

**Abrasivaufbereitung aus dem
Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneideverfahren
mittels Nasssiebung und Magnetseparation**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Alexander Heneka

Tag der mündlichen Prüfung: 07.11.2023

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes

Korreferent: Prof. Dr. Horst Geckeis

Karlsruhe 2024



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Kurzfassung

Beim Rückbau eines Kernkraftwerks ist die Zerlegung des Reaktordruckbehälters und seiner Einbauten eine technische Herausforderung. Eines der Zerlegeverfahren, um den zum Teil über 25 cm dicken Edelstahl sicher und fernhantiert zu schneiden, ist das Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneideverfahren (WASS-Verfahren). Den vielen technischen Vorteilen dieses Zerlegeverfahrens steht allerdings der Nachteil gegenüber, dass große Mengen Sekundärabfall anfallen. Der Abrasivabfall des WASS-Verfahrens besteht aus Abrasivpartikeln und radioaktiven Stahlpartikeln aus dem Reaktordruckbehälter, wodurch das gesamte Gemisch als radioaktiver Abfall entsorgt werden muss. Eine Möglichkeit, die Menge dieses Sekundärabfalls zu reduzieren, ist die Abrasivaufbereitung und direkte Wiederverwendung in der WASS-Anlage. Um bei der Abrasivaufbereitung ein wiederverwendbares Abrasiv zu gewinnen, muss aus dem Abrasivabfall eine Fraktion aus intakten Abrasivpartikeln einer bestimmten Partikelgröße abgetrennt werden. Die Stahlkonzentration der jeweiligen Fraktionen muss hierbei besonders beachtet werden, da in der späteren kerntechnischen Anwendung damit die zu erwartende Radioaktivität des Abrasivs und des Sekundärabfalls abgeschätzt werden kann.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekts wurde eine Separationsanlage, die aus dem Abrasivabfall ein wiederverwendbares Abrasiv abtrennen kann, entwickelt. Die Separationsanlage verwendet eine Siebkomponente und ein Magnetfiltersystem zur Größenklassierung und Separation der Stahlpartikel. In der vorliegenden Arbeit wird die Kombination beider Verfahren zur Abrasivbehandlung experimentell an der Separationsanlage untersucht. Anhand von Separationsversuchen mit Abrasiv-Stahl-Probengemischen wurden der Wiederverwendungsanteil, Siebfehler, Abscheidegrad des Stahls und die Partikelgrößenverteilungen des wiederverwendbaren Abrasivs bestimmt. Mittels einer Modellrechnung zur mehrmaligen Wiederverwendung des Abrasivs lassen sich die Reduzierung des Sekundärabfalls sowie die Stahlkonzentrationen der jeweiligen Fraktionen bei verschiedenen Betriebsparametern abschätzen.

Abstract

During the decommissioning of a nuclear power plant, the dismantling of the reactor pressure vessel and its internals is a technical challenge. One of the dismantling methods used to safely and remotely cut the stainless steel, some of which is more than 25 cm thick, is the water abrasive suspension cutting process (WASS process). However, the many technical advantages of this cutting process are contrasted by the large quantities of secondary waste are produced. The abrasive waste from the WASS process consists of spent abrasive particles and radioactive steel chips from the reactor pressure vessel, requiring the entire mixture to be disposed of as radioactive waste. One way to reduce the amount of this secondary waste is to process the abrasive and reuse it directly in the WASS plant. In order to obtain a reusable abrasive during processing, a fraction of intact abrasive particles of a specific particle size must be separated from the abrasive waste. The steel concentration of the respective fractions must be given special attention here, since in the subsequent nuclear application this allows the expected radioactivity of the abrasive and the secondary waste to be estimated.

As part of a research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, a separation plant capable of separating a reusable abrasive from the abrasive waste was developed. The separation plant uses a screening component and a magnetic filter system to sieve the abrasive particles and separate the steel particles. In this paper, the combination of both abrasive treatment methods is experimentally investigated on the separation system.

Based on separation tests with abrasive-steel sample mixtures, the reuse rate, screening error, separation efficiency of the steel and particle size distributions of the reusable abrasive were determined. By means of a model calculation for multiple reuse of the abrasive, the reduction of secondary waste, as well as the steel concentrations of the respective fractions can be estimated for different operating parameters.

Vorwort

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

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes für die Übernahme des Hauptreferates und die Betreuung der wissenschaftlichen Arbeit bedanken. Das Vertrauen, die Unterstützung und die Freiheit bei der Entwicklung der Anlage haben diese Arbeit ermöglicht. Herrn Prof. Dr. Horst Geckeis danke ich für die Übernahme des Korreferates, sowie für die fachlichen Hilfestellungen und Anregungen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Hagsheno für die Teilnahme an der Promotionskommission.

Weiter bedanke ich mich bei allen Kollegen des TMB für die Unterstützung, Kritik und Motivation. Besonders danke ich meiner Zimmerkollegin und Freundin Carla für das tolle und offene Arbeitsklima und die gute Zeit.

Danke an alle Mitarbeiter des Mask- und Namask Projekts, sowie allen Studenten, Hiwis und Praktikanten. Besonderer Dank an Winfried und Junaid für die gute Zeit und die Ausdauer beim Auf- und Umbau der Anlage. Ein großer Dank geht an Herrn Torsten Schuler für die Mühe bei der Fertigung der Anlage und die tolle Umsetzung.

Für die mikroskopischen Analysen möchte ich mich bei Herrn Dr. Dieter Schild bedanken und für die chemischen Analysen bei Herrn Dr. Markus Plaschke, Frau Tanja Kisely und Frau Sylvia Moisei-Rabung.

Ganz besonders danke ich meiner Familie für die Unterstützung, Geduld und Aufmunterung, meinen Eltern, meiner lieben Frau Yue und meinem Sohn Leonas.

Inhalt

Kurzfassung	III
Abstract	V
Vorwort	VII
Nomenklatur	XI
Abkürzungen	XIII
1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Motivation	3
1.3 Zielsetzung	3
2. Grundlagen.....	5
2.1 Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden.....	5
2.2 Siebung	15
2.3 Mischen, Rühren und Homogenisieren	20
3. Aufbau der Separationsanlage und Messmethoden	25
3.1 Separationsanlage.....	25
3.1.1 Vorgegangene Arbeiten zur Separationsanlage	25
3.1.2 Prinzip der Separationsanlage	26
3.1.3 Technische Umsetzung der Separationsanlage	29
3.2 Probenmaterial	46
3.2.1 Auswahl der Stahlsorten	46
3.2.2 Herstellung des Probenmaterials.....	49
3.2.3 Probenvorbereitung und Homogenisierung	54
3.3 Messmethoden	56
3.3.1 Siebanalyse.....	56
3.3.2 Quantitative Elementanalyse.....	59
3.4 Versuchsplanung.....	62
4. Wiederverwendbares Abrasiv	67
4.1 Charakterisierung des Probenmaterials	67
4.2 Anforderungen an das wiederverwendbare Abrasiv.....	77
4.3 Abrasivaufbereitung mit unterschiedlicher Maschenweite	79
4.4 Wiederverwendungsanteil	83
4.5 Stahlkonzentration.....	86
4.6 Modellrechnung zur Sekundärabfallreduzierung durch Abrasivwiederverwendung ..	93
5. Zusammenfassung	100
6. Anhang	108
6.1 Betriebsparameter	108
6.1.1 Dauer der Siebung und Magnetfiltration	108
6.2 Versuchsergebnisse	109

6.2.1 Siebanalyse.....	109
6.2.2 Partikelgrößenverteilungen.....	111
Abbildungsverzeichnis	114
Tabellenverzeichnis	116
Literaturverzeichnis	117

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	[m/s ²]	Schwingbeschleunigung
A	[m ²]	Querschnittsdurchmesser
B	[T]	Magnetische Flussdichte
c ₀	[Massen-%]	Ausgangskonzentration
c ₁	[Massen-%]	Konzentration nach Separation
D	[m]	Behälterdurchmesser
d _{St}	[m]	Stokesdurchmesser
E	[m]	Schwingungsamplitude
F _g	[N]	Schwerkraft
Fr	[-]	Froudezahl
G	[m/s ²]	Schwerebeschleunigung
M	[kg]	Masse
m ₀	[t]	Abrasivverbrauch ohne Abrasiveverwendung
m _w	[t]	Abrasivverbrauch mit Abrasiveverwendung
N	[1/s]	Drehfrequenz des Rührers
q ₃ (x)	[%]	Massen- bzw. volumenbezogene Dichteverteilung der Partikelgröße
Q ₃ (x)	[%]	Massen- bzw. volumenbezogene Summenverteilung der Partikelgröße

u_{St}	[m/s]	Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit
w	[m]	Maschenweite
w_1	[%]	Wiederverwendungsanteil der ersten Wiederverwendung
w_2	[%]	Wiederverwendungsanteil der zweiten Wiederverwendung
w_3	[%]	Wiederverwendungsanteil der dritten Wiederverwendung
w_4	[%]	Wiederverwendungsanteil der vierten Wiederverwendung
x	[m]	Partikelgröße
x_{max}	[m]	Größte Partikelgröße im Aufgabegut
x_{min}	[m]	Kleinste Partikelgröße im Aufgabegut
x_T	[m]	Trennkorngröße

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
η	[%]	Abscheidegrad
μ	[kg/ms]	dynamische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
HPX80	Abrasiv der Firma Barton, Granatsand mit Mesh-80-Siebung
ICP-OES	Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma
INE	Institut für Nukleare Entsorgung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MaSK	„Magnet-Separation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen“
Nenawas	Neuartige Entsorgungswege für Abrasivmittel aus der Wasserstrahl-Schneidetechnik
REM	Rasterelektronenmikroskopie
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
WAIS	Wasser-Abrasiv-Injektions-Schneiden
WAS	Wasser-Abrasiv-Schneiden
WASS	Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneiden

1. Einleitung

Mit dem wachsenden Energiebedarf weltweit ist in den kommenden Jahren in mehreren Ländern ein Ausbau der kerntechnischen Energieerzeugung geplant. Während die Zahl der geplanten und in Bau befindlichen Kernkraftwerke steigt, erreichen immer mehr Reaktoren das Ende ihrer Laufzeit. Damit stellt sich in Zukunft die Aufgabe, die Kernkraftwerke am technisch bedingten Laufzeitende sicher rückzubauen und den radioaktiven Abfall zu entsorgen. Als Konsequenz des Unfalls im Kernkraftwerk Fukushima in Japan im Jahr 2011 beschloss die deutsche Bundesregierung den Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2023. Durch diese Entscheidung sind in den letzten Jahren die Stilllegung und der Rückbau der Kernkraftwerke in Deutschland fortgeschritten. Nicht nur der aufwendige Rückbau, sondern auch die Lagerung und Entsorgung des radioaktiven Abfalls führt dabei zu sehr hohen Kosten. Deshalb wird bei der Planung des Rückbaus auf die Vermeidung von Sekundärabfall geachtet. Die Aufgaben der Zerlegung, Trennung, Dekontamination, etc. können mit vielen unterschiedlichen Verfahren bewältigt werden. Für die Auswahl eines Verfahrens steht die sichere Durchführung der Arbeiten im Vordergrund. In jedem speziellen Anwendungsfall ist anschließend nach einer Abwägung von Aufwand, Geschwindigkeit und der Menge an zusätzlichem Sekundärabfall die Entscheidung für ein Verfahren zu treffen.

1.1 Hintergrund

Eine große Herausforderung beim Rückbau eines Kernkraftwerks ist die Zerlegung des Reaktordruckbehälters (RDB) und seiner Einbauten. Diese Komponente besteht aus zum Teil 25 cm dickem Edelstahl, der nach jahrelanger Neutronenbestrahlung während des Betriebs teilweise aktiviert ist. Die Zerlegung und Verpackung der Teile muss daher fernhantiert erfolgen. Die verschiedenen Verfahren, mit denen der RDB und die Einbauten zerlegt werden können, haben bestimmte Vor- und Nachteile, weshalb kein bestimmtes Verfahren universell angewendet wird. Mit thermischen Zerlegeverfahren, wie z.B. dem Plasmaschneiden, können mit hoher Schnittgeschwindigkeit fernhantiert dicke Stahlkomponenten geschnitten werden. Der Nachteil ist jedoch, dass beim Schneiden durch das Aufschmelzen des Stahls Aerosole in die Umgebung abgegeben werden. Da diese Aerosole aus dem Reaktorstahl stammen und radioaktiv sind, werden eine dichte Einhausung, sowie

aufwendige Luftfilter benötigt. Ein weiteres klassisches Zerlegeverfahren ist das Sägen. Im Vergleich zum Plasmaschneiden werden bei diesem kalten Trennverfahren keine schwer zu kontrollierenden Emissionen freigesetzt. Auch ist die Menge des Sekundärabfalls klein und beschränkt sich auf das Werkzeug. Ein Nachteil ist jedoch die Störanfälligkeit bei komplexen Trennaufgaben wie z.B. Schnitten an Komponenten unter mechanischer Spannung. Dabei besteht die Gefahr, dass das Sägeblatt während des Schnitts eingeklemmt wird und das Werkzeug nicht mehr bewegt werden kann.

Ein gegenüber Störungen unempfindlicheres Verfahren ist das Wasser-Abrasive-Suspensions-Schneide-Verfahren (WASS). Beim WASS-Verfahren wird mit einem Hochdruckwasserstrahl geschnitten, der Abrasivpartikel (Granatsand) enthält. Bei diesem kalten Trennverfahren werden keine Aerosole freigesetzt und es können komplexe Strukturen unter mechanischer Spannung, wie z.B. die RDB-Einbauten, zerlegt werden. Für die Fernhantierung muss, ohne aufwendige Vorarbeiten, die Düse über die zu schneidende Komponente geführt werden. Der Nachteil des Verfahrens ist die zusätzliche Menge an Sekundärabfall, der in Form eines Abrasiv-Stahlpartikel-Gemischs beim Schnitt entsteht. Beim Schneiden vermischen sich radioaktive Stahlpartikel aus dem Schnittfugenmaterial mit Abrasivpartikeln, wodurch das gesamte Partikelgemisch als radioaktiver Abfall entsorgt werden muss. Abhängig davon, wie und in welchem Umfang Schnitte mit dem WASS-Verfahren durchgeführt werden, kann sich die zu entsorgende Abfallmenge durch den Sekundärabfall verdoppeln. Obwohl das Verfahren technisch viele Vorteile gegenüber anderen Trennverfahren bietet, werden aufgrund der hohen Entsorgungskosten des Sekundärabfalls häufig andere Verfahren vorgezogen.

1.2 Motivation

Im vom BMBF geförderten Projekt NENAWAS wurde bereits eine Möglichkeit untersucht, den Sekundärabfall des WASS-Verfahrens mittels einer Magnetseparationsanlage zu reduzieren. Auf den Erkenntnissen aufbauend, wurde im BMBF-geförderten Projekt „Magnet-Separation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (MaSK)“, eine neue Separationsanlage zur Siebung und Magnetseparation des Abrasiv-Stahl-Partikelgemischs entwickelt. Mit der Separationsanlage soll aus dem Abrasivabfall ein wiederverwendbares Abrasiv gewonnen werden, wodurch der Abrasivverbrauch des WASS-Verfahrens reduziert und somit der Sekundärabfall minimiert werden kann. Im Rahmen dieses gemeinsamen Forschungsvorhabens des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) und des Instituts für Nukleare Entsorgung (INE), wurde die vorliegende Arbeit angefertigt.

Da nach einem WAS-Schnitt ein Großteil der Abrasivpartikel noch intakt ist, soll der Sekundärabfall dabei durch Aufbereitung des wiederverwendbaren Abrasivs aus dem Abrasivabfall und die anschließende Wiederverwendung in der WASS-Anlage reduziert werden. In jedem Schneidevorgang mit Wiederverwendung kann so ein bestimmter Anteil an Abrasiv gespart werden. Für den Einsatz im kerntechnischen Bereich ist nicht nur die Abrasivaufbereitung, sondern auch die Reduktion der Stahlkonzentration im Fokus, da es sich um radioaktiven Stahl handelt. Zur Planung des Schneidevorhabens und der Verpackung des Abrasivabfalls ist es notwendig, die Stahlkonzentrationen der Fraktionen und somit die Radioaktivität im Voraus abschätzen zu können. Mit dieser Planung können die Parameter des Separationsverfahrens so eingestellt werden, dass der Prozess mit dem höchst möglichen Wiederverwendungsanteil betrieben werden kann, um somit zusätzlichen radioaktiven Sekundärabfall zu vermeiden und hohe Entsorgungskosten einzusparen.

1.3 Zielsetzung

Für die Zerlegung des RDBs mit dem WASS-Verfahren müssen bei der Planung neben der Durchführung der Schnitte auch die Menge und Zusammensetzung der Abfälle beachtet werden. Diese Informationen sind entscheidend für die Verpackung und Lagerung der Abfälle sowie die Handhabung aufgrund der Radioaktivität. Wird beim Einsatz des WASS-Verfahrens eine Aufbereitung und Wiederverwendung des

Abrasivs vorgenommen, ist die Menge und Zusammensetzung, insbesondere die Konzentration des radioaktiven Stahls, abhängig von den Prozessparametern der Abrasivaufbereitungsanlage. Die Siebmaschenweite der Aufbereitungsanlage und der Siebfehler der Siebung sind die Haupteinflüsse auf die Abfallmenge, den Wiederverwendungsanteil und die Stahlkonzentration der jeweiligen Fraktionen. Die Effektivität der Magnetseparation bei der Abrasivaufbereitung ist zudem abhängig von der Stahlsorte des geschnittenen Stahls. Um die Zusammenhänge dieser Parameter bei der Abrasivaufbereitung besser verstehen zu können und die entstehenden Abfallmengen und Zusammensetzung abschätzen zu können, werden folgende Fragen untersucht:

- Welchen Einfluss hat die Maschenweite der Nasssiebung bei der Abrasivaufbereitung auf den Wiederverwendungsanteil und somit auf den gesamten Abrasivverbrauch bzw. die Abfallmenge?
- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Maschenweite der Nasssiebung und der Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv?
- Die Effektivität des Magnetfilters ist abhängig von den magnetischen Eigenschaften des abzutrennenden Materials. Wie wird die Effektivität des Magnetfilters, und somit die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv, durch den Schnitt von unterschiedlichen Edelstahlsorten beeinflusst?

Anschließend wird anhand der Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen abgeschätzt, welche Abfallmengen und Stahlkonzentrationen sich beispielhaft in einem Schnittszenario an einem RDB ergeben.

2. Grundlagen

2.1 Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden

Das Wasserstrahlschneiden ist ein Trennverfahren, bei dem ein Hochdruckwasserstrahl zum Zerteilen des Schnittguts verwendet wird. Beim Wasserstrahlschneiden mit reinem Wasser, ohne den Zusatz von Abrasivpartikeln, können weiche Materialien wie z.B. Nahrungsmittel, Kunststoffe oder Textilien geschnitten werden. Durch den Einsatz von Abrasivpartikeln, welche dem Hochdruckwasserstrahl zugegeben werden, erhöht sich die Schnittleistung des Verfahrens stark, wodurch sich der Anwendungsbereich vergrößert. Das Verfahren wird als Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden (WASS) bezeichnet, wenn die Abrasivpartikel bereits im Hochdruckbereich der Anlage dem Wasser zugegeben werden. Werden die Abrasivpartikel dem Wasserstrahl erst nach Austritt aus der Düse zugegeben, wird das Schneidverfahren als Wasser-Abrasiv-Injektions-Schneiden (WAIS) bezeichnet [1]. Bei diesem Verfahren muss der Abrasivzugabebehälter nicht den Systemdruck besitzen. Ein Nachteil des WAIS-Verfahrens ist allerdings, dass durch die Abrasivzugabe nach der Wasserdüse Luftblasen in den Strahl gezogen werden, welche zu einer Trübung des Schnittbeckens führen. Mit der Verwendung von Abrasiv können auch harte Materialien wie z.B. Edelstahl, Keramiken, Beton oder Zirkalloy geschnitten werden [2]. Da es sich um ein kaltes Trennverfahren handelt, das zudem fernhantiert betrieben werden kann, eignet es sich spezielle Einsatzbereiche wie z.B. bei der Kampfmittelbeseitigung. Aus sicherer Entfernung kann die Schneidanlage gesteuert und z.B. Zünder aus Minen oder Blindgängern geschnitten werden [3].

