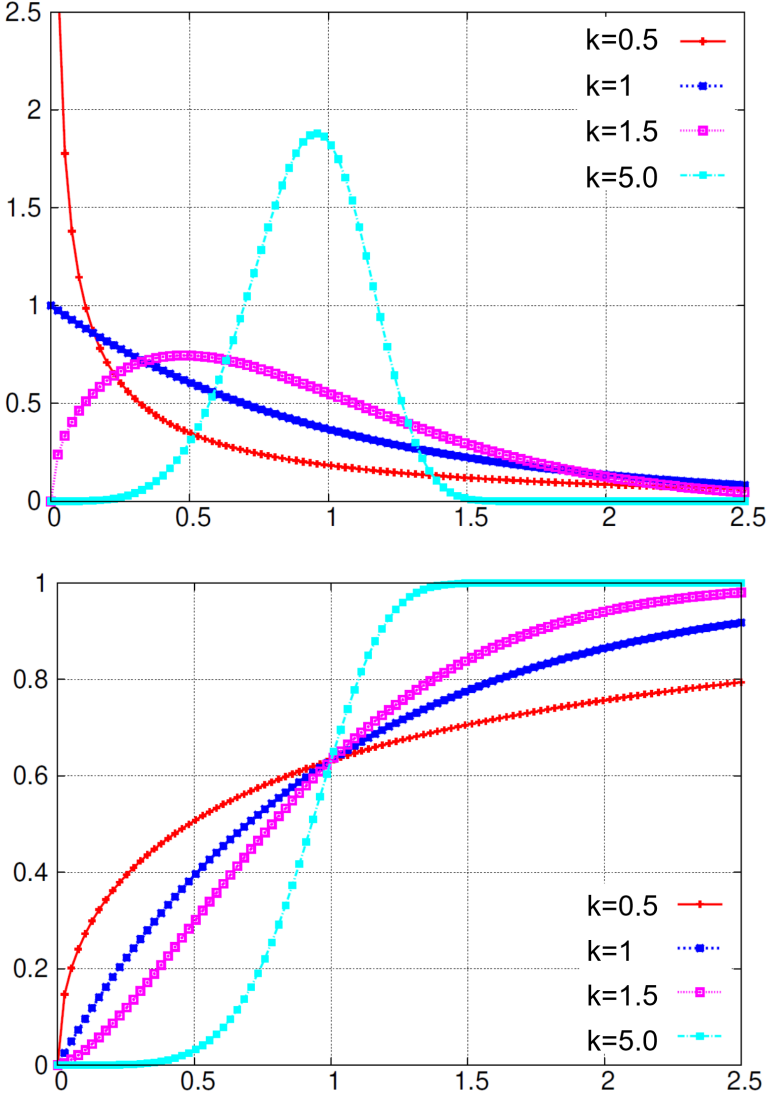


Abbildung 2.13: Weibull-Verteilung, oben: Dichtefunktion für unterschiedliche Formparameter k , unten: Verteilungsfunktion für unterschiedliche Formparameter k

3 Experimentelle Untersuchungen

Für die Experimente wurde das Magnetfiltersystem und die dazugehörigen Magnetoste verwendet. Dies wurde für die Separationsanlage entwickelt und gebaut und ist in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Es wurden zwei Experimente durchgeführt. Zum einen wurden Versuche zur Magnetfeldmessung bearbeitet. Zum anderen wurden Experimente zur Abscheidegradbestimmung durchgeführt.

3.1 Magnetfeldmessung

Um die magnetische Flussdichte zu messen, wurden die Magnetoste aus dem Magnetfiltersystem entnommen. In Abbildung 2.5 rechts ist ein Magnetrost abgebildet. Dieser besteht aus zwei Komponenten, den Magnetstäben und dem Magnetstabgehäuse mit den einzelnen Hüllrohren. Durch das Hineinschieben und Herausziehen der Magnetstäbe in die und aus den Hüllrohren kann ein Magnetfeld an- und ausgeschaltet werden. Bei der Magnetfeldmessung befanden sich die Magnetstäbe immer innerhalb der Hüllrohre.

Zur Messung der magnetischen Flussdichte wurde ein Magnetometer verwendet. Die Funktionsweise dieses Messgeräts wurde in Kapitel 2.8.1 beschrieben.

3.1.1 Versuchsaufbau

Für die Magnetfeldmessung wurde das Magnetometer und der Magnetrost in eine Fräsmaschine eingebaut. In Abbildung 3.1 ist rechts ein Bild des Versuchsaufbaus gezeigt. Dort ist die Fräse zu sehen. Die digitale Anzeige oben rechts gibt die Koordinaten des Maschinentischs an. Auf dem Maschinentisch ist die Messapparatur des Magnetometers mit einem Schraubstock eingespannt. Rechts daneben befindet sich die Anzeige des Magnetometers. Der Magnetrost

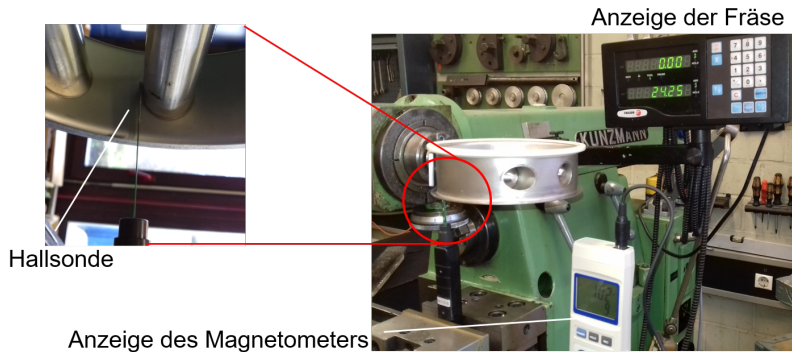


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau der Messung der magnetischen Flussdichte

wurde in die Werkzeugaufnahme der Fräse eingespannt. Die Werkzeugaufnahme kann um 90° gedreht werden.

Durch diesen Aufbau ist die Möglichkeit gegeben die magnetische Flussdichte an unterschiedlichen Stellen und in unterschiedlichen Richtungen zu messen. Die Messungen wurden so durchgeführt, dass der Werkzeugaufnahme der Fräse manuell in eine Richtung um eine bestimmte Länge verschoben wurde, dann wurden von den beiden Anzeigen jeweils die genaue Ortskoordinate und die magnetische Flussdichte aufgezeichnet.

3.1.2 Durchgeführte Messungen

Das Magnetometer misst mit Hilfe einer Hallsonde die magnetische Flussdichte. Mit einer Hallsonde kann immer nur eine Koordinaten-Richtung der magnetischen Flussdichte \vec{B} gemessen werden. Bei paralleler Hallsonden-Ausrichtung werden die senkrecht verlaufenden Magnetfeldlinien und bei senkrechter Hallsonden-Ausrichtung die parallel verlaufenden Magnetfeldlinien gemessen.

In Abbildung 3.2 links wird eine seitliche Aufnahme des Magnetosts gezeigt und dabei die Bezeichnungen oben und unten erläutert. In dem linken Bild in Abbildung 3.2 werden die durchgeführten Messungen durch die roten Pfeile mit dazugehöriger Nummer gezeigt. Die magnetische Flussdichte wurde bei

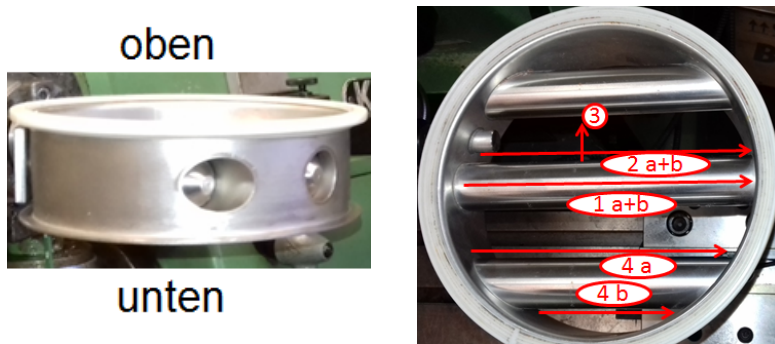


Abbildung 3.2: Verwendeter Magnetrost; Links: Seitliche Ansicht; Rechts: Draufsicht, mit den roten Linien werden die durchgeführten Messungen angezeigt

dem mittleren Hüllrohr des Magnetrosts seitlich axial mit paralleler (gekennzeichnet mit 2 a) und senkrechter (2 b) Hallsonden-Ausrichtung, axial oben (1 a) und unten (1 b) mit paralleler Hallsonden-Ausrichtung und radial (3) am Magnetfeldmaximum mit paralleler Hallsonden-Ausrichtung gemessen. Eine weitere Messung wurde an dem äußeren Hüllrohr innen (4 a) und außen (4 b) vorgenommen. Zudem wurde eine axiale und radiale Messung an einem Magnetstab, der sich nicht in dem Magnetrostgehäuse befindet, durchgeführt.

3.1.3 Ergebnisse

In Abbildung 3.3 wird der Magnetfeldlinienverlauf bei zwei gleichpolig gegenüberstehenden Permanentmagneten dargestellt. Die verwendeten Magnetstäbe bestehen auch aus kleineren Permanentmagneten, die gleichpolig aneinandergereiht sind.

In Abbildung 3.4 oben wird der Verlauf des senkrecht und parallel zum Magnetstab verlaufenden Anteils der magnetischen Flussdichte \vec{B} seitlich am mittleren Hüllrohr dargestellt. Dabei stellt die rote Linie die Messergebnisse bei paralleler Hallsonden-Ausrichtung und die blaue Linie die Ergebnisse bei senkrechter Hallsonden-Ausrichtung dar. Der Verlauf der beiden Graphen entspricht dem, was theoretisch erwartet wird.

So ist der senkrechte Teil der magnetischen Flussdichte B_s (rot) dort, wo zwei Permanentmagneten sich gegenüberstehen, am größten. Bei Betrachtung von

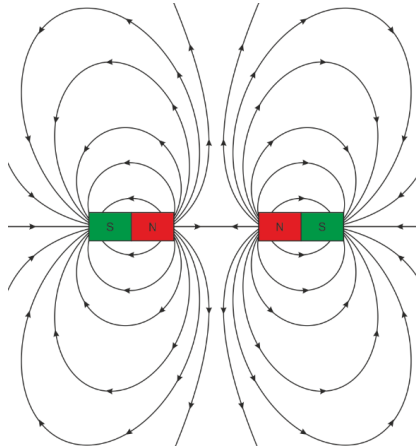


Abbildung 3.3: Feldlinienverlauf bei zwei gleichpolig gegenüberstehenden Permanentmagneten

Abbildung 3.3 ist die größte Dichte an Magnetfeldlinien mit senkrechter Ausrichtung zwischen den beiden Permanentmagneten. Eine parallel zu den Permanentmagneten ausgerichtete Hallsonde würde hier die stärkste magnetische Flussdichte messen. Im weiteren Verlauf entlang einer der Permanentmagneten ist zu sehen, dass der Anteil an parallel verlaufenden Magnetfeldlinien sukzessive zunimmt. Dies hat zur Folge, dass eine parallel zum Magneten stehende Hallsonde keine magnetische Flussdichte messen wird. Dieses Ergebnis ist auch in gemessenen Daten zu sehen. Wird der Verlauf der parallel zum Magneten verlaufenden Magnetfeldlinien betrachtet, ist die magnetische Flussdichte zwischen zwei Permanentmagneten nahezu Null. In der Mitte eines einzelnen Magneten hingegen erreicht sie ihr Maximum.

Bei den Messungen der magnetischen Flussdichte ist der senkrechte Anteil bei den beiden äußeren Peaks nur halb so hoch wie bei den inneren Peaks. Dies liegt daran, dass hier kein weiterer Permanentmagnet positioniert ist und somit sein Beitrag fehlt. Dass dies zu einer Halbierung führt und die anderen Peaks ungefähr gleich hoch sind, ist der Gleichheit der magnetischen Eigenschaften der einzelnen Permanentmagneten geschuldet.

In Abbildung 3.5 wird der radiale Verlauf des senkrechten Anteils der magnetischen Flussdichte B_s an einem Magnetfeldmaximum (siehe Abbildung 3.4, roter Graph) gezeigt. Es ist zu sehen, dass die magnetische Flussdichte

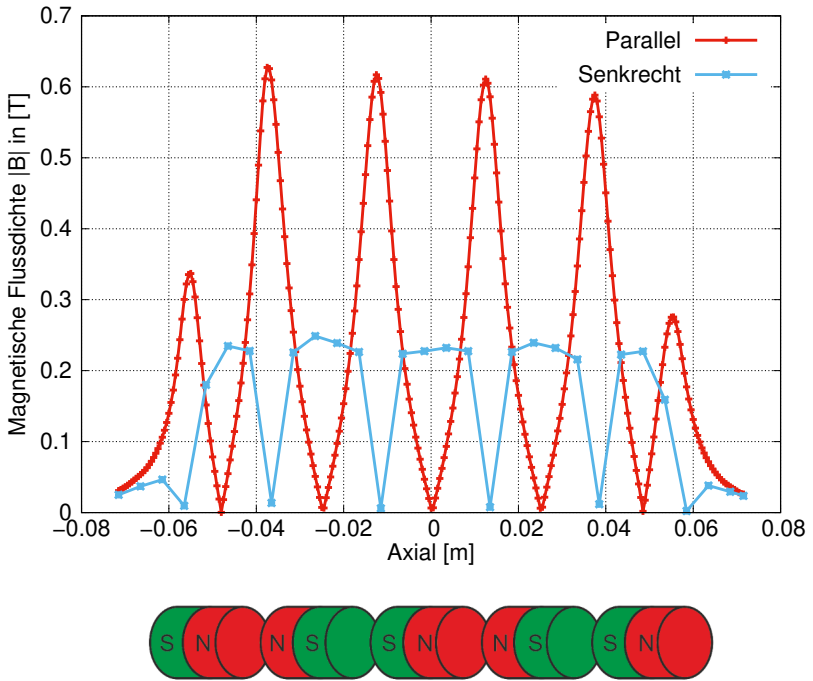


Abbildung 3.4: Oben: Ergebnis der senkrecht (rot, Messung 2 a) und parallel (blau, Messung 2 b) zum Magnetstab verlaufenden Teile der magnetischen Flussdichte \vec{B} seitlich am mittleren Magnetrostgehäuse (Die Angaben zur Ausrichtung beziehen sich auf die Hallsonde); Unten: Schematische Darstellung des Aufbaus des mittleren Magnetstabs des Magnetrosts

mit zunehmendem Abstand stark abnimmt. Diese Annahme wird auch in der Theorie erwartet, siehe Kapitel 2.3.3.

In Abbildung 3.6 sind die Ergebnisse der Ausmessung des äußeren Magnetstabsgehäuses dargestellt. In Abbildung 3.6, oben wurden die Messergebnisse des seitlichen Verlaufs innen in Rot gekennzeichnet und außen in Blau. Werden die Maxima der magnetischen Flussdichte betrachtet, ist festzustellen, dass die der äußeren Messung um 15% höher sind als die der inneren Messung. Die rechte Seite in Abbildung 3.6 zeigt eine Frontalansicht auf den Magnetrost mit den darin befindlichen Magnetstäben. Wird der äußeren Magnetstab (unten) und das Magnetrostgehäuse genauer angeschaut, ist zu erkennen, dass der Ma-

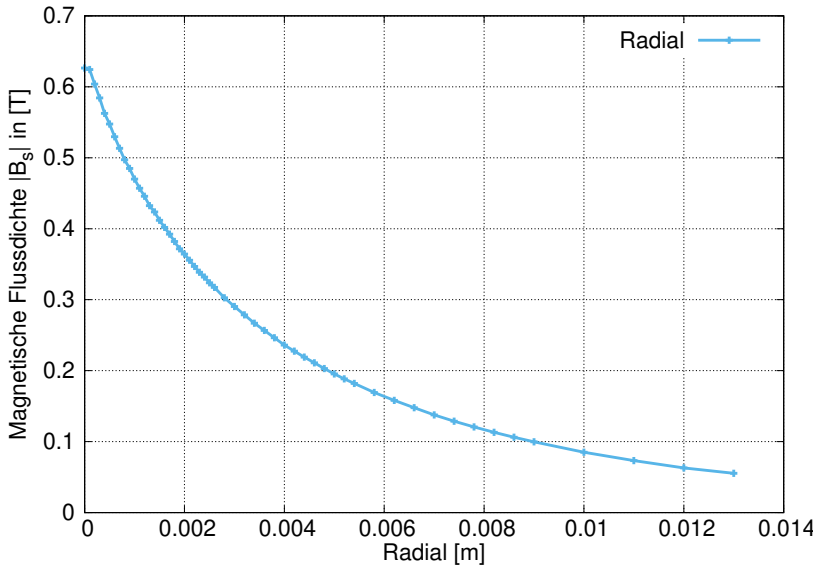


Abbildung 3.5: Ergebnis der senkrecht zum Magnetstab verlaufenden Teile der magnetischen Flussdichte \vec{B}_s mit zunehmender radialer Entfernung vom Magnetfeldmaximum

gnetstab an der äußeren Seite des Gehäuses anliegt und zur inneren Seite einen kleinen Abstand aufweist. Die starke Abnahme des Magnetfelds mit zunehmendem Abstand erklärt, warum die Messung der magnetischen Flussdichte auf der inneren Seite des äußeren Magnetstabgehäuses kleiner ausfiel, als die an der äußeren Seite.

In Abbildung 3.7 werden die Ergebnisse der Messung des mittleren Hüllrohrs oben und unten gezeigt. Oben ist der Verlauf des senkrechten Anteils der magnetischen Flussdichte (rot) und unten (blau) abgebildet. Der Verlauf der Maxima der magnetischen Flussdichte unterscheidet sich auch hier wieder. So sind die Maxima auf der Seite, wo die Magnetstäbe an dem Hüllrohr aufgehängt werden, gleich hoch (siehe Diagramm aus Abbildung 3.7 im negativen axialen Bereich). Bei Betrachtung der beiden Graphen ist zu sehen, je weiter sich von der Aufhängung entfernt wird, desto höher werden die Maxima der magnetischen Flussdichte bei der unteren Messung und desto niedriger bei der oberen Messung. Beim äußersten Höhepunkt weicht die Messung an der oberen

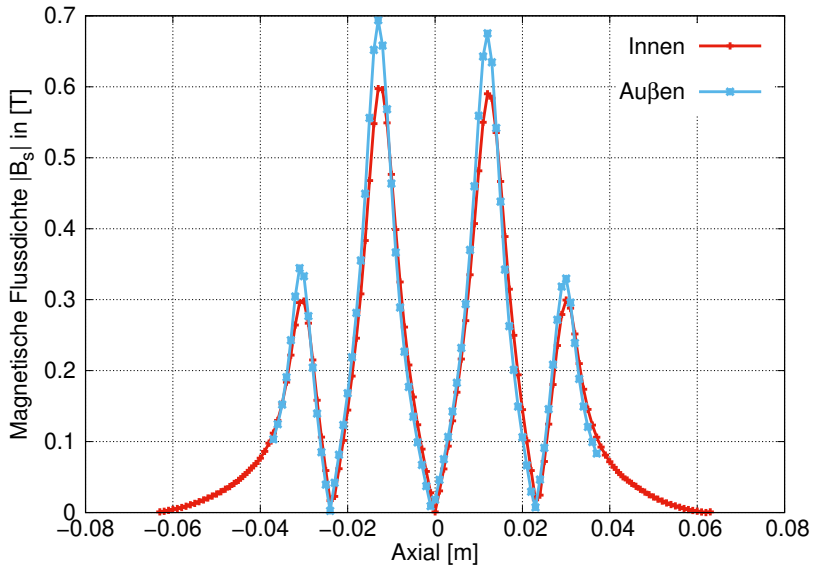


Abbildung 3.6: Ergebnis der Ausmessung des äußeren Magnetstabgehäuses; Oben: Verlauf des senkrechten Anteils der magnetischen Flussdichte in axialer Richtung, dabei ist der rote Graph die innere Messung und der blaue Graph die äußere Messung ; Unten: Frontalbild des Magnetrosts

Seite um 30% von der Messung an der unteren Seite ab. Bei Betrachtung des Bilds in Abbildung 3.6 (unten) ist zu sehen, dass der mittlere Magnetstab am Ende des Hüllrohrs unten aufliegt und nach oben einen kleinen Abstand aufweist. Dies erklärt die Differenzen in den Messergebnissen der magnetischen Flussdichte bei dem mittleren Hüllrohr des Magnetrosts. In Abbildung 3.7 unten ist eine schematische Darstellung der Lage des Magnetstabs innerhalb des Gehäuses abgebildet, wobei sich links die Aufhängung des Magnetstabs im Magnetrost befindet.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Magnetstäbe nicht gerade in den Hüllrohren stecken, sodass der Verlauf der magnetischen Flussdichte nicht konstant ist. Durch das Einschieben und das Herausziehen der Magnetstäbe in die Magnetroste, ändert sich deren Position und somit auch der Verlauf der magnetischen Flussdichte.

3.2 Experimente zur Abscheidegradbestimmung

Die wichtigste Aufgabe des Magnetfiltersystems (siehe Abbildung 2.5) ist das Abscheiden von Partikeln mit magnetischen Eigenschaften. So gelangen die Partikel in Suspension mit einem Fluid, in diesem Falle Wasser, durch den Einlass und in das Magnetfiltersystem. Durch das angelegte Magnetfeld sammeln sich diese Partikel um die Hüllrohre der Magnetroste an, wobei die Magnetstäbe in den Hüllrohren stecken. Einige Partikel passieren jedoch das Magnetfiltersystem durch den Auslass. Der Abscheidegrad AG_{MFS} gibt nun das Verhältnis zwischen der Anfangsmenge m_A und der im Magnetfiltersystem abgeschiedenen Menge m_{MFS} an.

Im Folgenden werden nun die Experimente zur Bestimmung des Abscheidegrads erläutert.

3.2.1 Versuchsaufbau

In Abbildung 3.8 ist der Versuchsaufbau der Messung zur Abscheidegradbestimmung der Edelstahlpartikel dargestellt. Oben befindet sich ein Rührbehälter. Dieser enthält zwei Bestandteile im Innern. Einen Stromstörer und einen Propeller, der von einem darüber befindlichen Motor angetrieben wird. Der Stromstörer verhindert bei eingeschaltetem Rührwerk, dass sich eine Trombe

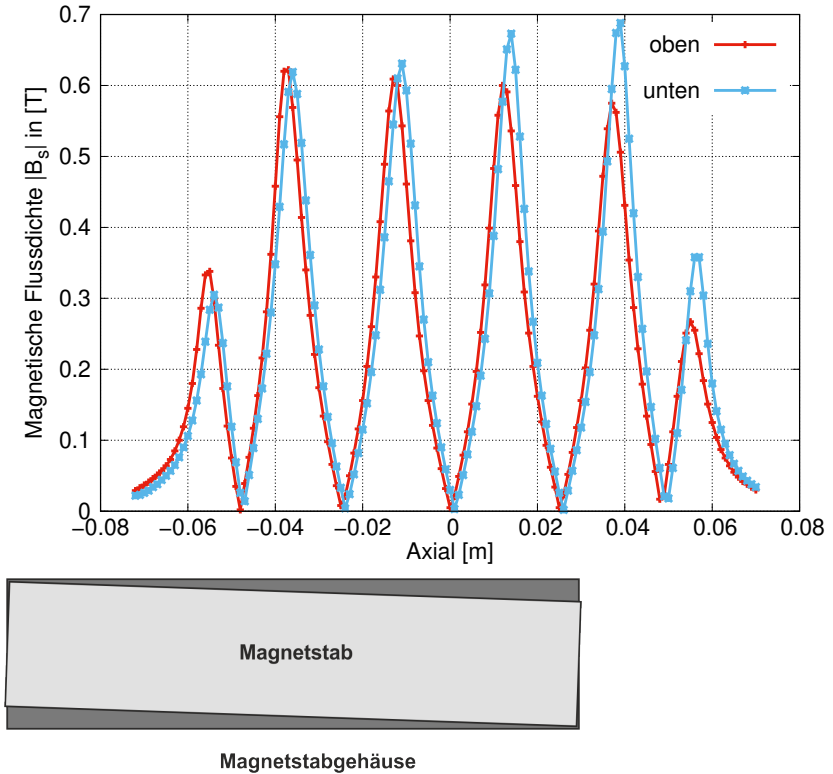


Abbildung 3.7: Ergebnis der Ausmessung des mittleren Magnetstabgehäuses oben und unten; Oben: Verlauf des senkrechten Teils der magnetischen Flussdichte in axialer Richtung, dabei ist der rote Graph die obere Messung und der blaue Graph die untere Messung; Unten: Schematische Darstellung der Lage des Magnetstabs innerhalb des mittleren Magnetstabgehäuses

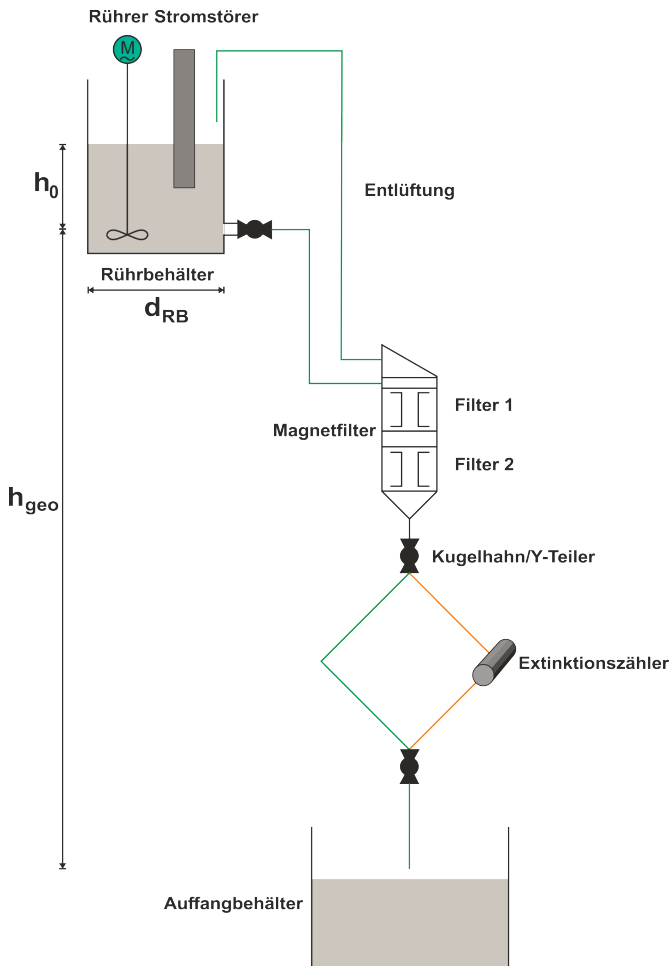


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: Versuchsaufbau; Grüne Linie: 1/2" Schlauch, Orangene Linie: 1/8" Schlauch, h_0 : Maximale Füllhöhe des Rührbehälters (0,45m), h_{geo} : Höhendifferenz zwischen Rührbehälter und Auslass (2,4m), d_{RB} : Durchmesser des Rührbehälters (0,038m)

bildet und somit auch, dass Luftblasen in die Suspension gelangen.

Am Rührbehälterausgang befindet sich ein Kugelhahn, an dem ein Schlauch angebracht ist, der mit dem Magnetfiltersystem verbunden ist. Eine detaillierte Beschreibung des Magnetfiltersystems ist in Kapitel 2.2.1 zu finden. Das Entlüftungsrohr des Magnetfiltersystems führt zum Rührbehälter. Unterhalb des Magnetfiltersystems befindet sich wieder ein Kugelhahn. Hinter dem Kugelhahn wird die Strömung in zwei kleinere Schläuche geführt. Die Aufteilung ist nötig, da für die Messung der nicht separierten Partikel ein Extinktionszähler benötigt wird. Der bei den Versuchen verwendete Extinktionszähler hat ein Durchlauffläche von $10^{-6}m^2$. Die Querschnittsfläche des verwendeten Schlauchs am Ausgang des Magnetfiltersystems beträgt $126,6 \cdot 10^{-6}m^2$. Wäre der Extinktionszähler direkt an dem Auslass des Magnetfiltersystems angebracht, hätte dies einen Einfluss auf das Fließverhalten innerhalb des Magnetfiltersystems, so würde sich die Durchlaufgeschwindigkeit sehr stark verlangsamen. Um dies zu verhindern, wurde die Strömung nach dem Magnetfiltersystem geteilt. An dem einen Schlauch der Teilung ist der Extinktionszähler angebracht. Bevor die Strömung in den unten positionierten Auffangbehälter gelangt, werden die beiden kleinen Schläuche wieder verbunden. Dort befindet sich ein weiterer Kugelhahn.

In Abbildung 3.9 sind zwei Fotografien des Versuchsaufbaus abgebildet. Die Linke stellt die Frontalansicht des unteren Teils des Aufbaus dar. Hier ist zu sehen, dass die einzelnen Komponenten, wie Extinktionszähler und Magnetfiltersystem, an Aluprofilen angebracht sind.

In der Skizze ist die in dem Auffangbehälter unten befindliche Pumpe nicht eingezeichnet, da diese keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Versuche hatte. Diese Pumpe verhinderte während der Versuche ein Überlaufen und ermöglichte nach der Durchführung der Versuche ein Entleeren des Auffangbehälters. Das Bild auf der rechten Seite in Abbildung 3.9 zeigt den oberen Teil des Aufbaus. Hier ist oben der Rührbehälter mit dazugehörigem Rührer zu sehen. Die Daten des Extinktionszählers werden mit Hilfe eines Computerprogramms ausgewertet. Der zur Datenerfassung benötigte Laptop befindet sich unterhalb des Rührbehälters.



Abbildung 3.9: Fotografien des Versuchsaufbaus; Links: Unterer Teil, Rechts: Oberer Teil

3.2.2 Disperse Phase

Das verwendete Magnetfiltersystem soll, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, Partikel mit magnetischen Eigenschaften (Edelstahlpartikel) von Partikeln mit kaum magnetischen Eigenschaften (Abrasivepartikel) separieren. Dies geschieht, indem die Edelstahlpartikel vom Magnetfeld innerhalb des Magnetfiltersystems angezogen werden und sich dort ansammeln, die Abrasivepartikel dieses aber passieren. Entscheidend bei diesem Separationsprozess ist die Abscheidung der Edelstahlpartikel, d.h. die Aktivität und die Wiederverwendungsrate der separierten Abrasivfraktion hängen ausschließlich von der Edelstahlkonzentration ab, sodass das Magnetfiltersystem ein besseres Ergebnis erzielt, umso mehr Edelstahlpartikel abgeschieden werden. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass die Abrasivepartikel nur einen geringen Einfluss auf die Abscheidung der Edelstahlpartikel haben und sollten sie einen Einfluss haben, hätten sie bei den vorliegenden Versuchen immer denselben Einfluss. So würden die Abrasivepartikel zwar die Einzelergebnisse möglicherweise beeinflussen, doch nicht die Vergleiche der Ergebnisse zueinander. So wurden für die folgenden Untersuchungen nur die Edelstahlpartikel betrachtet und die Abrasivepartikel vernachlässigt.

Für die Experimente wurden runde Edelstahlpartikel der Werkstoffnummer 1.4404 und einem Durchmesser von $d_p = 10 - 400 \mu\text{m}$ verwendet. Die Dichte der Partikel beträgt $\rho_p = 7950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. In Abbildung 3.10 ist die vom Hersteller angegebene Dichteverteilung der verwendeten Edelstahlpartikel dargestellt. Mit diesen Herstellerangaben wurde berechnet, wie sich die Partikelanzahl auf einem Volumen von 1cm^3 verteilt. Dies ist in Abbildung 3.11 abgebildet. So ergibt sich ein Partikelmediandurchmesser von $61,73 \mu\text{m}$, wird die prozentuale Verteilung betrachtet.

In Abbildung 3.12 sind zwei Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der verwendeten Edelstahlpartikel abgebildet, dabei wurde bei dem linken Bild ein größerer Maßstab angewandt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Partikel eine rundliche Form aufweisen.

Mit Hilfe eines Extinktionszählers wurde die Partikelgrößenverteilung gemessen. Diese wurde mit den Herstellerangaben verglichen, was in Kapitel 3.2.4 beschrieben wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Edelstahlpartikel weisen die gleichen magnetischen Eigenschaften und die gleiche Dichte auf, wie die bei den WASS-Schnitten entstehenden Edelstahlpartikel. Auch die Partikelgrößenverteilung

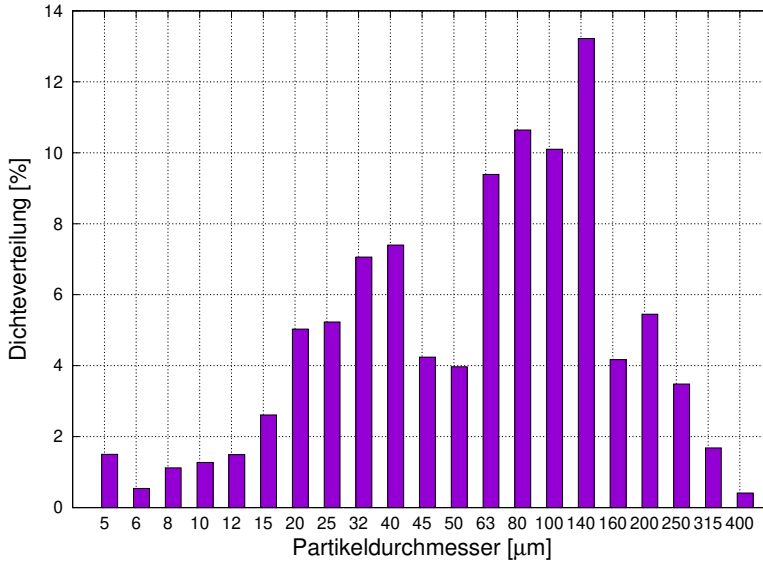


Abbildung 3.10: Dichteverteilung der im Experiment verwendeten Edelstahlpartikel (Herstellerangabe)

ähnelt den realen Edelstahlpartikeln. Die Formen der einzelnen Partikel unterscheiden sich jedoch. So sind die Edelstahlpartikel, die bei dem WASS-Schnitt entstehen, länglicher (vergleiche Abbildung 2.2 und Abbildung 3.12). Die Form der einzelnen Partikel hat aber keinen Einfluss darauf, ob ein Partikel abgeschieden wird.

Strömungsmechanisches Verhalten

Mit Gleichungen 2.44 und 2.45 wurden die strömungsmechanischen Eigenschaften der Partikel bestimmt. Es wurde für u_0 die Geschwindigkeit im Magnetfiltersystem verwendet. Für die charakteristische Länge wurde der Durchmesser des Magnetstabhüllrohrs verwendet und für den Partikeldurchmesser der prozentuale Partikelmediandurchmesser. Daraus folgt

$$t_0 = 1,7 \cdot 10^{-3} s \tag{3.1}$$

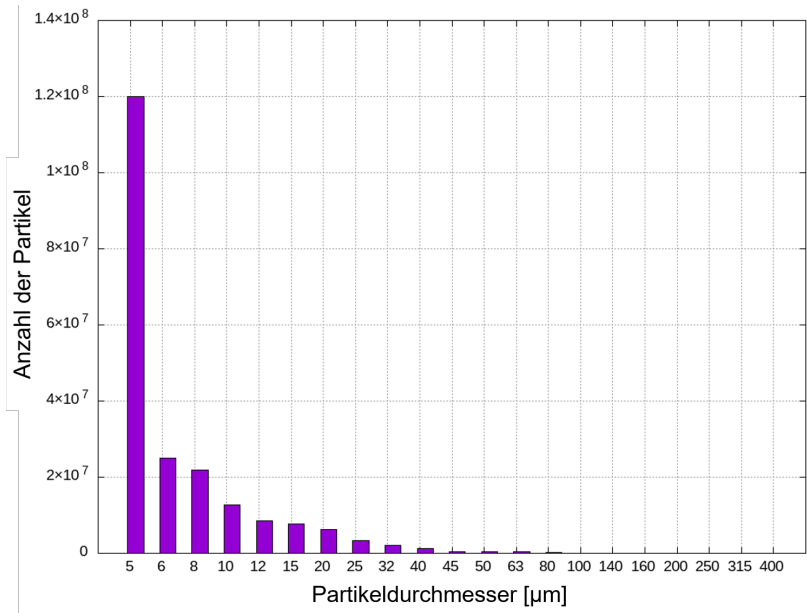


Abbildung 3.11: Anzahl der Edelstahlpartikel (berechnet aus den Herstellerangaben für ein Volumen von 1 cm^3)

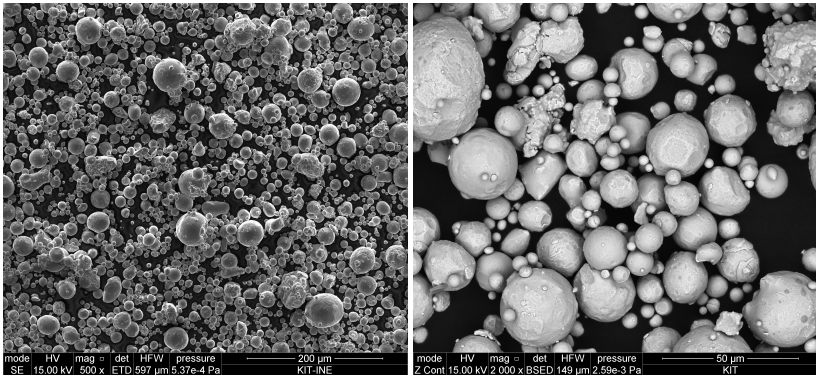


Abbildung 3.12: Links: Sekundärelektronenbild; Rechts: Rückstreuelektronenbild der verwendeten Edelstahlpartikel

und

$$St = 0,54 \cdot 10^{-3}. \quad (3.2)$$

Die Stokes Zahl ist somit $\ll 1$, d.h. die Partikel folgen der Strömung.

3.2.3 Erzeugung einer Strömung

Die Strömung innerhalb des Magnetfiltersystems wird durch den Höhenunterschied zwischen Rührbehälter und Auffangbehälter erzeugt. Das angebrachte Entlüftungsrohr und das Schließen des unteren Kugelhahns, sowie das Öffnen des oberen Ventils ermöglichen ein vollständiges Befüllen des Magnetfiltersystems. Als Trägerfluid wurde Wasser verwendet. Dieses hat eine Dichte von $\rho = 998,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und eine Viskosität von $\mu = 1.0 \text{ mPas}$.

Vor dem Versuchsaufbau wurde rechnerisch bestimmt, ob der Volumenstrom als konstant angenommen werden kann, da mit Fortschreiten des Experiments die Füllhöhe in dem Rührbehälter abnimmt und somit auch der Volumenstrom. Bei der Berechnung des Volumenstroms wurde der Druckverlust an den Wänden (Grenzschichten) nicht miteingerechnet. Diese Eigenschaft sollte theoretisch die Volumenstromänderung kleiner werden lassen, da der Druckverlust mit steigender Geschwindigkeit zunimmt. Die theoretische Betrachtung ergab eine Differenz von 8%. Dies wurde auch experimentell nochmals überprüft. Hier kam eine Abweichung von 7% zustande mit einem Messfehler von 3%. Mit diesen Ergebnissen wurde der Volumenstrom als konstant angenommen. Eine genauere Beschreibung der Berechnung ist in Anhang B zu finden.

Volumenstrombestimmung

Zur Bestimmung des durchschnittlichen Volumenstroms wurden im Rührbehälter die Anfangs- und Endhöhe gemessen, um so das Volumen V_{RB} des während des Abscheideprozesses verwendeten Wassers zu bestimmen. Zudem wurde die Zeit t_{ges} gemessen. Mit Gleichung 2.14 wird ein Volumenstrom innerhalb des Systems von

$$\dot{v}_{ges} \approx 8 \frac{\text{l}}{\text{min}} \quad (3.3)$$

berechnet.

3.2.4 Erzeugung und Nachweis einer homogenen Suspension

In Abbildung 3.8 sind der Rührer und Rührbehälter dargestellt, in dem die homogene Suspension aus Wasser und Edelstahlpartikeln erzeugt wurde. Als Rührer wurde ein Wendelrührer, der seitlich im Behälter positioniert wurde und eine maximale Drehzahl von $3000 \frac{\text{Umdrehungen}}{\text{min}}$ aufwies, verwendet. Zudem wurde ein Stromstörer eingebaut. Die seitliche Positionierung des Rührers und der Stromstörer verhindert eine Trombenbildung und somit, dass während der Experimente Luftblasen das System und damit auch den Extinktionszähler durchlaufen.

Zur Überprüfung, ob eine homogene Suspension entsteht, wurde ein Extinktionszähler verwendet. Hierfür wurde der Versuchsstand aus Abbildung 3.8 ohne Magnetfiltersystem benutzt, d.h. es wurde vom Auslass des Rührbehälters ein Schlauch bis zum Kugelhahn mit nachfolgendem Y-Teiler eingebaut. Am Y-Teiler wird zum Hauptstrom ein Nebenstrom gebildet. In den Nebenstrom wurde der Extinktionszähler integriert. Dieser konnte nicht direkt am Hauptstrom eingebaut werden, da der Extinktionszähler eine Durchlaufläche von 10^{-6}m aufweist. Der Nachweis für eine homogene Suspension erfolgt unter der Annahme, dass, falls es eine homogene Suspension im Nebenstrom gibt, auch eine homogene Suspension im Hauptstrom existiert. Diese Annahme beruht darauf, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass der Hauptstrom eine inhomogene Verteilung der Partikel aufweist und die Teilung des Stroms in zwei Nebenströme eine Homogenität in einem Nebenstrom hervorbringt.

Die Experimente wurden dreimal wiederholt und wie folgt durchgeführt: Zuerst wurde der Rührer eingeschaltet. Dieser lief mindestens 60s bevor der unterste Kugelhahn geöffnet wurde. Die restlichen Kugelhähne waren zu diesem Zeitpunkt alle geöffnet, wodurch sich im kompletten System schon Wasser befand. Durch das Öffnen des Kugelhahns begann sich der Rührbehälter zu entleeren und 3s nach dem Öffnen des unteren Kugelhahns wurde mit der Messung im Extinktionszähler begonnen.

Die Abweichungen der wiederholten Experimente waren vernachlässigbar klein.

Um die homogene Suspension nachzuweisen, wurde aus der Konzentration der Partikel in dem Rührbehälter berechnet, wie viel Gesamtpartikelvolumen im Extinktionszähler in einer Zeit Δt_E gemessen werden müsste.

Hierfür wurde mit dem 90%-Schichthöhenkriterium die Suspensionshöhe h_S über

$$h_S = 0,9 \cdot h_{FH} \quad (3.4)$$

bestimmt, wobei h_{FH} die Füllhöhe des Rührbehälters ist. Die Partikelkonzentration ϕ_{RP} innerhalb des Rührbehälters ist

$$\phi_{RP} = \frac{V_P}{V_W} = \frac{4m_p}{\pi\rho_p d_{RB}^2 h_S}, \quad (3.5)$$

dabei sind V_p und V_W das Volumen der Partikel und des Fluids im Rührbehälter, m_p die zugeführte Masse an Partikeln, ρ_p die Dichte des verwendeten Edelstahls und d_{RB} der Durchmesser des Rührbehälters.

Der Volumenstrom durch den Extinktionszähler \dot{V}_{EZ} wurde experimentell bestimmt. Dabei wurde das Wasser, das den Extinktionszähler während eines Experiments durchlaufen hat, in einem Messzylinder aufgefangen und gleichzeitig die Dauer gemessen. Daraus ergab sich ein durchschnittlicher Volumenstrom von $4,49 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$. Damit kann das Gesamtpartikelvolumen

$$V_{pEZ} = \phi_{RP} \dot{V}_{EZ} \Delta t_{EZ} \quad (3.6)$$

berechnet werden.

Der Extinktionszähler misst die Anzahl der Partikel A_p mit einem Durchmesser d_p im Bereich von $x_1 < d_p < x_2$ (siehe Tabelle 3.1), die diesen in einer bestimmten Zeit Δt_{EZ} durchlaufen. Es gibt 21 unterschiedliche Durchmesserbereiche. Über

$$V_{EZ} = \sum_{n=1}^{21} V_{p,n} A_{p,n} \quad (3.7)$$

lässt sich das Gesamtpartikelvolumen bestimmen, das im Extinktionszähler gemessen wurde.

Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung einer homogenen Suspension ist das Verhalten der Partikelgrößenverteilung. Diese sollte zum einen mit den Herstellerangaben übereinstimmen und zum anderen relativ konstant bleiben, d.h. keine großen Änderungen in den einzelnen Messzyklen aufweisen. Die Dauer eines Messzykluses beträgt 20s und es wurden 8 Messzyklen gemessen, wobei der Extinktionszähler 1s bis zum Start des nächsten Messzykluses benötigt (siehe Tabelle 3.2).

d_p [μm]	5	6	8	10	12	16	20	245	32	40	45	50
	63	80	100	125	160	200	250	315	400			

Tabelle 3.1: Mit dem Extinktionszähler gemessene Bereiche der Partikeldurchmesser

Δt_i [s]	0-20	21-41	42-62	63-83	84-104	105-125	126-146	147-167
------------------	------	-------	-------	-------	--------	---------	---------	---------

Tabelle 3.2: Mit dem Extinktionszähler gemessene Zeitabschnitte

Ergebnisse

Zum Nachweis einer homogenen Suspension wurden zum einen der zeitliche Verlauf der Partikelgrößenverteilung mit dem Extinktionszähler gemessen und diese Daten miteinander verglichen. Zum anderen wurden diese Ergebnisse mit den Angaben des Herstellers der dispersen Phase verglichen. Dies ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Hier ist die kumulative Partikelgrößenverteilung zu sehen, die der Extinktionszähler in dem jeweiligen Zeitintervall gemessen hat im Vergleich mit den Angaben des Herstellers. Dabei kann die Messung nach 105s außer Betracht gelassen werden, da in diesem Bereich der Wasserstand im Rührbehälter so niedrig war, dass Luftblasen mit in das System gelangten und diese die Messergebnisse verfälschten. Deutlich zu erkennen ist, dass es laut Herstellerangaben (grüner, gestrichelter Graph mit Kreuzen) mehr kleine Partikel in einem Bereich Partikeldurchmesser $d_p < 63\mu\text{m}$ gibt. In dem Bereich $d_p > 63\mu\text{m}$ stimmen die Ergebnisse der Messungen und der Herstellerangaben besser überein. So sind in diesem Bereich die Abweichungen unter 10%. Die große Abweichung bei Partikeln mit kleinem Durchmesser kann mit der Art des Probenteilers zusammenhängen. Hierfür wurde ein Riffelteiler verwendet, der im mm -Bereich einen Fehler von 3% aufweist [But]. Laut Theorie müsste es umgekehrt sein, d.h. in kleineren Durchmesserbereichen ist die Entmischung bei der Probenteilung geringer, da die Reibungskräfte zwischen den Partikeln im Vergleich zum Eigengewicht dann mehr in den Vordergrund treten [Bat56]. Dies gilt bis zu einem Partikel mit dem Durchmesser von $200\mu\text{m}$. In dem hier vorliegenden Fall sind die Abweichungen besonders im Bereich unter einem Partikeldurchmesser $63\mu\text{m}$ groß. Dies könnte daran liegen, dass sich die Partikel in diesem Bereich während der Teilung nicht direkt in dem Probenteiler absetzten, sondern in der Luft blieben und somit beim Teilen ver-

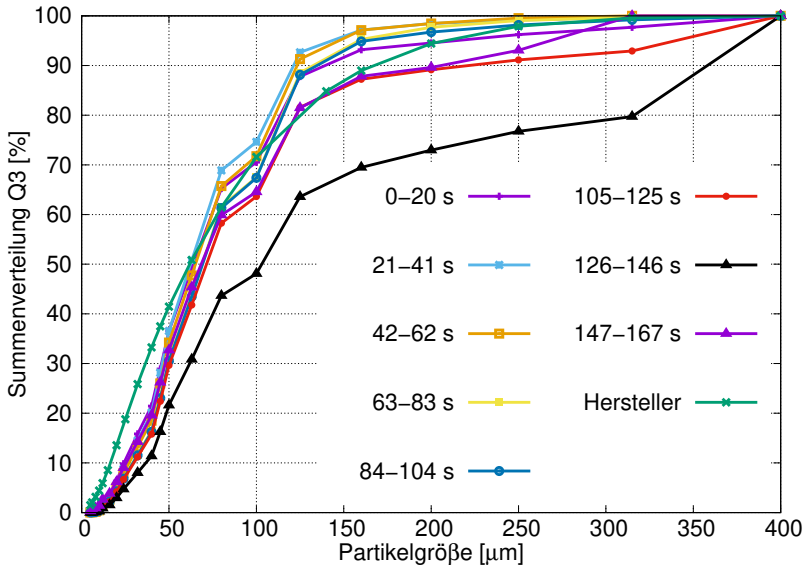


Abbildung 3.13: Kumulative Partikelgrößenverteilung der verwendeten Edelstahlpartikel, Messdaten ohne Magnetfiltersystem und Herstellerangaben

loren gehen. Dieses Ergebnis bedeutet nur, dass die Partikelmischung, die bei der Partikelgrößenverteilung verwendet wurde, nicht mit den Herstellerangaben übereinstimmt. Es bedeutet jedoch nicht, dass in dem Rührbehälter keine homogene Suspension hergestellt wurde.

Hierfür wird der zeitliche Verlauf der Partikelgrößenverteilung betrachtet, wobei die Messungen $> 105\text{s}$ nicht beachtet werden. Diese zeigen im Bereich bis $12\mu\text{m}$ eine relative Messabweichung von bis zu 15% auf, jedoch nimmt diese mit steigendem Partikeldurchmesser schnell ab. So liegen die relativen Abweichungen bei Partikeldurchmessern größer $50\mu\text{m}$ unter 7%. Der Verlauf der einzelnen Graphen ist sehr ähnlich. So weisen die Graphen untereinander ähnliche Steigungen zwischen den einzelnen Messpunkten auf. Insgesamt ist dies ein gutes Ergebnis, sodass die Suspension im Rührbehälter als nahezu homogen angenommen werden kann.