Eine WASS-Anlage besteht aus einer Hochdruckpumpe, einem Abrasivzugabebehälter, einem Mischer, einem Hochdruckschlauch und einer Düse. In Abbildung 2.1 ist der Aufbau einer WASS-Anlage schematisch dargestellt.

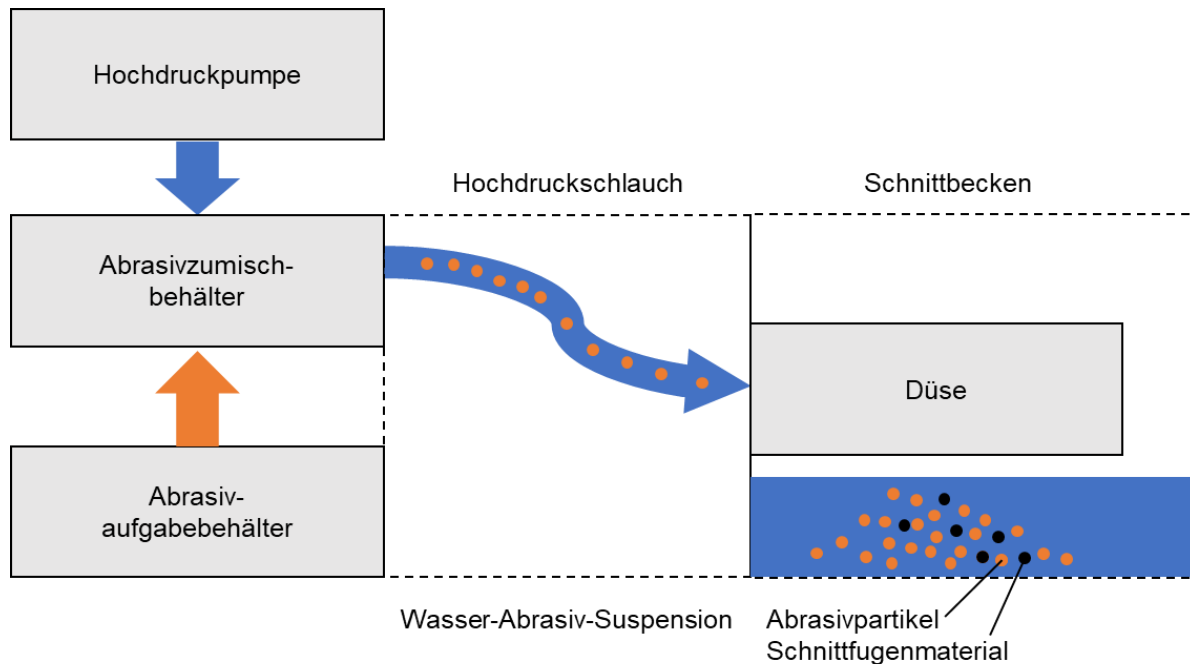


Abbildung 2.1: Aufbau und Komponenten einer WASS-Anlage

Mit der Hochdruckpumpe wird ein Wasserdruck von bis zu 2500 bar bereitgestellt. Je nach Anwendung und benötigter Schnittleistung wird der Wasserdruck angepasst. Beim WASS-Verfahren wird das Abrasiv im druckführenden Bereich der Anlage dem Wasser zugegeben, was den Vorteil hat, dass eine luftfreie Wasser-Abrasive-Suspension hergestellt wird. Im Abrasivzugabebehälter wird das Abrasiv für den Schnitt vorgelegt. Da die Beimischung des Abrasivs im Druckbereich der Anlage geschieht, wird der Abrasivzugabebehälter ebenfalls auf den Systemdruck gebracht. Im Mischer wird das Abrasiv dem Wasser zugegeben und die Suspension über den flexiblen Hochdruckschlauch zur Düse geführt. Die Düse wird mittels eines Manipulators bewegt und befindet sich knapp oberhalb des Schnittguts. Die Düse besteht üblicherweise aus Wolframcarbid mit einem Durchmesser von 0,6 mm. Bei einem Wasserdruck von etwa 2000 bar kann die Austrittsgeschwindigkeit des Strahls ca. 500 m/s betragen [4]. Aufgrund des hohen Verschleißes durch den WAS-Strahl vergrößert sich der Düsendurchmesser beim Schnitt [5]. Der Wasserdruck muss daher mit fortschreitender Schnittdauer angepasst werden, um eine konstante Austrittsgeschwindigkeit zu erreichen. Beim Schnitt von Stahlkomponenten wird Granatsand als Abrasiv verwendet. Bei einem Wasserdruck von über 2000 bar ist es möglich Edelstahlkomponenten mit einer Dicke von 300 mm zu schneiden. In Abbildung 2.2 ist der Schneidvorgang dargestellt.

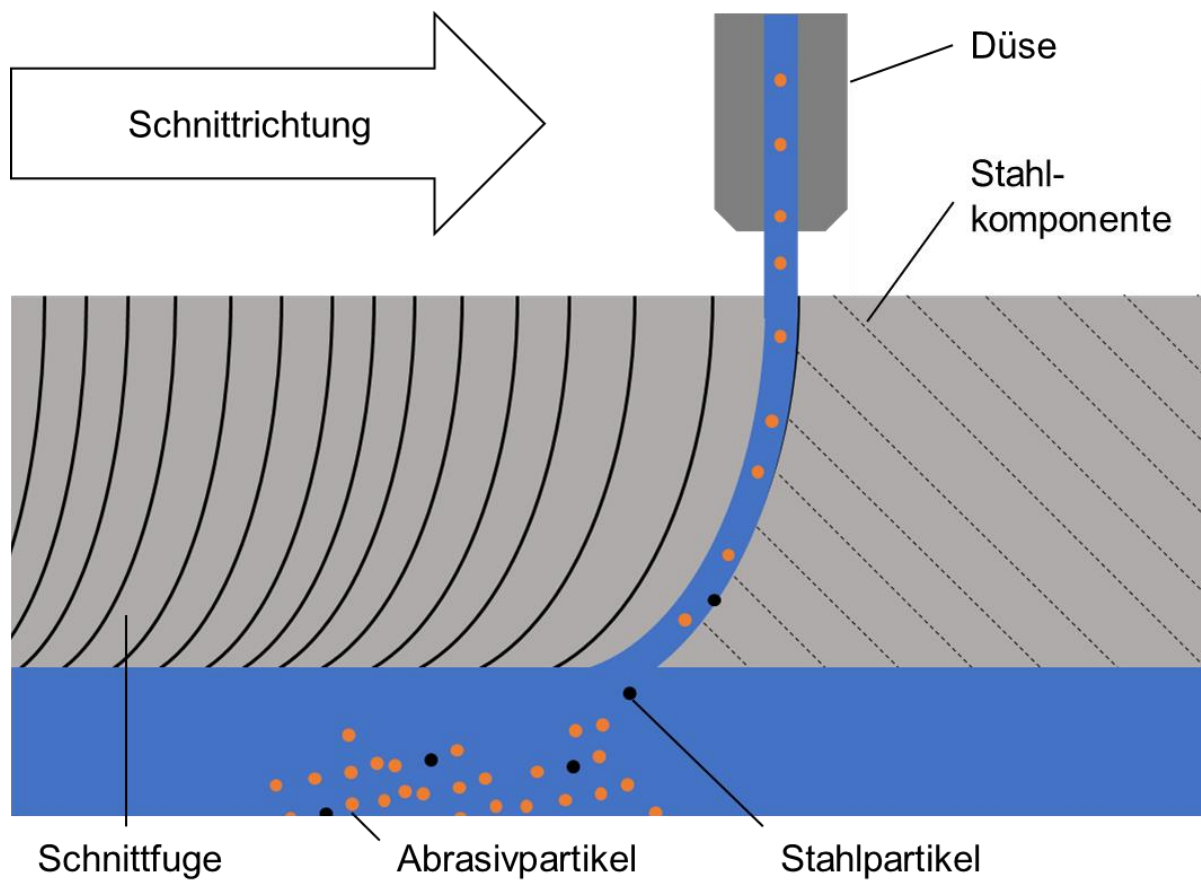


Abbildung 2.2: Darstellung eines WAS-Schnitts

Die Düse befindet sich wenige Millimeter von der Oberfläche der zu schneidenden Komponente. Der Wasserstrahl verlässt die Düse und die darin geführten Abrasivpartikel treffen auf die Stahloberfläche. Beim Aufprall trennen sie kleine Partikel aus dem Stahl heraus. Dabei zerbricht ein Teil der Abrasivpartikel, bzw. wird durch Abplatzungen oder Risse beschädigt. Die Stahlpartikel sowie die Abrasivpartikel und Abrasivbruchstücke werden vom Wasser aus der Schnittfuge gespült. In Abbildung 2.3 ist die Schnittfläche eines WAS-Schnitts an einem 100 mm dicken Edelstahl gezeigt.

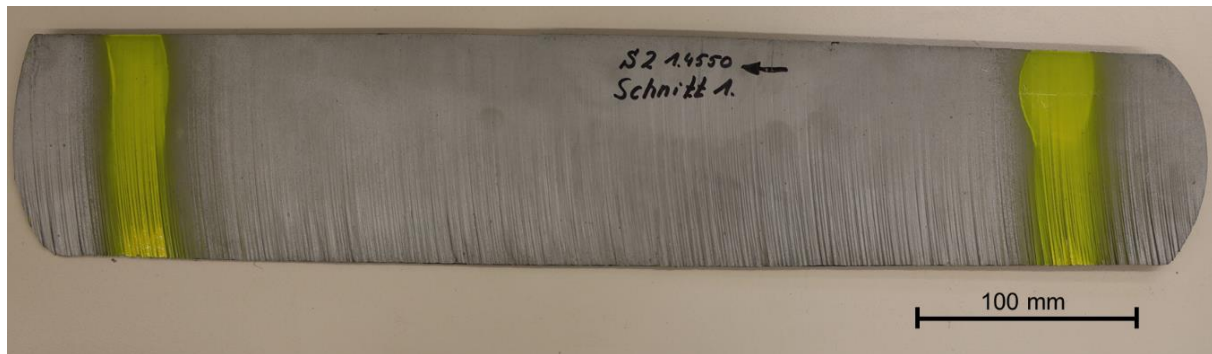


Abbildung 2.3: Schnittfläche eines WAS-Schnitts. Schnittrichtung von rechts nach links

An den gebogenen Schnittspuren ist die Schnittrichtung erkennbar. Der Hochdruckwasserstrahl wurde von oben auf den Stahl gerichtet. Am Austritt des Strahls auf der Unterseite werden die Furchen der Schnittspuren grober und tiefer.

WASS beim Rückbau kerntechnischer Anlagen

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eignet sich der Einsatz des WASS-Verfahrens speziell bei der Zerlegung von großen Stahlkomponenten wie z.B. dem RDB und seinen Einbauten [6]. Diese Bauteile stehen unter mechanischer Spannung, was die störungsfreie und fernhantierte Zerlegung mit Trennverfahren wie z.B. Seilsägen oder Kreissägen erschwert. Im Vergleich dazu ist das WASS-Verfahren unempfindlich gegenüber mechanischer Spannung im Schnittgut, da die Schnittdüse im Abstand von wenigen Millimetern über der Oberfläche geführt werden muss und so nicht verklemmen kann [7]. Die fernhantierte Bedienung kann über einen Manipulator erfolgen ohne aufwendige Vorbereitungen wie z.B. bei der Seilsäge. Bei der Zerlegung der Reaktoreinbauten eignet sich der Einsatz unter Wasser, was neben der Vermeidung von Emissionen (z.B. Aerosole) auch den Vorteil der abschirmenden Wirkung des Wassers gegenüber radioaktiver Strahlung bietet [8]. Neben dem WASS-Verfahren eignen sich für das Schneiden unter Wasser mechanische Verfahren wie z.B. Kreissägen und Seilsägen, sowie thermische Verfahren wie z.B. das Plasmaschneiden [9]. Beim Schnitt vermischt sich das Abrasiv mit dem radioaktiven Schnittfugenmaterial. Der Abrasivabfall muss deshalb als radioaktiver Abfall in der Endlagerung entsorgt werden. In dieser starken Vergrößerung der Sekundärabfallmenge liegt der Nachteil des WASS-Verfahrens. Aufgrund der technischen Vorteile des Verfahrens wird es trotzdem für die Zerlegung von Reaktordruckbehältern und Einbauten eingesetzt.

Granatsand als Abrasiv

Als Abrasiv für das WASS-Verfahren wird am häufigsten Granatsand verwendet. Je nach Förderort des Sands, Verarbeitung und Hersteller besitzt das Abrasiv eine andere Partikelgrößenverteilung und Zusammensetzung. In der vorliegenden Arbeit wurde als Abrasiv der Granatsand HPX80 der Firma Barton verwendet, welcher von WASS-Anwendern ebenfalls für die Zerlegung von Stahlkomponenten kerntechnischer Anlagen eingesetzt wird. Die Bezeichnung HPX80 weist auf die Partikelgröße des Abrasivs hin, da für die Größenklassierung des Granatsands ein Sieb mit 80 Maschen pro Inch verwendet wurde, was einer Maschenweite von 177 μm entspricht [10]. Granatsand eignet sich aufgrund seiner hohen Härte und Dichte für Schneidanwendungen. Es werden hierfür Granatsande bevorzugt, die aus dem Gestein gebrochen und gesiebt werden, im Gegensatz zu alluvialen Granatsandlagerstätten, die sich aufgrund von Anschwemmen durch Flüsse gebildet haben [11]. Beim Brechen der Körner entstehen scharfe Bruchkanten, was den Materialabtrag beim Schnitt erhöht und höhere Schnittgeschwindigkeiten ermöglicht [12]. Der verwendete Granatsand besteht überwiegend aus den Mineralien Almandin, Pyrop und Grossular (92 - 96 Massen-%) und zu einem geringeren Teil aus Magnetit, Hornblende und Feldspat (4 - 8 Massen-%). Die chemische Analyse des hier verwendeten Granatsands ist in Tabelle 2.1 angegeben.

Tabelle 2.1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung in Massen-% des Abrasivs Barton HPX [10]

Siliciumdioxid	SiO_2	36 %
Aluminiumoxid	Al_2O_3	20 %
Eisen(II)-oxid	FeO	30 %
Eisen(III)-oxid	Fe_2O_3	2 %
Titan(IV)-oxid	TiO_2	2 %
Mangan(II)-oxid	MnO	1 %
Calciumoxid	CaO	2 %
Magnesiumoxid	MgO	6 %

Granatsand aus alluvialen Lagerstätten weist eine rundere Form auf, da die Ecken durch den Abrieb geschliffen wurden. Die scharfen Kanten des gebrochenen Abrasivs sind in Abbildung 2.4 gezeigt.

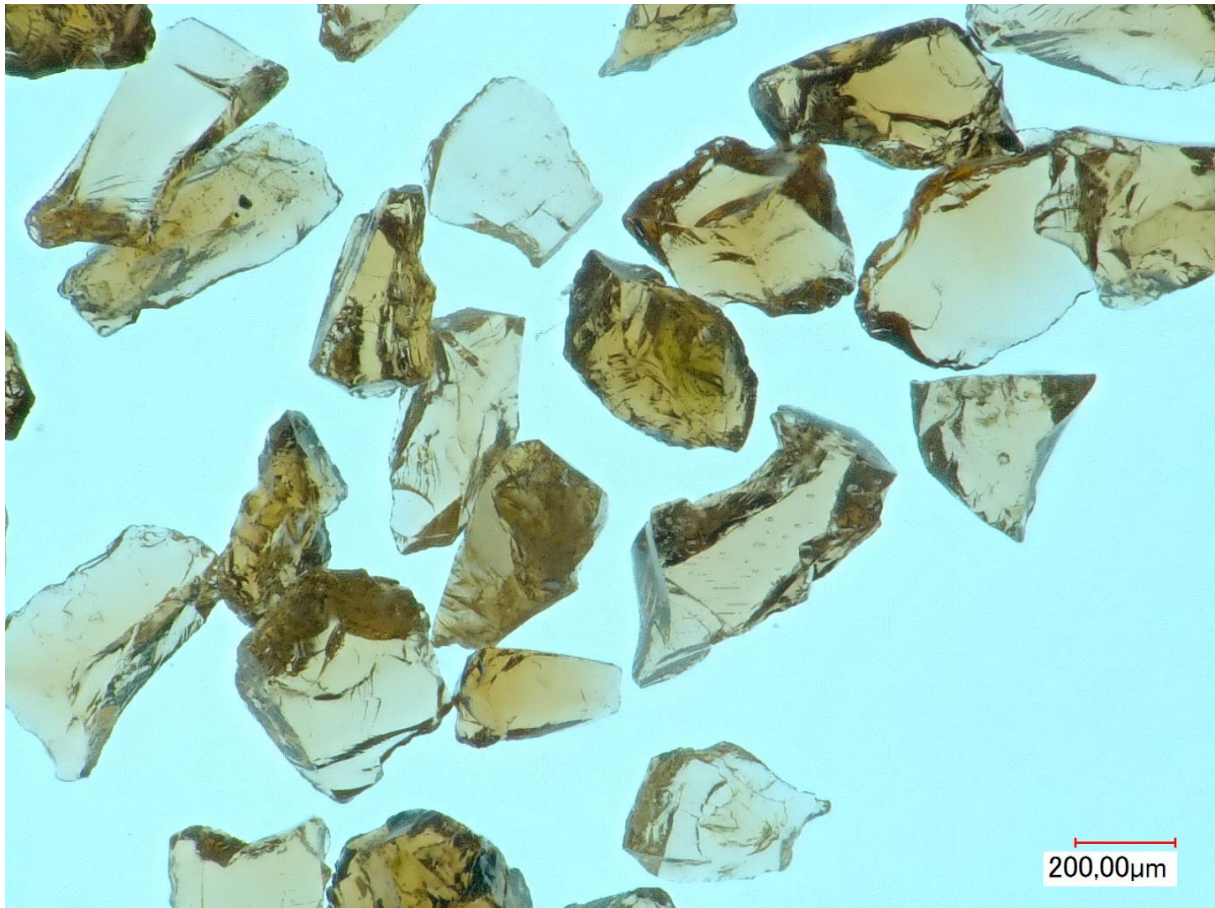


Abbildung 2.4: Lichtmikroskopaufnahme des neuen HPX80 Abrasivs

Neben der Form und Schärfe der Kanten hat die Partikelgröße einen Einfluss auf die Schneiteigenschaften des Abrasivs. Größere Abrasivpartikel ermöglichen beim Schnitt durch den größeren Impuls einen höheren Energieeintrag. Eine allgemeine, ideale Partikelgröße für Schneidanwendungen ist nicht zu bestimmen, da sich je nachdem welches Material geschnitten wird, eine andere Partikelgröße des Abrasivs eine maximale Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe erreichen lässt. Detaillierte Untersuchungen zu den Zusammenhängen der Partikelgröße von Granatsandabrasiven und deren Schnittgeschwindigkeiten und Schnitttiefen finden sich in der Literatur [13], [14]. Die Abhängigkeit der maximalen Schnitttiefe von der Abrasivpartikelgröße und den Materialeigenschaften des Schnittguts ist in Abbildung 2.5 gezeigt. Hierfür wurden die idealen Abrasivpartikelgrößen beim Schnitt einer duktilen Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung ($AlMgSi_{0,5}$) und sprödem Material wie Glas ermittelt.