Entscheidender für die Berechnung des Abscheidegrads ist, dass das aus dem Rührbehälter zu erwartende Partikelvolumen V_{PEZ} auch im Extinktionszähler

gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Das aus dem Wasservolumen im Rührbehälter und der zugeführten Menge an Edelstahlpartikeln berechnete Partikelvolumen, das in 20s durch den Partikelzähler gelangt, beträgt $V_{pEZ} = 1,1 \cdot 10^{-8} m^3$. Bei Betrachtung des Ergebnisses ist zu sehen, dass die Messung sehr gut mit den zu erwartenden Ergebnissen übereinstimmt.

Wird der Messbereich zwischen 0 – 20s betrachtet, so liegt das im Extinktionszähler gemessene Partikelvolumen von 19,7% unter dem im Rührbehälter berechneten. Ein Grund dafür ist, dass sich zu Beginn der Messung innerhalb des gesamten Versuchsaufbaus klares Wasser befindet, sodass zu Beginn der Messung dieses die Messergebnisse verfälscht. In dem Messbereich von 84s bis 146s ist das im Extinktionszähler gemessene Partikelvolumen um mindestens 15,1% größer, als das im Rührbehälter bestimmte Partikelvolumen. Umso zeitlich weiter die Messungen verglichen werden, desto größer wird diese Abweichung der Ergebnisse. Der Grund für diesen Effekt könnte der immer niedriger werdende Wasserstand im Rührbehälter sein. Dieser ermöglicht, dass sich mehr Luftblasen während des Rührens bilden und diese durch den niedrigen Wasserstand auch in das Messsystem gelangen.

In dem Bereich der Messung zwischen 21s und 83s (gelb markiert) beträgt die relative Abweichung maximal 12%. Wurde die relative Abweichung für den beschriebenen Bereich berechnet, war diese relative Abweichung bei allen durchgeführten Experimenten unter 2%, sodass bei der Berechnung des Abscheidegrads nur dieser Bereich betrachtet wurde. Dies bedeutet, dass die experimentell bestimmten Abscheidegrade experimentell bedingt eine Ungenauigkeit von maximal 2% aufweisen.

3.2.5 Abscheidegradbestimmung

Die Experimente wurden wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben durchgeführt. Es wurde eine homogene Suspension in dem Rührbehälter erzeugt. Danach pasierte diese das Magnetfiltersystem, in dem die Edelstahlpartikel separiert wurden. Mit Hilfe des Extinktionszählers wurde dann gemessen, wie viele Partikel das System passieren.

Zur Abscheidegradbestimmung wurde das Volumen der Edelstahlpartikel V_{pEZ} berechnet, das in 20s durch den Extinktionszähler fließen müsste. Dies wurde mit dem gemessenen Volumen V_{EZ} im Extinktionszähler verglichen.

Δt_i [s]	0-20	21-41	42-62	63-83	84-104	105-125
$V_{EZ}[m^3]$	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$
F_{pro} [%]	-19,7	-12,0	-2,2	11,4	15,1	17,3
Δt_i [s]	126-146					
$V_{EZ}[m^3]$	$1,8 \cdot 10^{-8}$					
F_{pro} [%]	62,1					

Tabelle 3.3: Gemessenes Volumen an Partikeln V pro Zeitintervall Δt : V_{EZ} mit Extinktionszähler bestimmt und $V_{pEZ} = 1,1 \cdot 10^{-8} m^3$ mit Partikelkonzentration aus dem Rührbehälter bestimmt, F_{pro} relative Abweichung der gemessenen Volumen im Extinktionszähler V_{EZ} zu den berechneten Werten V_{pEZ} in %

Mit diesen Volumenangaben wurde dann der Abscheidegrad bestimmt. Für den experimentell bestimmten Abscheidegrad gilt

$$AG_{MFS,EXP} = \frac{V_{EZ}}{V_{pEZ}} * 100. \quad (3.8)$$

Variiert wurde bei den durchgeführten Experimenten das Magnetfeld. Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, besteht das Magnetfiltersystem unter anderem aus zwei Magnetrosten (einem oberen und einem unteren), die aus einem Gehäuse und Magnetstäben bestehen. Bei diesen Magnetrosten ist die Möglichkeit gegeben, ein Magnetfeld innerhalb des Magnetfiltersystems ein- und auszuschalten indem die Magnetstäbe in das Gehäuse gesteckt (Magnetfeld ein) werden oder herausgezogen werden (Magnetfeld aus).

Es wurden nun drei unterschiedliche Experimente durchgeführt. Bei der einen Variation befanden sich in beiden Magnetrosten Magnetstäbe. Bei den anderen beiden Variationen befanden sich nur in dem oberen, bzw. nur in dem unteren Magnetrost Magnetstäbe. Jede Variation wurde zur Überprüfung der Ergebnisse dreimal wiederholt.

3.2.6 Ergebnisse

Die Abscheideexperimente ergaben folgende Ergebnisse. Bei der Auswertung wurden, wie in Kapitel 3.2.4 festgelegt, ausschließlich die drei Messzyklen

zwischen 21s und 83s betrachtet.

Bei den Versuchen, bei denen sich in den beiden Gehäusen der Magnetrost die Magnetstäbe befanden, wurde ein Abscheidegrad von

$$AG_{EXP,beide} \approx 93,01\% \quad (3.9)$$

gemessen, wobei der Wert um 4,5% zwischen den betrachteten Messzyklen variiert.

Befanden sich nur im oberen Magnetrost Magnetstäbe wurde ein Abscheidegrad von

$$AG_{EXP,oben} \approx 86,91\% \quad (3.10)$$

erreicht, wobei der Wert um 7,7% zwischen den betrachteten Messzyklen variiert.

Bei der Variation mit Magnetstäben im unteren Magnetrost wurde ein Abscheidegrad von

$$AG_{EXP,unten} \approx 86,07\% \quad (3.11)$$

bestimmt. Hierbei ergab sich eine Abweichung von 2,48% zwischen den unterschiedlichen Messzyklen.

Abbildung 3.14 zeigt die Ansammlung der Edelstahlpartikel auf dem Magnetrost, in dem sich keine Magnetstäbe während der Versuchsdurchführung befanden. Diese Ansammlungen entstanden dadurch, dass Partikel auch ohne Magnetfeld auf den Hüllrohren der Magnetrost sedimentierten und dort liegen blieben, da die Strömung innerhalb des Magnetfiltersystems zu schwach war, diese um die Hüllrohre zu befördern oder abzuspülen. So ist der Abscheidegrad, bei dem sich in einem Magnetrost Magnetstäbe befanden, in der Realität kleiner.

Wird angenommen, dass eine homogene Partikelverteilung durch das Magnetfiltersystem fließt, kann durch den Vergleich der Fläche F_A , auf der sich die Partikel ansammeln, mit der Querschnittsfläche F_Q eines Magnetrosts der Abscheidegrad eines Magnetrosts ohne Magnetstäbe AG_{MR} berechnet werden. In Abbildung 3.14 ist zu sehen, wie sich die Partikel auf einem Magnetrost ansammeln, in dem sich keine Magnetstäbe befinden. Es ist zu sehen, dass sich viele Partikel in der Mitte eines einzelnen Magnetstabhüllrohrs ansammeln. Mit zunehmendem Abstand zur Mitte nimmt auch die Partikelkonzentration auf den Magnetstabhüllrohren ab. Dies liegt an dem in Richtung des Stroms größer werdenden Winkel. So können die Partikel an den äußeren Ränder der Hüllrohre besser von der Strömung abgespült werden. Die Breite b_A , die

die Breite der Ansammlungen der Partikel auf den Magnetstabhüllrohren beschreibt, wird auf $1,2\text{cm}$ festgelegt. Die Längen der Hüllen betragen in der Mitte $L_M = 15\text{cm}$ und an den Seiten $L_S = 11,5\text{cm}$. Mit

$$AG_{MR} = \frac{F_A}{F_Q} 100 = \frac{(L_M + 2L_S)b_A}{0,25\pi L_M^2} \quad (3.12)$$

ergibt sich für einen Magnetrost ohne Magnetstäbe ein Abscheidegrad von $25,1\%$.

Mit

$$AG_{u/o} = AG_{MR} + (100 - A_{MR}) \frac{AG_{MS}}{100}, \quad (3.13)$$

kann der Abscheidegrad AG_{MS} eines Magnetrosts mit Magnetstäben darin berechnet werden, wobei $AG_{u/o}$ der Gesamtabscheidegrad bei einem Versuch ist, bei dem sich die Magnetstäbe nur in einem Magnetrost befinden und bei dem anderen Magnetrost nur die Hüllrohren verwendet wurden.

Damit ergibt sich für den Abscheidegrad AG_{MSu} , bei dem sich nur im unteren Magnetrost Magnetstäbe befanden, für diesen Magnetrost

$$AG_{MSu} = 81,4\% \quad (3.14)$$

und für den Abscheidegrad AG_{MSo} , bei dem sich nur im oberen Magnetrost Magnetstäbe befanden, für diesen Magnetrost

$$AG_{MSo} = 82,5\%. \quad (3.15)$$



Abbildung 3.14: Ansammlung der Edelstahlpartikel auf dem Magnetrost, in dem sich keine Magnetstäbe während der Versuchsdurchführung befanden

4 Numerische Untersuchungen

Bei der numerischen Untersuchung wurde das Magnetfiltersystem, das für die Separationsanlage entwickelt und gebaut wurde, graphisch nachgestellt. Es wurde das Magnetfeld simuliert und mit den Ergebnissen der Magnetfeldmessung verglichen. Zudem wurde das Strömungsfeld innerhalb des Magnetfiltersystems berechnet.

Zum Schluss wurden die Partikel in dem Magnetfiltersystem simuliert. Auf diese wirkten nun das Magnetfeld, die Strömung und die Erdanziehung ein. Die Partikelbewegungen selber hatten keinen Einfluss auf die Strömung oder das Magnetfeld. Es gab also eine Ein-Wege-Kopplung.

Für die Simulation der Abscheidung der Partikel wurde ein Euler-Lagrange-Modell verwendet.

4.1 Allgemeine Informationen zu den numerischen Untersuchungen

4.1.1 Geometrieerstellung

Zur Geometrieerstellung wurde *salome* verwendet, welches ein freies Computerprogramm ist, mit dem dreidimensionale Tätigkeiten im CAE-Bereich bearbeitet werden können. In Abbildung 4.1 ist rechts eine Fotografie des Magnetfiltersystems und links das Ergebnis der Geometrieerstellung mit *salome* dargestellt. Nach der Erstellung der Geometrie wurden die einzelnen Oberflächen in STL-Dateien generiert und farblich gekennzeichnet. Die lila Einfärbung rechts oben stellt den Einlass dar. Der grau transparente Bereich zeigt die Wand und unten befindet sich in Gelb der Auslass. Die grünen und roten Bereiche sind Magnet 1 und Magnet 2. Diese zwei Magnetarten ermöglichen, dass zwei gleiche Magnete mit entgegengesetzter Polung simuliert werden können. Genaueres zur Magnetfeldsimulation folgt in Kapitel 4.2.1.

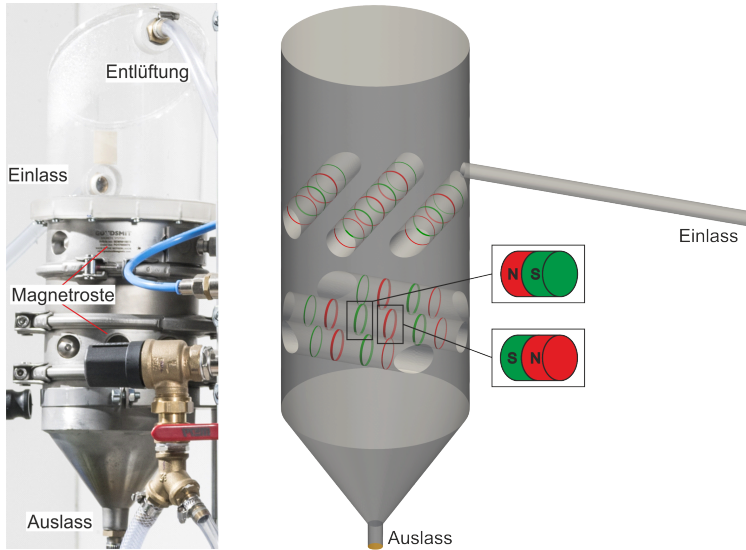


Abbildung 4.1: Links: Fotografie des Versuchsaufbaus; Rechts: Geometrie aus dem CAD-Programm *salome*

STL-Dateien beschreiben Geometrien durch eine Vielzahl von Dreiecken. Die STL-Datei mit den einzelnen Oberflächen wird in *OpenFOAM* eingelesen und dort mit *snappyHexMesh* bearbeitet, um ein Netz (Mesh), das in *OpenFOAM* verarbeitet werden kann, zu generieren. Dabei wird in *OpenFOAM* eine Geometrie erstellt, meist ein Quader, und dann wird die Geometrie der STL-Datei eingelesen. Die Funktion *snappyHexMesh* schneidet nun aus dem Quader die Geometrie der STL-Datei aus. Es wird also aus einer zweidimensionalen Geometrie ein dreidimensionales Netz erstellt. [Ope15, sal]

SnappyHexMesh bietet noch zusätzliche Möglichkeiten, wie z.B. die Verfeinerung (mehr Zellen pro Fläche, Volumen) des Netzes in bestimmten Bereichen oder die Bearbeitung von Kantenverläufen.

4.1.2 Netzgenerierung

Abbildung 4.2 zeigt das mit *paraview* dargestellte Netz des Magnetfiltersystems, das für die Berechnungen unter *OpenFOAM* verwendet wurde. Es wurden hierbei 4,1 Mio Zellen generiert. Gut zu erkennen sind hier die Bereiche, die ein feineres Netz besitzen. Das Netz wurde im Einlassrohr, im ganzen Wandbereich, beim Eintritt der Strömung vom Einlassrohr aus und um die Magnetstäbe herum verfeinert.

In den Tabellen 4.1 und 4.2 sind die Durchmesser einzelner Zellen und die Richtung, in der diese gemessen wurden, aufgelistet. Dabei gibt 4.1 die Ergebnisse im Einlassrohr an und 4.2 die im Magnetfilter an.

Eine Netzstudie wurde durchgeführt, wobei die Anzahl der Zellen variiert wurde. Die Verfeinerungsregionen waren bei allen Simulationen dieselben. Die Anzahl der Zellen waren 1,4 Mio., 2,4 Mio. und 4,1 Mio..

In Abbildung 4.3 ist das Ergebnis der Magnetfeldsimulation an einem Magnetfeldmaximum mit zunehmenden Abstand bei unterschiedlicher Zellenanzahl dargestellt. Es ist zu erkennen, dass je mehr Zellen simuliert werden, desto mehr Messpunkte gibt es. Durch diese höhere Anzahl an Zellen wird die magnetische Flussdichte besser aufgelöst, umso näher man an den Magneten kommt. Dies hat zur Folge, dass das Magnetfeld in der Nähe des Magnetfeldmaximums exaktere Ergebnisse liefert, je mehr Zellen generiert wurden. Wird der Verlauf der Kurven mit zunehmendem Abstand betrachtet, ist zu sehen, dass die Erhöhung der Zellen keinen Einfluss darauf hat.

In Abbildung 4.4 ist das Ergebnis der Strömungssimulation des Freistrahls mit einer Entfernung von 0,04m zum Einlass bei unterschiedlicher Zellenanzahl abgebildet. Auch hier ist wieder zu sehen, dass eine höhere Anzahl an Zellen zu einer Erhöhung der Messpunkte führt. Der Verlauf der Kurven bei unterschiedlicher Zellenanzahl ist identisch. Das Ergebnis des Graphens bei 1,4 Mio Zellen weicht in dem Bereich $0,325m < z < 0,336m$ um 80% ab, die absolute Abweichung beträgt aber nur $1,7 \frac{m}{s}$. Die Messung bei 2,4 Mio. Zellen weicht in dem Bereich von $0,306m < z < 0,317m$ im Vergleich zu den anderen Messung maximal um 20% ab. Dies entspricht einer absoluten Abweichung von nur $0,02 \frac{m}{s}$.

Des Weiteren wurde die Variation des Abscheidegrads mit unterschiedlicher Zellenanzahl untersucht. Die prozentuale Abweichung lag unter 1%.

Position	Wand	Mitte
Durchmesser [m]	$2,72 \cdot 10^{-5}$	$3,53 \cdot 10^{-4}$
Achse	z-Achse	z-Achse

Tabelle 4.1: Zelldurchmesser am Einlassrohr

Position	Größte Zelle	Wand	Verfeinerung um Magnet	Am Magnetstab
Durchmesser [m]	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$3,69 \cdot 10^{-4}$
Achse	z-Achse	x-Achse	z-Achse	z-Achse

Tabelle 4.2: Zelldurchmesser im Magnetfilter

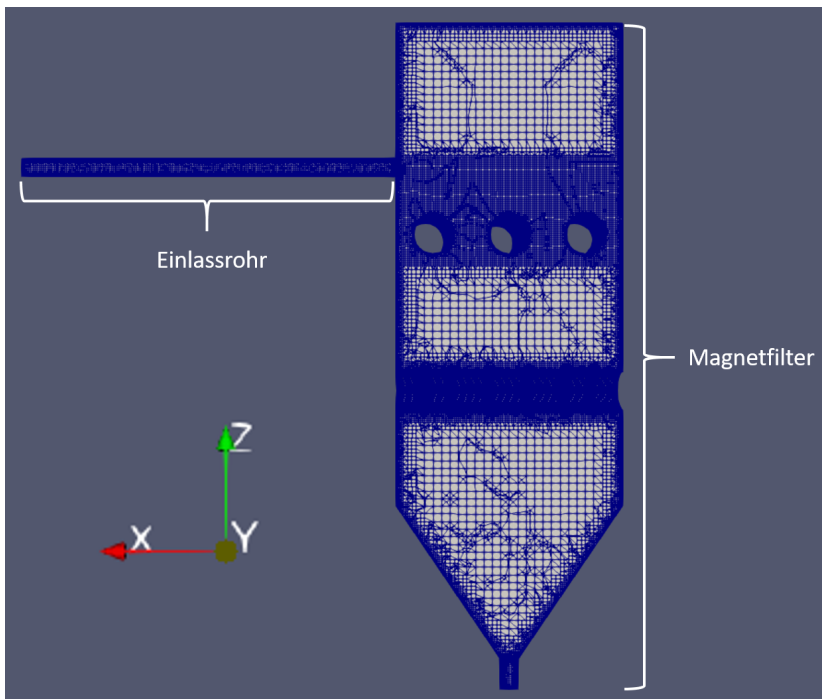


Abbildung 4.2: Paraview-Darstellung des Meshes (OpenFOAM)

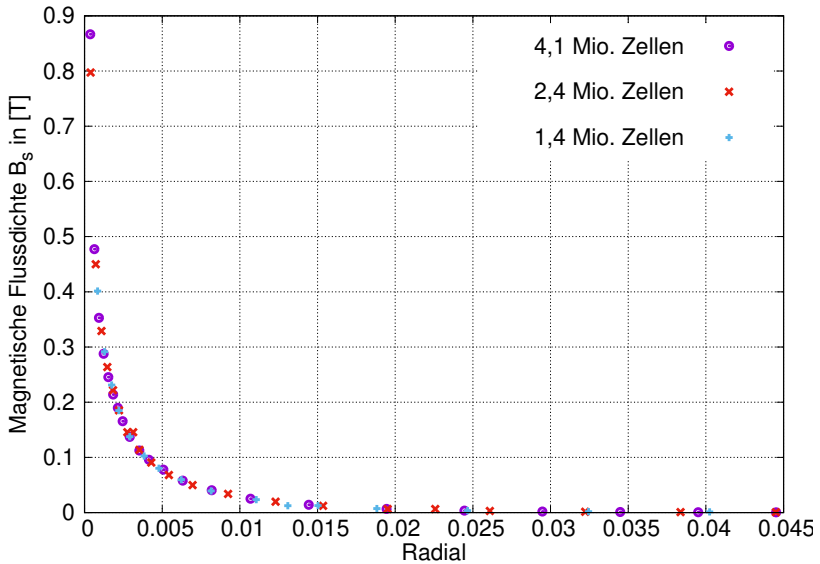


Abbildung 4.3: Ergebnis der Magnetfelduntersuchung, Messung an einem Magnetfeldmaximum mit zunehmendem Abstand, mit unterschiedlicher Anzahl von Zellen

4.1.3 MapFields

Das Strömungsfeld des Fluids und das Magnetfeld wurden unabhängig voneinander berechnet. Die Partikel werden von beiden Feldern beeinflusst. Die Felder hingegen werden von den Partikeln nicht beeinflusst. Es liegt also eine Ein-Ein-Wege-Kopplung vor.

Im Programm *OpenFOAM* bedeutet dies: Zuerst wird das Magnetfeld berechnet. Danach wird die Geometrie mit Hilfe der Funktion `mapFields` an die Berechnung der Strömung übergeben. Zudem werden die Informationen (Dateien) mit den berechneten Eigenschaften des Magnetfelds weiter an die Strömungsberechnung weitergegeben, beeinflussen diese Berechnung aber nicht. Im Anschluss wird die Strömung simuliert. Nun findet wieder ein Geometrieübertrag mittels `mapFields` statt. Diesmal wird das Ergebnis der eingelaufenen Strömung (Dateien) und die berechneten Dateien des Magnetfelds in die Partikesimulati-

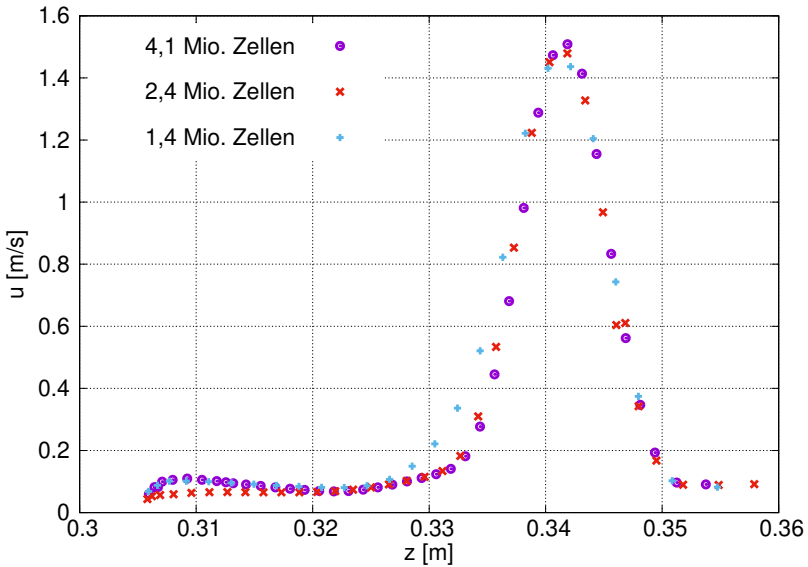


Abbildung 4.4: Ergebnis der Strömungssimulation mit unterschiedlicher Anzahl von Zellen

on übertragen. Bei der Partikelsimulation haben jetzt sowohl das Magnetfeld, als auch die Strömung Einfluss auf die Partikelbewegungen. [Ope15]

4.1.4 Generierung einer homogenen Suspension

Um eine homogene Suspension zu generieren, wurde ein CPP-Programm für die vorliegende numerische Untersuchung geschrieben. In *OpenFOAM* gibt es die Möglichkeit, Partikel an bestimmten Orten durch Angabe der Koordinaten einzufügen. Das CPP-Programm erzeugt eine *OpenFOAM*-Einlese-Datei mit einer bestimmten Partikelverteilung in einem bestimmten Bereich. Hierfür muss zu Beginn der Bereich, in dem die homogene Verteilung der Partikel generiert werden soll, die Dichte der Partikel und des Fluids, sowie der Feststoffanteil in der Suspension durch den Nutzer festgelegt werden. Das Programm berechnet danach die Koordinaten für die Partikel. Diese werden dann in die Datei „kinematicCloudPositionsStahl“ geschrieben und von *OpenFOAM* ein-

gelesen. [Ope15]

Das CPP-Programm ist Anhang C dargestellt.

4.1.5 Datenauswertung

PostProcessing

Die berechneten Daten des Magnetfelds und des Strömungsfelds wurden mit der Anwendung `postProcess` unter *OpenFOAM* analysiert. Mit diesem Verfahren können die berechneten Werte, z.B. entlang einer Schnittlinie, in einer separaten Textdatei ausgegeben werden. Dabei wird in einer Textdatei mit der Bezeichnung „sampleDict“ angegeben, welches Ausgabeformat zur Weiterverarbeitung benötigt wird, wo die Schnittlinie verläuft und welche Parameter (Geschwindigkeit, magnetische Flussdichte) ausgegeben werden. Die Graphen wurden im Anschluss mit *gnuplot* erstellt. [Ope15, gnu]

Abscheidegradbestimmung

Zur Auswertung des Abscheidegrads wurde ein CPP-Programm geschrieben, das einliest, wo sich welche Partikel in den einzelnen Berechnungsschritten befinden und berechnet daraus die Partikelanzahl, die sich innerhalb des Magnetfiltersystems befindet. Über dies kann dann bestimmt werden, wie hoch der Abscheidegrad ist. Dafür kann der zu betrachtende Rechenschritt mit den vorherigen verglichen werden. Bleibt dieser über eine festgelegte Zeit konstant, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Zustand der Partikel nicht mehr ändert, d.h. entweder haben die Partikel das System passiert oder sie sind durch das Magnetfeld angezogen worden und verlassen das Magnetfeld nicht mehr. Aus der Anfangskonzentration und dem Endzustand wird dann der Abscheidegrad berechnet.

Weiterhin kann dieses Programm die generierte Partikelgrößenverteilung ausgeben.

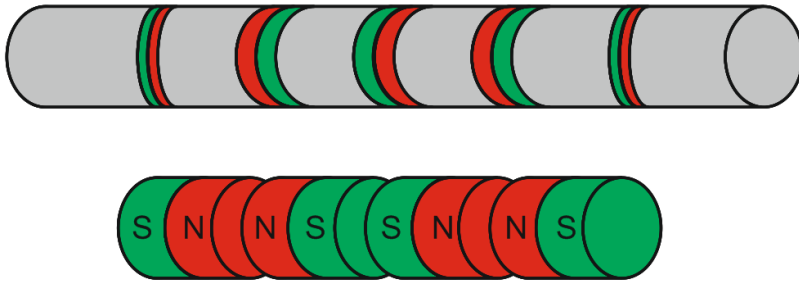


Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau der einzelnen Permanentmagneten innerhalb eines Magnetstabs; Oben: Numerische Simulation; Unten: Realität

Visualisierung

Zur Visualisierung der Ergebnisse wurde das Open-Source-Programm *paraview* verwendet. Dieses basiert auf einer VTK-Visualisierungsbibliothek. [par]

4.2 Magnetfeld

MagneticFoam wurde als solver für die Berechnung des Magnetfelds verwendet.

4.2.1 Aufbau der Magnetstäbe

In Abbildung 4.5 (unten) ist der schematische Aufbau eines einzelnen Magnetstabs abgebildet. Bei Betrachtung eines einzelnen Magnetstabs in einem Hüllrohr besteht dieser Magnetstab aus einer Ummantelung einzelner Permanentmagneten. Die Permanentmagneten sind so in dem Magnetstab angeordnet, dass sie sich gleichpolig gegenüber stehen. Durch diese Anordnung entsteht dort eine große magnetische Flussdichte, wo zwei Permanentmagneten aufeinander treffen. Für die Simulation sollte diese Anordnung auch so nachgebildet werden.

Zur Berechnung des Magnetfelds ist der Raum zwischen den einzelnen Perma-

nentmagneten dringend notwendig. Bei der Berechnung des Strömungsfelds und der Partikelsimulation darf kein Zwischenraum sein, da dort die Strömung durchfließen würde. Dieser Durchfluss würde wiederum das Strömungsfeld im Umkreis der Zwischenräume stark beeinflussen. Auch die Partikel hätten in der Simulation sonst die Möglichkeit durch diese Zwischenräume zu passieren, wenn kein Magnetfeld angelegt wäre. All dies entspräche nicht den realen Bedingungen und würde die Simulation stark verfälschen.

Eine Lösung wäre `mapFields` gewesen. Mit `mapFields` wird die Geometrie mit dem berechneten Magnetfeld an die Berechnung der Strömung übergeben (siehe Kapitel 4.1.1). In *OpenFOAM version 2.4.0* gibt es die Funktion „`cuttingPatches`“, mit der die Berechnung eines Felds mit einer Geometrie aus einer Quelldatei in eine Zieldatei übergeben werden kann und dabei diese Geometrie verkleinern kann [Ope15]. Durch Anwendung dieser Funktion wäre zwar eine Geometrieänderung in dem hier verwendeten Fall möglich gewesen, doch es würde nicht das berechnete Magnetfeld mit übergeben.

Wird das Verhalten der einzelnen Partikel während des Separationsvorgangs beobachtet, kann festgestellt werden, dass die meisten Partikel dort angezogen werden, wo zwei einzelne Permanentmagneten sich gleichpolig gegenüber stehen und die magnetische Flussdichte am größten ist. Abbildung 4.6 zeigt die Verteilung der Partikel nach einem Separationsvorgang. Auch hier ist wieder deutlich zu sehen, dass sich die Partikel dort ansammeln, wo die magnetische Flussdichte am größten ist. In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass die meisten Partikel angezogen werden, wenn sie nah genug an die Magnetfeldmaxima herankommen. Ob ein Partikel nun separiert wird, hängt hauptsächlich davon ab, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass dieser Fall eintritt. Die Separation zwischen diesen Maxima kann also vernachlässigt werden.

In der Simulation wurden also nur die Stellen mit einem Magnetfeld simuliert, wo die magnetische Flussdichte ein Maximum hat. Die schematische Darstellung der Anordnung der einzelnen Magnete wird in Abbildung 4.5 gezeigt. Bei den Magnetstäben aus den Experimenten stehen den äußeren Magneten kein Permanentmagnet mehr gleichpolig gegenüber, dadurch ist die magnetische Flussdichte hier nur halb so groß als bei den mittleren Maxima (siehe Kapitel 3.1.3). Dies bewirkt, dass die Kraft, die auf ein Partikel wirkt, an den äußeren Maxima nur halb so stark ist. Die äußeren Magneten in der Simulation sind nur halb so groß (siehe Abbildung 4.5, oben), da die Kraft, die auf ein Partikel wirkt, proportional zur Fläche des anziehenden Magnets ist.

Für die Berechnung des Magnetfelds wurde die Anwendung „`magneticFoam`“ benutzt. Diese Anwendung berechnet das magnetische Skalarpotential ψ , mit

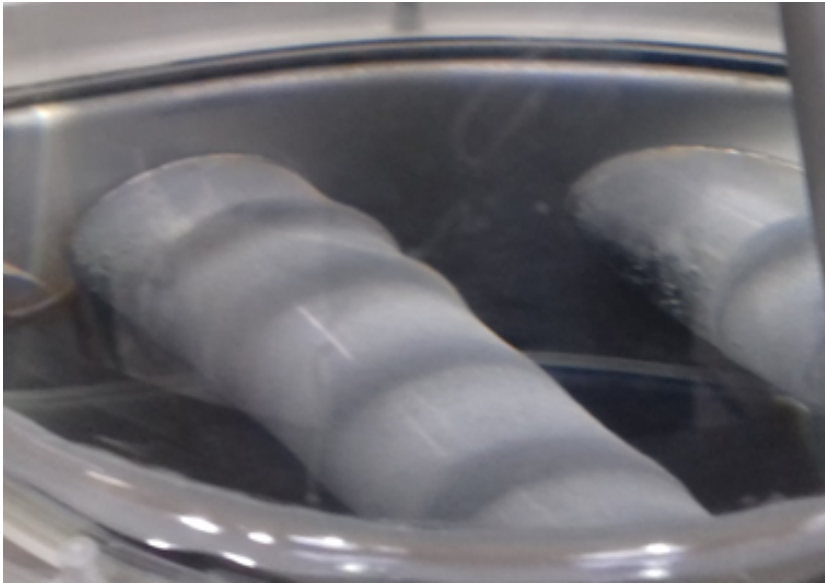


Abbildung 4.6: Ringförmige Ansammlung der Edelstahlpartikel an den Magnetfeldmaxima der Magnetstabhüllrohre mit Magnetrosten und darin steckenden Magnetstäben

den in Gleichung 2.12 beschriebenen Differentialgleichungen. Mit diesem Skalarpotential kann dann die magnetische Feldstärke und die magnetische Flussdichte bestimmt werden.

4.2.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die aus den Simulationen stammenden Werte der magnetischen Flussdichte mit den experimentell bestimmten Werten (siehe Kapitel 3.1) verglichen.

In Abbildung 4.7 wird der Betrag des senkrechten Anteils der magnetischen Flussdichte entlang des Magnetstabs dargestellt. Dabei stellt der rote Graph das Ergebnis der numerischen Untersuchung entlang des mittleren, unteren Magnetstabs in einem Abstand von 0.5mm dar und der blaue Graph die seitliche Messung am mittleren Magnetstabgehäuse.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Maxima und Minima bei beiden Untersuchungen an den selben Stellen sind.

Bei Betrachtung des Verlaufs der Graphen unterscheiden diese sich um bis zu 95%. Der Grund für diese Abweichungen liegt an der unterschiedlichen Anordnung der einzelnen Permanentmagneten, siehe Abbildung 4.5. Diese erheblichen Abweichungen sind aber nicht relevant, da sie zwischen den Maxima auftreten. Die in dieser Arbeit angenommene Theorie (siehe 4.2.1) besagt nämlich, dass eine Abscheidung der Partikel hauptsächlich von den Magnetfeldmaxima abhängt.

So ist für die Vergleichbarkeit die Höhe der Maxima ausschlaggebend. Die Abweichungen bei den mittleren vier Maxima betragen maximal 10%. Bei dem äußeren, linken Peak ist die Abweichung unter 1%. Die unterschiedlichen Abweichungen bei den inneren vier Maxima liegen daran, dass die Magnetstäbe bei der experimentellen Untersuchung nicht gerade in den Magnetstähbehüllrohren lagen.

Die äußeren Peaks der Simulation sind ungefähr doppelt so groß als die der Messung. Das Fehlen eines weiteren Permanentmagnets in der Anordnung der Permanentmagneten (siehe Abbildung 4.5) ist der Grund, wieso die magnetische Flussdichte bei den Messungen hier um die Hälfte kleiner ist. Entscheidend für die Simulation ist, dass die magnetische Kraft, die auf ein zu separierendes Partikel wirkt, bei den äußeren Magnetfeldmaxima halb so groß ist. Die magnetische Kraft, die auf ein Partikel wirkt, ist proportional zur Fläche des anziehenden Magnets (siehe Gleichung 2.13). In der Simulation beträgt die Fläche der äußeren Magneten nur die Hälfte der Inneren. Das bedeutet, dass die Kraft, die auf die Partikel wirkt, in Simulation und Experiment ungefähr den gleichen Wert hat.

In Abbildung 4.8 ist der senkrechte Anteil der magnetischen Flussdichte an einem Magnetfeldmaximum mit zunehmendem Abstand dargestellt. Dabei ist der rote Graph wieder das Ergebnis der Simulation und der blaue Graph das der experimentellen Untersuchung.

Sowohl bei der numerischen als auch bei der experimentellen Untersuchung nimmt die magnetische Flussdichte mit zunehmendem Abstand ab. Im Falle der numerischen Untersuchung ist die magnetische Flussdichte zu Beginn höher als die der Messung. Die Abweichung beträgt 38%. Der Grund für diese Abweichung kommt durch die im Experiment bedingte Lage der Hallsonde, sodass die magnetische Flussdichte nicht direkt auf dem Magnetstahgehäuse gemessen werden kann.

Der Abfall der magnetischen Flussdichte ist in der numerischen Untersuchung

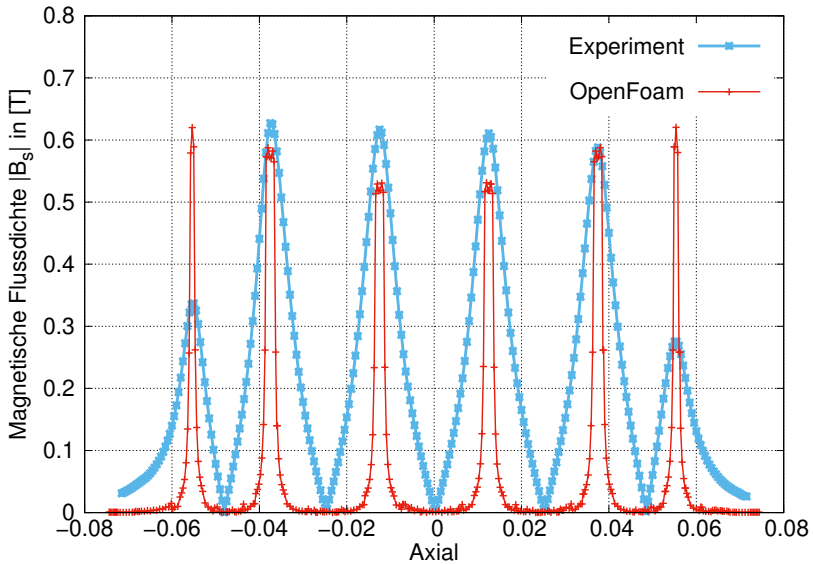


Abbildung 4.7: Beitrag des senkrechten Anteils der magnetischen Flussdichte entlang des Magnetstabs; Rot: Ergebnis der numerischen Untersuchung des mittleren, unteren Magnetstabs in einem Abstand von 0.5 mm, Blau: Messung des Magnetfelds des mittleren Magnetstabsgehäuses

deutlich stärker als bei der Messung. Hier beträgt die maximale Abweichung bis zu 60%. Die Ursache hierfür liegt wieder an dem unterschiedlichen Aufbau der Magnetstäbe mit ihren einzelnen Permanentmagneten, siehe Abbildung 4.5.

Bei dem äußersten Messpunkt beträgt die Abweichung noch 25%.

Diese relativ hohen Abweichungen bei dem Vergleich der experimentellen mit den numerischen Daten liegen, wie schon erwähnt, an dem unterschiedlichen Aufbau der einzelnen Permanentmagneten. Eine Änderung bei der numerischen Untersuchung ist nicht sinnvoll, da solche Zwischenräume zwischen den einzelnen Permanentmagneten benötigt werden. Die Zwischenräume hätten aber einen negativen Einfluss bei der Strömungs- und Partikelsimulation. Durch Variation bei der Einstellung des Magnetfelds ist zwar die Möglichkeit gegeben einzelne Abweichungen in den betrachteten Diagrammen zu minimieren, es

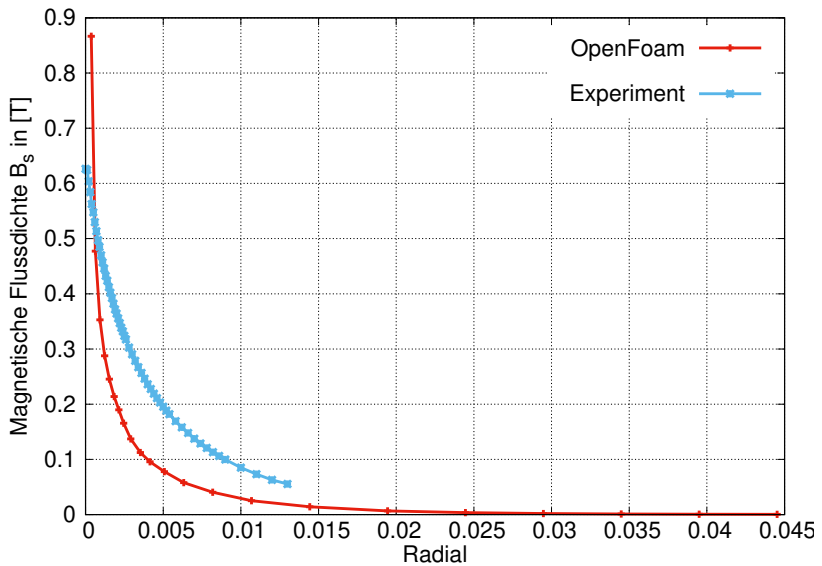


Abbildung 4.8: Senkrechter Anteil der magnetischen Flussdichte an einem Magnetfeldmaximum mit zunehmendem Abstand; Rot: Ergebnis der numerischen Untersuchung des mittleren, unteren Magnetstabs, Blau: Messung des Magnetfelds am mittleren Magnetstabgehäuse

hat aber den Effekt, dass sich an anderen Stellen die Abweichungen vergrößert hätten.

4.3 Strömung

Die Strömung wurde mit dem simple-solver berechnet. Zur Turbulenzmodellierung wurde das $k\omega$ -SST-Modell ($k\omega$ -Shear-Stress-Modell) verwendet. Eine Erläuterung des Modells ist in Kapitel 2.7.3 zu finden.

Mit

$$k = \frac{3}{2}(I|u_{ref}|)^2 \quad (4.1)$$

u_{ref}	L	k	ω
$1,2 \frac{m}{s}$	$12,7 \text{ mm}$	$1,2$	970

Tabelle 4.3: Parameter der Strömungsberechnung

und

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{C_\mu L} \quad (4.2)$$

wurden die turbulente kinematische Energie k und die turbulente spezifische Dissipation ω berechnet. Dabei ist I die Intensität ($I = 0,05$) und C_μ eine Konstante ($C_\mu = 0,09$).

Als Referenzlänge L wurde der Durchmesser des Einlassrohrs verwendet und die Referenzgeschwindigkeit u_{ref} . Letztere wurde über den Volumenstrom aus den Experimenten (siehe Kapitel 3.2.3) und dem Durchmesser des Einlassrohrs bestimmt. In Tabelle 4.3 sind die Werte der Parameter angegeben.

4.3.1 Ergebnisse

In Abbildung 4.9 ist das Ergebnis der numerischen Berechnung der eingelaufenen Strömung innerhalb des Magnetfiltersystems abgebildet. Das Resultat bestätigt die strömungsmechanischen Erwartungen, was im Folgenden genauer erläutert wird.

In der schwarzen Box am Ende des Einlassrohrs ist eine eingelaufene turbulente Rohrströmung zu sehen. Für die Reynoldszahl Re_τ mit entdimensionierten Variablen gilt

$$Re_\tau = \frac{u_\tau r}{\nu}, \quad (4.3)$$

wobei r der Rohrradius ist. Mit den Gleichungen 2.24, 2.25 und 2.26 ergibt sich für die Wandschubspannung $\tau = 5,043 \frac{N}{m^2}$ und für die Reynoldszahl Re_τ mit entdimensionierten Variablen

$$\tau = 5,043 \frac{N}{m^2} \text{ und } Re_\tau = 425. \quad (4.4)$$

In Abbildung 4.10 wird das Ergebnis der für diese Arbeit angefertigten Strömungssimulation mit DNS-Daten und Daten aus den Experimenten verglichen.

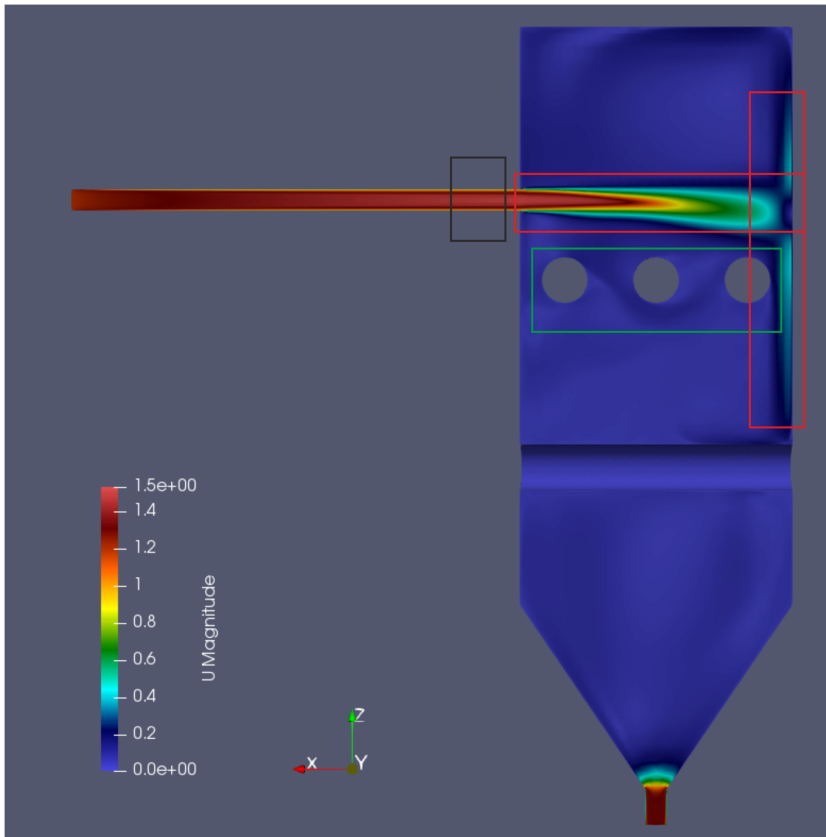


Abbildung 4.9: Einlaufende Strömung in das Magnetfiltersystem; Schwarze Box: Eingelaufene Rohrströmung; Rote Box: Prallstrahl; Grüne Box: Kriechströmung

Hierbei wurden die entdimensionalisierten Variablen u^+ logarithmisch über y^+ aufgetragen (siehe Kapitel 2.4.3).

Bei den DNS-Daten handelt es sich um eine numerische Simulation, bei der alle Verwirbelungen/Turbulenzen exakt aufgelöst werden. Die hier verwendeten Daten stammen aus folgender Quelle [Cen] und gelten für eine Reynoldszahl von $Re_\tau = 360$. Die experimentellen Daten stammen aus der Quelle [UPM] und wurden für $Re_\tau = 442$ bestimmt.

Bei allen drei Graphen sind die drei Bereiche des turbulenten Grenzschichtprofils zu erkennen. In dem Bereich von $\log y^+ = 0.01$ bis $\log y^+ = 5$ liegt die viskose Unterschicht. Danach bis zu $\log y^+ = 30$ folgt der Übergangsbereich. In dem Bereich größer als $\log y^+ = 30$ liegt der logarithmische Bereich.

In der viskosen Unterschicht weichen die experimentellen Daten und die in dieser Arbeit bestimmten Daten von den DNS Daten bis zu 75% ab. Dies liegt an dem kleinen Skalenbereich, die absolute Messabweichungen liegen in diesem Bereich unter 1. In dem Übergangsbereich weichen die experimentellen Daten unter 5% von den DNS Daten ab und die in dieser Arbeit bestimmten Daten um 15% von den DNS Daten. Im logarithmischen Bereich weichen die in dieser Arbeit berechneten Daten nur noch 5% von den beiden anderen Datensätzen ab. Insgesamt liegt die absolute Messabweichung bei maximal 1. Diese Abweichungen sind für die in dieser Arbeit verwendete Turbulenzmodellierung sehr gut.

In der roten Box in Abbildung 4.9 ist eine Prallströmung zu sehen. In der Literatur gibt es viele Beschreibungen einer Prallströmung, wobei das einfließende Fluid hier auf ein ruhendes Fluid trifft (siehe Kapitel 2.4.4). In dem hier vorliegenden Fall gibt es aber eine Strömung nach unten (in z-Richtung). Dadurch wird die Strömung des Prallstrahls beeinflusst.

In Abbildung 4.11 ist das Ergebnis der Geschwindigkeitsmessungen entlang der z-Achse innerhalb des Magnetfiltersystems in unterschiedlichen Abständen zum Einlass abgebildet. Die rote Linie mit den Kreuzen befindet sich hierbei mit einem Abstand von $0,04m$ am nächsten zur Einlassöffnung. Die blaue Linie zeigt das Ergebnis der Messung in der Mitte des Freistrahls bei einem Abstand von $0,0745m$ zum Einlass. Der rosa Graph ist die Messung mit der größten Entfernung zur Einlassöffnung.

Bei einem Freistrahle würde ohne eine äußere Strömung in z-Richtung eine mit zunehmendem Abstand vom Einlass breiter werdende Normalverteilung mit positionsstarreren Maxima erwartet werden. Das Breiterwerden der Verteilung und die Abnahme der Höhe der Peaks ist auch in den hier abgebildeten Messungen deutlich zu erkennen.

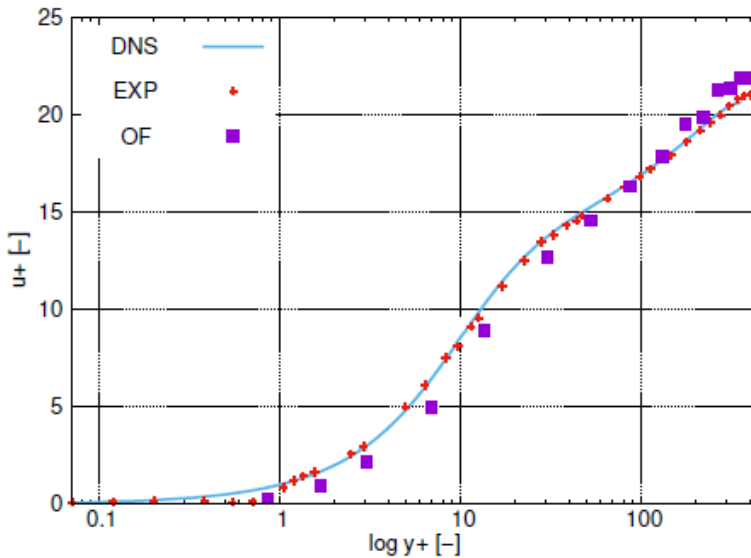


Abbildung 4.10: Eingelaufene Rohrströmung: Experimentell (EXP); DNS-Daten (DNS); Eigene Berechnung mit *OpenFOAM* (OF)

Aber zudem ist auch der Einfluss der äußeren Strömung in z -Richtung zu sehen. So sind die Verteilungskurven gegen die Strömungsrichtung verkürzt und mit der Strömungsrichtung verlängert. Auch die Höhepunkte der Graphen verschieben sich mit zunehmendem Abstand vom Einlass in Strömungsrichtung. Dies zeigt, dass die äußere Strömung in z -Richtung mit zunehmendem Abstand zum Einlass einen immer größeren Einfluss auf die Strömung des Freistrahls hat.