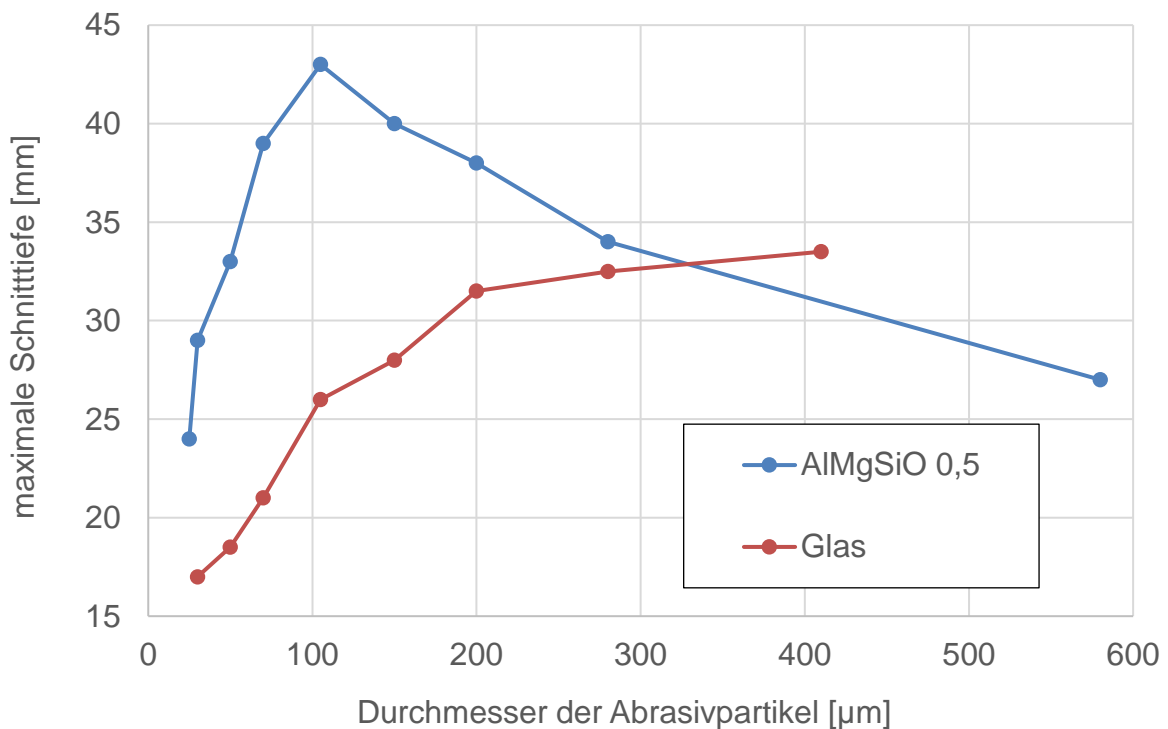


Abbildung 2.5: Einfluss der Abrasivpartikelgröße auf die max. Schnitttiefe verschiedener Materialien [15]

Für das Schneiden des spröden Glases steigt die maximale Schnitttiefe mit der Partikelgröße des Abrasivs stetig. Beim Schnitt des duktilen Materials erreichen Abrasivpartikel mit einem Durchmesser von 100 µm die maximale Schnitttiefe. Die Verwendung größerer Abrasivs führt zu einem Abfall der möglichen Schnitttiefe.

Während des Schnitts zerbricht beim Aufprall auf der Oberfläche des Schnittguts ein Teil des Abrasivs. Untersuchungen zum Bruchverhalten und zur Änderung der Partikelgrößenverteilung für verschiedene Granatabrasive sind in der Literatur zu finden [14]. Für das Abrasiv HPX80 der Firma Barton wurde als häufigstes Bruchverhalten die Zerkleinerung der Partikel mit 180 µm Durchmesser festgestellt, deren Partikelgröße sich zu 63 µm verschiebt [15]. Partikel zwischen 75 µm und 150 µm wurden am geringsten zerkleinert. Abrasive von verschiedenen Lagerstätten und Herstellern weisen jedoch unterschiedliche Bruchverhalten auf. Wie stark die Abrasivpartikel beim Schnitt zerkleinert werden, wird hauptsächlich durch das Material und die Dicke des Schnittguts beeinflusst [13]. Der Schnitt von Edelstahl verringert die durchschnittliche Partikelgröße des Abrasivs etwa doppelt so stark wie der Schnitt von Aluminium gleicher Materialdicke. Beim Schnitt von Granit wird die Abrasivzerkleinerung von der Zusammensetzung des Gesteins beeinflusst. Nach dem Schnitt kann der Anteil an Abrasivpartikeln größer 106 µm zwischen 67 % und 92 %

liegen [16]. Das Verständnis des Bruchverhaltens und der Zerkleinerung des Abrasivs sind für das Abrasivrecycling, welches in der konventionellen WASS-Anwendung verbreitet ist, von Bedeutung [17].

Beim Abrasivrecycling werden Abrasivbruchstücke mittels Größenklassierung wie z.B. Sieben entfernt. Die Nasssiebung ist bei der Abrasivaufbereitung direkt nach dem Schnitt ein geeignetes Verfahren, da einerseits eine energieintensive Trocknung des Abrasivabfalls entfällt und Staubemissionen vermieden werden. In der industriellen Anwendung des WASS-Verfahrens ist bei der Abrasivaufbereitung eine Entfernung der Partikel kleiner 90 µm üblich, um die einfache Handhabung des Abrasivs in der Schneidanlage sicherzustellen [18]. Um höhere Schnittgeschwindigkeiten, kleinere Schnittfugen und glattere Schnittflächen zu erreichen, können Abrasivpartikel kleiner 106 µm bzw. 125 µm entfernt werden [14]. Eine zusätzliche Entfernung des im Grobgut verbleibenden Schnittfugenmaterials ist beim konventionellen Abrasivrecycling unüblich [19], [20]. Aufgrund der breiten Anwendung des WASS-Verfahrens für verschiedene Werkstoffe, muss das Separationsverfahren für den Anwendungsfall und das Schnittgut geeignet sein. Die Kombination von Nasssiebung und Magnetseparation eignet sich für die Abscheidung von magnetischem Schnittfugenmaterial, wird jedoch bisher in der konventionellen Anwendung nicht eingesetzt.

Das aufbereitete Abrasiv kann entweder direkt oder mit Zumischen von neuem Abrasiv in einer WASS-Anlage verwendet werden. In der Literatur finden sich Untersuchungen zu den Schnitteigenschaften und Wiederverwendungsanteilen von recyceltem Abrasiv [12] und Abrasivmischungen [11]. Die Höhe des Wiederverwendungsanteils hängt von der Abrasivzerkleinerung beim Schnitt ab. Unter anderem führen dünnere Materialstärken des Schnittguts und niedrigere Schneiddrücke zu geringerer Abrasivzerkleinerung und somit höheren Wiederverwendungsanteilen [13]. Die Schnitteigenschaften der aufbereiteten Abrasive unterscheiden sich jedoch je nach Hersteller und Herkunft des Abrasivs. Untersuchungen der Schnitteigenschaften von aufbereitetem HPX80 Granatabrasiv der Firma Barton zeigen eine leichte Verbesserung der maximalen Schnitttiefe und eine niedrigere Oberflächenrauheit der Schnittfläche im Vergleich zu neuem Abrasiv. Die maximale Schnitttiefe von aufbereitetem Granatabrasiv aus Südindien, das mit einer Mesh-80-Siebung hergestellt wurde, ist bei der ersten Wiederverwendung im Vergleich zu neuem Abrasiv

um 26 % geringer [21]. Bei weiteren Aufbereitungs- und Wiederverwendungszyklen sinkt die Schnitttiefe bei jeder Aufbereitung um 3,9 % - 5,5 %. Bei drei Wiederverwendungszyklen sinkt der Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv nach den Schnitten auf 83 % beim ersten und 13 % beim dritten Schnitt (siehe Abbildung 2.6). Während eines WAS-Schnitts entstehen beim Aufprall des Abrasivs auf dem Schnittgut Risse in den Abrasivpartikeln. Aufgrund dieser Beschädigungen sind die Partikel bei einer Wiederverwendung anfälliger für eine Zerkleinerung. Auch durch Absplitterungen an den Abrasivpartikeln sinkt die Partikelgröße, bis diese bei der Abrasivaufbereitung entfernt werden. Daher sinkt mit jedem Aufbereitungszyklus der Wiederverwendungsanteil des Abrasivs [22].

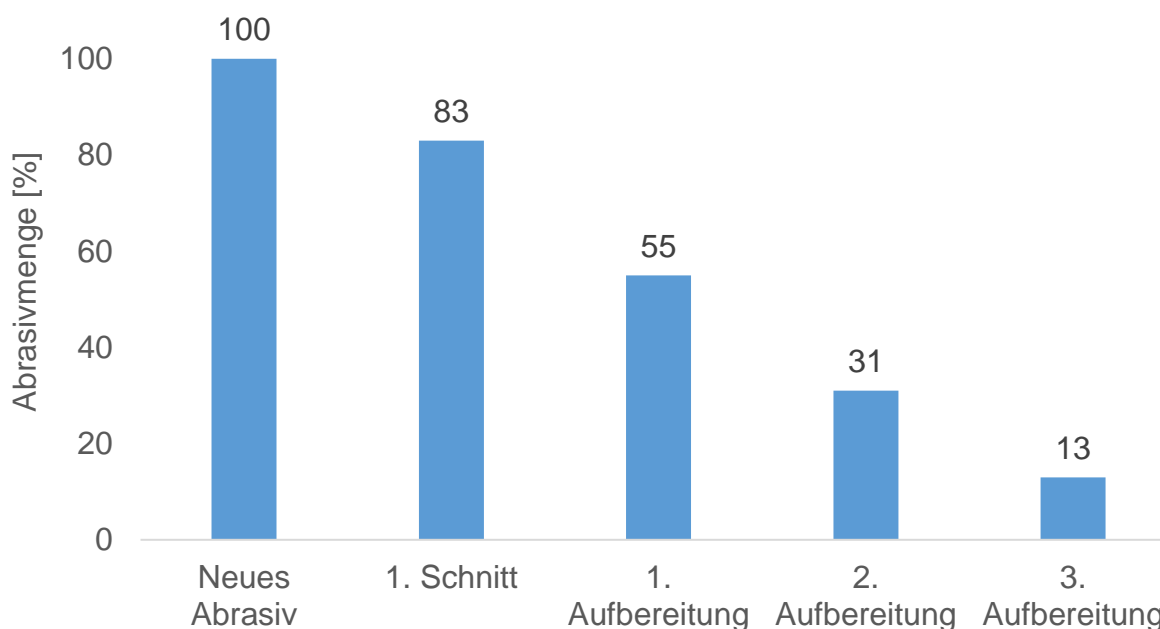


Abbildung 2.6: Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv bei 3 Wiederverwendungszyklen [14]

Die Zumischung von 40 % neuem Abrasiv zum aufbereiteten Abrasiv führt zu einer Zunahme der maximalen Schnitttiefe im Vergleich zu neuem Abrasiv. Untersuchungen zu Wiederverwendungsanteilen von Granatabrasiv der Firma GMA mit gleicher Partikelgröße zeigen Wiederverwendungsanteile nach den ersten beiden Schnitten von 59,05 % und 56,18 % [14].

Eine wiederholte Abrasivaufbereitung und Wiederverwendung ist möglich und nur durch die Partikelgröße und Zerkleinerung des Abrasivs beschränkt. Die Schnitttiefe,

Schnittgeschwindigkeit, Wiederverwendungsanteile sowie die Verbesserung der Schnitteigenschaften durch Zumischen von neuem Abrasiv können, je nach Herkunft der Granatsande, variieren [21].

2.2 Siebung

Die Siebung ist ein mechanisches Trennverfahren, mit dem Partikel eines polydispersen Stoffgemischs in zwei Fraktionen getrennt werden. Die Fraktion der Partikel, die größer als die Trennkorngröße sind, wird als Grobgut bezeichnet, die Fraktion der kleineren Partikel als Feingut (siehe Abbildung 2.7).

Das Aufgabegut wird auf den Siebboden gegeben und in Bewegung versetzt oder im Fluidstrom über die Siebmaschen bewegt. Bei diesem wiederholten Vergleich der Partikelgröße (x) mit der Maschenweite (w) des Siebs wird das Feingut durch die Siebmaschen bewegt. Je kleiner die Partikel im Vergleich zur Maschenweite sind, desto einfacher läuft der Prozess ab. Partikel mit einer Größe ähnlich der Maschenweite ($1 w < x < 1,2 w$) werden auch Grenzkörner genannt [23]. Bei Partikeln dieser Größe besteht die Möglichkeit, dass die Maschen von Partikeln verstopft werden und so die freie Siebfläche verringert wird. Diese Partikel werden dann als Klemmkörner bezeichnet und treten besonders bei senkrechter Anströmrichtung bei der Beladung des Siebs auf [24]. Werden Klemmkörner nicht während des Siebprozesses entfernt, nimmt mit der Betriebszeit die freie Siebfläche durch verstopfte Maschen ab.

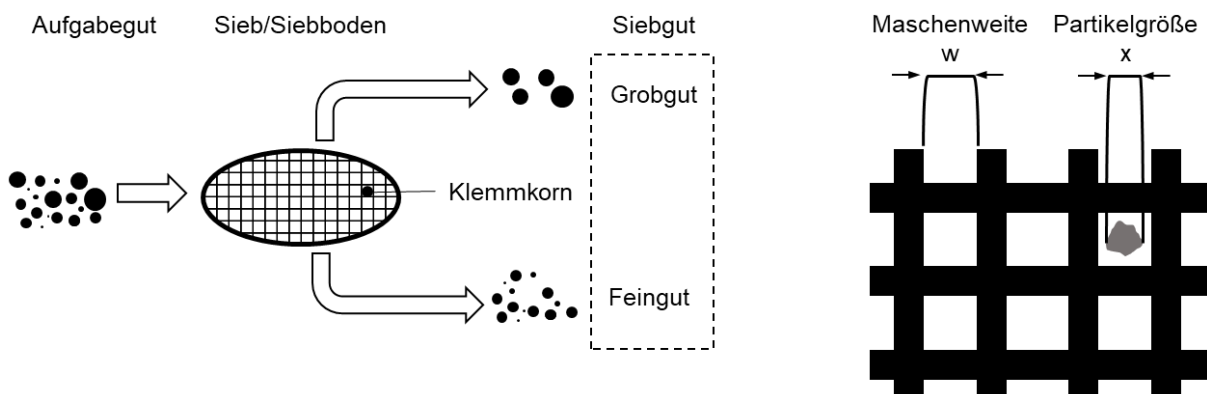


Abbildung 2.7: Definition der verwendeten Begriffe

Bei einer idealen Siebung ohne Klemmkörner wird das Partikelgemisch in zwei Fraktionen größer und kleiner der Trennkorngröße getrennt. In Abbildung 2.8 werden die Partikelgrößenverteilungen von Aufgabegut, Feingut und Grobgut einer Siebung

beispielhaft gezeigt. Die Verteilungskurven sind als massenbezogene bzw. volumenbezogene Dichteverteilungen $q(x)$ dargestellt, bei denen der Anteil der jeweiligen Partikelgrößenfraktion an der Gesamtmenge über der Partikelgröße x aufgetragen ist.

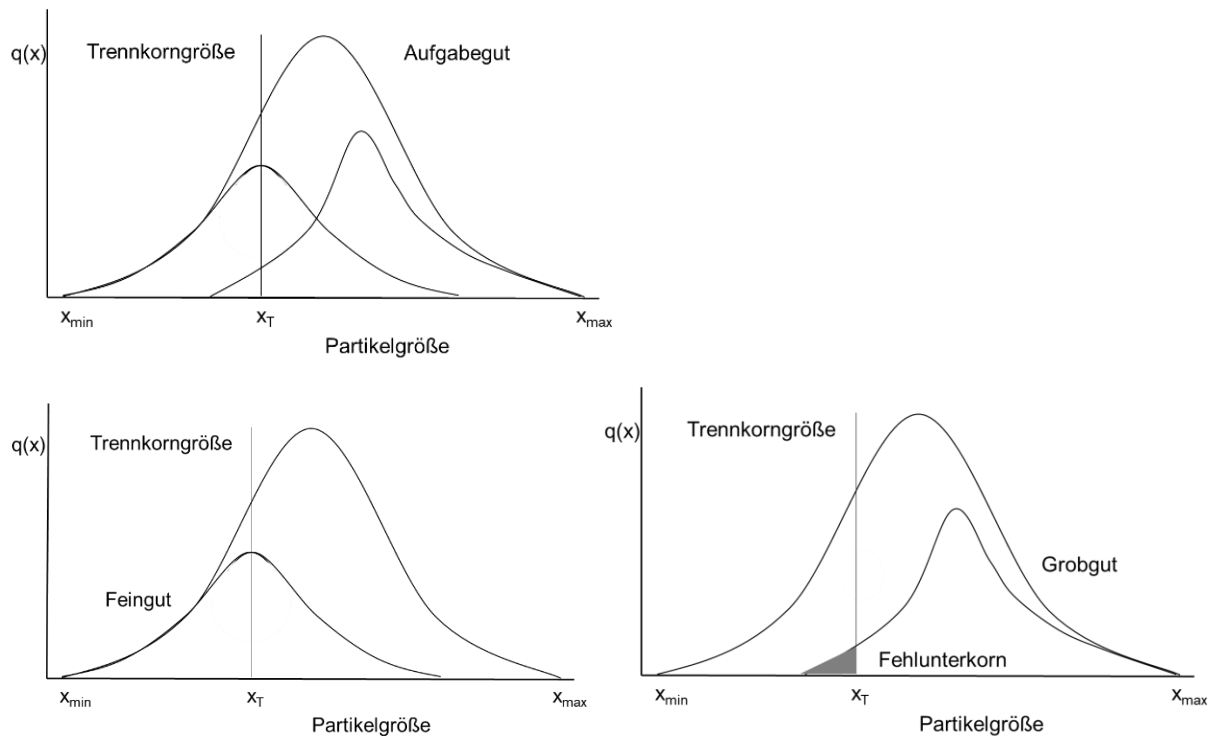


Abbildung 2.8: Klassierung von Aufgabegut in Feingut und Grobgut als Partikelgrößenverteilung dargestellt

Die Partikelgrößen der kleinsten, bzw. größten Partikel, welche im Aufgabegut enthalten sind, werden mit x_{\min} , bzw. x_{\max} bezeichnet. In der praktischen Siebung kommt es allerdings zu Siebfehlern, was in der Darstellung durch überlappende Kurven der Partikelgrößenverteilung gezeigt wird. Der Siebfehler, bei dem sich Partikel größer der Trennkorngröße x_T im Feingut befinden, wird als Fehlüberkorn bezeichnet. Gründe für diesen Fehler können beschädigte Maschen oder aus dem Sieb gespültes Aufgabegut sein. Feingutpartikel, welche kleiner als die Trenngröße x_T sind und sich nach der Siebung im Grobgut befinden, werden Fehlunterkorn genannt. Der Anteil des Fehlunterkorns wird unter anderem von der Siebdauer, der Aufgabemenge und der Siebfläche beeinflusst [23].

Für die Bewertung eines Siebergebnisses einer Klassiersiebung kann der Fehlkornanteil verwendet werden. Zum Beispiel ist bei einer Schutzsiebung, bei der eine maximale Partikelgröße im Siebgut nicht überschritten werden darf, das Fehlüberkorn relevant.

Kräfte beim Sieben

Bei grobem Aufgabegut wirken hauptsächlich Massen- und Reibungskräfte auf die Partikel. Im Bereich der Feinstsiebung ($x < 1$ mm) überwiegt der Einfluss der Haftkräfte. Diese sind Van-der-Waals-Kräfte, Flüssigkeitsbrücken zwischen feuchten Partikeln und elektrostatische Anziehungskräfte. Bei der Siebung müssen die Haftkräfte überwunden werden. Je nach Siebgut können bei der Feinstsiebung die Haftkräfte nicht durch Massenkräfte (Beschleunigung der Partikel) überwunden werden [25].

Die Zusammenhänge zwischen den Haftkräften H und Partikelgröße x , sowie der Massenkräfte F_m und der Partikelgröße lauten:

$$H \sim x \quad (2.1)$$

und

$$F_m \sim x^3 \quad (2.2)$$

Das bedeutet, je feiner das Aufgabegut ist, desto stärker überwiegen die Haftkräfte, wodurch die Siebung behindert.

Zusätzlich zur Beschleunigung sind hierfür die Strömungskräfte des Fluides (Luft oder Wasser) nötig, um die Haftkräfte zu überwinden. Bei der Luftstrahlsiebung oder der Nasssiebung werden Massenkräfte und Strömungskräfte genutzt, um die Haftkräfte zu überwinden, um Feinstsiebungen durchzuführen [23]. Zur Feinstsiebung eignet sich besonders die Nasssiebung, bei der das Aufgabegut mit Wasser umspült wird. Dadurch werden Haftkräfte reduziert und die Anziehung durch Flüssigkeitsbrücken aufgehoben. Dadurch können Partikel im Größenbereich von ca. 25 μm gesiebt werden. In der Praxis ist der Einsatz der Nasssiebung eingeschränkt, da zu beachten ist, dass das Siebgut nicht im Fluid lösbar sein darf und je nach Anwendung weitere Prozessschritte wie Trocknung und Umgang mit Agglomeration nötig sind [24].

Einflussgrößen bei der Siebung

Die große Anzahl der Einflussgrößen beim Sieben kann man in drei Gruppen zusammenfassen:

- Stoffgrößen und Eigenschaften des Siebguts
- Betriebsparameter der Siebanlage
- Geometrie und Bauweise der Siebanlage

Je nach Art der Siebmaschine, Siebung und des Siebguts sind diese Einflüsse verschieden, wodurch eine Vielzahl von Siebtheorien, jedoch noch keine allgemeingültige, entwickelt wurde. Eine Auswahl wichtiger Einflussgrößen bei der Siebung und im speziellen bei der Nasssiebung im Feinstbereich sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Kategorisierte Auswahl wichtiger Einflussgrößen bei der Nasssiebung

Stoffgrößen des Siebguts	Betriebsparameter	Geometrie der Siebanlage
Partikelgrößenverteilung	Aufgabemenge	Maschenweite
Partikelform	Volumenstrom des Wassers	Freie Siebfläche
Dichte	Frequenz und Amplitude	Neigung des Siebbodens

Bei den Stoffgrößen und Stoffeigenschaften ist vor allem die Partikelgrößenverteilung des Aufgabeguts wichtig, wodurch die Fein- und Grobgutfraktionen sowie das Auftreten von Klemmkörnern abgeschätzt werden kann. Je nach Dichte des Aufgabeguts und Volumenstrom des Wassers muss mehr mechanische Energie aufgewendet werden, um die Bildung eines zähen, entwässerten Siebkuchens zu vermeiden [26]. Für den Eintrag der mechanischen Energie werden häufig Unwuchtantriebe verwendet. Man unterscheidet zwischen indirekt und direkt erregten Siebböden. Bei indirekt erregten Sieben ist am Siebrahmen ein Unwuchtantrieb angebracht, welcher das gesamte Sieb in Bewegung versetzt. Über Federn oder lose Lagerung ist das Sieb mit der unbewegten Umgebung des Gehäuses verbunden. Bei diesem Aufbau sind Beschleunigungen von etwa 8 g möglich [23].

Die Schwingbeschleunigung a wird beschrieben durch:

$$a = e * \omega^2 \quad (2.3)$$

a = Schwingbeschleunigung, e = Amplitude, ω = Winkelgeschwindigkeit

Das Verhältnis der Schwingbeschleunigung zur Erdbeschleunigung ist die Froudezahl Fr :

$$Fr = \frac{e * \omega^2}{g} \quad (2.4)$$

Fr = Froudezahl, g = Schwerebeschleunigung

Bei Wurfsieben beginnt die Auflockerung und Bewegung des Aufgabeguts bei $Fr = 1$. Häufig werden Siebmaschinen mit Unwuchtantrieb im Bereich von $1 > Fr > 5$ betrieben [23].

Je nach Aufgabemenge, Maschenweite und freier Siebfläche wechselt der Betriebszustand von einer Dünnschicht- zu einer Dickschichtsiebung. Bei der Dickschichtsiebung behindern sich die Partikel beim Maschendurchtritt. Der Feingutanteil im Grobgut ist abhängig von der Siebdauer. Die Bewegung und Durchmischung des Siebkuchens und die Zugabe von Wasser ist für die Siebleistung der Dickschichtsiebung wichtig.

Nasssiebanlage

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Siebkomponente wendet eine Nasssiebung im Batch-Betrieb an. Das Siebgut wird in einer Suspension mit ca. 1 Massen-% Feststoffkonzentration auf das Sieb gegeben. Das Grobgut bleibt auf dem Siebboden zurück, während das Feingut mit dem Wasser abgepumpt wird. Zu Beginn der Siebung ist der Siebboden leer und erreicht zum Ende der Siebung die maximale Beladung. Der Betriebszustand wechselt mit fortschreitender Siebdauer zur Dickschichtsiebung. Das Siebgut wird durch einen Unwuchtrotationsvibrator, welcher horizontal ausgerichtet ist, in Bewegung gehalten. Der Unwuchtrotationsvibrator ist am Rahmen des lose im Gehäuse gelagerten Siebs befestigt. Das Grobgut auf dem Siebboden wird durch die nachfließende Suspension gespült. Mit der Siebdauer sinkt die Feststoffkonzentration der Suspension. Der Aufbau und die Funktionsweise der Siebkomponente der Separationsanlage sind in Kapitel 3.1.3.1 dargestellt.

2.3 Mischen, Rühren und Homogenisieren

Mischen bezeichnet die Verteilung mehrerer Stoffkomponenten gleicher oder verschiedener Aggregatzustände in einem bestimmten Volumen. Eine homogene Mischung zeichnet sich durch eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten aus. Im Folgenden wird auf zwei Fälle des Mischens, dem Mischen von Partikeln (fest - fest) und dem Mischen von Partikeln in Flüssigkeiten (fest - flüssig) genauer eingegangen.

Partikelmischungen (fest - fest)

Das Mischen von Partikeln ist in der Praxis vor allem bei der Probennahme und Analyse von Partikelmischungen eine Problemstellung, da die Aussagekraft der Analyse von einer repräsentativen Probennahme abhängt [27]. Ähneln sich die Partikelgrößen, Dichten und Formen der zu mischenden Komponenten, ist eine gleichmäßige Mischung in der Praxis möglich, da andernfalls Entmischungseffekte auftreten, die ein homogenes Mischen erschweren [28]. Bei der Entmischung von Partikelmischungen treten mehrere Mechanismen gleichzeitig auf, was eine allgemeingültige Beschreibung oder Berechnung des Vorgangs erschwert. Die Effekte und Einflussgrößen der verschiedenen Mechanismen sind im Folgenden beschrieben. Entmischung tritt auf, wenn Partikelmischungen bewegt werden, deren Partikel sich in Größe, Dichte und Form unterscheiden. Bei guten Fließeigenschaften der Partikelmischungen tritt stärkere Entmischung auf [29]. Bei feuchten Gemischen ist die Beweglichkeit der Partikel durch die Haftkräfte der Flüssigkeitsbrücken eingeschränkt, wodurch auch die Entmischung reduziert wird [30].

Suspensionen (fest - flüssig)

Der Zustand einer Mischung von Partikeln in einer Flüssigkeit wird Suspension genannt. Die Partikel müssen hierfür in Bewegung gebracht werden, da das Gemisch in Ruhe durch Sedimentation oder Flotation der Partikel zur Phasentrennung neigt. Die Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel hängt hauptsächlich von der Partikelgröße ab, sowie der Dichtedifferenz von Partikel und Flüssigkeit und der Viskosität der Flüssigkeit [31].

Für Partikel bis zu einer bestimmten Größe kann die Sedimentationsgeschwindigkeit mit der Stokes'schen Sinkgeschwindigkeit abgeschätzt werden:

$$u_{st} = \frac{\Delta\rho d_{st}^2 g}{18 \mu} \quad (2.5)$$

u_{st} = Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit

$\Delta\rho$ = Dichtedifferenz Partikel- Flüssigkeit

d_{st} = Stokesdurchmesser

μ = dynamische Viskosität der Flüssigkeit

g = Schwerebeschleunigung

Sie gibt die Sinkgeschwindigkeit eines sphärischen Partikels in einer Suspension mit geringem Feststoffanteil ohne Partikel-Partikel-Interaktion an. Zur Herstellung einer Suspension müssen die sedimentierten Partikel aufgewirbelt werden und durch Energieeintrag der Sedimentation entgegengewirkt werden. In der Praxis geschieht die Herstellung einer Suspension häufig in einem Rührbehälter. Die typische und einfachste Bauform eines Rührbehälters ist ein zylinderförmiger Behälter mit einem Klöpperboden und einem Rührer, der über eine Rührerwelle angetrieben wird [25]. Bei einem zentral positionierten Rührer gerät die Flüssigkeit im Behälter in Rotation und wird durch die Fliehkraft in Richtung der Behälterwand gefördert. Dadurch steigt der Füllstand am Behälterrund und sinkt in der Behältermitte. Dieses Strömungsbild in Rührbehältern wird auch als Flüssigkeitstrombe bezeichnet [30]. In Abbildung 2.9 ist die Trombenbildung in einem Rührbehälter mit zentralem Rührer veranschaulicht.

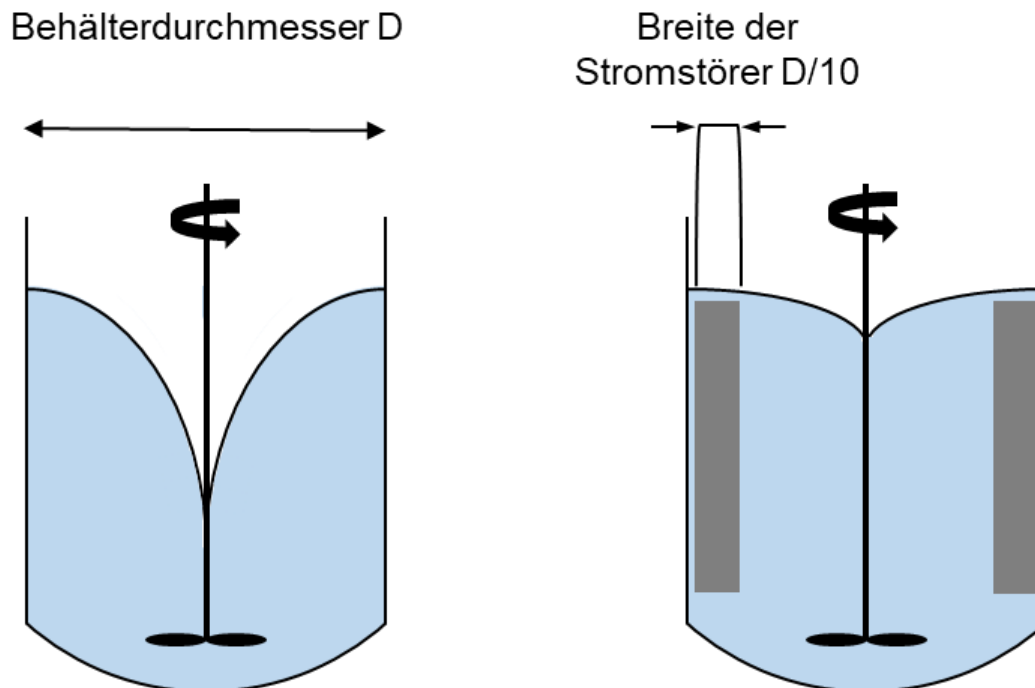


Abbildung 2.9: Trombenbildung im Rührbehälter ohne Stromstörer (links) und mit Stromstörern (rechts)

Bei starker Rotation kann die Trombe die Rührerblätter erreichen, wodurch Luftblasen eingerührt werden und Unwuchten der Rührerwelle verstärkt werden. Durch die Rotation der Suspension und die dadurch auf die Partikel der Suspension wirkenden Kräfte, wird zudem die Entmischung gefördert. Durch den Einsatz von Stromstörern, welche an der Behälterwand angebracht sind, wird die Rotation der Flüssigkeit behindert. Für Suspensionen in Wasser erfüllen vier Stromstörer mit definierter Breite, die von der Behälterwand in den Rührkessel ragen, (siehe Abbildung 2.9, rechts) diese Aufgabe [32]. Der Energieeintrag geschieht durch die Rotation des Rührers. Je nach Medium und Anforderung sind verschiedene Rührertypen wie z.B. Propellerrührer, Blattrührer, Gitterrührer, Wendelrührer etc., für die Rühraufgabe geeignet. Zwischen dem Ruhezustand, bei dem sich alle Partikel am Behälterboden befinden, und dem Zustand der homogenen Suspension, bei dem die Verteilung der Partikel im gesamten Rührbehälter gleichmäßig ist, gibt es Zwischenstufen, die in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt sind [30]. Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Drehfrequenz des Rührers und dem Zustand der Suspension im Rührbehälter.

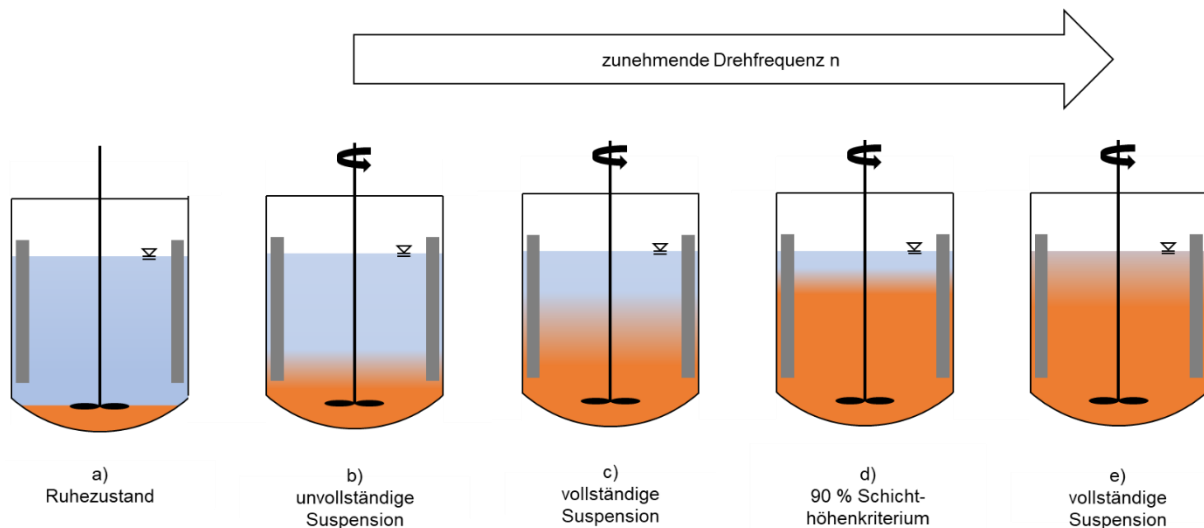


Abbildung 2.10: Zustände der Suspension in Abhängigkeit der Rührerdrehfrequenz

Bis zu einer bestimmten minimalen Drehfrequenz des Rührers reicht der Energieeintrag nicht aus, um Partikel vom Behälterboden aufzuwirbeln. Ab einer bestimmten Drehfrequenz werden Partikel von der Strömung vom Behälterboden abgehoben und bis zu einer bestimmten Höhe aufgewirbelt, während weiterhin ein Teil der Partikel am Behälterboden bleibt (Abbildung 2.10 b). Der Zustand bei dem alle Partikel vom Behälterboden aufgewirbelt werden (Abbildung 2.10 c) wird als vollständige Suspension bezeichnet. Dies bedeutet noch keine homogene Verteilung der Partikel, da der obere Bereich des Behälters weiterhin partikelfrei sein kann. Die vollständige Suspension wird mit dem „1-Sekunden-Kriterium“ beschrieben, welches besagt, dass ein Partikel nicht länger als eine Sekunde am Behälterboden verbleiben kann, bevor es wieder aufgewirbelt wird. Bei höherer Rührerdrehfrequenz werden die Partikel höher aufgewirbelt und erreichen eine Höhe von etwa 90 % des Füllstands. Besitzen die Partikel in der Suspension eine sehr breite Partikelgrößenverteilung mit sehr feinen Partikeln, ist die Grenze zwischen Suspension und Überstand bei über 90 % der Füllhöhe nicht klar erkennbar. Der Zustand, bei dem alle Partikel der Suspension bis zu einer Höhe von 90 % der Füllhöhe aufgewirbelt werden, wird als „90 %-Schichthöhenkriterium“ bezeichnet (Abbildung 2.10 d). Wird die Drehfrequenz weiter erhöht, verteilen sich die Partikel homogen im gesamten Flüssigkeitsvolumen (Abbildung 2.10 e). Je nach Anwendungsfall kann in der Praxis das geeignete Kriterium zur Beurteilung der Suspension gewählt werden. In vielen Anwendungen genügt bereits das

„1-Sekunden-Kriterium“ für eine ausreichende Verteilung der Partikel. Entscheidend ist zudem, wo die Suspension aus dem Rührbehälter entnommen wird. Wird die Suspension über Rohrleitungen abgepumpt, sind die Eintauchtiefe des Ansaugrohrs und der dort vorherrschende Zustand der Suspension zu berücksichtigen. Je nach Anwendung kann dies für die gewünschte Feststoffkonzentration und Zusammensetzung der Suspension genutzt werden.

3. Aufbau der Separationsanlage und Messmethoden

Im folgenden Kapitel wird die am TMB entwickelte [33] Separationsanlage zur Herstellung des wiederverwendbaren Abrasivs vorgestellt und die Herstellung des Probenmaterials für die Separationsversuche gezeigt. Anschließend werden die Messmethoden, mit denen die Proben untersucht und die Separationsversuche bewertet wurden, erklärt. In Kapitel 3.4 wird beschrieben, welche Versuchsplanung und Vorgehensweise zur Beantwortung der Fragestellungen aus der Zielsetzung gewählt wurden.

3.1 Separationsanlage

Die in dieser Arbeit vorgestellte Separationsanlage ist nicht die erste Anlage zur Behandlung von Abrasivabfällen, die am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) entwickelt wurde. Die vorangegangenen Arbeiten, welche die Grundlage und die Vorarbeit für die hier vorgestellte Separationsanlage sind, werden im Folgenden gezeigt. Es wird auf die Funktionsweisen der Anlagen eingegangen und die technische Umsetzung erklärt.

3.1.1 Vorangegangene Arbeiten zur Separationsanlage

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer Sieb- und Magnetseparationsanlage zur Herstellung eines wiederverwendbaren Abrasivs, die die zweite Anlage zur Behandlung von Abrasivabfällen ist, die am TMB entwickelt wurde. Die Grundlage hierfür war die Separationsanlage „Nenawas“. Ziel dieser Vorgängeranlage war es, radioaktive Stahlpartikel aus dem Abrasivabfall soweit abzutrennen, dass die nicht radioaktiven Abrasivpartikel als konventioneller Abfall entsorgt werden können [34]. Um dieses Ziel umzusetzen, wurde ein Magnetfilter verwendet, durch den der Abrasivabfall als wässrige Suspension in einem Kreislauf gepumpt wurde. Die Stahlpartikel wurden am Magnetfilter abgeschieden und gereinigtes Abrasiv sollte getrennt von den Stahlpartikeln entsorgt werden (Projekt „Nenawas“). Die technische Umsetzung des Separationsverfahrens sowie eine Parameterstudie und eine Untersuchung der Fraktionen wurden in der Dissertation von Dr.-Ing. Martin Brandauer behandelt [35]. Das Funktionsprinzip dieser Anlage und der Einsatz des Magnetfilters wurden als Grundlage für das folgende Projekt „MASK“ übernommen. Der verwendete Magnetfilter mit Permanentmagneten wurde in der Dissertation von Dr.-Ing. Carla-Olivia Krauß

mittels numerischer Strömungssimulationen und Strömungsexperimenten untersucht und verbessert [36]. Das ursprüngliche Ziel des Forschungsvorhabens war die Separation der radioaktiven Stahlpartikel aus dem Abrasivabfall, um das verbrauchte Abrasiv nach der Behandlung als nichtradioaktiven Abfall entsorgen zu können. Chemische Analysen und Mikroskopieaufnahmen des mit der Separationsanlage behandelten Abrasivs zeigten, dass eine ausreichende Separation der Stahlpartikel für dieses Ziel nicht möglich ist. Anhand von Rastelektronenmikroskopie konnten zudem Stahlanhaftungen an Abrasivpartikeln festgestellt werden, welche mit dem Separationsverfahren nicht abgetrennt werden können [35], [37]. Im Laufe des Projekts wurde die Zielsetzung geändert, mit dem neuen Ziel, ein wiederverwendbares Abrasiv aus dem Abrasivabfall herzustellen, welches direkt für weitere Schnitte in der WASS-Anlage eingesetzt werden kann. Um den Ansatz der Aufbereitung und Wiederverwendung von Abrasivabfällen umzusetzen zu können, wurde die Separationsanlage um eine Siebkomponente erweitert. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Betriebs- und Anlagenparameter auf den Wiederverwendungsanteil und die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv experimentell untersucht. Mittels einer Extrapolation der Wiederverwendungsanteile für bis zu vier Wiederverwendungszyklen wurde die Abrasivabfallreduzierung bei der Abrasivaufbereitung mit verschiedenen Maschenweiten modelliert. Im folgenden Abschnitt ist der Ansatz der Kombination von Siebung und Magnetseparation genauer erläutert.