In Abbildung 4.12 ist schematisch dargestellt, welchen Einfluss die Strömung in z -Richtung auf den Freistrahler der Prallströmung hat. So ist zu sehen, dass die Wirbel, durch die das äußere Fluid in das innere eingesaugt wird, nicht genau senkrecht verlaufen. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Einfluss der äußeren Strömung in z -Richtung mit zunehmendem Abstand steigt. Dies liegt daran, dass direkt am Einlass die Strömungsgeschwindigkeiten des Freistrahls gebündelter und größer sind. Mit zunehmendem Abstand wird der Freistrahler breiter und die Strömungsmaxima kleiner, sodass die äußere Strömung in z -

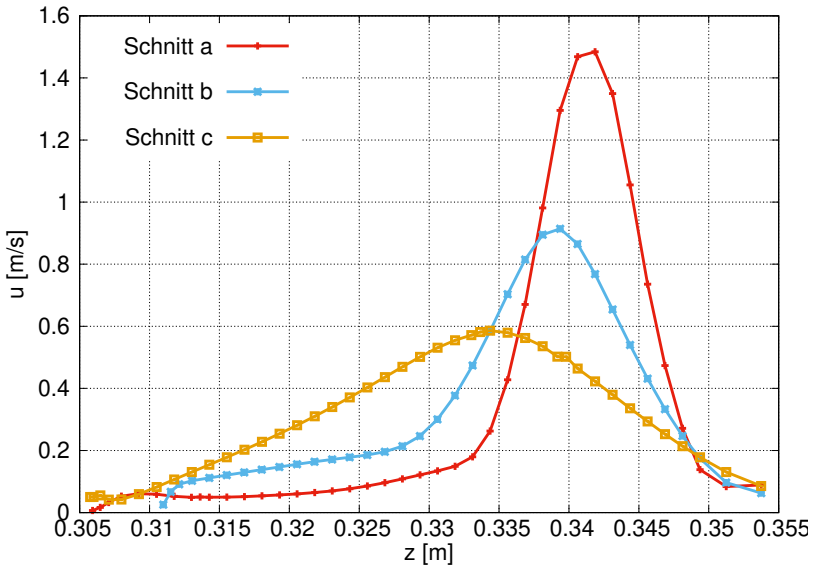


Abbildung 4.11: Numerisches Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung in z-Richtung mit unterschiedlichen Abständen zur Einlassöffnung des Freistrahls: $a=0.04$ m, $b=0.0745$ m und $c=0.1145$ m

Richtung mehr Einfluss auf den Verlauf des Freistrahls hat.

In Abbildungen 4.13 und 4.14 sind nun die Geschwindigkeitsverläufe entlang des Freistrahls abgebildet. Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeit entlang der x-Achse (in Abbildung 4.12 gekennzeichnet durch Schnitt 1), in Abbildung 4.14 ist der Verlauf entlang der Geschwindigkeitsmaxima dargestellt (in Abbildung 4.12 gekennzeichnet durch Schnitt 2). Der Nullpunkt der x-Achse wurde bei den abgebildeten Messungen auf die Einlassöffnung gelegt. Die gemessenen Werte sind rot gekennzeichnet und die theoretisch zu erwartenden Werte sind in blau unterlegt, wobei diese für einen Freistrahls ohne äußere Strömung in z-Richtung gelten.

Es ist zu sehen, dass im Bereich des Kernstrahls die Ergebnisse gut übereinstimmen. Das liegt daran, dass die Kräfte des Freistrahls in diesem Bereich deutlich größer sind als die der äußeren Strömung. Im weiteren Verlauf weist

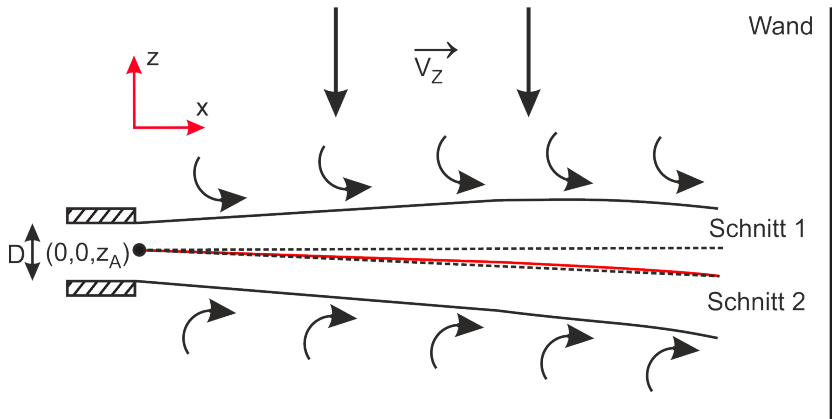


Abbildung 4.12: Graphische Darstellung des Einflusses der äußeren Strömung $-v_z$ im Magnetfilter auf die Ausbreitung des Freistrahls

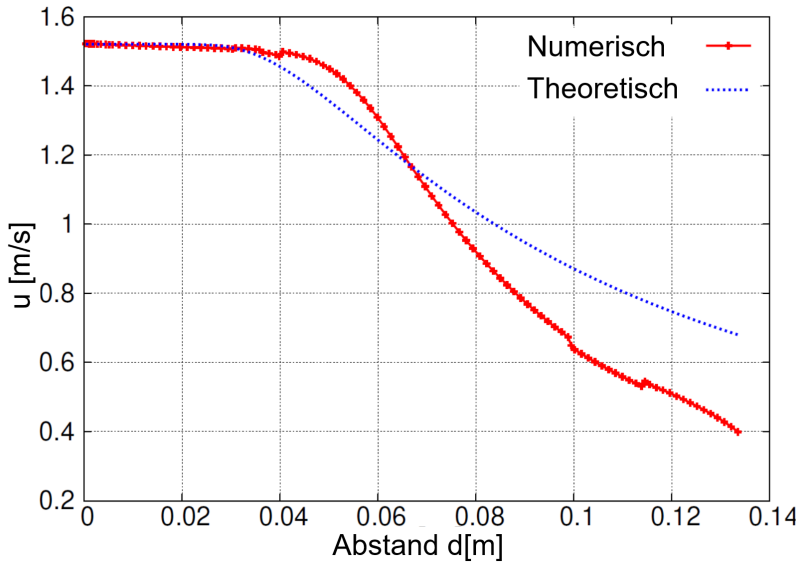


Abbildung 4.13: Numerisches und theoretisches Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung in x-Richtung entlang der z-Achse

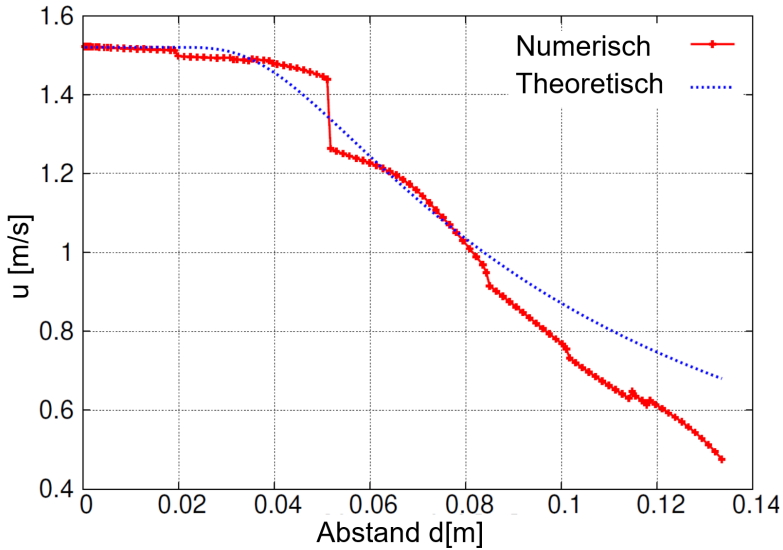


Abbildung 4.14: Numerisches und theoretisches Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung in x-Richtung entlang des Strahlmittelpunkts

das theoretische Ergebnis eine immer größere Geschwindigkeit als das numerische Ergebnis auf. Dies liegt daran, dass der Einfluss der Kräfte der äußeren Strömung immer größer wird.

Die Abweichungen in den Graphen der numerischen Lösungen in den Bereichen von $0,023m$ bis $0,045m$ und $0,0998m$ bis $0,115m$ liegen an den darunter befindlichen Magnetrosten. Dort, wo sich die Magnetstäbe befinden, verlangsamt sich die Strömung in z-Richtung, d.h. der Einfluss der äußeren Strömung wird kleiner, da diese durch die darunter befindlichen Magnetrostbe abgebrems wird. In den Zwischenbereichen ist es umgekehrt.

Werden die Graphen aus Abbildungen 4.13 und 4.14 miteinander verglichen, ist festzustellen, dass der rechte Graph eine bessere Übereinstimmung mit der theoretischen Lösung aufweist. Dies liegt daran, dass dieser entlang der Geschwindigkeitsmaxima verläuft. Die Verschiebung der Geschwindigkeitsmaxima in die negative z-Richtung liegt an der äußeren Strömung $-v_z$ im Magnetfiltersystem. Dies ist graphisch in Abbildung 4.12 dargestellt. Dort ist

zu sehen, dass sich die Geschwindigkeitsmaxima in die negative z -Achse verschieben, d.h. der strömungsmechanische Mittelpunkt des Strahls ist in diesem Fall nicht identisch mit dem geometrischen Mittelpunkt des Strahls.

In Abbildung 4.15 ist das Ergebnis der numerischen Untersuchung des Wandstrahls abgebildet. Dabei wurde die Geschwindigkeit in dem Bereich der z -Achse aufgetragen, wo der Freistrah auf die Wand des Magnetfiltersystems trifft. Der rote Graph zeigt dabei das Ergebnis bei einem Wandabstand von $0,0005m$ und der blaue das Ergebnis bei einem Abstand von $0,0045m$.

Gut zu erkennen ist der Staupunkt. Hier ist die Geschwindigkeit, wie erwartet, gleich Null. Der Staupunkt liegt hier nicht senkrecht gegenüber des Einlassmittelpunkts. Der Grund dafür ist wieder die äußere Strömung in z -Richtung. Das obere Maximum ist ungefähr $1,96D$ (D : Durchmesser Rohr) vom Staupunkt entfernt und das untere ungefähr $2,4D$.

Werden also die numerischen Daten mit den theoretischen Daten der Prallströmung verglichen, passen diese sehr gut zusammen. Die Simulation erfasst alle drei wichtigen Bereiche: Den Freistrah, den Staustrahl und den Wandstrahl, sowie deren Hauptmerkmale. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen lassen sich darin begründen, dass hier der Strahl nicht auf ein ruhendes Fluid trifft, sondern in ein in z -Richtung bewegtes Fluid und darin, dass der Strahl nicht in einen hohlen Raum trifft, sondern dass sich im Bereich unterhalb des Strahls ein Magnetrost befindet.

4.4 Partikelsimulation

4.4.1 Vorarbeiten für die Partikelsimulation

Partikelgrößenverteilung

Um die Partikelgrößenverteilung zu generieren, wurde die Rossin-Rammler-Verteilung verwendet. Diese basiert auf der Weibull-Verteilung (siehe Kapitel 2.10.1).

Um die passenden Parameter zu bestimmen, wurde die Weibull-Funktion an die Partikelgrößenverteilungsangaben des Herstellers der im Experiment ver-

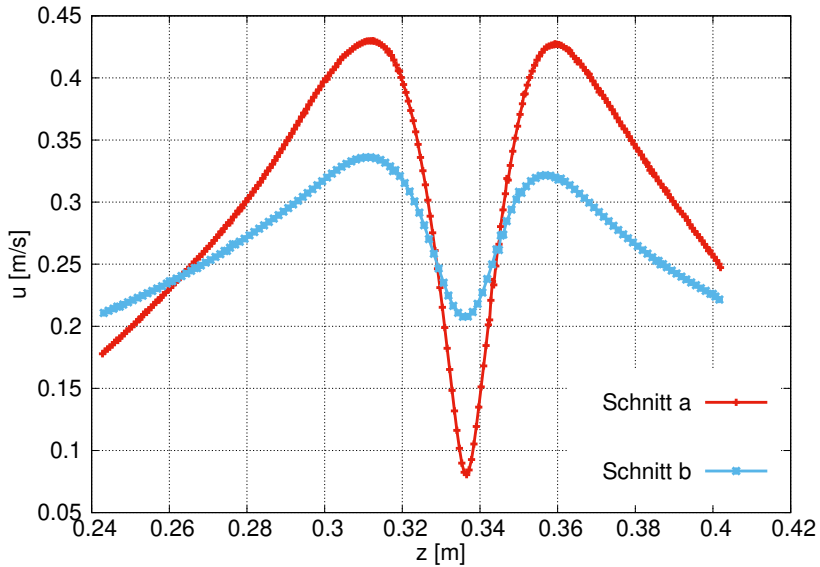


Abbildung 4.15: Numerisches Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung in z -Richtung mit unterschiedlichen Wandabständen des Wandstrahls: $a=0.0005$ m und $b=0.0045$ m

wendeten Partikel interpoliert. Die Interpolationsparameter (Formparameter) sind λ und k . Es ergaben sich folgende Werte

$$\lambda = 12020,9 \pm 67,03 \text{ (0.5576\%)} \quad (4.5)$$

und

$$k = 1,31466 \pm 0,01221 \text{ (0.9284\%)}. \quad (4.6)$$

In Abbildung 4.16 stellt der obere Graph die Partikelgrößenverteilung dar, während der rote Graph die Verteilungsangaben des Herstellers der in den Experimenten verwendeten Partikel abbildet. Der blaue Graph ist das Ergebnis der Interpolation mit den oben angegebenen Parametern.

In *OpenFOAM* gibt es bei dem Rossin-Rammler-Modell vier Parameter, die eingegeben werden können. Diese sind der Minimalwert *minValue*, der Maximalwert *maxValue*, der Durchmesser d , der am wahrscheinlichsten ist, und

n . Der Parameter n entspricht hierbei dem Formparameter k der Weibull-Verteilung aus Kapitel 2.10.1. Der inverse Skalenparameter ist durch

$$\lambda = \frac{\maxValue - \minValue}{d} \quad (4.7)$$

gegeben.

Zur Simulation der Partikelgröße wurden zwei Möglichkeiten getestet, um die Parameter \minValue , \maxValue und d zu variieren. Zum einen wurden \minValue und \maxValue festgelegt und der Parameter d wurde mit der Gleichung 4.7 berechnet. Dies ergab folgende Werte

$$\minValue = 10^{-5}, \maxValue = 4 \cdot 10^{-4} \text{ und } d = 3 \cdot 10^{-8}. \quad (4.8)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.16 unten durch die blau gestrichelte Linie dargestellt.

Bei der zweiten Möglichkeit wurden \minValue sowie d bestimmt und \maxValue berechnet. Dies ergab folgende Werte

$$\minValue = 5 \cdot 10^{-6}, \maxValue = 1 \text{ und } d = 1 \cdot 10^{-4}. \quad (4.9)$$

Das Ergebnis ist ebenfalls in Abbildung 4.16 unten durch die pink gestrichelte Linie dargestellt.

In Abbildung 4.16 unten ist der rote Graph wieder die Partikelgrößenverteilung der Herstellerangaben, die bei den Experimenten verwendet wurde.

Beide Ergebnisse der simulierten Partikelgrößenverteilung weichen erheblich von der realen Partikelgrößenverteilung ab. Dies liegt hauptsächlich an der verhältnismäßig kleinen Anzahl an Partikeln in der Simulation. Die Partikelgrößenverteilung, die mit den Werten aus Gleichung 4.9 simuliert wurde, erfasst jedoch den gesamten Partikelgrößenbereich der Partikel. Für die Abscheidegradbestimmung wurde diese Einstellung verwendet.

Nachweis Abscheidegradbestimmung

Um nachzuweisen, dass das in dieser Arbeit entwickelte CPP-Programm auch den tatsächlichen Abscheidegrad berechnet, wurde eine Simulation mit Partikeln gleichen Durchmessers durchgeführt. Es ist zu beachten, dass der Abscheidegrad, der über die Anzahl der Partikel bestimmt wurde, in diesem Fall

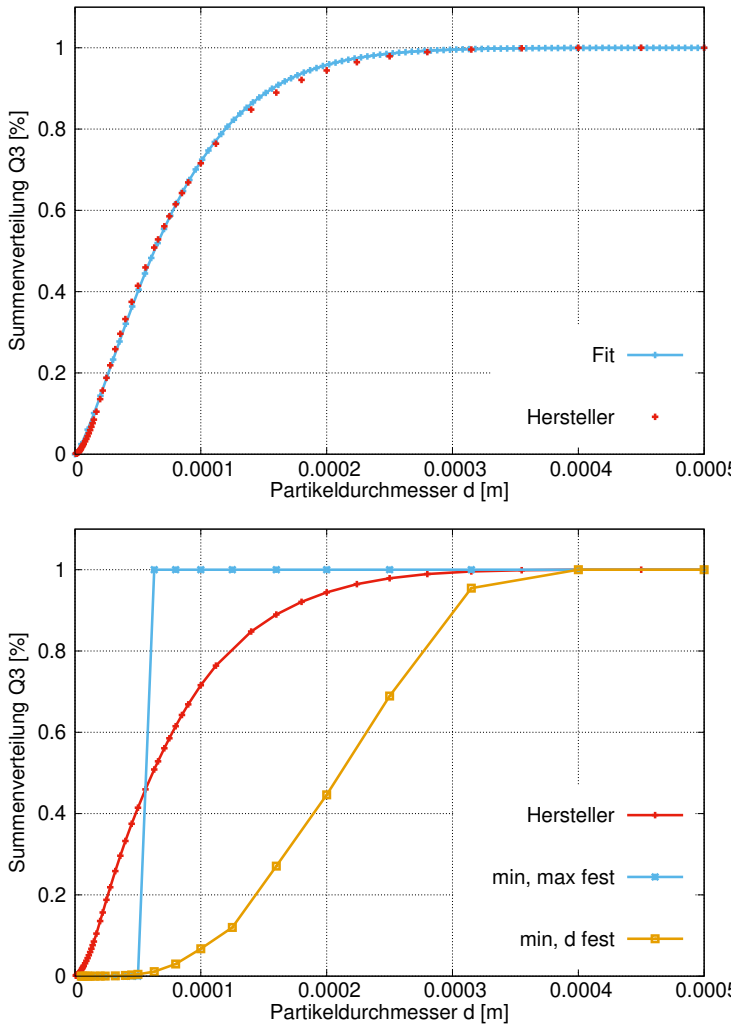


Abbildung 4.16: Kumulative Partikelgrößenverteilungen; Oben: Rot: Herstellerangaben der bei den Experimenten verwendeten Partikel; Blau: Interpolierte Weibull-Verteilungsfunktion; Unten: Rot: Herstellerangaben der bei den Experimenten verwendeten Partikel; Blau: Simulation mit berechnetem Parameter d ; Gelb: Simulation mit berechnetem Parameter $maxValue$

identisch zu dem ist, der über das Volumen bestimmt wird. Dieser Test wurde mit zwei unterschiedlichen Partikeldurchmessern ($100\mu\text{m}$ und $150\mu\text{m}$) durchgeführt.

Verwendete Parameter

Auf die Partikel wirken unterschiedliche Kräfte. In der Simulation gibt es die Möglichkeit die Stärke dieser Kräfte zu variieren.

So wirkt auf die Partikel die Erdanziehung \vec{g} . Diese wurde in der Simulation auf

$$\vec{g} = (0, 0, 9.81)^T \quad (4.10)$$

gesetzt.

Zudem können die magnetischen Eigenschaften der Partikel festgelegt werden. Damit ist es möglich zu variieren, wie abstoßend oder anziehend und wie stark das Magnetfeld auf die Partikel wirkt. Die magnetische Permeabilität wurde mit den Angaben aus [Bra17] auf

$$\mu_r = 1,61 \quad (4.11)$$

eingestellt.

Des Weiteren konnte den Partikeln eine Startgeschwindigkeit und damit ein Impuls vorgegeben werden. Hierbei wurde im Einlassrohr eine mittlere Geschwindigkeit von

$$\vec{u}_p = (-1.2, 0, 0)^T \quad (4.12)$$

angesetzt.

4.4.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Partikelsimulation vorgestellt. Es wurden drei unterschiedliche Simulationen getestet. Dabei variierte das Magnetfeld, wie bei der experimentellen Untersuchung. In Abbildung 4.1 ist rechts das in der Simulation verwendete Magnetfiltersystem dargestellt. Wie bei den Experimenten werden die oberen drei Magnetstäbe als oberer Magnetrost und die unteren drei Magnetstäbe als unterer Magnetrost bezeichnet. Die folgenden Abbildungen zeigen die durchgeführten Simulationen. Zur besse-

ren Unterscheidung der Simulationen werden diese Bezeichnungen eingeführt:

Beide: Bei beiden Magnetrosten ist ein Magnetfeld eingeschaltet.

Unten: Magnetfeld ist nur unten simuliert.

Oben: Magnetfeld ist oben am Magnetrost vorhanden.

Partikelinjektion

In Abbildung 4.17 wird das Ergebnis gezeigt, wie die Partikel zu Beginn der Simulation verteilt sind. Dabei ist eine schräge Draufsicht auf das Einlassrohr dargestellt. Das Magnetfiltersystem ist durchsichtig dargestellt, sodass die Partikel zu sehen sind. Es wurden insgesamt 432 Partikel injiziert. Die unterschiedlichen Durchmesser der Partikel sind zum einen durch ihre Größe dargestellt, zum anderen durch verschiedene Farben.

Wie in Kapitel 4.4.1 schon beschrieben variieren die Partikeldurchmesser zwischen $5\mu\text{m}$ bis $360\mu\text{m}$. Im Folgenden werden Partikel als klein bezeichnet, die einen Partikeldurchmesser von kleiner als $100\mu\text{m}$ besitzen, und als groß Partikel, die einen Partikeldurchmesser größer als $300\mu\text{m}$ haben.

Für die Partikelpositionen wurde ein CPP-Programm, das für die vorliegende Arbeit entwickelt wurde, verwendet (siehe Kapitel 4.1.4). Die Partikelgrößenverteilung wurde mit der Rosin-Rammler-Verteilung erstellt (siehe Kapitel 4.4.1).

In Abbildung 4.17 ist nun zu sehen, dass die Partikel homogen in dem vorgegebenen Bereich verteilt sind und auch die Partikel mit unterschiedlichen Größen sind gleichmäßig verteilt.

Einströmverhalten

In Abbildung 4.18 ist das Einströmverhalten der Partikel dargestellt. Von oben nach unten werden hier die Berechnungsschritte 1, 3, 5 und 8 gezeigt. Die Bilder auf der linken Seite zeigen das Verhalten der Partikel, wenn ihnen keine Startgeschwindigkeit gegeben wird, d.h.

$$u_p = (0,0,0)^T. \quad (4.13)$$

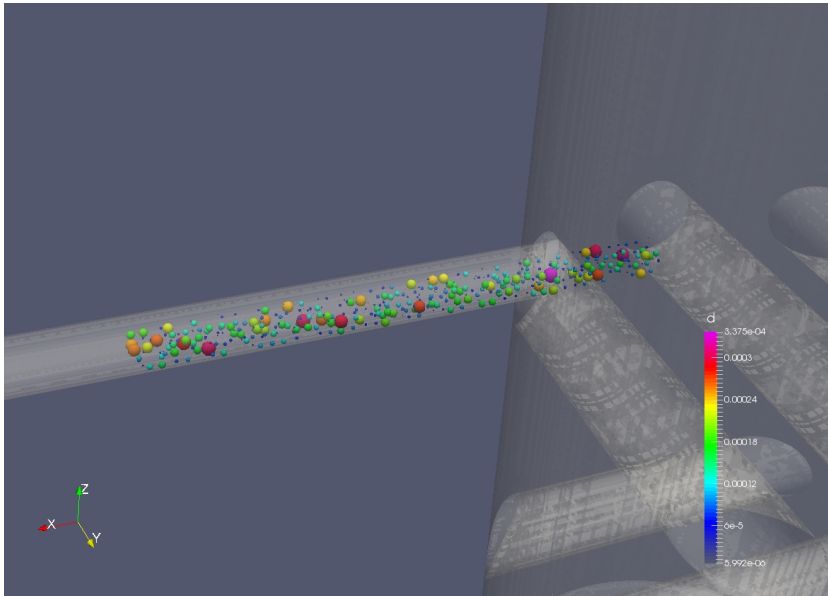


Abbildung 4.17: Partikelinjektion bei Berechnungsschritt 1, Simulation „Oben“

Bei den Bildern auf der rechten Seite ist die Partikelgeschwindigkeit durch

$$u_p = (-1.2, 0, 0)^T \quad (4.14)$$

gegeben.