3.1.2 Prinzip der Separationsanlage

Das WASS-Verfahren eignet sich mit seinen vielen technischen Vorteilen für die sichere und schnelle Zerlegung von RDBs und ihren Einbauten. Die Entsorgung des Abrasivabfalls, der dabei in große Mengen anfällt, erhöht jedoch die Kosten und den Aufwand, wodurch Schneidverfahren mit mehr Nachteilen, aber geringerem Sekundärabfall diesem vorgezogen werden. Eine Möglichkeit den Sekundärabfall zu verringern, ist die Aufbereitung und Wiederverwendung des Abrasivs. Im Folgenden wird zuerst das Prinzip der Abrasivwiederverwendung und anschließend die technische Umsetzung mit der Separationsanlage vorgestellt.

Beim Schnitt von radioaktiven Komponenten, wie z.B. den Reaktoreinbauten mit dem WASS-Verfahren, vermischt sich das Abrasiv mit den radioaktiven Stahlpartikeln des Schnittfugenmaterials. Dieses Gemisch muss, obwohl es nur etwa 2 Massen-%

radioaktive Partikel enthält, vollständig als radioaktiver Abfall entsorgt werden. Um den Abrasivabfall als nichtradioaktiven Abfall entsorgen zu können, wäre eine fast vollständige Separation der Stahlpartikel nötig. Mechanische Separationsanlagen, wie z.B. Siebanlagen besitzen in der Praxis eine begrenzte Trennschärfe. Zudem weisen vereinzelte Abrasivpartikel Stahlanhaftungen auf, die beim Aufprall auf das Schnittgut während des WAS-Schnitts entstehen [37]. Diese Anhaftungen können mit mechanischen Separationsverfahren nicht abgetrennt werden und befinden sich auch nach der Behandlung im Abrasivabfall. Eine vollständige Trennung der Abrasivpartikel von den radioaktiven Stahlpartikeln ist deshalb technisch nicht möglich. Eine Möglichkeit, die Menge an Sekundärabfall zu reduzieren, ist die Wiederverwendung von Abrasiv. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, ist nach dem WAS-Schnitt ein Teil des Abrasivs noch intakt und kann für einen weiteren Schnitt der WASS-Anlage erneut zugeführt werden. Das Prinzip der Abrasivwiederverwendung und die dafür nötigen Prozessschritte sind in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt.

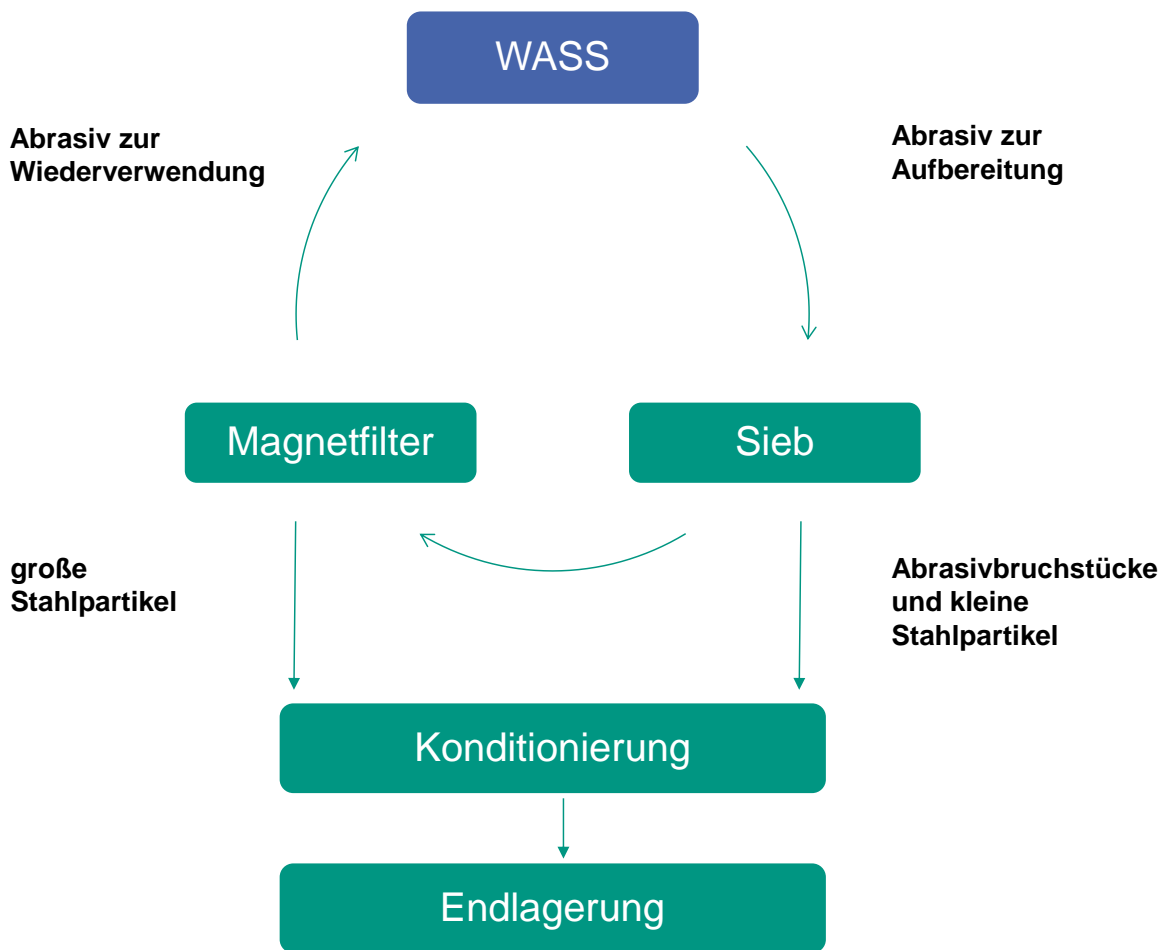


Abbildung 3.1: Prinzip der Wiederverwendung [37]

Beim Schneiden eines Stahlbauteils des RDBs oder der Einbauten fällt ein Gemisch aus Abrasivpartikeln und radioaktiven Stahlpartikeln an. Um daraus die intakten Abrasivpartikel abzutrennen, die für einen weiteren Schnitt geeignet sind, werden zwei Prozessschritte, Sieben und Magnetfiltern, angewandt. Im ersten Schritt wird das Partikelgemisch nass gesiebt. Das Feingut, welches aus Stahlpartikeln und kleinen Abrasivbruchstücken besteht, kann nicht weiter genutzt werden und wird nach geeigneter Konditionierung der Endlagerung zugeführt. Das Grobgut besteht aus Abrasivpartikeln, welche groß genug sind, um bei einem weiteren Schnitt in der WASS-Anlage verwendet zu werden und aus großen Stahlpartikeln. Die radioaktiven Stahlpartikel erschweren die Handhabung der Fraktion und können bei einem zweiten Schnitt die WASS-Anlage und die Düse beschädigen. Daher wird nach der Siebung das Grobgut mit einem Magnetfilter behandelt. Durch die Magnetfiltration wird ein Großteil der Stahlpartikel entfernt, welche anschließend aufgrund der Radioaktivität

ebenfalls in die Endlagerung gegeben werden. Nach der Siebung und Magnetfiltration verbleibt eine Fraktion, welche geeignet ist, in der WASS-Anlage für einen weiteren Schnitt verwendet zu werden. Dieses Aufbereiten und Wiederverwenden kann mehrmals geschehen und ist in konventionellen WASS-Anwendungen verbreitet [18], [21]. Bei jedem Wiederverwendungszyklus werden Abrasivpartikel zerkleinert und der Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv verringert. Die Menge an eingespartem Sekundärabfall ergibt sich durch die Menge des wiederverwendeten Abrasivs.

3.1.3 Technische Umsetzung der Separationsanlage

Für die Herstellung eines wiederverwendbaren Abrasivs müssen Abrasivbruchstücke und Stahlpartikel aus dem Abrasivabfall entfernt werden. In vorangegangenen Arbeiten wurden im Abrasivabfall enthaltenen Stahlpartikel untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die mittlere Partikelgröße der Stahlpartikel im Bereich von $43\ \mu\text{m}$ – $68\ \mu\text{m}$ liegt. Eine Häufung der Dichteverteilung bei Abrasivbruchstücken konnte im Bereich von $80\ \mu\text{m}$ – $150\ \mu\text{m}$ beobachtet werden [35].

Die Siebanalysen des Abrasivabfalls, die zu Beginn des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, (siehe Kapitel 4.1) haben bestätigt, dass der Großteil der Stahlpartikel kleiner ist als die intakten Abrasivpartikel. Die Größenverteilung und die physikalischen Eigenschaften der zu trennenden Bestandteile im Gemisch schränken die Auswahl der geeigneten Trennverfahren ein. Die Stahlpartikel sind kleiner als die Abrasivpartikel, besitzen jedoch eine höhere Dichte (Dichte Abrasiv: ca. $4,3\ \text{g/cm}^3$, Stahl ca. $7,9\ \text{g/cm}^3$ [38]).

Bei der Trennung von Abrasiv- und Stahlpartikeln über die unterschiedliche Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel überwiegt zwar der Einfluss der Partikelgröße über den der Dichte [31], wie Kapitel 2.3 (Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit) beschrieben wurde, eine hohe Trennschärfe wird jedoch durch die hohe Dichte des Stahls behindert. Trennverfahren mittels Sedimentation sowie der Einsatz von Hydrozyklonen ist für eine hohe Trennschärfe bezüglich des Stahls nicht geeignet. Für eine reine Größenklassierung, ohne Verunreinigungen durch Stahlpartikel aus dem Feingut, ist daher die Siebung geeignet. Da das Probenmaterial bereits nass vorliegt und eine Trocknung nicht notwendig ist, kann eine Nasssiebung durchgeführt werden. Dies hat zudem den Vorteil, dass feinste Stahlpartikel kleiner $20\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur Trockensiebung besser abgeschieden werden können (siehe Kapitel 2.2). In

Abbildung 3.2 ist schematisch der Partikelgrößenbereich der Bestandteile des Abrasivabfalls und der gewählten Trennverfahren eingezeichnet.

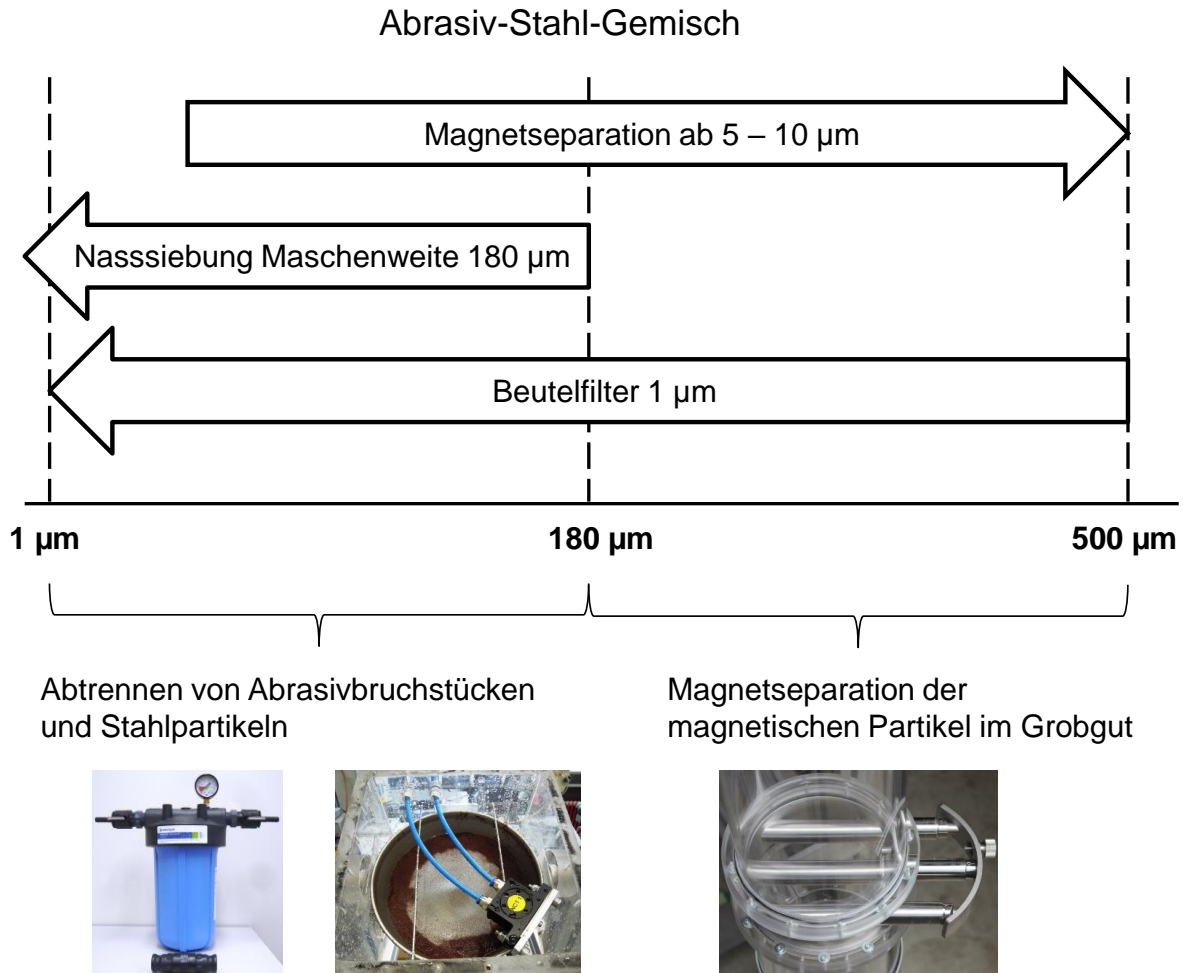


Abbildung 3.2: Partikelgrößenbereich des Probenmaterials und der Trennverfahren

Durch die Nasssiebung wird eine Größenklassierung durchgeführt, bei der eine möglichst hohe Trennschärfe angestrebt wird, um die Stahlkonzentration im Grobgut bereits durch die Siebung zu reduzieren. Das Feingut wird anschließend mit einem Beutelfilter mit einer Maschenweite von 1 µm getrennt. Für die Abtrennung der verbleibenden Stahlpartikel im Grobgut wird die Magnetseparation mit einem Permanentmagnetfilter verwendet. Dieses Verfahren hat sich bereits in der vorherigen Separationsanlage (Projekt „Nenawas“) als geeignet erwiesen, Stahlpartikel aus einer Abrasiv-Stahl-Wasser-Suspension abzuscheiden [34]. Je kleiner die Partikel sind, desto schwerer können sie von den Permanentmagneten angezogen werden. Der

Magnetfilter ist in der Lage, Stahlpartikel größer 30 μm abzuscheiden [39]. Partikelgrößenanalysen des Retentats haben gezeigt, dass auch kleinere magnetische Partikel bis zu einer Größe von 5 μm abgeschieden wurden [35]. Die Selektivität des Magnetfilters gegenüber großen Partikeln eignet sich, um große Stahlpartikel, welche die WASS-Anlage bei der Wiederverwendung beschädigen könnten, zu entfernen.

Durch die Kombination der Siebung und Magnetseparation des Grobguts wird die Selektivität der Verfahren bezüglich der Partikelgröße für die Stahlabtrennung ausgenutzt. Stahlanhaftungen an den Abrasivpartikeln können mit dieser Kombination der Verfahren nicht entfernt werden, wodurch ein verbleibender Stahlanteil im Abrasiv zu erwarten ist.

Die Verfahren der Siebung, Magnetfiltration und Beutelfiltration wurden in einer kompakten Versuchsanlage für kleine Probenmengen umgesetzt. Die Versuchsanlage wurde so konzipiert, dass sie, was die Dimension betrifft, grundsätzlich in einer Handschuhbox mit radioaktiven Abrasiv-Stahl-Probengemischen betrieben werden kann. Dies stellt zusätzlich aber auch weitere Anforderungen an die verwendeten Komponenten und Materialien, die in dieser Dissertation nur teilweise behandelt werden. Es erfordert zudem eine störungsfreie Ausführung der Prozesse sowie möglichst wenig Eingriffe des Anlagenbedieners. Mit der Separationsanlage lässt sich im Labormaßstab Abrasivabfall behandeln, um das Separationsverfahren und die gewonnenen Fraktionen zu untersuchen. Statt im kontinuierlichen Betrieb, wie es bei industriellen Siebanlagen üblich ist, wird die Anlage im Batchbetrieb genutzt. Der Batchbetrieb eignet sich zur Untersuchung des Prozesses, da mit geringeren Probenmengen als im kontinuierlichen Betrieb Separationsversuche unter gleichen Bedingungen durchgeführt werden können. Es vereinfacht zudem die Probennahme, da die Prozessschritte nacheinander durchlaufen werden. Ein weiterer Vorteil ist die geringere Größe der Anlage, da die Dimensionen auf die zu behandelnde Probenmenge ausgelegt werden. Eine definierte Menge an Probenmaterial wird im Rührbehälter in eine wässrige Suspension überführt und anschließend in einem Kreislauf durch die Siebkomponente, den Magnetfilter bzw. den Beutelfilter gepumpt. Ein Feststoffanteil von etwa 10 Massen-% in der Suspension kann von der Anlage behandelt werden. Die Suspension wird mittels einer druckluftbetriebenen Doppelmembranpumpe durch die Rohrleitungen gefördert. Wegen der hohen Sinkgeschwindigkeit der Abrasivpartikel darf für die Förderung der Suspension ein minimaler

Volumenstrom nicht unterschritten werden, um ein Absetzen der Partikel in den Rohren zu verhindern. Der Rührbehälter hält ein Flüssigkeitsvolumen von 60 l und ist mit einem zentral angebrachten Propellerrührer ausgestattet. Vier an den Innenseiten des Rührbehälters angebrachte Stromstörer verhindern die Trombenbildung beim Rühren. In den Rührbehälter ragen von oben drei Förderrohre über die Suspension aus dem Behälter gezogen wird oder zurückfließen kann. Die Eintauchtiefe der Rohre ist unterschiedlich, um je nach Prozessschritt eine andere Feststoffbeladung der Suspension zu fördern. Das tiefste Förderrohr reicht bis in die Mitte zum tiefsten Punkt des Klörperbodens. An diesem Punkt kann die Suspension mit dem höchsten Feststoffanteil abgepumpt werden. Über die Rührgeschwindigkeit kann der Zustand der Suspension an den verschiedenen Eintauchtiefen beeinflusst werden (siehe Kapitel 2.3). Für die Siebung, Magnetfiltration und Beutelfiltration wird das Förderrohr mit der maximalen Eintauchtiefe verwendet. Für das Rückspülen des Siebs wird die höchste Förderleitung genutzt, die klares Wasser aus dem Überstand knapp unterhalb der Wasseroberfläche abzieht.

Im Folgenden wird der Ablauf der Separation anhand der Abbildung 3.3 erklärt.

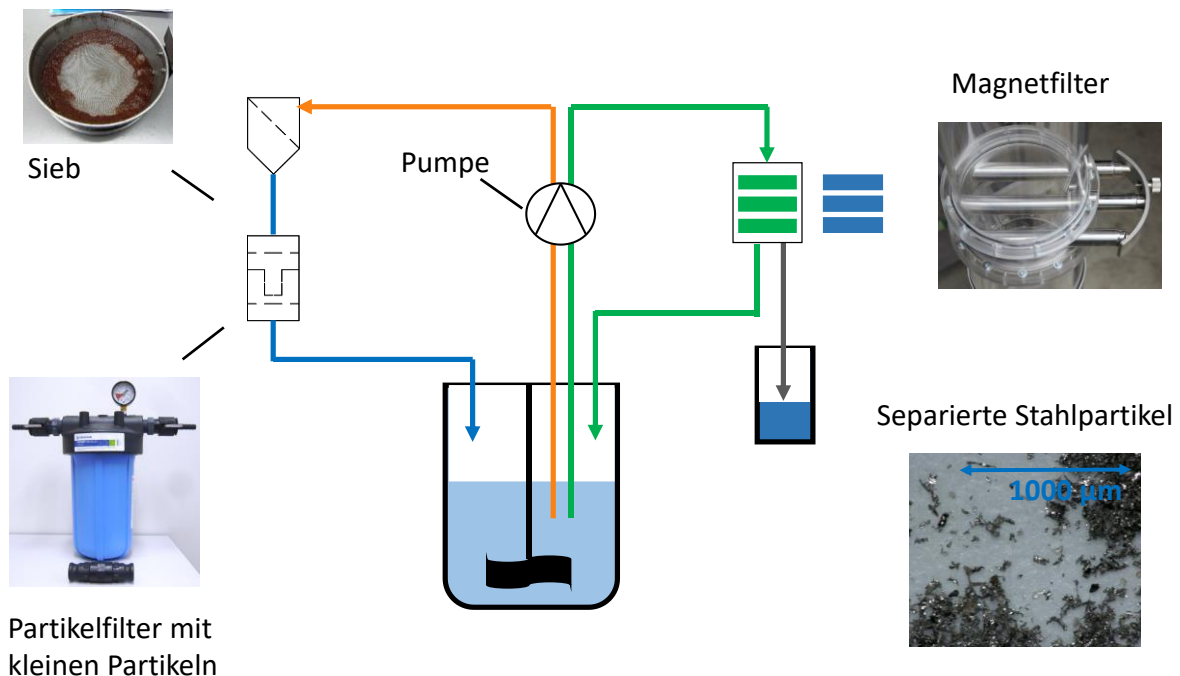


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Prozesses

Der erste Verfahrensschritt ist die Nasssiebung. Das Probenmaterial wird im Rührbehälter in Suspension gebracht und mit einer Membranpumpe auf ein Vibrationsieb

gepumpt. Das Grobgut sammelt sich auf dem Siebboden an, während das Feingut das Sieb passiert und am Gehäuseboden abgepumpt wird. Das Feingut wird direkt in einen Beutelfilter gepumpt und dort zurückgehalten. Klares Wasser fließt aus dem Beutelfilter in den Rührbehälter zurück.

Zu Beginn des Siebvorgangs befinden sich alle Partikel des Probenmaterials als Suspension im Rührbehälter. Kontinuierlich wird Suspension aus dem Rührbehälter auf das Sieb gepumpt und klares Wasser nach der Filtration zurückgeführt. Der Feststoffanteil im Rührbehälter sinkt somit über die Zeit stetig, was in Abbildung 3.4 ausgedrückt ist.

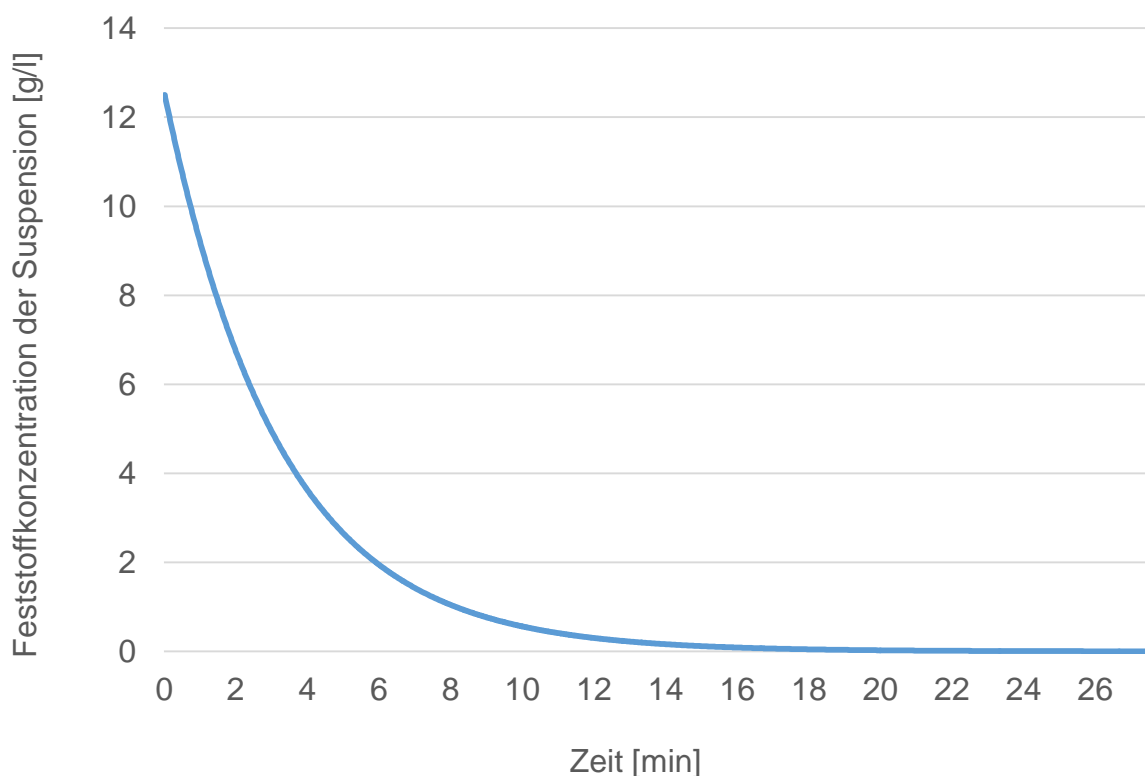


Abbildung 3.4: Feststoffanteil der Suspension im Rührbehälter in Abhängigkeit der Zeit

Das Diagramm zeigt die Feststoffkonzentration im Rührbehälter bei einer Anfangsbeladung von 750 g Probenmaterial in 60 l Wasser mit einem Volumenstrom von 15,5 l/min. Die Konzentrationen wurden iterativ, beginnend bei der Anfangskonzentration, berechnet und abgebildet.

Der Siebvorgang wird gestoppt, sobald über 99,9 % der Partikel den Rührbehälter verlassen haben und entweder als Grobgut im Sieb oder als Feingut im Beutelfilter

vorzufinden sind. Dieser Zeitpunkt wird iterativ anhand des Flüssigkeitsvolumens und des Suspensionsvolumenstroms bestimmt. Der Beutelfilter samt darin enthaltenem Feingut wird entfernt und das Grobgut des Siebs wird in den Rührbehälter zurückgespült. Das leere Sieb wird anschließend ebenfalls entfernt. Im Rührbehälter befinden sich danach das Grobgut der Siebung, welches aus Abrasiv- und Stahlpartikeln besteht, die größer als die Maschenweite sind, sowie ein Anteil an Fehlunterkorn. Im zweiten Verfahrensschritt, der Magnetfiltration, werden aus dem Grobgut die Stahlpartikel entfernt. Das Grobgut wird dafür im Rührbehälter in Suspension gebracht und mit der Membranpumpe im Kreislauf durch den Magnetfilter gepumpt. Die Magnetfiltration wird beendet, wenn über 99,9 % der Partikel mindestens einmal den Magnetfilter erreicht haben. Dieser Zeitpunkt wird ebenfalls iterativ bestimmt. Nach dem Beenden der Magnetfiltration werden die Stahlpartikel aus dem Magnetfilter entfernt und im Behälter bleibt das behandelte, wiederverwendbare Abrasiv zurück. Mit diesem Separationsprozess wurde das Probengemisch aus Abrasiv- und Stahlpartikeln in eine wiederverwendbare Fraktion, eine Feingutfraktion und eine im Magnetfilter abgeschiedene Fraktion aufgetrennt. Abbildung 3.5 zeigt die Separationsanlage mit Bezeichnung der einzelnen Komponenten.

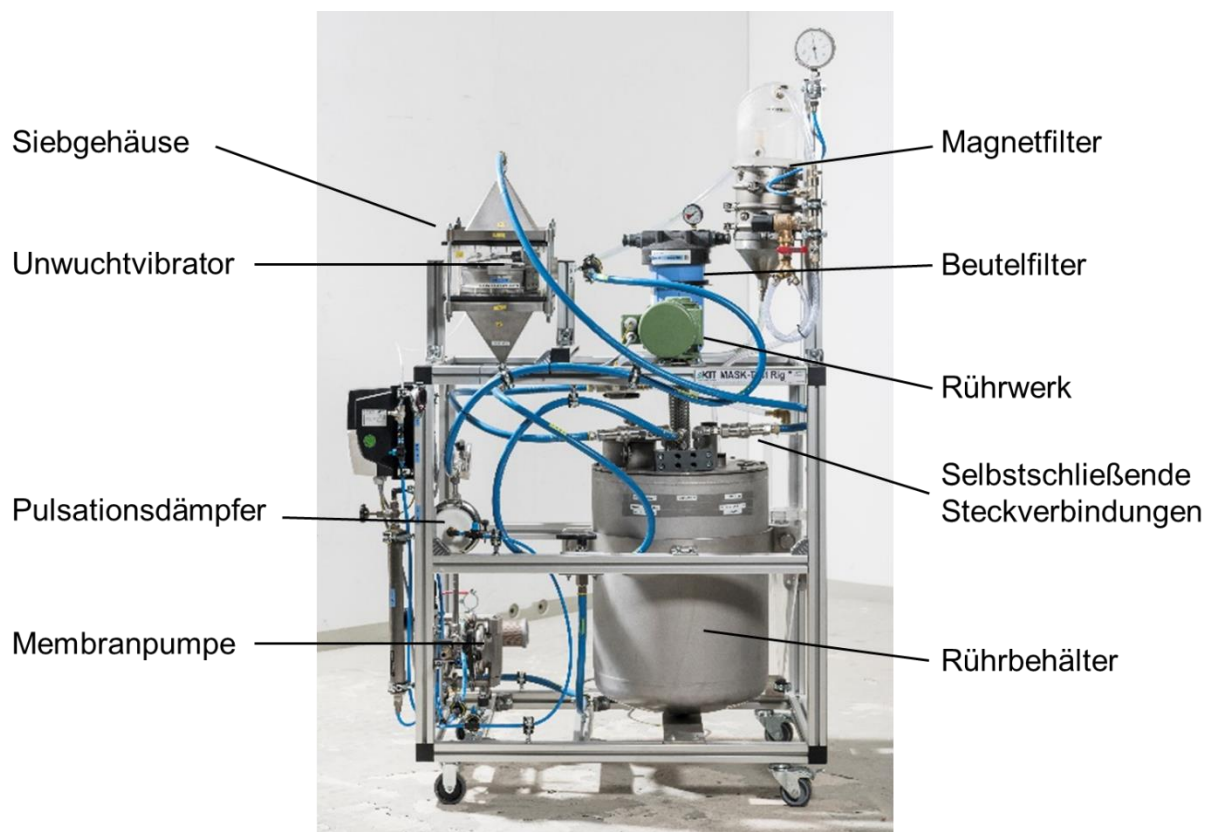


Abbildung 3.5: Separationsanlage mit Bezeichnung der Komponenten

Im Folgenden werden ausgewählte Komponenten der Anlage im Detail beschrieben.

3.1.3.1 Siebkomponente

Der erste Prozessschritt der Separationsanlage ist die Siebung. Für diese Aufgabe wurde eine Siebkomponente entwickelt, welche die besonderen Anforderungen für den Einsatz in einer Handschuhbox in Bezug auf Größe, Bedienbarkeit und Sicherheit erfüllt. Aufgrund der kleinen Probenmengen, des beschränkten Bauraums und der Nutzung im Labor wurde die Anlage für einen Batchbetrieb konzipiert. Das Sieb muss dafür im Betrieb beladen und rückgespült werden, ohne das Gehäuse dafür zu öffnen. Dafür wurde das Siebgehäuse drehbar befestigt, wodurch sich das komplette Gehäuse samt dem darin befindlichen Sieb um 180° (kopfüber) gedreht werden kann, um das beladene Sieb zu leeren und rückspülen zu können. Ein Zweck der Anlage ist, den Einfluss der Maschenweite auf das Separationsergebnis zu untersuchen. Um eine große Auswahl an Maschenweiten möglichst einfach in einem einzigen Versuchsaufbau untersuchen zu können, wurde das Siebgehäuse so konstruiert, dass standardisierte Analysesiebe eingebaut werden können. Um die Siebe zu wechseln,

muss der Deckel des Gehäuses geöffnet werden, das Sieb getauscht und die Druckluftversorgung des Unwuchtvibrators am neuen Sieb angeschlossen werden. Im späteren Einsatz in der Handschuhbox dürfen keine Partikel oder Flüssigkeit die Anlage verlassen und in den Innenraum der Box gelangen. Um Leckagen, z.B. im Falle eines verstopften Schlauches oder einer undichten Druckluftversorgung, zu verhindern, wird die Siebung im Unterdruck durchgeführt. Am Gehäuseboden wird mit der Membranpumpe Luft bzw. Wasser oder Suspension abgezogen, so dass im Inneren des Gehäuses ein Unterdruck entsteht. Durch den Unterdruck im Siebgehäuse wird die Suspension über ein im Rührbehälter eingetauchtes Rohr aus dem Rührbehälter gezogen und von oben in das Siebgehäuse geleitet. Im Falle einer Leckage im Siebgehäuse tritt Luft von außen ein und der Zufluss der Suspension stoppt. Es gelangt bei dieser Störung jedoch kein Material nach außen.

Der Aufbau des Siebs ist in Abbildung 3.6 vorgestellt. Im linken Bild ist das geöffnete Siebgehäuse nach einem Siebvorgang gezeigt und im rechten Bild das geschlossene Siebgehäuse. Das Wasser bzw. die Suspension strömt in allen Betriebsarten von oben in das Siebgehäuse und verlässt es unten.

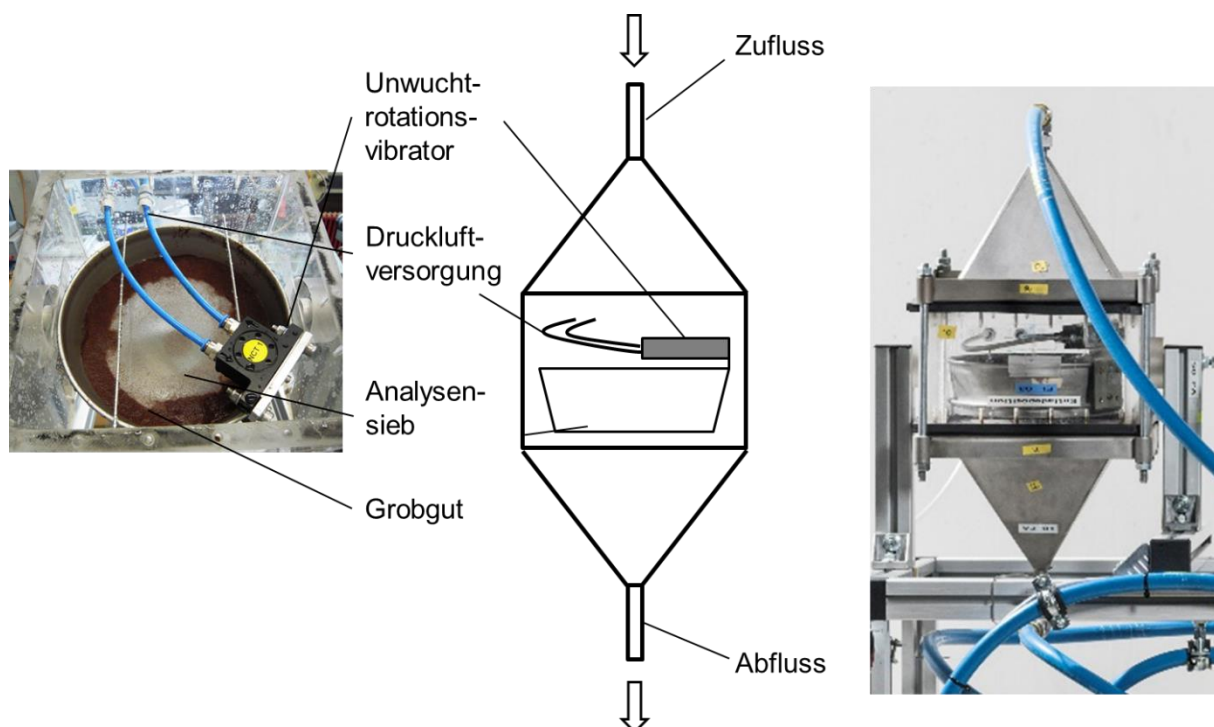


Abbildung 3.6: Aufbau der Siebkomponente

Die Wände zum Zu- und Abfluss sind um 45° angewinkelt um Ablagerungen von Partikeln zu verhindern. Der Mittelteil des Gehäuses besteht aus Plexiglas, was die

Beobachtung des Siebvorgangs erlaubt. Mögliche Störungen wie das Verstopfen und Überlaufen des Siebs, sowie eine zu schwache Vibration des Unwuchtvibrators lassen sich so an der Bewegung des Siebguts erkennen. Die Beladung des Siebs steigt mit fortschreitender Siebdauer. Die Frequenz des Vibrators muss daher angepasst werden, wenn die Vibration das Siebgut nicht mehr über den Siebboden bewegen kann. Die Verbindung des Mittelteils mit dem Deckel und dem Boden ist mit einer Dichtung versehen. Eine intakte Dichtung ist nötig, damit im Gehäuse der Unterdruck aufgebaut und gehalten werden kann, um die Suspension aus dem Rührbehälter zu ziehen. Das Analysesieb mit einem Siebbodendurchmesser von 200 mm liegt locker auf einer Halterung im Siebgehäuse und hat zu den Seitenwänden wenige Millimeter Abstand. Am Siebrahmen ist ein druckluftbetriebener Unwuchtvibrator montiert, welcher das bewegliche Sieb in horizontale Schwingung versetzt. Die Frequenz der Schwingung lässt sich über den Volumenstrom der Druckluft ändern. Je nach Beladung des Siebs, Wasserstand im Sieb und Frequenz des Vibrators ändert sich das Verhalten des Siebguts, wodurch im Betrieb regelmäßig die Frequenz beobachtet werden muss, um sicherzustellen, dass das Siebgut bewegt wird. Mit steigender Beladung des Siebs wird ein höherer Druckluftvolumenstrom zum Vibrator benötigt, um das Siebgut in Bewegung zu halten.

Zu Beginn der Siebung ist der Siebboden leer und der Druck im Siebgehäuse entspricht dem Umgebungsdruck. Beim Start der Membranpumpe wird zuerst Luft aus dem Gehäuse durch den Auslass unten abgezogen. Die Zuflussleitung an der Oberseite des Gehäuses führt direkt zum Rührbehälter und endet am tiefsten Punkt des Behälterbodens. Mit steigendem Unterdruck im Gehäuse steigt in der Zuflussleitung Suspension aus dem tiefsten Punkt des Rührbehälters auf und fließt von oben in den Innenraum des Siebgehäuses. Die Partikel der Suspension werden gesiebt, das Feingut und das Wasser fließen zum Auslass des Gehäuses und werden dort abgepumpt. Ab diesem Zeitpunkt ist der Innendruck im Gehäuse während der Siebung konstant. Vor Beginn der Siebung enthält die Suspension im Rührbehälter einen Feststoffanteil von ca. 1,25 %. Da das Grobgut auf dem Siebboden zurückbleibt und das Feingut nach Verlassen des Gehäuses im Beutelfilter abgetrennt wird, sinkt der Feststoffanteil im Rührbehälter stetig. Nach ca. 30 Minuten befindet sich im Rührbehälter klares Wasser und der Siebvorgang kann beendet werden. Das Rückspülen des Siebs ist in Abbildung 3.7 schematisch dargestellt.