In jedem Bild ist die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids durch Abstufungen zwischen weiß, grau und schwarz abgebildet. Die verschiedenen Partikeldurchmesser sind durch variierende Größen und durch die Farben Gelb bis Orange dargestellt.

So ist zu erkennen, dass die Partikel, die eine Startgeschwindigkeit haben, schneller in das Magnetfiltersystem einfließen.

Bei beiden Simulationen setzten die Partikel sich zu Simulationsbeginn auf dem Einlassrohrboden ab (siehe Berechnungsschritt 3).

Bei Betrachtung des Verlaufs der einströmenden Partikel in das Magnetfiltersystem ist zu sehen, dass dieser parabelförmig ist. Dies entspricht auch der physikalischen Erwartungshaltung, wenn Partikel ohne äußere Strömung in

das System einfließen würden. Es bedeutet also, dass die Strömung des Fluids einen geringen Einfluss auf die Partikelbewegung hat.

Der Einfluss der Startgeschwindigkeit ist bei großen Partikeln stärker. Dies liegt daran, dass ihr Impuls größer ist und auch ihre Trägheit. So werden größere Partikel durch ihren großen Eigenimpuls weniger von den anderen Kräften, wie der Strömung des Fluids, beeinflusst. Durch dieses Verhalten werden deutlich mehr große Partikel bei der Simulation mit Startgeschwindigkeit auf die Magnetstäbe der vom Einlassrohr gegenüberliegenden Seite befördert als bei der ohne Startgeschwindigkeit, wo sich die größeren Partikel im Bereich der vorderen Magnetstäbe bewegen (siehe Berechnungsschritt 8). Bei Betrachtung der Partikel mit einem Durchmesser unter $200\mu\text{m}$ ist der Unterschied zwischen den beiden Simulationen kaum.

In Abbildung 4.19 ist die Verteilung der Partikel auf den oberen Magnetstäben nach einer Simulation dargestellt. Die Partikelgröße ist hier durch unterschiedliche Farben dargestellt, so sind rote Partikel besonders groß und blaue Partikel klein. Das linke Bild zeigt das Ergebnis der Simulation, bei der die Partikel keine Startgeschwindigkeit hatten, und rechts ist das Ergebnis der Simulation dargestellt, bei der die Partikel ruhend die Simulation starteten.

Hier ist das Ergebnis des vorher beschriebenen Einstömverhaltens der Partikel mit unterschiedlichen Größen zu sehen. Auf dem rechten Bild ist zu sehen, dass sich die großen Partikel auf den beiden dem Einlassrohr nahen Magnetstäben ansammeln. Auf dem linken Bild lagern sich die großen Partikel auf der dem Einlassrohr entfernten Seite an. Bei beiden Simulationen ist aber wieder eine relativ gleichmäßige Verteilung der kleinen Partikel zu sehen.

Für die weiteren Simulationen wurde nun eine Startgeschwindigkeit für die Partikel angesetzt. Dies ist physikalisch korrekt, da die Partikel im Experiment nicht vor dem Einlass ruhen, um mit dem Trägerfluid in das Magnetfiltersystem reingespült zu werden, sondern mit dem Trägerfluid vorher beschleunigt werden, um dann in das Magnetfiltersystem zu gelangen.

Relevant ist diese Einstellung für den Abscheidegrad aber nicht. So wurde der Abscheidegrad bei den beiden vorher beschriebenen Simulationen verglichen. Der Unterschied lag bei $0,98\%$.

Partikelbewegung im Magnetfiltersystem

In Abbildung 4.20 ist die Partikelverteilung im Magnetfiltersystem während der Separation abgebildet. Die unterschiedlichen Partikelgrößen sind unter an-

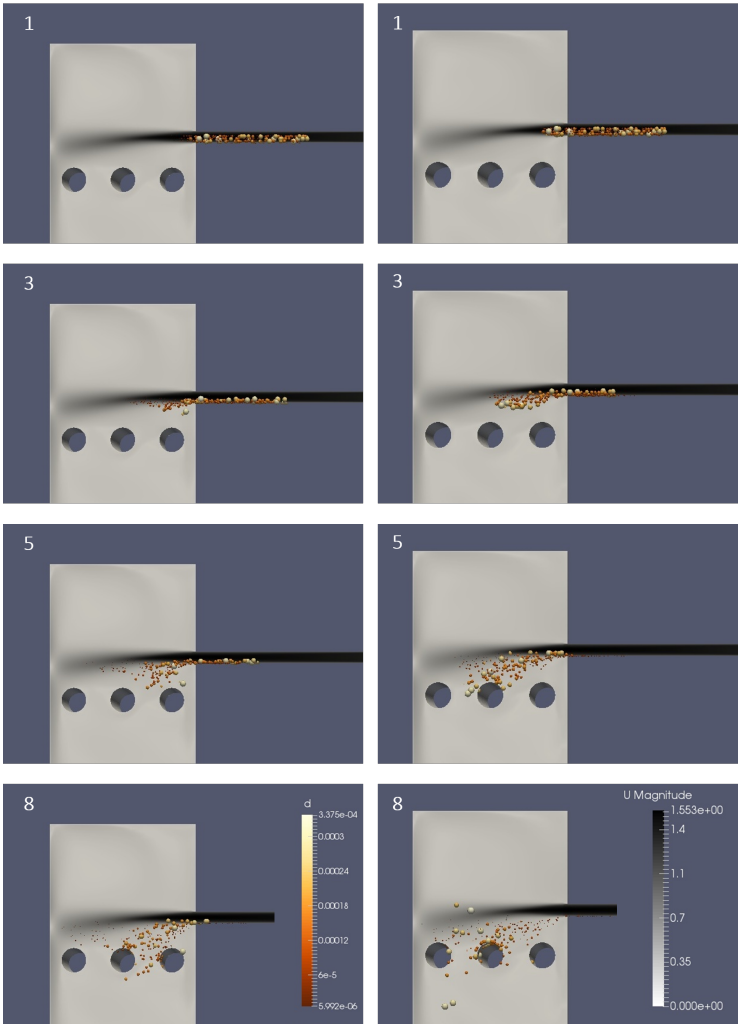


Abbildung 4.18: Partikeleinströmverhalten bei Berechnungsschritt 1, 3, 5 und 8, die Ergebnisse der linken Seite zeigen, wie das Verhalten der Partikel ohne eine Startgeschwindigkeit ist (Simulation „Beide“), die Ergebnisse auf der rechten Seite zeigen wiederum das Ergebnis mit einer Partikelstartgeschwindigkeit von $u_p = (-1.2, 0, 0)^T$ (Simulation „Oben“)

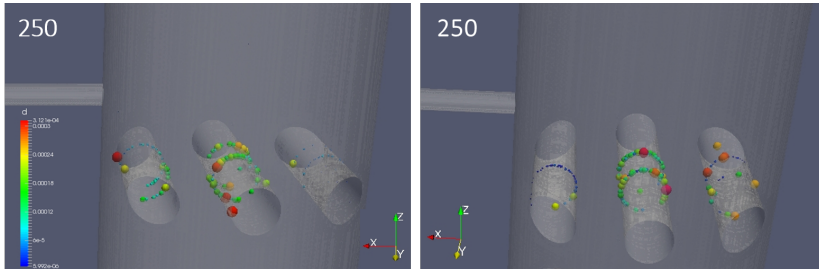


Abbildung 4.19: Verteilung der Partikel auf den oberen Magnetstäben, linke Abbildung zeigt die Verteilung der Partikel ohne eine Startgeschwindigkeit, die Abbildung auf der rechten Seite zeigt wiederum das Ergebnis mit einer Partikelstartgeschwindigkeit von $u_p = (-1.2, 0, 0)^T$

derem wieder durch Farbe gekennzeichnet. So sind violette und rote Partikel große Partikel und blaue kleine Partikel. Das linke Bild stellt das Ergebnis des 23. Berechnungsschritts und das rechte Bild den 40. Berechnungsschritt dar. Es wird die Simulation gezeigt, bei der an den oberen Magnetstäben das Magnetfeld ausgeschaltet ist.

Wie schon beim Einströmverhalten beschrieben, ist bei den kleinen Partikeln unterhalb der oberen Magnetstäbe bei dem linken Bild in Abbildung 4.20 zu sehen, dass die Partikel parabelförmig in das Magnetfiltersystem gelangen. Es ist zu erkennen, dass diese kleinen Partikel sich um die Magnetstäbe herum bewegen und, dass sich unterhalb der Magnetstäbe keine Partikel verteilen. Dies liegt wieder daran, dass die Strömung des Fluids einen relativ geringen Einfluss auf die Partikel hat.

Auf dem linken Bild in Abbildung 4.20 kann außerdem, wie beim Einströmverhalten beschrieben, erkannt werden, dass sich die Partikel mit einem Partikeldurchmesser größer als $240\mu\text{m}$ beim Einströmen auf der vom Einlass gegenüberliegenden Seite befinden.

Auf beiden Bildern aus Abbildung 4.20 ist gut zu erkennen, dass die großen Partikel deutlich schneller absinken als die kleinen Partikel. Dies ist auch das, was physikalisch erwartet werden wird. Es kommt also zu einer Entmischung von großen und kleinen Partikeln. Da in der Simulation keine Partikel-Partikel-Interaktion betrachtet wird, hat dieses Verhalten jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis bei der Berechnung des Abscheidegrads.

Zudem ist in Abbildung 4.20 bei beiden Bildern zu erkennen, dass, nachdem die großen Partikel entweder durch das Magnetfeld abgeschieden sind oder

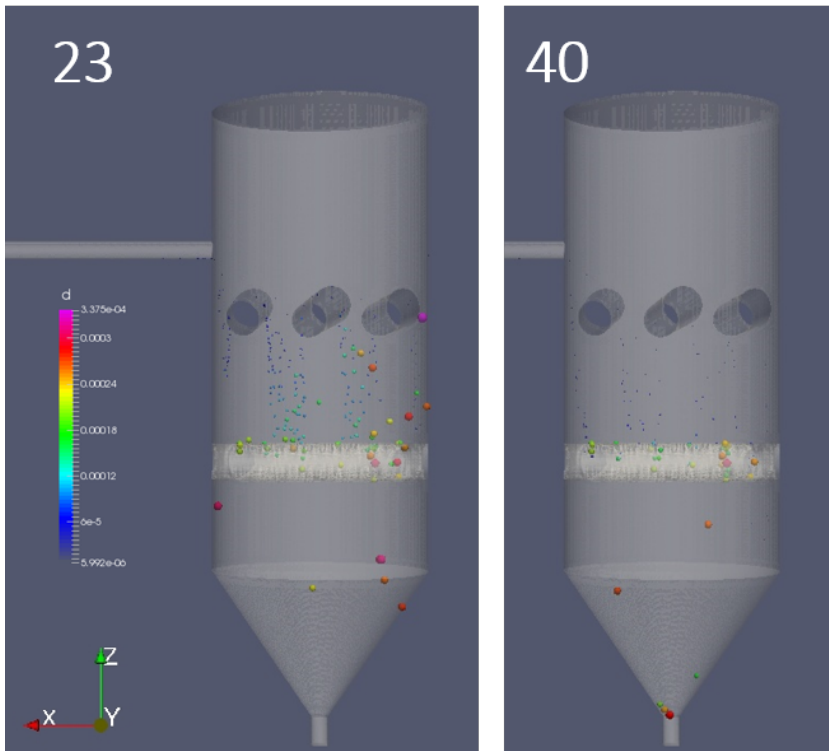


Abbildung 4.20: Partikelverteilung im Magnetfiltersystem bei Berechnungsschritt 20 und 40 (Simulation „Unten“)

das Magnetfiltersystem passiert haben, noch immer kleine Partikel durch das Einlassrohr in das Magnetfiltersystem hereinrieseln.

Partikelverteilung

In Abbildung 4.19 auf dem linken Bild ist die Verteilung der Partikel auf den oberen Magnetstäben nach einer Separation abgebildet. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Partikel sich hauptsächlich auf den mittigen Magnetfeldern der

Magnetstäbe, dort, wo der Einlassstrahl verläuft, ansammeln. Die Verteilung ist somit nicht gleichmäßig, sondern konzentriert sich entlang des Einlassstrahls.

4.4.3 Ergebnisse: Abscheidegrad

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der Partikelabscheidungen der Simulationen zusammengefasst. Es sind in der Tabelle das Volumen und die Partikelanzahl beim Start und am Ende der Simulation angegeben. Aus diesen Werten wurden dann die Abscheidegrade berechnet. So gibt es einen Abscheidegrad, der aus dem Volumen der Partikel bestimmt wurde, und einen Abscheidegrad, der sich aus der Anzahl der Partikel berechnen lässt. Da die Partikel nicht denselben Durchmesser haben, unterscheiden sich die beiden Abscheidegrade voneinander. Die Partikelanzahl und deren gesamtes Volumen ist dabei zu Beginn der Simulation bei allen drei Simulationen konstant gewesen.

Den höchsten Abscheidegrad erreicht, wie zu erwarten, die Simulation bei der die oberen und unteren Magnetstäbe ein Magnetfeld aufweisen. Bei dieser Simulation ist auch die Abweichung der beiden Abscheidegrade (volumen- und mengenmäßig) am kleinsten.

Bei Betrachtung der zwei unterschiedlich berechneten Abscheidegrade bei den anderen beiden Simulationen fällt auf, dass diese sich markant unterscheiden. Besonders fällt dies bei der Simulation auf, bei der nur an den oberen Magnetstößen ein Magnetfeld ist. Der Grund für diesen großen Unterschied bei der Simulation „Oben“ ist das Einstromverhalten der kleinen Partikel. Hier rieseln die Partikel viel langsamer in das Magnetfiltersystem ein und werden dort von dem Einlass nahen Magnetfeld separiert. Dies führt zu einem erhöhten Abscheidegrad, wenn die Partikelanzahl betrachtet wird, hat aber keinen großen Einfluss auf das abgeschiedene Volumen der Partikel.

Wie schon erwähnt existiert ein Unterschied zwischen den Abscheidegraden der Simulationen, bei denen an den oberen oder den unteren Magnetstäben ein Magnetfeld ist. Dieser Unterschied ist auch mit der Anzahl und dem Volumen der unterschiedlich großen Partikel erklärbar. So haben die großen Partikel einen kleinen Einfluss auf die Abscheidung der Partikelanzahl, aber einen sehr großen Einfluss auf die Abscheidung bei Betrachtung des Volumens. Da es auch weniger große Partikel gibt, ist es bei Betrachtung des abgeschiedenen Volumens entscheidend, wie viele von diesen separiert werden.

Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung dieser Aspekte ausreichend.

	Beide	Oben	Unten
V_{Start}	$7,4 \cdot 10^{-10} m^3$	$7,4 \cdot 10^{-10} m^3$	$7,4 \cdot 10^{-10} m^3$
V_{Ende}	$6,84 \cdot 10^{-10} m^3$	$5,79 \cdot 10^{-10} m^3$	$5,82 \cdot 10^{-10} m^3$
PA_{Start}	432	432	432
PA_{Ende}	398	371	350
AG_V	92,48%	78,19%	78,78%
AG_{PA}	92,13%	85,88%	81,01%

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Partikelabscheidung, dabei steht V_{Start} für das gesamte Partikelvolumen zu Beginn der Simulation, V_{Ende} für das gesamte Partikelvolumen im Endzustand der Simulation, PA_{Start} für die Partikelanzahl zu Beginn der Simulation, PA_{Ende} für die Partikelanzahl am Ende der Simulation, AG_V für den Abscheidegrad berechnet aus dem Volumen und AG_{PA} für den Abscheidegrad berechnet aus der Partikelanzahl

Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse

Für die Verbesserung des Abscheideprozesses ist der Abscheidegrad, bei dem das Volumen betrachtet wird, relevant. Dieser wird im Folgenden mit $AG_{MFS_{NUM}}$ bezeichnet. Für den Vergleich der numerischen mit den experimentellen Ergebnissen ist es wichtig die Abscheidegrade zu betrachten.

In Abbildung 4.21 sind die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Simulationen visualisiert worden. Das linke Bild zeigt dabei das Ergebnis der Simulation „Beide“, bei der an den oberen und den unteren Magnetstäben das Magnetfeld eingeschaltet war. Mittig befindet sich die Simulation „Oben“, bei der nur bei den oberen Magnetstäben das Magnetfeld eingeschaltet war, und das rechte Bild zeigt das Ergebnis der Simulation „Unten“ mit unten eingeschaltetem Magnetfeld. Durch die unterschiedlichen Farben sind auch hier die verschiedenen Partikelgrößen dargestellt. Zudem ist bei jedem Bild der dazugehörige Abscheidegrad angegeben.

In Kapitel 3.2.6 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich des Abscheidegrads beschrieben. In Tabelle 4.5 sind nochmals die Ergebnisse der numerischen und der experimentellen Untersuchungen zum Abscheidegrad abgebildet.

Die Ergebnisse stimmen gut überein. Besonders die Ergebnisse der Variation „Beide“, bei denen das obere und untere Magnetfeld angeschaltet waren,

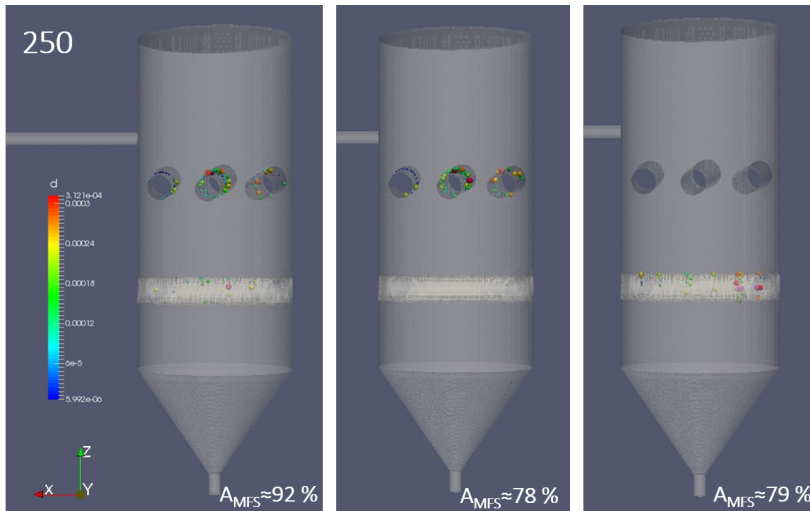


Abbildung 4.21: Endzustand des beladenen Magnetfiltersystems nach der Separation, unterschiedliche Partikelgrößen sind farblich markiert, linkes Bild zeigt den Zustand der Simulation „Beide“, mittiges Bild der Simulation „Oben“ und rechtes Bild das Ergebnis der Simulation „Unten“

	Beide	Oben	Unten
AG_{EXP}	93,01%	86,91%	86,07%
AG_{NUM}	92,48%	78,19%	78,78%
Abweichung	0,6%	10%	8,5%

Tabelle 4.5: Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse bei Betrachtung des Abscheidegrads

passen sehr gut zusammen und weichen weniger als 1% voneinander ab. Bei den beiden anderen Versuchen ist die relative Abweichung größer. Sie liegt im Bereich von 10%. Der Grund dafür ist, dass sich bei den Experimenten die leeren Magnetstühhüllen noch im Magnetfiltersystem befanden und sich auf diesen dann Partikel ablagerten. Dieser Effekt wurde in der Simulation nicht beachtet.

4.5 Abscheidegrad mit mehreren Magnetrosten

Im Folgenden wird analysiert, welchen Einfluss die Verwendung eines oder mehrerer Magnetroste auf den Abscheidegrad hat.

In Tabelle 4.5 sind unter anderem die Ergebnisse der numerischen Untersuchung bei Verwendung von einem Magnetrost aufgelistet. Der Unterschied, ob der oberere oder der untere Magnetrost eingeschaltet war, liegt bei unter 1%. Dies ist sehr gering, sodass angenommen werden kann, dass die Lage des Magnetrosts, bzw. der Magnetroste im Magnetfiltersystem keinen Einfluss auf den Abscheidegrad hat. Mit dieser Annahme gilt für jeden Magnetrost, dass er ungefähr 78,5% der passierenden Stahlpartikel separiert. Das heißt, separiert der erste dem Einlass folgende Magnetrost 78,5%, dann separiert der nächste Magnetrost von den restlich verbleibenden 21,5% wieder 78,5%. Es gilt also für den Abscheidegrad $AG(n)$ unter Verwendung von n Magnetrosten

$$AG(n) = AG(n-1) + (100 - AG(n-1)) \cdot \frac{AG(1)}{100} \text{ für } n \leq 2. \quad (4.15)$$

Wird mit Gleichung 4.15 der Abscheidegrad für zwei Magnetroste berechnet, ergibt dies

$$AG(2) = 95,16\%. \quad (4.16)$$

Wird das berechnete Ergebnis mit dem numerischen Ergebnis aus Tabelle 4.5 verglichen, ergibt sich eine Abweichung von 2,81%.

Eine weitere Möglichkeit den Abscheidegrad eines zusätzlichen Magnetrosts zu ermitteln, ist eine Interpolation also die Anpassung einer Funktion an die Ergebnisse. Für die Interpolation wurde die folgende Funktion $f(x)$ verwendet

$$f(x) = -\frac{a}{e^x} - 100. \quad (4.17)$$

Für den Parameter a ergab sich

$$a = 58,14 \mp 0,95 (1,62\%). \quad (4.18)$$

Abbildung 4.22 zeigt das Ergebnis der numerischen Untersuchung, dargestellt durch rote Punkte. Die Interpolationsfunktion wurde blau unterlegt.

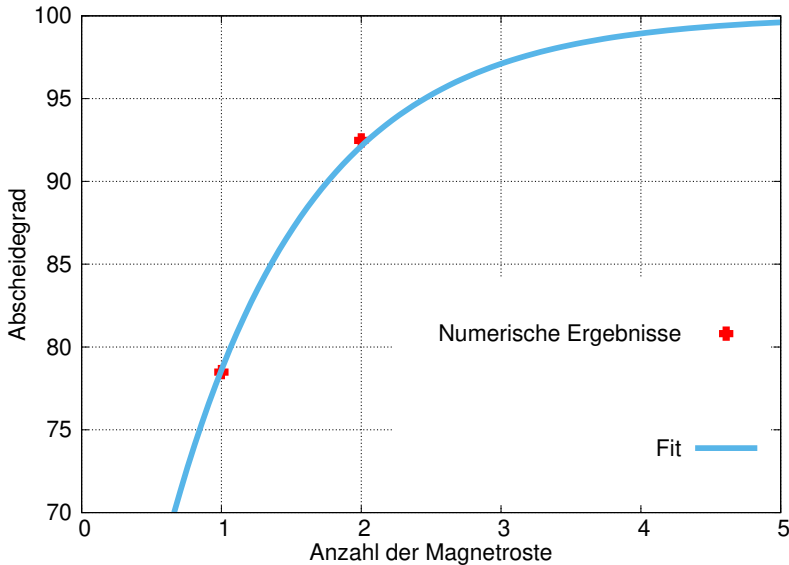


Abbildung 4.22: Abscheidegrad in Abhängigkeit der verwendeten Magnetrost, Rot: Numerische Ergebnisse, Blau: Interpolation

4.5.1 Abscheidegrad bei drei Magnetrosten

Um den Einfluss von drei Magnetrosten auf den Abscheidegrad zu testen, wurde eine weitere numerische Untersuchung durchgeführt.

Hierfür wurde eine neue Geometrie erstellt, die in Abbildung 4.23 dargestellt ist. Es wurde ein weiterer Magnetrost, welcher um 45° zu den anderen beiden Magnetrosten zwischen den beiden Magnetrosten gedreht ist, eingeplant. Dieser Magnetrost gleicht dem Aufbau der anderen beiden Magnetrost. Dieser besteht auch aus den Flächen Wand, Magnet 1 und Magnet 2. Eine genauere Erläuterung zu den Eigenschaften der einzelnen Flächen und zum Aufbau eines Magnetstabs ist in Kapitel 4.1, 4.2 und 4.3 gegeben.

Die Einstellungen der einzelnen Berechnungen waren auch identisch zu denen aus Kapitel 4.1, 4.2 und 4.3. Zuerst wurde das Magnetfeld berechnet. Dabei wurde zudem das Magnetfeld des mittleren Magnetrosts berechnet. Danach wurde die Strömung berechnet. Hierbei hatten die Magnetstäbe wieder die-

selben Eigenschaften, wie die Wand. Zum Schluss wurden die Partikel in das Magnetfiltersystem injiziert. Diese glichen den Partikeln der anderen Simulationen sowohl in den physikalischen Eigenschaften, als auch in der Partikelanzahl.

In Abbildung 4.24 ist das visualisierte Ergebnis dieser Simulation dargestellt. Die unterschiedlichen Partikelgrößen sind wieder zusätzlich durch Farben kenntlich gemacht. Im linken Bild ist das Ergebnis bei Berechnungsschritt 8 abgebildet und im mittleren Bild das bei Berechnungsschritt 23. Das linke Bild zeigt die Verteilung der Partikel im Endzustand.