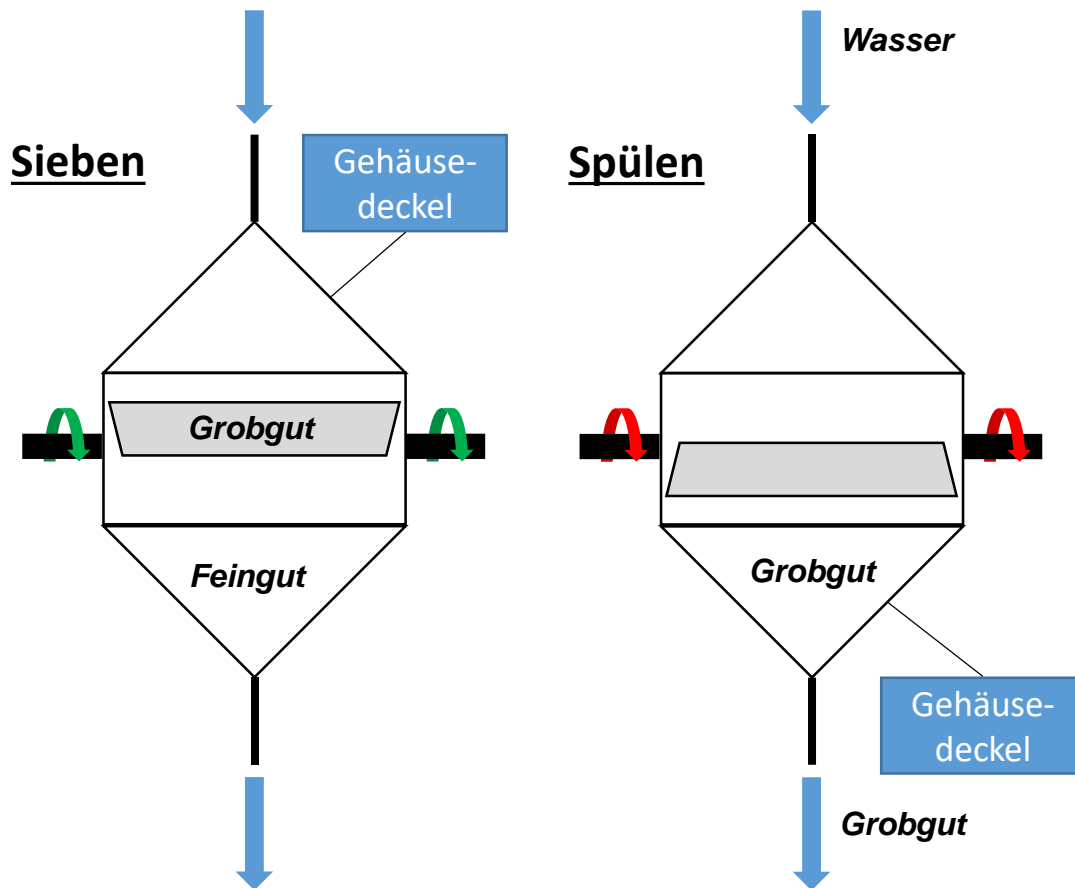


Abbildung 3.7: Leeren und Rückspülen des Siebs

Wie in Abbildung 3.7 erkennbar, ist das Siebgehäuse an der Mittelachse drehbar montiert. Die Zu- und Abflussleitungen sind mit selbstschließenden Steckverbindungen an der Separationsanlage angeschlossen (Abbildung 3.8).

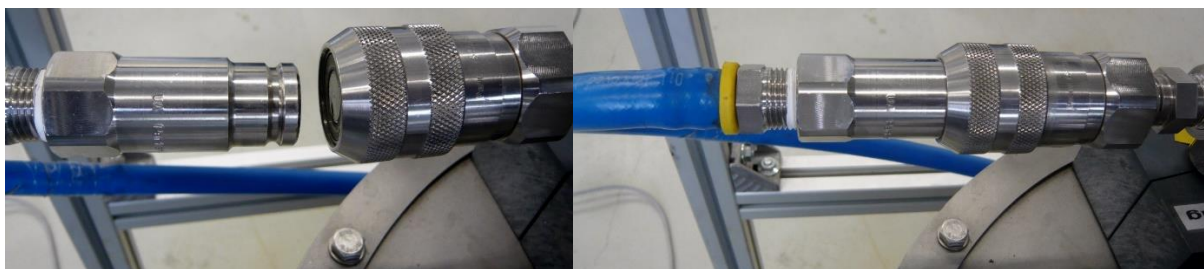


Abbildung 3.8: Selbstschließende Steckverbindungen getrennt (links) und verbunden (rechts)

Zum Spülen des Siebs werden die Steckverbindungen gelöst, das Sieb um 180° gedreht und die Steckverbindungen neu mit der Separationsanlage verbunden. Beim Spülen wird eine geringe Menge Wasser von oben auf die Siebunterseite gepumpt, wodurch das restliche Grobgut nach unten gespült wird. Das Spülen geschieht nicht im Unterdruck. Das Grobgut verlässt unten das Siebgehäuse und fließt in den Rührbehälter zurück. Anschließend können die Steckverbindungen erneut gelöst

werden und das Gehäuse in die Siebposition zurückgedreht werden. Für die Magnetfiltration ist die Siebkomponente nicht mit der Separationsanlage verbunden.

3.1.3.2 Magnetfilter

Der zweite Prozessschritt zur Aufbereitung des Abrasivs ist die Magnetseparation. Nach der Siebung enthält das Grobgut Stahlpartikel, die anschließend mit einem Magnetfilter entfernt werden müssen. Der Zweck der Magnetseparation ist einerseits die Gesamtkonzentration von Stahl im wiederverwendbaren Abrasiv so weit wie möglich zu senken und andererseits große Stahlpartikel, welche bei der Wiederverwendung die WASS-Düse beschädigen könnten, zu entfernen. Für die Magnetseparation wird ein Filter mit Permanentmagneten verwendet. Dies hat den Vorteil, dass der Filter leicht zu reinigen, wartungsarm und sicher gegenüber Störungen oder Fehlfunktionen ist. Speziell im Einsatz in der Handschuhbox mit radioaktivem Probenmaterial ist der störungsfreie Betrieb entscheidend.

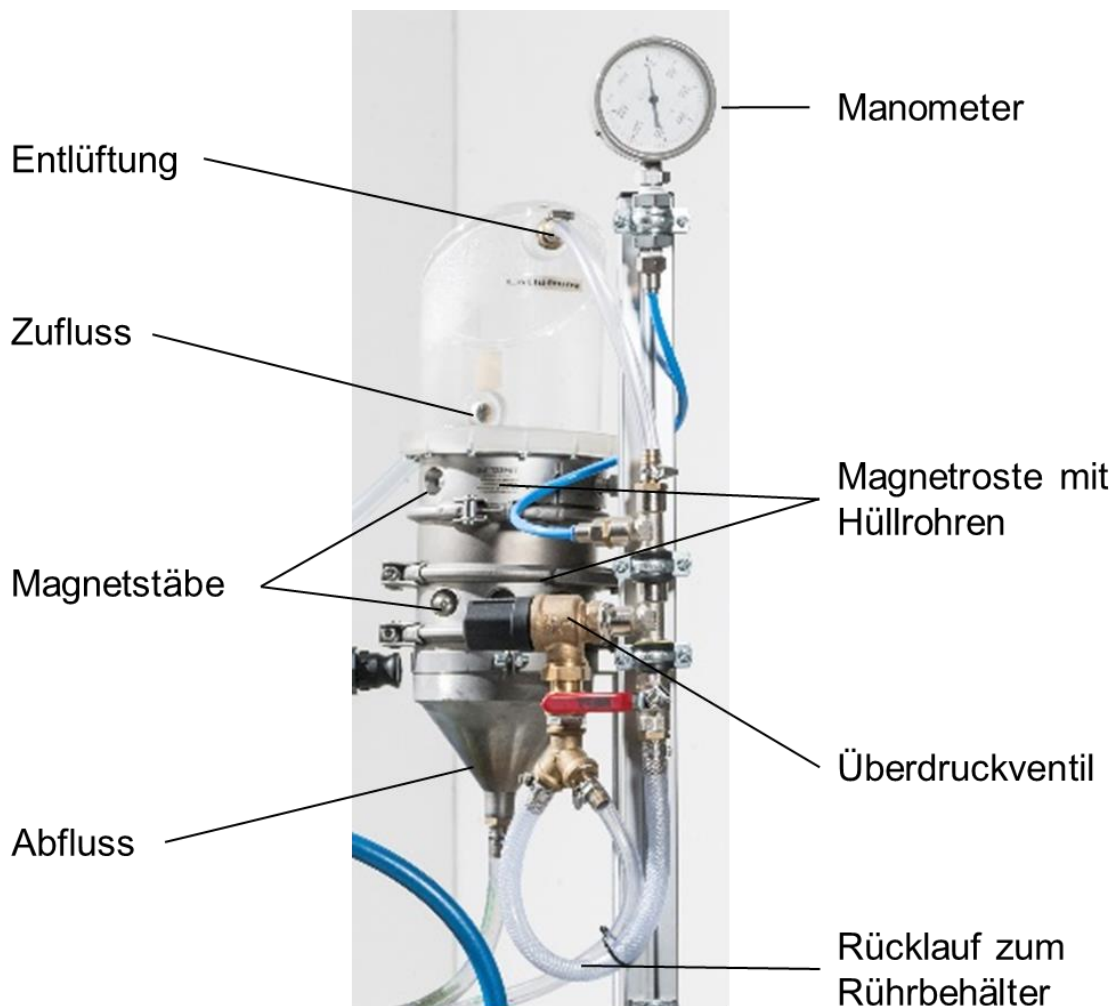


Abbildung 3.9: Magnetfilter mit Bezeichnung der Komponenten

Der Magnetfilter (siehe Abbildung 3.9) besteht aus einem Gehäuse mit einem Einlass oben an der Seite, durch den die Suspension einströmt, einer Entlüftung an der Gehäuseoberseite, an der zu Beginn der Filtration Luft entweichen kann, einem Auslass am trichterförmigen Boden des Gehäuses und einer Druckluftleitung, über die Druckluft von unten in das Gehäuse einströmen kann, um die Magnetstäbe mit Luftblasen zu umspülen. Der obere Teil des Gehäuses besteht aus Plexiglas, was es ermöglicht, den Filtrvorgang und die Beladung des Magnetfilters zu beobachten. Der Magnetfilter befindet sich im Mittelteil des Gehäuses. Er besteht aus einem Edelstahlsegment mit Hüllrohren. Von außen werden Permanentmagnetstäbe in die Hüllrohre eingeschoben, wodurch sich im Inneren des Gehäuses ein Magnetfeld befindet.

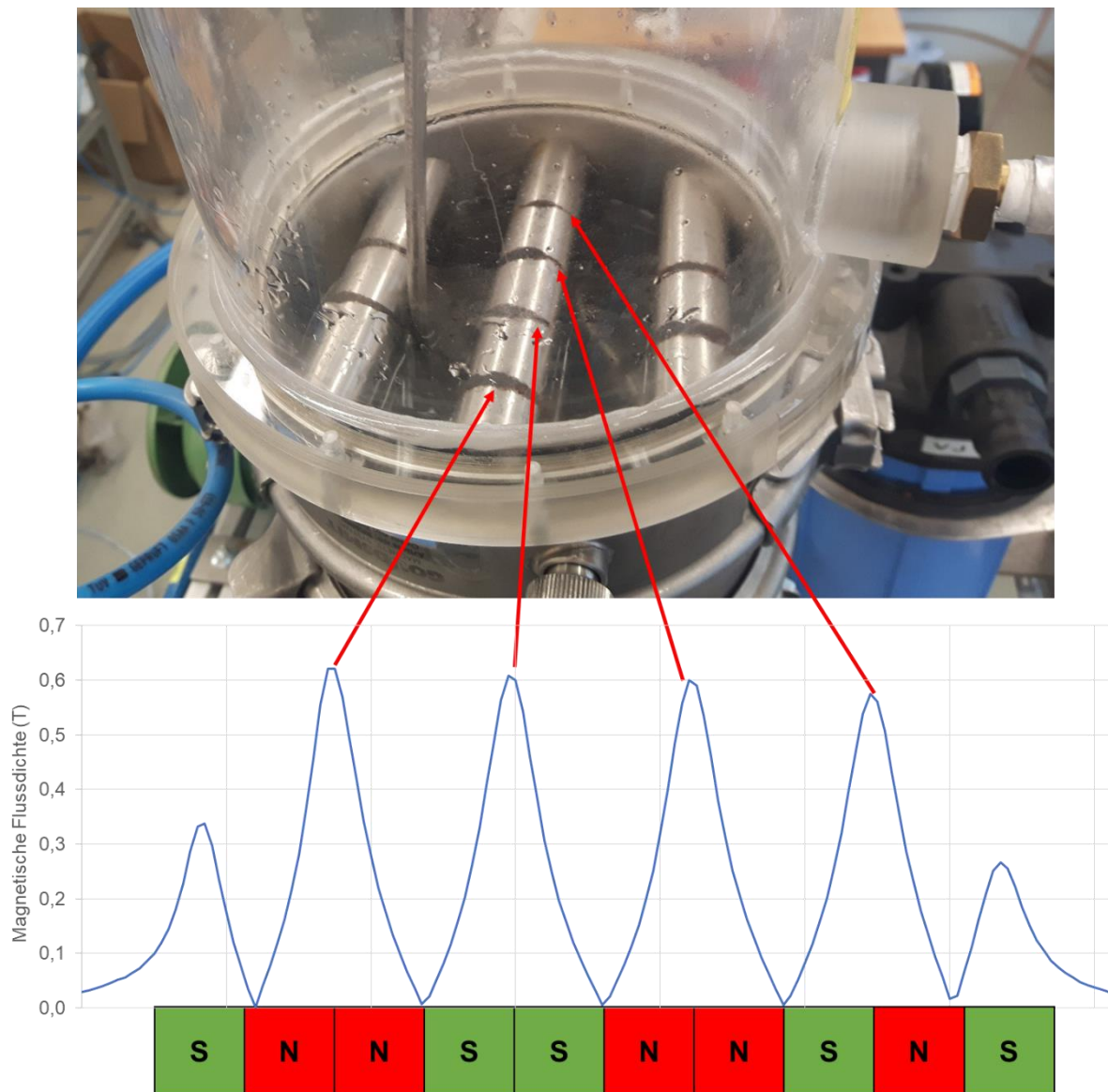


Abbildung 3.10: Aufbau der Magnetstäbe und des Magnetfilters [36]

Die Magnetstäbe bestehen aus zylinderförmigen Teilmagneten, welche mit gleichem Pol einander zugewandt in einem Stab angebracht sind (siehe Abbildung 3.10). An der Kontaktfläche der Pole ist das Magnetfeld am stärksten, was dazu führt, dass an diesen Stellen die Stahlpartikel angezogen werden. An diesen Bereichen sammeln sich die Stahlpartikel ringförmig um den Magnetstab. Der Innendruck im Magnetfilter kann an einem Manometer, das an der Entlüftung angebracht ist, überwacht werden. Mit den einzelnen Schritten des Betriebs ändert sich der Innendruck im Gehäuse. Im Gegensatz zur Siebkomponente wird der Magnetfilter im Überdruck betrieben. Weiter sind an der Entlüftung ein Absperrhahn und ein mechanisches Überdruckventil angebracht, welches bis zu einem Überdruck von 500 mbar geschlossen ist und bei

einem höheren Überdruck eine Rückflussleitung zurück zum Rührbehälter öffnet. Mit diesem Überdruckventil wird eine Beschädigung am Gehäuse oder ein Austreten von Flüssigkeit verhindert, falls der Innendruck im Gehäuse zu groß wird.

Zu Beginn der Magnetfiltration ist das Gehäuse mit Luft gefüllt, die Magnetstäbe befinden sich in den Hüllrohren, der Absperrhahn der Entlüftung ist offen und der Innendruck entspricht dem Umgebungsdruck. Die Suspension wird über den Einlass in das Gehäuse gepumpt und fließt am Gehäuseboden über den Auslass zurück in den Rührbehälter. Durch die Neigung der Seitenwände des trichterförmigen Bodens rutschen die schnell sedimentierenden Abrasivpartikel in den Auslass. Während die Suspension durch das Gehäuse fließt, steigt der Wasserstand. In Abbildung 3.11 ist der Start der Magnetfiltration mit leerem Gehäuse (links) und im Betriebszustand der Filtration mit Hüllrohren unter Wasser (rechts) gezeigt.

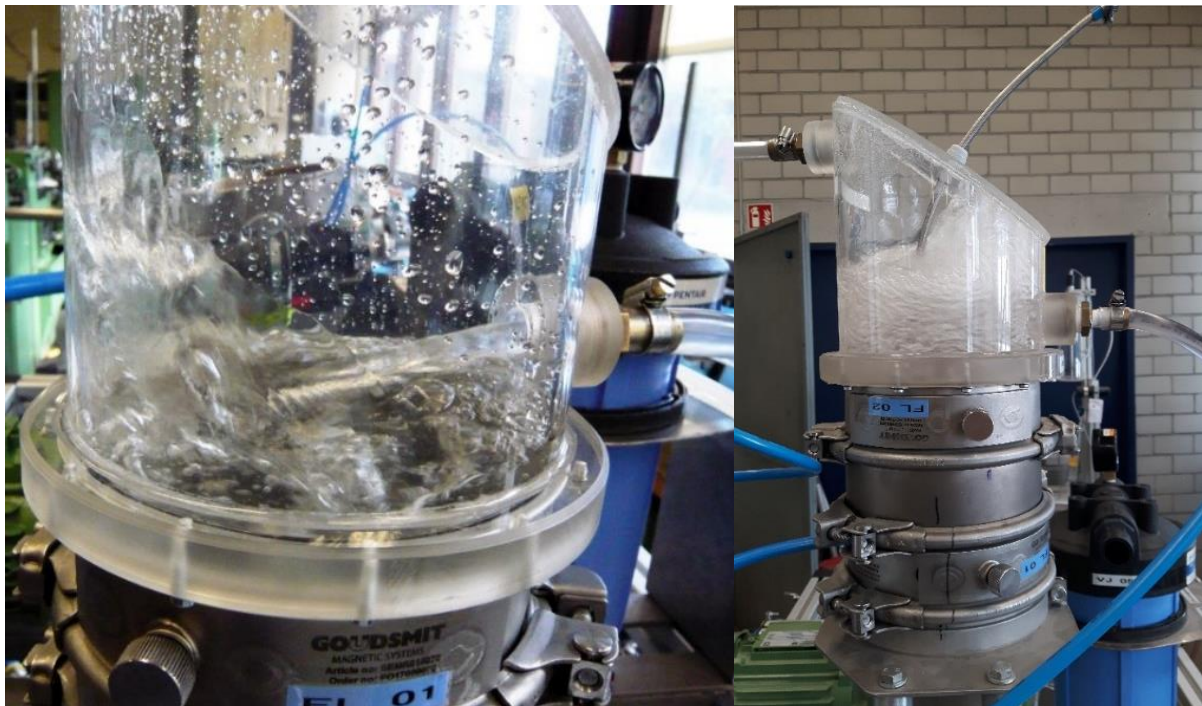


Abbildung 3.11: Wasserstand im Magnetfilter bei Start der Filtration (links), Betriebszustand (rechts)

Um den Betriebszustand zu erreichen, müssen die Hüllrohre vollständig unter Wasser sein. Befinden sich die Hüllrohre noch über Wasser, trifft der Suspensionsstrahl ungebremst auf und spült bereits angezogene Stahlpartikel wieder ab. Durch die Wasserüberdeckung wird der Strahl abgebremst und verwirbelt, was die Funktion des Magnetfilters verbessert. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben ist, werden bestimmte Bestandteile des Abrasivs ebenfalls vom Magnetfilter angezogen. Durch die niedrige

Strömungsgeschwindigkeit der Suspension im Gehäuse und die Anziehung durch das Magnetfeld kommt es zu Ablagerungen von Abrasivpartikeln auf den Hüllrohren. Abrasiv, welches im Magnetfilter abgeschieden wird, senkt den Wiederverwendungsanteil und belegt die Hüllrohre, was die Abtrennung der Stahlpartikel behindert. Mittels einer Druckluftleitung, die am Gehäuseboden endet, können während der Magnetfiltration Luftblasen von unten in den Innenraum gepresst werden. In Abbildung 3.12 ist der Magnetfilter im Betriebszustand ohne Druckluft (links) gezeigt. Aufgrund des großen Innendurchmessers des Magnetfilters (150 mm) ist die Strömungsgeschwindigkeit im Gehäuse gering, wodurch sich die Partikel aufgrund der Sedimentation in Richtung Auslass bewegen. Aufgrund der Membranpumpen befinden sich vereinzelte Luftblasen im Gehäuse, die die Partikelsedimentation kaum beeinflussen. Wird während der Filtration Druckluft in den unteren Bereich des Magnetfiltergehäuses eingebracht (siehe Abbildung 3.12, rechts) ändert sich der Strömungszustand im Gehäuse. Die Partikel der Suspension sedimentieren nach unten zum Gehäuseauslass und treffen auf die aufsteigenden Luftblasen. Die Verweilzeit der Partikel im Filter erhöht sich und die Strömung im Filtergehäuse wird turbulent.