Im rechten Bild der Abbildung 4.24 ist das Einströmverhalten der Partikel durch den Einlass in das Magnetfiltersystem zu sehen. Dieses gleicht dem Verhalten bei der Verwendung von zwei Magnetrosten.

Bei Betrachtung des Ergebnisses von Berechnungsschritt 23 ist zu sehen, dass der obere Magnetrost über 85% der Partikel separiert hat. An den darunter liegenden Magnetrosten sammeln sich nur 13% der Partikel an. Es ist aber auch unterhalb der Magnetroste zu sehen, dass einige wenige Partikel nicht durch das Magnetfeld der Magnetroste angezogen wurden. Diese werden in der weiteren Berechnung das Magnetfiltersystem verlassen.

Im Endzustand (in Abbildung 4.24 links) ist zu sehen, dass die Verteilung der Partikel auf dem oberen Magnetrost der gleicht, die auch bei zwei verwendeten Magnetrosten erreicht wurde. Bei dem darunter liegenden mittigen Magnetrost lagern sich auch einige Partikel, besonders einige große Partikel, an. Am untersten Magnetrost sind die wenigsten Partikel separiert worden.

Am untersten Magnetrost wurden die wenigsten Partikel separiert. Wegen dieser geringen Anzahl an Partikeln an den unteren Magnetrosten ist die Bestimmung des Abscheidegrads über die Simulation fehleranfälliger als die Bestimmung bei den Simulationen mit einem oder zwei verwendeten Magnetrosten. Dies liegt daran, dass hier schon wenige, zum Teil schon einzelne große Partikel einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Für eine Abschätzung reicht dieses Ergebnis allerdings aus.

Mit der numerischen Untersuchung wurde eine Abscheidung $AG_{NUM}(3)$ von

$$AG_{NUM}(3) = 98,8\% \quad (4.19)$$

bestimmt.

Mit der Annahme, dass jeder Magnetrost immer denselben Prozentsatz an

Partikeln separiert und mit daraus folgender Gleichung 4.15, ergibt sich für diesen Abscheidegrad $AG_{FOR}(3)$

$$AG_{FOR}(3) = 98,9\% \quad (4.20)$$

bei Verwendung von drei Magnetrosten.

Wird das Ergebnis der numerischen Untersuchung 4.19 mit dem Ergebnis 4.20, das aus Formel 4.15 berechnet wurde, verglichen, liegt die Abweichung bei unter 0,1%.

Zur Bestimmung der Auswirkung des Einsatzes weiterer Magnetrost im Magnetfiltersystem auf den Abscheidegrad wurde eine Funktion mit den aus der Verwendung von einem und zwei Magnetrosten stammenden Werten interpoliert (siehe Gleichung 4.17 und 4.18). Mit dieser Formel ergibt sich für den Abscheidegrad $AG_{FIT}(3)$

$$AG_{FIT}(3) = 97,1\%, \quad (4.21)$$

wenn drei Magnetrost betrachtet werden.

Der Vergleich der Ergebnisse aus der numerischen Simulation 4.19 und dem Ergebnis 4.21, das sich aus der Interpolation ergibt, ergibt sich eine relative Abweichung von 1,7%.

Alle Ergebnisse passen sehr gut zusammen. Das heißt, wird ein dritter Magnetrost in das bestehende Magnetfiltersystem integriert, erhöht sich der Abscheidegrad um ungefähr 5%.

Abscheidegrad mit vier Magnetrosten

Um den Abscheidegrad von vier Magnetrosten abschätzen zu können, wurde dieser mit der Gleichung 4.15 berechnet.

Zudem wurde eine Interpolation unter Verwendung der numerisch bestimmten Daten zu den Abscheidegraden bei Verwendung von einem, zwei und drei Magnetrosten erstellt. Diese ist in Abbildung 4.25 abgebildet. Als Interpolationsfunktion wurde wieder Gleichung 4.17 verwendet. Für den Parameter a wurde folgender Wert bestimmt

$$a = 57,57 \mp 3,2 \text{ (5,6\%)}. \quad (4.22)$$

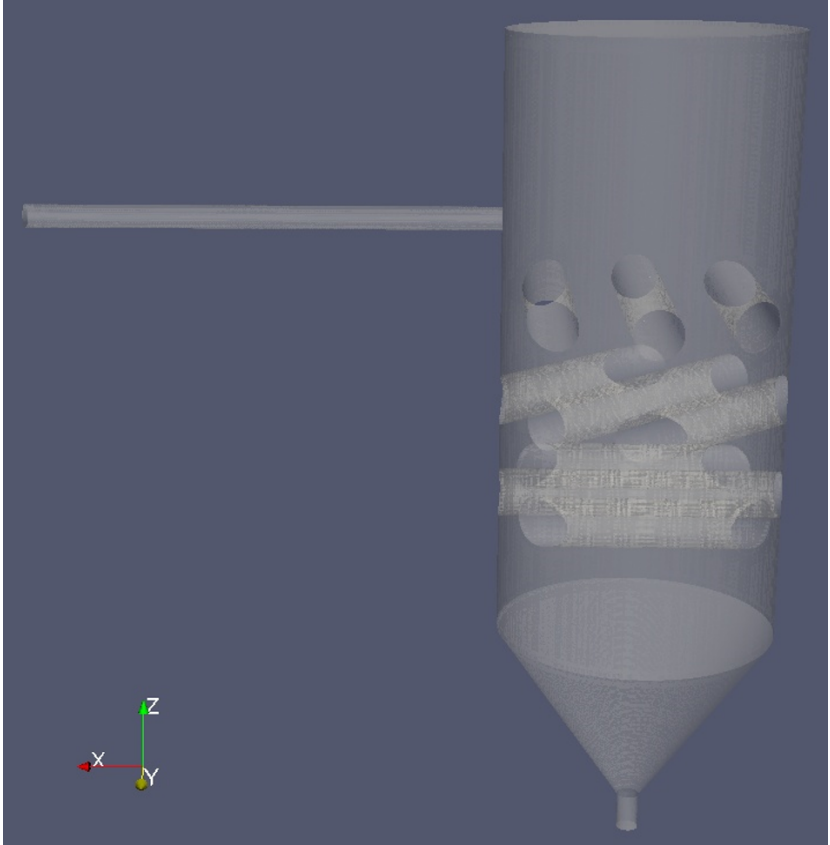


Abbildung 4.23: Verwendete Geometrie mit drei Magnetrosten

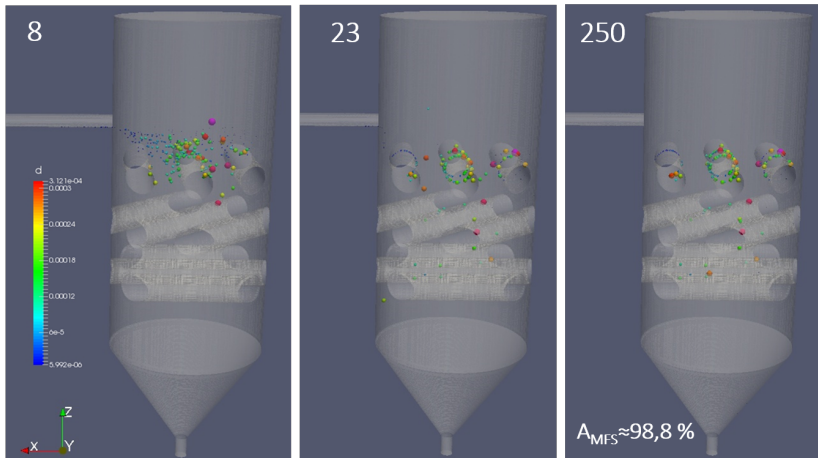


Abbildung 4.24: Ergebnis der Partikelverteilung bei Verwendung von drei Magnetrosten bei den Berechnungsschritten 8 und 23 und im Endzustand

Mit der Formel 4.15 ergibt sich für vier Magnetroste ein Abscheidegrad von

$$AG_{NUM}(4) = 98,8\%. \quad (4.23)$$

Der Abscheidegrad würde sich also um 0,8% erhöhen.

Mit der Interpolationsfunktion ergibt sich für den Abscheidegrad

$$AG_{FIT}(4) = 98,9\%. \quad (4.24)$$

Die Erhöhung des Abscheidegrads um einen weiteren Magnetrost würde 1,8% betragen.

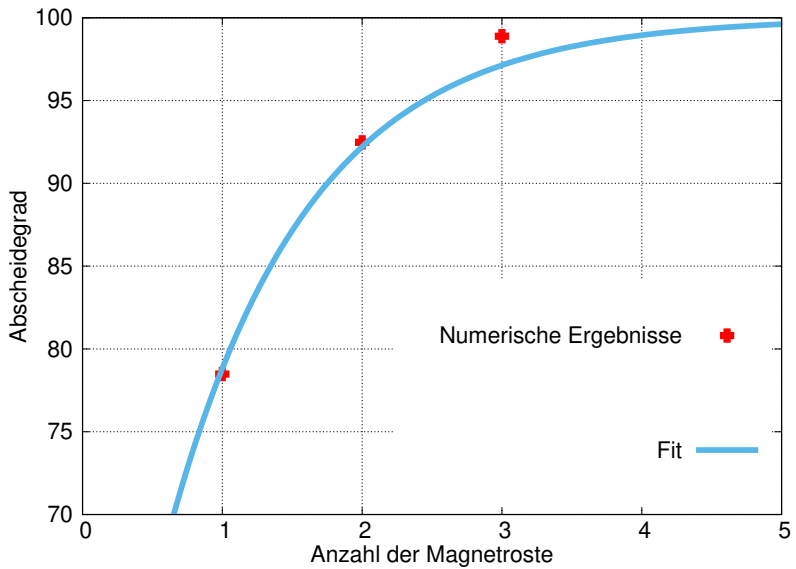


Abbildung 4.25: Abscheidegrad in Abhängigkeit der verwendeten Magnetroste; Rot: Numerische Ergebnisse; Blau: Interpolation, bestimmt mit drei Magnetrosten

5 Wirtschaftliche Bedeutung

Um die möglichen Einsparungen des Sekundärabfalls bei der Zerlegung der Einbauten des RDBs beim Rückbau kerntechnischer Anlagen durch das entwickelte Magnetfiltersystem zu bestimmen, wird angenommen, dass die Separationsanlage (siehe Anhang A) ausschließlich mit dem Magnetfiltersystem betrieben wird.

Das Magnetfiltersystem separiert unter optimalen Bedingungen bei Verwendung von drei Magnetrosten ungefähr 98,8% der Edelstahlpartikel. Würde dies auf das vom WAS-Schnitt stammende Abrasiv-Stahl-Partikelgemisch, das eine Stahlkonzentration von 2% aufweist, übertragen werden, würde dies zu einer Stahlkonzentration von 0,024% führen. Da die Abrasivpartikel aber Anhaftungen der Edelstahlpartikel aufweisen [KGGea17b] und die Separationsanlage nicht optimale Bedingungen aufweist, liegt der reale Abscheidegrad unter dem numerisch bestimmten Wert. Es wird angenommen, dass der Magnetfilter mit drei Magnetrosten einen Abscheidegrad von 97,5% bei einem realen Partikelgemisch erreicht. Dies würde zu einer Stahlkonzentration von 0,05% in der wiederverwendbaren Abrasivfraktion führen.

Im Folgenden wird die Zerlegung der Einbauten des RDBs im kerntechnischen Bereich betrachtet, da bei dieser Zerlegung das WAS-Verfahren am meisten Vorteile im Vergleich zu den anderen Verfahren bietet. Werden diese mit dem WAS-Verfahren zerlegt, hängt die Wiederverwendungsquote hauptsächlich von der Aktivität der zu zerlegenden Komponente ab. Mit den Daten aus Kernkraftwerk-Rückbauprojekten in Deutschland wird angenommen, es sind 100t Einbauten zu zerlegen. Es wird angenommen, diese würden, wenn sie mit dem WAS-Verfahren zerlegt werden, zusätzlich 100t Sekundärabfall erzeugen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass 40% des Abrasiv-Edelstahl-Gemischs mit dem Magnetfiltersystem der Separationsanlage so behandelt werden können, dass diese separierte Abrasivfraktion der WAS-Anlage zu einem nochmaligen Schnitt beigefügt werden kann. Bei den restlichen 60% würde die Separation nicht ausreichen, um die Aktivität in der separierten Abrasivfraktion so niedrig zu halten, dass diese der WAS-Anlage zugeführt werden kann,

ohne dass diese WAS-Anlage nach den Schnitten ebenfalls als radioaktiver Abfall entsorgt werden müsste.

Unter den oben genannten Annahmen würde die Separationsanlage mit Verwendung des Magnetfiltersystems das Gewicht an radioaktivem Abfall bei der Zerlegung der Einbauten eines RDBs um 20% senken.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen wird neben anderen Verfahren das Wasser-Abrasiv-Schneid-Verfahren (WAS-Verfahren) zum Zerlegen des Reaktordruckbehälters und seiner Einbauten verwendet, wobei diese Komponenten durch die Ioneneinstrahlung aktiviert sind. Dieses Verfahren bietet viele Vorteile im Vergleich zu anderen Zerlegetechniken. Es weist aber auch einen großen Nachteil auf. Bei der Anwendung dieses Verfahrens entsteht ein Partikelgemisch aus Stahlpartikeln (von der zu zerlegenden Stahlkomponente) und Abrasivpartikeln (von dem WAS-Verfahren). Dieses Partikelgemisch muss derzeit als radioaktiver Abfall behandelt werden und wird als Sekundärabfall bezeichnet. Die Mengen an Sekundärabfall sind dabei enorm, sodass das WAS-Verfahren trotz seiner technischen Vorteile kaum noch eingesetzt wird.

In einem vom Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt wurde eine Separationsanlage entwickelt, die die beiden Fraktionen, das Abrasiv und Stahlpartikel, voneinander trennen soll. Eine der wichtigsten Komponenten dieser Separationsanlage ist das Magnetfiltersystem.

In dieses Magnetfiltersystem wird das Partikelgemisch in Suspension mit Wasser befördert. Wenn dieses Partikelgemisch das Magnetfiltersystem durchläuft, werden die Stahlpartikel von dem in dem System bestehenden Magnetfeld angezogen. Die Abrasivpartikel wiederum passieren das Magnetfiltersystem. Es kommt somit zu einer Separation der Abrasiv- und Stahlpartikel.

In dieser Arbeit wurde der Abscheideprozess der Stahlpartikel im Magnetfiltersystem numerisch und experimentell untersucht. Bei den Untersuchungen wurden jedoch die Abrasivpartikel vernachlässigt, d.h. es wurde analysiert, was passiert, wenn ausschließlich die Stahlpartikel das Magnetfiltersystem passieren. Die Beurteilung der Separation wurde anhand des Abscheidegrads gegeben. Dieser gibt an, wie viele Stahlpartikel vom Magnetfiltersystem separiert werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei Experimente durchgeführt. Die eine beinhaltet die Messung der magnetischen Flussdichte am

Magnetrost. Die andere Untersuchung umfasst die Bestimmung des Abscheidegrads des Magnetfiltersystems. Dafür wurde ein Versuchsstand geplant und aufgebaut. Dieser Versuchsstand bestand aus einem Rührbehälter mit einem Rührer, die eine homogene Suspension erzeugten. Diese wurde mit Hilfe des Höhenunterschieds durch das Magnetfiltersystem transportiert. Hinter dem Magnetfiltersystem war ein Extinktionszähler angebracht, der die nicht separierten Partikel zählte. Mit der hinzugegebenen Menge an Stahlpartikeln und den Ergebnissen des Extinktionszählers konnte der Abscheidegrad bestimmt werden.

Es wurde untersucht, welchen Einfluss die einzelnen Magnetrostte auf den Separationsprozess haben. So wurden Untersuchungen mit Magnetfeldern an beiden Magnetrosten und jeweils nur an einem Magnetrost (oberer oder unterer) durchgeführt. Der Abscheidegrad mit Magnetfeldern an beiden Magnetrosten ergab 93,01%, der Abscheidegrad, bei dem nur bei dem oberen Magnetrost ein Magnetfeld war, war 86,91% und der Abscheidegrad für ein Magnetfeld am unteren Magnetrost betrug 86,01%.

Für die numerischen Untersuchungen wurden die Ergebnisse der Magnetfeldmessung genutzt, um das Magnetfeld realitätsgetreu zu simulieren. Danach wurde die Strömung innerhalb des Magnetfiltersystems berechnet. Zur Kontrolle wurden hierbei die Ergebnisse mit wissenschaftlichen Studien verglichen und analysiert. Zum Schluss wurden die Partikel in die Simulation integriert und der Abscheidegrad berechnet. Der Abscheidegrad mit einem Magnetfeld an beiden Magnetstäben ergab 92,48%, der Abscheidegrad, bei dem nur an den oberen Magnetstäben ein Magnetfeld war, betrug 78,19% und der Abscheidegrad für ein Magnetfeld an den unteren Magnetstäben ergab 78,76%.

Der Vergleich des numerischen und experimentell bestimmten Abscheidegrads ergab, dass die numerischen Ergebnisse realitätsgetreu sind. Im Fall der gleichzeitigen Aktivierung des Magnetfelds der oberen und unteren Magnetstäbe, betrug der Unterschied des Abscheidegrads weniger als 1%. Bei den anderen beiden Messungen (mit Magnetfeld nur oben oder unten) war der Unterschied größer. Dies lag aber daran, dass sich während der Experimente einige Partikel auf denjenigen Magnetrosten ansammelten, in denen kein Magnetfeld angeschaltet war. Bei der numerischen Untersuchung wurde dieser Effekt aber nicht mit berücksichtigt, sodass bei den Experimenten ein höherer Abscheidegrad gemessen wurde als bei den beiden Simulationen.

Um den Einfluss eines weiteren Magnetrosts zu bestimmen, wurde eine weitere Simulation durchgeführt, eine Gleichung zur Berechnung des Einflusses weiterer Magnetrostte aufgestellt und eine Ausgleichsfunktion mit den vorhan-

denen Werten erstellt.

Bei der Simulation wurde ein dritter zu den anderen beiden Magnetrostern um 45° gedrehter Magnetrost in die CAD-Zeichnung des Magnetfiltersystems der numerischen Untersuchung integriert. Dieser wies dieselben physikalischen und geometrischen Eigenschaften wie die anderen Magnetroste auf.

Die Gleichung zur Bestimmung des Einflusses weiterer Magnetroste wurde unter der Annahme ausgewählt, dass jeder Magnetrost denselben Abscheidegrad erzielt, unabhängig von den anderen Magnetrosten. Das heißt, separiert der erste Magnetrost 78%, dann separiert der folgende Magnetrost 78% der restlichen vom ersten Magnetrost verbleibenden 22% der Stahlpartikel.

Die numerische Untersuchung mit drei Magnetrosten bestimmte einen Abscheidegrad von 98,8%. Mit der aufgestellten Formel ergab einen Abscheidegrad von 98,7%. Der aus der Ausgleichsfunktion bestimmte Abscheidegrad ergab 97,1%. Die bestimmten Werte wiesen eine Abweichung von unter 2% auf.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Erweiterung des Magnetfiltersystems um einen dritten Magnetrost eine Erhöhung des Abscheidegrads um ungefähr 5% erzielt. Ein dritter Magnetrost führt aber auch zu einer Erhöhung der Störstellen im Magnetfiltersystem. Da dieser in Zukunft radioaktives Material behandeln soll, sollten die Störstellen möglichst gering gehalten werden. Trotz der weiteren Störstellen durch Hinzufügen eines weiteren Magnetrosts, würde dies empfohlen werden.

Mit der Interpolationsfunktion und der aufgestellten Formel kann auch bestimmt werden, welchen Einfluss ein vierter und jeder weitere Magnetrost hat. Schon der vierte Magnetrost erzielt nur noch eine Erhöhung des Abscheidegrads unter 2%. Im realen Partikelgemisch des WAS-Schnitts ist es nicht möglich eine 100%ige Abscheidung der Stahlpartikel zu erzielen, da während des WAS-Schnitts durch die hohen Energien die Abrasivpartikel Anhaftungen des Stahls aufweisen und diese mit dem Magnetfiltersystem nicht separiert werden können. Deshalb reicht ein Abscheidegrad von ungefähr 98% für das Magnetfiltersystem aus.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen würde ein Einbau eines weiteren Magnetrosts folglich nicht mehr in das bestehende Magnetfiltersystem empfohlen werden.

Des Weiteren kann bei der numerischen Berechnung das Einströmverhalten und, wie sich die Partikel auf den Magnetstäben verteilen, betrachtet werden. Es ist festzustellen, dass die Partikel nur entlang des Einstrahls einströmen und sich auch nur dort auf den Magnetstäben ansammeln. Indem das Einlassrohr

aufgeteilt wird und die Suspension aus zwei Einlassrohren, die um 90° versetzt sind, in das Magnetfiltersystem strömen lässt, würden sich die Partikel über die ganze Fläche am Einlass ausbreiten und es würden mehr Partikel abgeschieden werden.

A Separationsanlage

Beim WAS-Schnitt einer Stahlkomponente entsteht ein Abrasiv-Stahl-Gemisch. Wird diese Technik zum Zerlegen radioaktiver Komponenten beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt, ist dieses Partikelgemisch ebenfalls radioaktiv und muss dementsprechend entsorgt werden. Da der Hauptteil dieses Gemischs Abrasiv ist, ist die Menge an Sekundärabfall erheblich. Um dies zu minimieren, wurde eine Separationsanlage entwickelt und gebaut. Diese behandelt das Partikelgemisch, sodass die separierte Abrasivfraktion für einen erneuten Schnitt mit der WAS-Anlage genutzt werden kann.

In Abbildung A.1 ist ein vereinfachtes Prozessfließbild der Separationsanlage dargestellt. In der Mitte unten ist der Rührbehälter. Hier wird mit Hilfe des Rührers eine homogene Suspension des zu behandelnden Materials mit Wasser erzeugt.

Innerhalb des Rührbehälters kann oben Wasser zum Reinigen der Anlage abgepumpt werden. In diesem Fall ist der Rührer ausgeschaltet, sodass die Partikel sich am Behälterboden sammeln. Zum anderen kann unten im Rührbehälter die Partikelsuspension durch die Anlage befördert werden. Links unten im Fließbild ist die Doppelmembranpumpe. Diese wird zur Beförderung der Suspension oder des Fluids verwendet. Sie kann einen Volumenstrom von 3 bis $20 \frac{l}{min}$ erzeugen. Hinter der Membranpumpe ist ein Pulsationsdämpfer integriert. Dieser bewirkt, dass der Volumenstrom gleichmäßiger wird. Damit wird die mechanische Beanspruchung durch Druckstöße reduziert.

Oben links sind die Komponenten der Anlage gezeigt, die durch entsprechendes Anbringen in die Anlage eingebaut werden können. Mit diesen Komponenten gibt es die Möglichkeit, das aus dem WAS-Schnitt stammende Material zu sieben (Sieb). Nach dem Sieben befinden sich die feinen Partikel, die das Sieb passiert haben, in der Anlage. Diese werden danach mit Hilfe des Beutelfilters aus dem System gefiltert. Nach dem Filtern werden die groben Partikel dem System durch Reinigen des Siebs wieder zugeführt.

Danach werden die groben Partikel mit dem Magnetfiltersystem behandelt, das in Abbildung A.1 oben rechts abgebildet ist. Hier werden nun die groben Stahl-

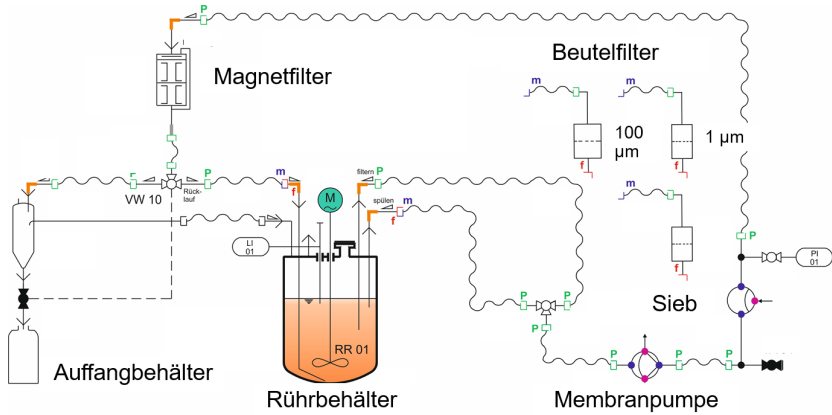


Abbildung A.1: Prozessfließbild der Separationsanlage

partikel herausgefiltert. In einem zweiten Schritt wird das Magnetfiltersystem mit klarem Wasser von den Stahlpartikeln befreit. Diese Partikel werden dann rechts unten in dem Probensammler aufgefangen.

In Abbildung A.2 ist eine Fotografie der Separationsanlage dargestellt. [KG-Gea17b, KGGea17a, HGGea17, KGGea18, HGGea18, HGGea19]

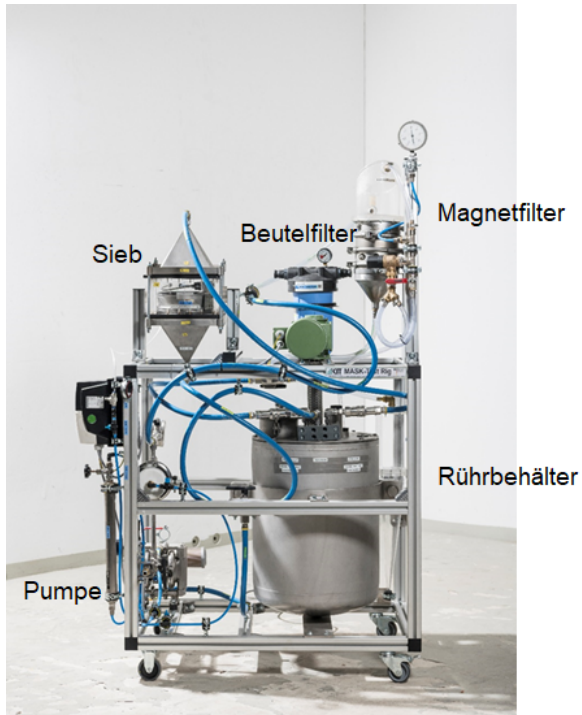


Abbildung A.2: Fotografie der Separationsanlage

B Entleerung des Behälters

Um zu berechnen, wie sich der Volumenstrom mit abnehmender Füllhöhe verhält, wurde die Formel 2.43 verwendet. Der daraus folgende Graph ist in Abbildung B.1 dargestellt. Es wurden die Werte des Anlagenaufbaus verwendet, mit dem der Abscheidegrad bestimmt wurde (siehe Abbildung 3.8). Es ist zu sehen, dass die Ausflusskurve einen fast linearen Verlauf im betrachteten Zeitraum hat. Der quasi lineare Verlauf bedeutet, dass der Volumenstrom im betrachteten Fall relativ konstant ist.

Mit der Füllhöhe und der Zeit aus Formel 2.43 kann der Volumenstrom zu unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet werden. Dies wurde für $t_1 = 20$ und $t_2 = 120$ durchgeführt und ergab eine Veränderung des Volumenstroms um 8%.

Zudem wurde experimentell noch überprüft, wie sich der Volumenstrom verhält. Hierzu wurde angenommen, dass die Volumenstromänderungen in allen Bereichen des Versuchsstands konstant sind. Es wurde beim Extinktionszähler das auslaufende Wasser mit Hilfe eines Messzylinders und die jeweilige Zeit gemessen. Damit konnte der Volumenstrom zu unterschiedlichen Zeitpunkten berechnet werden. Es wurde hier der Volumenstrom bei 0,2l und 0,5l bestimmt und verglichen. Daraus ergab sich eine Volumenstromänderung von 7%, wobei der Messfehler auch bei 3% lag.

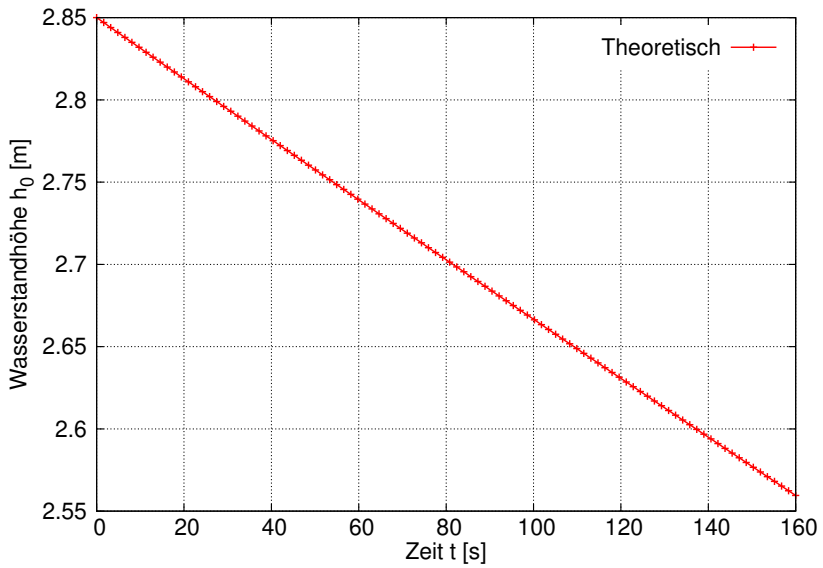


Abbildung B.1: Abnahme der Wasserstandshöhe im Rührbehälter

C CPP-Programm zur Generierung einer homogenen Suspension

Listing C.1: CPP-Programm zur Generierung einer homogenen Suspension

```
1 #include <stdio .h>
2 #include <iostream >
3 #include <cmath>
4 #include <fstream >
5 #include <limits >
6 #include <string >
7
8 using namespace std;
9
10 double nround (double n, unsigned int c)
11 {
12     double marge = pow (10, c);
13     double up     = n * marge;
14     double ret   = round (up) / marge;
15     return ret;
16 }
17
18 //Berechnung der Anzahl der Teilchen in eine (h)
19 Koordinaten Richtung
20 double dif(double n, double h, double f, double g)
21 {
22     double s=n*pow(h,2.0)/(f*g);
23     double x=1.0/3.0;
24     double dif=pow(s,x);
25     return (dif);
26 }
27
```

```

28 //Schreibe neue einlese-Datei fuer die
29 Partikelpositionen double text(fstream& f,
30 double n_x, double n_y, double n_z, double dx,
    double dz, double x, double y, double z, double
    du, int n_tat)
31 {
32     f << " /*-----*--
        C++
        *-----*\\
        "<<endl;
33     f << " | ===== |
        | "<<endl;
34     f << " | \\ \\ \\ / F i e l d |
        OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
        | "<<endl;
35     f << " | \\ \\ \\ / O p e r a t i o n |
        Version: 3.0.1
        | "<<
        endl;
36     f << " | \\ \\ \\ / A n d | Web:
        www.OpenFOAM.org
        | "<<endl;
37     f << " | \\ \\ \\ / M a n i p u l a t i o n |
        | "<<endl;
38     f << "
        \\*-----*--
        "<<endl;
39     f << " FoamFile "<<endl;
40     f << " {"<<endl;
41     f << " version 2.0; "<<endl;
42     f << " format ascii; "<<endl;
43     f << " class vectorField; "<<endl;
44     f << " object
        kinematicCloudPositions; "<<endl;
45     f << " }"<<endl;

```

```

46      f <<" // * * * * * * * * * * * * * * * * * *
          * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
          // " <<endl;
47      f <<"      " << endl;
48      f <<"      " << endl;
49      f <<"      " << endl;
50      f <<"(" << endl;
51      n_tat=0.0;
52      if( n_x<2)
53      {
54          n_x=1;
55          cout << "Warnung: Korngemischanteil zu
                  gering, weniger als 1 Teilchen in x-
                  Richtung, dadurch werden mehr
                  Teilchen in den anderen Dimensionen
                  injeziert" << endl;
56      }
57
58      if( n_y<2)
59      {
60          n_y=1;
61          cout << "Warnung: Korngemischanteil zu
                  gering, weniger als 1 Teilchen in y-
                  Richtung, dadurch werden mehr
                  Teilchen in den anderen Dimensionen
                  injeziert" << endl;
62      }
63      if( n_z<2)
64      {
65          n_z=1;
66          cout << "Warnung: Korngemischanteil zu
                  gering, weniger als 1 Teilchen in z-
                  Richtung, dadurch werden mehr
                  Teilchen in den anderen Dimensionen
                  injeziert" << endl;
67      }
68
69      for(int i=1; i<=n_x; i++)

```

```
70     {
71         for(int j=1; j<=n_y+0.5; j++)
72         {
73             for(int k=1; k<=n_z+0.5; k++)
74             {
75                 double x_1=dx+(i-0.5)*du;
76                 double y_2=(j-0.5)*du-y
77                     /2.0;
78                 double z_1=dz+(k-0.5)*du-y
79                     /2.0;
80                 n_tat=n_tat+1;
81                 if (n_x==1)
82                 {
83                     x_1=dx+x*0.5;
84                 }
85                 if (n_y==1)
86                 {
87                     y_2=0;
88                 }
89                 if (n_z==1)
90                 {
91                     z_1=0.342;
92                 }
93                 f << "(" << x_1 << " " <<
94                     y_2 << " " << z_1 << ")
95                     " << endl;
96             }
97         }
98     f <<")" << endl;
99     f.close();
100     return n_tat;
101 }
102
103
```



```
104 std::istream& skipline( std::istream& in )
105 {
106     return in.ignore( std::numeric_limits< std::
107         streamsize >::max(), '\n' );
108 }
109
110 int main() {
111     double X_k;           // Feststoffanteil in %
112     double X_f;           // Fluidanteil in %
113     double rho_s;        // Dichte Stahl
114     double rho_f;        // Dichte Traegerfluid
115     double d_s;          // Durchmesser
116         Stahlpartikel
117     double V_ges;        // Gesamtvolumen
118         injezierung
119     double V_ges_rund;   // Gesamtvolumen mit
120         Rundung
121     double pi=3.14159265359;
122     double m_ges;        // Gesamtmasse
123     double m_s;
124     double m_f;
125     double V_ku;         // Volumen einer
126         Stahlkugel
127     double vol_s;
128
129     double x;            // Einlauflaenge
130     double r;            // Radius des Einlasses
131     double y;
132     double y_1;
133     double z;
134
135     double dx;           // Startpunkt
136         Partikelinjektion in x
137     double dz;           // Startpunkt
138         Partikelinjektion in z-Richtung
139     double x_int;        //
140         Initialisierungsbereich in x-Richtung
```

```
134
135     double dt;           //Berechnung der endtime
                          fuer controllDict
136
137     double n_s;         //Anzahl der
                          Stahlteilchen im Gesamtvolumen
138     int n_s_tat;       //tatsaechliche Anzahl der
                          Stahlpartikel
139
140     double n_sx;        //Anzahl der
                          Stahlteilchen in x-Richtung
141     double n_sy;        //Anzahl der
                          Stahlteilchen in y-Richtung
142     double n_sz;        //Anzahl der
                          Stahlteilchen in z-Richtung
143
144     double du_s;        //Abstand zwischen zwei
                          Stahlpartikeln
145
146
147 //x, y, z, dx und dz Werte, Dichten,
    Feststoffanteil, Stahlanteil werden eingelesen
148     ifstream file_1;
149     file_1.open("constant/particlesProperties", ios
    ::in);
150     if (file_1.is_open())
151     {
152         file_1 >> skipline >> dx >>
            skipline;
153         file_1 >> skipline >> dz >> skipline
            ;
154         file_1 >> skipline >> x >> skipline
            ;
155         file_1 >> skipline >> r >> skipline;
156         file_1 >> skipline >> rho_s >>
            skipline;
157         file_1 >> skipline >> rho_f >>
            skipline;
```

```
158         file_1 >> skipline >> X_k >>
           skipline;
159         file_1 >> skipline >> d_s >>
           skipline;
160         file_1.close();
161     }
162     else
163     {
164         cerr << "Fehler beim Oeffnen der
           Datei particlesProperties" <<
           endl;
165     }
166
167     z=r/pow(2.0,0.5)*2.0;           //Berechnung von
           Initialisierung von y und z Richtung
168         y=z;
169
170 //Partikeldurchmesser und Dichte des Traegerfluids
           hier eingeben
171
172     x_int=x;
           // Initialisierungsbereich in x-Richtung
173
174     X_f=100-X_k;                   //
           Anteil Fluid
175
176     V_ges_rund=pi*pow(r,2.0)*x_int; //
           Gesamtvolumen
177
178     m_ges=V_ges_rund/(X_k*rho_f/(X_f*rho_s)+1)*
           rho_f+V_ges_rund/(X_f*rho_s/(X_k*rho_f)
           +1)*rho_s; //Berechnung von der
           Gesamtmasse
179
180     vol_s=V_ges_rund/(X_f*rho_s/(X_k*rho_f)+1);
           //Volumen Stahlanteil
181
182     m_f= m_ges*X_f/100;           //Masse des Fluids
```

```
183
184     m_s=m_ges*X_k/100;    //Masse Stahl
185
186     double m_f_kon= V_ges_rund/(X_k*rho_f/(X_f*
187         rho_s)+1)*rho_f;
188     double m_s_kon=V_ges_rund/(X_f*rho_s/(X_k*
189         rho_f)+1)*rho_s;
190     double pfs =m_s/m_ges*100.0;
191
192     if (nround(m_f,6) != nround(m_f_kon,6) ||
193         nround(X_k,3) != nround(pfs,3) )
194     {
195         cout << "Fehler bei der Berechnung der
196             Massen" << endl;
197     }
198     V_ku = pi*pow(d_s,3.0)/6.0;
199     n_s=vol_s/V_ku;    //Anzahl der
200         Stahlpartikel
201
202     //INFO : n kann kleiner als n_sx, ... sein. Es
203         kommt Warnung in text-Funktion
204
205     n_sx=dif(n_s, x_int, y,z);
206         //Anzahl der Stahlpartikel in x-Richtung
207     n_sy=dif(n_s, y, x_int,z);
208         //Anzahl der Stahlpartikel in y-Richtung
209     n_sz=dif(n_s, z, y,x_int);
210         //Anzahl der Stahlpartikel in z-Richtung
211
212
213     du_s=x_int/n_sx;
214         //Abstand zwischen zwei Stahlpartikeln
215
216     cout << "Fehler bei der Berechnung der Massen" <<
217         du_s<< endl;
218     //Schreiben der neuen Dateien
219
220     ofstream g;
```

```
210     g.open("constant/  
        kinematicCloudPositionsStahl", ios::out)  
        ;  
211     n_s_tat=text(g, n_sx, n_sy, n_sz, dx, dz,  
        x_int, y, z, du_s, n_s_tat);  
212  
213     fstream g_2;  
214     g_2.open("postProcess/gen", ios::out);  
215     if(g_2.is_open())  
216     {  
217         if (nround(m_f,6) != nround(m_f_kon  
            ,6) || nround(X_k,3) != nround(pfs  
            ,3) )  
218         {  
219             g_2 << "Fehler bei der Berechnung der  
                Massen" << endl;  
220         }  
221         g_2<< "Anzahl der berechneten  
                Stahlpartikel: " << n_s <<  
                endl;  
222         g_2<< "Anzahl der tatsaechlichen  
                Stahlpartikel: " << n_s_tat << endl;  
223         g_2<<"Volumen Stahlpartikel: " << vol_s  
                << endl;  
224         g_2<<"Gesamtvolumen: " << V_ges_rund <<  
                endl;  
225         g_2<<"Masse Stahlpartikel: " << m_s_kon  
                << endl;  
226         g_2<<"Gesamtmasse: " << m_ges<< endl;  
227     }  
228  
229  
230     //return(0);  
231 }
```


Literaturverzeichnis

- [AK14] Inci Ayrançi and Suzanne M. Kresta. Critical analysis of zwieterring correlation for solids suspension in stirred tanks. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(3):413 – 422, 2014.
- [ANT] ANT. Wasserstrahlschneidsysteme. <https://www.ant-ag.com/>. Eingesehen am 2019-03-20.
- [Are] Areva. Rückbau. <http://de.areva.com/mini-home/liblocal/docs/PDF-Downloads/Rueckbau.pdf>. Eingesehen am 2019-08-06.
- [Bat56] W. Batel. Fehlermöglichkeiten bei der Bestimmung von Korngrößenverteilungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 28(2):81–87, 1956.
- [Bet97] Josef Betten. *Finite Elemente für Ingenieure*, volume 1: Grundlagen, Matrixmethoden, elastisches Kontinuum. Springer, Berlin, 1997.
- [Bra17] Martin Brandauer. *Experimentelle Untersuchungen zur Separation von Korngemischen in einem Stabmagnetfilter*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2017.
- [Bre05] Christopher Earls Brennen. Fundamentals of multiphase flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83(5):911–911, 2005.
- [But] Dr. Tanja Butt. Repräsentative Analysenergebnisse durch richtiges Probenhandling. https://www.retschedltmp.com/5d373fe3-6798-4ded-926e-e948c3c9c754-a5e5a8c4c19c/wp_sample_handling_division_0719_de.pdf. Eingesehen am 2019-08-06.
- [Cen] Linne FLOW Centre. Turbulent pipe flow. <https://www.flow.kth.se/flow-database/simulation-data-1.791810>. Eingesehen am 2019-03-20.

- [Dec05] Stefan Decker. *Zur Berechnung von gerührten Suspensionen mit dem Euler-Lagrange-Verfahren*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2005.
- [Dem06] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 3. Aufl. edition, 2006.
- [DR08] Wolfgang Dahmen and Arnold Reusken. *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 2., korrigierte Aufl. edition, 2008.
- [Elg94] Said Elghobashi. Elghobashi, s.: On predicting particle-laden turbulent flows. *applied scientific research* 52, 309-329. *Applied Scientific Research*, 52:309–329, 06 1994.
- [Fab95] Thomas E. Faber. *Fluid dynamics for physicists*. Cambridge Univ. Press, Cambridge [u.a.], 1. publ. edition, 1995.
- [FP08] Joel H. Ferziger and Milovan Peric. *Numerische Strömungsmechanik*. Springer, Berlin, 2008.
- [Frö06] Jochen Fröhlich. *Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen : mit 14 Tabellen*. Lehrbuch Maschinenbau. Teubner, Wiesbaden, 1. Aufl. edition, 2006.
- [GM03] Christian Gerthsen and Dieter Meschede. *Gerthsen Physik* . Springer, Berlin, Heidelberg, 22. völlig neu bearb. edition, 2003.
- [gnu] gnuplot. <https://www.http://www.gnuplot.info/>. Eingesehen am 2019-08-06.
- [Gou] Goudsmit. Neodym-magnete (ndfeb). <https://www.goudsmitmagnets.com/magnete-baugruppen/permanentmagnete/neodym-magnete-ndfeb/neodym-magnete-ndfeb>. Eingesehen am 2019-05-22.
- [HEK05] Joachim Hartung, Bärbel Elpelt, and Karl-Heinz Klösener. *Statistik : Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik ; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen*. Oldenbourg, München, 14., unwesentlich veränd. Aufl. edition, 2005.
- [HGGea17] A. Heneka, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Improvement of a separation method for the reduction of secondary waste from the waterjet abrasive suspension cutting technique. *PETRUS-ANNETTE PhD conference*, 2017.

- [HGGea18] A. Heneka, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Vorstellung eines Magnetfiltersystems zur Behandlung von Sekundärabfällen der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik. *AMNT*, 2018.
- [HGGea19] A. Heneka, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik. *Kontec*, 2019.
- [Hof05] Herbert Martin Hofmann. *Wärmeübergang beim pulsierenden Prallstrahl*. Dissertation, Karlsruhe, 2005.
- [Hof18] Hansgeorg [VerfasserIn] Hofmann. *Werkstoffe in der Elektrotechnik*. Lernbücher der Technik. Hanser, München, 8., aktualisierte Aufl. edition, [2018].
- [Jac13] John David Jackson. *Klassische Elektrodynamik*. Walter de Gruyter, Berlin, 2013.
- [KEKSN⁺13] George K. El Khoury, Philipp Schlatter, Azad Noorani, Paul Fischer, Geert Brethouwer, and Arne Johansson. Direct numerical simulation of turbulent pipe flow at moderately high reynolds numbers. *Flow, Turbulence and Combustion*, 91:475–495, 06 2013.
- [KGGea17a] C.-O. Krauß, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Untersuchung der Strömungsverläufe in einem Magnetfilter zur Minimierung von Sekundärabfall der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik. *AMNT*, 2017.
- [KGGea17b] C.-O. Krauß, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Verbesserung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik. *Kontec*, 2017.
- [KGGea18] C.-O. Krauß, S. Gentes, H. Geckeis, and et al. Presentation of a separation method for the reduction of secondary waste from the waterjet abrasive suspension cutting technique. *DEM*, 2018.
- [Kuh07] Hendrik C. Kuhlmann. *Strömungsmechanik*. Maschinenbau. Pearson Studium, München, 2007.
- [Lec11] Stefan Lecheler. *Numerische Strömungsberechnung : schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele*. Studium. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2., aktualisierte und erw. Aufl. edition, 2011.

- [Lin65] Bernard W. Lindgren. *Statistical theory*. Macmillan, New York, 3.print. edition, 1965.
- [LS72] B. E. Launder and D. B. Spalding. Lectures in mathematical models of turbulence. pages 7, 169 p., 1972.
- [Mar77] Holger Martin. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. 13:1 – 60, 1977.
- [Max65] J. Clerk Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 155:459–512, 1865.
- [Men93] F. Menter. *Zonal Two Equation k - ω Turbulence Models For Aerodynamic Flows*. 1993.
- [Men94] F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, 1994.
- [Men15] Katharina Menzel. *Anwendung der Hoch-Gradienten Magnetfiltration und apparative Weiterentwicklung für den Einsatz in der Schmieröltreinigung und Bioprozesstechnik*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [MKL03] Florian Menter, M. Kuntz, and RB Langtry. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Heat and Mass Transfer*, 4, 01 2003.
- [Nol06] Wolfgang Nolting. *Grundkurs Theoretische Physik 3 - Elektrodynamik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [Oer15] Herbert Oertel. *Strömungsmechanik : für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. SpringerLink. Springer Vieweg, Wiesbaden, 7., überarb. Aufl. 2015 edition, 2015.
- [OL03] Herbert Oertel and Eckart Laurien. *Numerische Strömungsmechanik : Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*. Studium Technik. Vieweg, Braunschweig [u.a.], 2., neu bearb. Aufl. edition, 2003.
- [OPB08] Herbert [Hrsg.] Oertel, Ludwig [Begr.] Prandtl, and Martin Böhle, editors. *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre : Grundlagen und Phänomene*. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 12., vollst. überarb. und erw. Aufl. edition, 2008.
- [Ope15] OpenCFD. *OpenFOAM - The Open Source CFD Toolbox - User's Guide*. OpenCFD Ltd., United Kingdom, 2.4.0 edition, 21st May 2015.

- [par] paraview. <https://www.paraview.org/>. Eingesehen am 2019-08-06.
- [Pos13] Petr Pospisil. Reactor vessel internals segmentation experience using mechanical cutting tools. *Technological Engineering*, 06 2013.
- [SA07] Joseph H. Spurk and Nuri Aksel. *Strömungslehre : Einführung in die Theorie der Strömungen*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 7. Aufl. edition, c 2007.
- [sal] Salome. <https://www.salome-platform.org>. Eingesehen am 2019-08-06.
- [SG06] Hermann Schlichting and Klaus Gersten. *Grenzschicht-Theorie : mit 22 Tabellen*. Springer, Berlin, 10., überarb. Aufl. edition, 2006.
- [SK09] Annette Schmitz and Peter Knoll. Rückbau der Reaktordruckbehälter-Einbauten im Kernkraftwerk Stade Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur grünen Wiese ist realisiert. *ATW*, 2009.
- [SKV89] Heinz Schade, Ewald Kunz, and Jorg-Dieter Vagt. *Strömungslehre*. De-Gruyter-Lehrbuch. de Gruyter, Berlin, 2., durchges. u. verb. Aufl. edition, 1989. Literaturverz. S. 526 - 529.
- [SLS+95] Tsan Hsing Shih, William W. Liou, Aamir Shabbir, Zhigang Yang, and Jiang Zhu. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers and Fluids*, 24(3):227 – 238, 1995.
- [Som19] Martin Sommerfeld. *L3.1 Bewegung fester Partikel in Gasen und Flüssigkeiten*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Sti08] Matthias Stieß. *Mechanische Verfahrenstechnik*, volume 1: Partikeltechnologie. Springer, Berlin, 2008.
- [Stö10] Horst Stöcker, editor. *Taschenbuch der Physik*. Deutsch, Frankfurt am Main, 2010.
- [Ts] Tec-science. Discharge outflow liquid speed torricellis law. <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/discharge-outflow-liquid-speed-torricellis-law>. Eingesehen am 2019-08-06.

- [TS09] Dr. S. Thierfeldt and Dr. F. Schartmann. *Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen*. Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 2009.
- [UPM] Fluid Dynamics Group UPM. Agard-ar-345. <https://torroja.dmt.upm.es/turbdata/agard/docs/>. Eingesehen am 2019-03-20.
- [VHKVM07] H. K. Versteeg, H. K. Henk Kaarle Versteeg, AACR: Versteeg, and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method*. Pearson/Prentice Hall, Harlow, 2. edition, 2007.
- [Wil88] David C. Wilcox. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, 26(11):1299–1310, 1988.
- [Wil06] David C. Wilcox. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, [La Canada, Calif.], 3. ed. edition, 2006.
- [Wil10] H. Wilker. *Band 3: Weibull-Statistik in der Praxis: Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Komponenten*. Weibull-Statistik in der Praxis. 2010.
- [Wr06] Martin Woe rner. Vorlesungsskript: Numerische Modellierung von Mehrphasenströmungen. Research Report, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Germany, 2006.
- [ZB91] Jürgen Zierep and Karl Bühler. *Strömungsmechanik*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, 1991.
- [Zlo99] Marko Zlokarnik. *Rührtechnik : Theorie und Praxis*. Chemische Technik, Verfahrenstechnik. Springer, Berlin, 1999.
- [Zwi58] Th.N. Zwietering. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, 8(3):244–253, 1958.