Abbildung 3.12: Magnetfilter ohne Einsatz von Druckluft am Gehäuseboden (links) und mit Druckluft (rechts)

Beim Aufsteigen umspülen die Luftblasen die Hüllrohre und erreichen die Wasseroberfläche am oberen Teil des Gehäuses. Das Umspülen der Hüllrohre entfernt die Abrasivpartikel, die nur schwach vom Magnetfeld angezogen werden. Stahlpartikel haften so stark an den Hüllrohren, dass diese von den Luftblasen nicht entfernt

werden. Die zusätzliche Turbulenz der Strömung erhöht zudem die Kontaktwahrscheinlichkeit der Partikel mit den Hüllrohren, wodurch der Magnetfilter effektiver betrieben wird. In Abbildung 3.13 wird der beladene Magnetfilter nach dem Betrieb mit und ohne Luftblasen gezeigt.



Abbildung 3.13: Beladung der Hüllrohre nach Magnetfiltration mit und ohne Druckluftumspülung

Sobald der Wasserstand im Gehäuse hoch genug ist, wird der Absperrhahn an der Entlüftung geschlossen. Der Innendruck wird durch das Überdruckventil konstant auf 500 mbar Überdruck gehalten und der Wasserstand bleibt konstant. In diesem Betriebszustand wird die Magnetfiltration durchgeführt. Die Dauer der Filtration entspricht der Dauer der Siebung, bis nach iterativer Berechnung 99,5 % der Partikel den Magnetfilter mindestens einmal durchströmt haben. Zum Spülen des Magnetfilters werden Zu- und Abfluss des Gehäuses getrennt und die Magnetstäbe aus den Hüllrohren entfernt. Die durch die Magneten abgeschiedenen Partikel werden nicht mehr an den Hüllrohren gehalten und werden durch die Luftblasen abgespült. Über das Umschalten eines 2/3-Wegehahns wird die Fließrichtung der Suspension nach dem Magnetfilterabfluss geändert, so dass das Wasser im Gehäuse und die abgeschiedenen Partikel in ein separates Probengefäß gespült werden. Im Rührbehälter verbleibt die wiederverwendbare Abrasivfraktion, deren Stahlkonzentration durch die Magnetfiltration reduziert wurde.

3.1.3.3 Partikelfilter

Die Partikelfiltration ist ein Verfahrensschritt, der parallel zur Siebung und nach der Magnetseparation durchgeführt wird. Mit einem Beutelfilter werden aus einem

Suspensionsstrom Partikel abgeschieden. Ziel ist es, eine möglichst vollständige fest-flüssig Trennung durchzuführen.

Der Beutelfilter erfüllt im gesamten Aufbereitungsprozess drei Aufgaben. Während der Siebung wird das Feingut im Beutelfilter abgetrennt, so dass klares Wasser in den Rührbehälter zurückfließt. Eine weitere Aufgabe ist es, nach der Magnetfiltration das aufbereitete wiederverwendbare Abrasiv aus dem Rührbehälter zu entfernen und im Beutelfilter abzutrennen. Die dritte Aufgabe ist es, zwischen den Separationsversuchen das Prozesswasser im Rührbehälter zu filtern und Partikel, die sich in Rohrleitungen abgesetzt haben, zu entfernen. Für jede dieser Aufgaben wird ein neuer Beutelfilter verwendet, um Proben der einzelnen Fraktionen zu entnehmen und nach dem Trocknen und Wiegen eine Massenbilanz des Separationsversuchs zu erstellen.

Abbildung 3.14 zeigt den verwendeten Beutelfilter. Er besteht aus einem Gehäuse mit einem Einlass, durch das die Suspension einströmt, einem Auslass an der Seite, aus dem das gefilterte Wasser das Gehäuse verlässt und einen Auslass zur Entwässerung am Gehäuseboden.



Abbildung 3.14: Beutelfiltergehäuse (links), neuer Filterbeutel, 1 μm (Mitte), mit Feingut beladener Filterbeutel nach Siebung (rechts)

Im Inneren des Beutelfiltergehäuses wird ein Filterbeutel eingelegt (siehe Abbildung 3.14, Mitte), der mit dem Deckel nach oben hin abgedichtet wird. Der Beutel hat eine Länge von ca. 20 cm und besteht aus einem Polypropylenvlies mit einer Porengröße von 1 μm . Die Suspension strömt in das Innere des Filterbeutels. Die Flüssigkeit tritt durch die Poren des Filters, während die Partikel im Vlies zurückgehalten werden. Während des Filtrvorgangs bildet sich im Inneren des Beutels ein Filterkuchen aus Partikeln. Durch den Druck der Membranpumpen bleibt der Volumenstrom durch das

Filtergehäuse konstant. Am Gehäusedeckel kann an einem Manometer der Innendruck im Filter abgelesen werden, um einen beladenen oder verstopften Filter rechtzeitig auszutauschen. Der Auslass des Beutelfilters für das gefilterte Wasser und die Entwässerungsöffnung am Gehäuseboden führen zurück in den Rührbehälter. Vor dem Austausch des Filterbeutels fließt das Wasser im Gehäuse und im Inneren des Filterbeutels über die Entwässerung ab. Die Dauer der Filtration wurde nach der gleichen Methode wie die Dauer der Siebung und Magnetseparation bestimmt und kann im Betrieb am klaren Prozesswasser im Rührbehälter überprüft werden.

3.2 Probenmaterial

Als Probenmaterial wird im Folgenden das Abrasiv-Stahl-Gemisch bezeichnet, welches beim Schnitt mit der WASS-Anlage anfällt. Um die Probengemische der drei verwendeten Stahlsorten zu unterscheiden, werden die Probengemische mit den Werkstoffnummern des jeweiligen Stahls benannt (z.B. Probengemisch 1.4307). Es werden zudem die untersuchten Stahlsorten und ihre magnetischen Eigenschaften genauer betrachtet.

3.2.1 Auswahl der Stahlsorten

Für die Durchführung der Trennversuche mit der Separationsanlage wurden Abrasiv-Stahl-Gemische hergestellt. Ziel war es, ein möglichst realitätsnahes Probenmaterial herzustellen. Hierfür wurden Edelstahlproben mit einer WAS-Schneideanlage geschnitten und der anfallende Abrasivabfall samt Fugenmaterial aufgefangen. Eine geeignete Anwendung der WASS-Technik ist die Zerlegung der RDB-Einbauten, Gitter, Kernlochbleche und Halterungen, die aus hochlegierten Edelstählen bestehen [7], [40]. In Abbildung 3.15 ist der Aufbau eines Siedewasserreaktors samt Einbauten in einer Schnittansicht gezeigt.

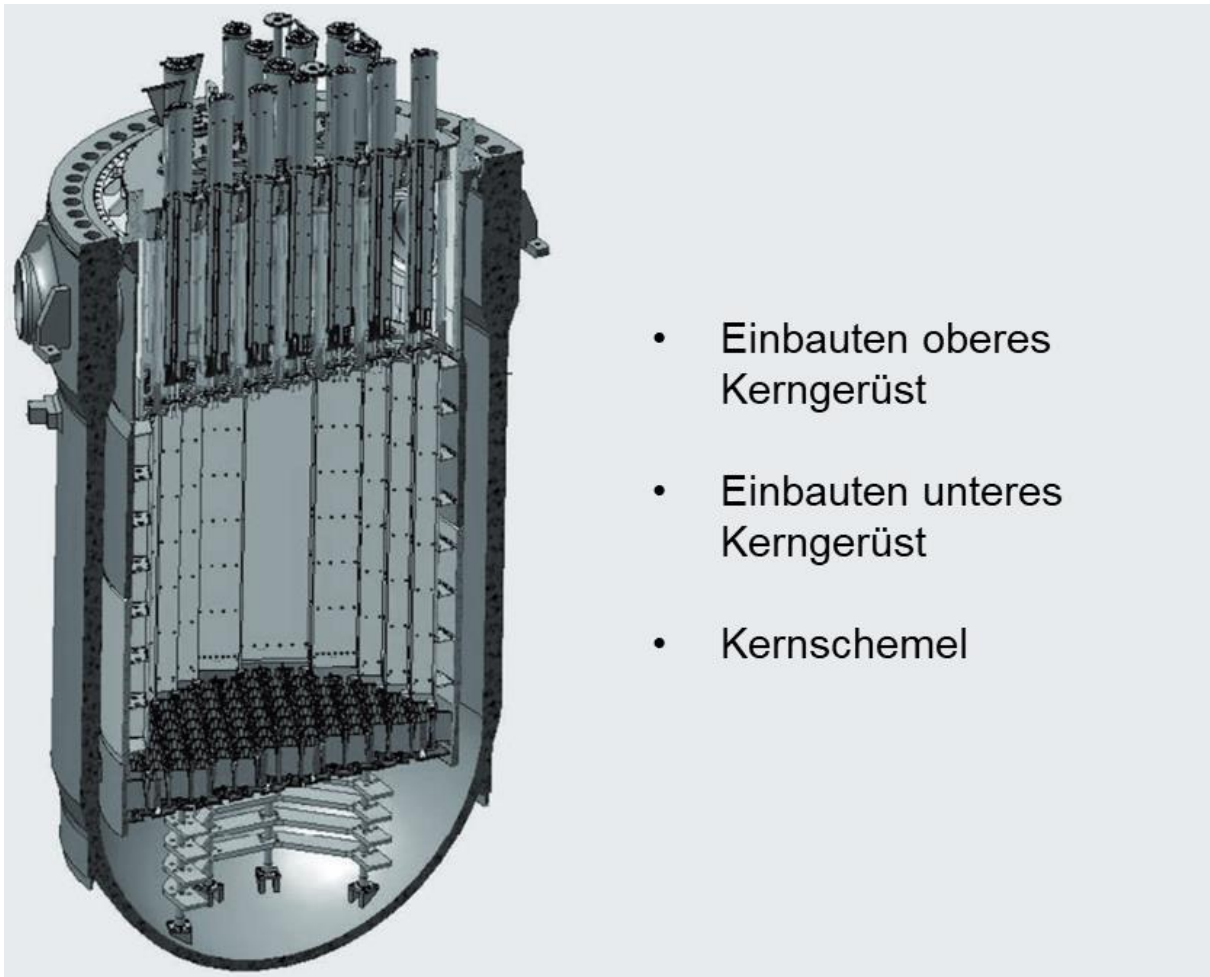


Abbildung 3.15: Behälter eines Druckwasserreaktors mit Einbauten [41]

Für die Herstellung des Probenmaterials wurden drei relevante Stahlsorten, welche in den Reaktoreinbauten Verwendung finden, ausgewählt. Tabelle 3.1 listet die jeweiligen Stahlsorten, Zusammensetzung und Verwendung der Stähle auf.

Tabelle 3.1: Stahlsorten des Probenmaterials [42]

Werkstoff Nr.:	Kurzname	Verwendung
1.4307	X2CrNi18-9	RDB-Einbauteile
1.4550	X6CrNiNb18-10	RDB-Plattierung/Einbauteile
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	RDB-Einbauteile

Bei den in Kapitel 4.5 vorgestellten Versuchen, werden das Separationsergebnis des Probenmaterials mit 1.4307 und 1.4571 und die Reduzierung der Stahlkonzentration durch die Behandlung verglichen. Aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften und

ihrem Verhalten im Magnetfilter wurden diese beiden Stahlsorten für den direkten Vergleich gewählt. Bei Edelstählen ist die magnetische Permeabilität abhängig vom magnetischen Phasenanteil des Gefüges [43]. Die α' -Martensitphase des Edelstahls besitzt ferromagnetische Eigenschaften. Beide Stahlblöcke waren vor der Probenherstellung mit der WASS-Anlage lösungsgeglüht. Vor dem Lösungsglühen weist der Stahl 1.4307 eine magnetische Permeabilität von 1,63 Vs/Am auf. Nach dem zweistündigen Lösungsglühen bei 1050°C und anschließender Wasserabschreckung besitzt er eine magnetische Permeabilität von 1,056 Vs/Am. Durch die starke plastische Verformung des Stahls beim Schneidvorgang ändert sich das Gefüge der Stahlpartikel, was die magnetischen Eigenschaften beeinflusst. In der Literatur wird die Erhöhung der magnetischen Permeabilität des verformten Stahls auf die Martensitbildung zurückgeführt. Abhängig von der Temperatur bei der plastischen Umformung, der Zusammensetzung des Stahls und dem Grad der Umformung wird die Phasenumwandlung und die Änderung der magnetischen Eigenschaften beeinflusst. Eine Verringerung der Temperatur und eine hohe plastische Verformung z.B. begünstigen die Martensitbildung [44], [45]. Durch die starke plastische Verformung der Stahlpartikel beim Heraustrennen aus dem Stahlblock mit dem WASS-Verfahren, der hohe Wärmeübergang zwischen Stahl und Wasser, sowie die hohe Konvektion durch die turbulente Wasserströmung im WAS-Schnittbecken werden diese Bedingungen erfüllt. Die magnetische Permeabilität des Stahls 1.4571 liegt im lösungsgeglühten Zustand bei 1,02 Vs/Am. Auch hier ändern sich die magnetischen Eigenschaften bei der plastischen Verformung. In der Literatur sind die Änderungen der Eigenschaften nach Umformungsgrad und Temperatur beschrieben. Die magnetische Permeabilität des Stahls steigt erst bei größerem Grad der Umformung und in geringerem Maß im Vergleich zu anderen Stählen vom Typ 304. Durch die höhere magnetische Permeabilität ist es möglich, die Stahlpartikel in einem Magnetfilter abzuscheiden. Es handelt sich bei der Sorte 1.4571 um einen titanstabilisierten Stahl, wodurch die Martensitbildung bei der Umformung von dem nicht an Titan gebundenen Kohlenstoff beeinflusst wird [46].

Die in der Literatur beschriebenen unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften der Stähle nach plastischer Verformung lassen sich ebenfalls an den Stahlpartikeln der Probengemische mit 1.4307 und 1.4571 beobachten. Abbildung 3.16 zeigt einen

einfachen Vergleich der beiden Probengemische, indem Stahlpartikel mit einem Permanentmagneten an der Außenwand des Probenglases angezogen wurden.



Abbildung 3.16: Vergleich der magnetischen Eigenschaften der Stahlpartikel (links 1.4307, rechts 1.4571)

Beide Probengefäße enthalten etwa die gleiche Probenmenge und Stahlkonzentration. Am Probengefäß des Stahls 1.4307 (Abbildung 3.16, links) konnte der Magnet mehr Stahlpartikel anziehen und der Innenwand haften lassen. In diesem qualitativen Vergleich kann die unterschiedliche magnetische Eigenschaft der Stahlpartikel bestätigt werden.

3.2.2 Herstellung des Probenmaterials

Das Probenmaterial wurde von der Firma ANT in Lübeck mit der Beteiligung dreier Mitarbeiter des KIT-TMB und KIT-INE hergestellt. Zu diesem Zweck wurde von der Firma ANT ein Abrasivauffangbecken konstruiert, um das Probenmaterial nach jedem Schnitt zu entfernen. Für die Schnitte wurde die Abrasivzumischeinheit „ANT-AMU 2500-100“ eingesetzt [47].

Für die Probenherstellung wurden pro Stahlsorte jeweils ein Vierkantstahl mit einer Dicke von 100 mm und einer Länge von 550 mm in einem WASS-Schneidbecken mit Wasserüberdeckung geschnitten. Die Dicke des Vierkantstahls entspricht etwa der nötigen Schnitttiefe bei der Zerlegung der RDB-Einbauten. An den Vierkantstählen wurden jeweils zwei Bohrungen mit Gewinde eingebracht, um den Stahl in der WASS-Schneidvorrichtung zu montieren. Die Bohrspäne wurden verwendet, um die chemische Zusammensetzung der Stähle mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) zu verifizieren (siehe Kapitel 3.3.2). Alle Messungen zeigten die im Prüfzeugnis der Stähle angegebenen Konzentrationen der Legierungselemente.



Abbildung 3.17: Vierkantstähle aus Edelstahl vor der Probenherstellung

In Abbildung 3.18 ist der Schneidprozess schematisch dargestellt. Mit einer Hochdruckpumpe wird ein Druck von etwa 2000 bar aufgebaut. Über Hochdruckschläuche ist die Pumpe mit dem Abrasivzumischbehälter verbunden. Die Zumischung des Abrasivs geschieht ebenfalls beim Betriebsdruck von 2000 bar. Die Suspension aus Wasser und Abrasivpartikeln wird in einem flexiblen Hochdruckschlauch zur WASS-Düse geführt.

Diese ist an einer Lineareinheit montiert, mit der der Schnitt durchgeführt und die Schnittgeschwindigkeit gesteuert werden kann. Der Schnitt findet unter Wasser statt,

um die Schallemission gering zu halten und den Verlust von Probenmaterial zu verhindern.

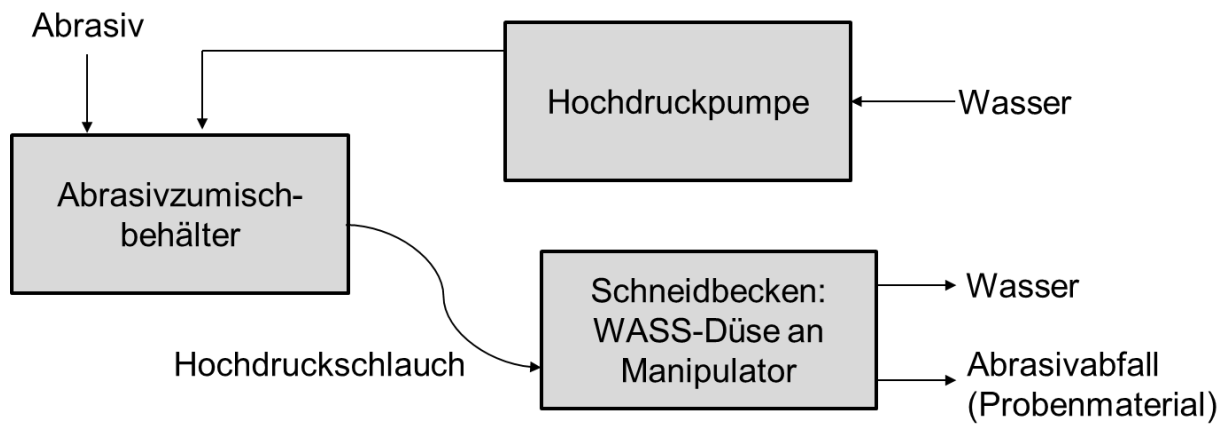


Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Komponenten der WASS-Anlage

Im Abstand von ca. 2 - 5 mm wird die Düse über die Stahloberfläche geführt. Abbildung 3.19 zeigt die WASS-Düse vor dem Beginn des Schnittes. Unterhalb der Düse ist der feine Wasserstrahl erkennbar, der den Stahl noch nicht berührt.

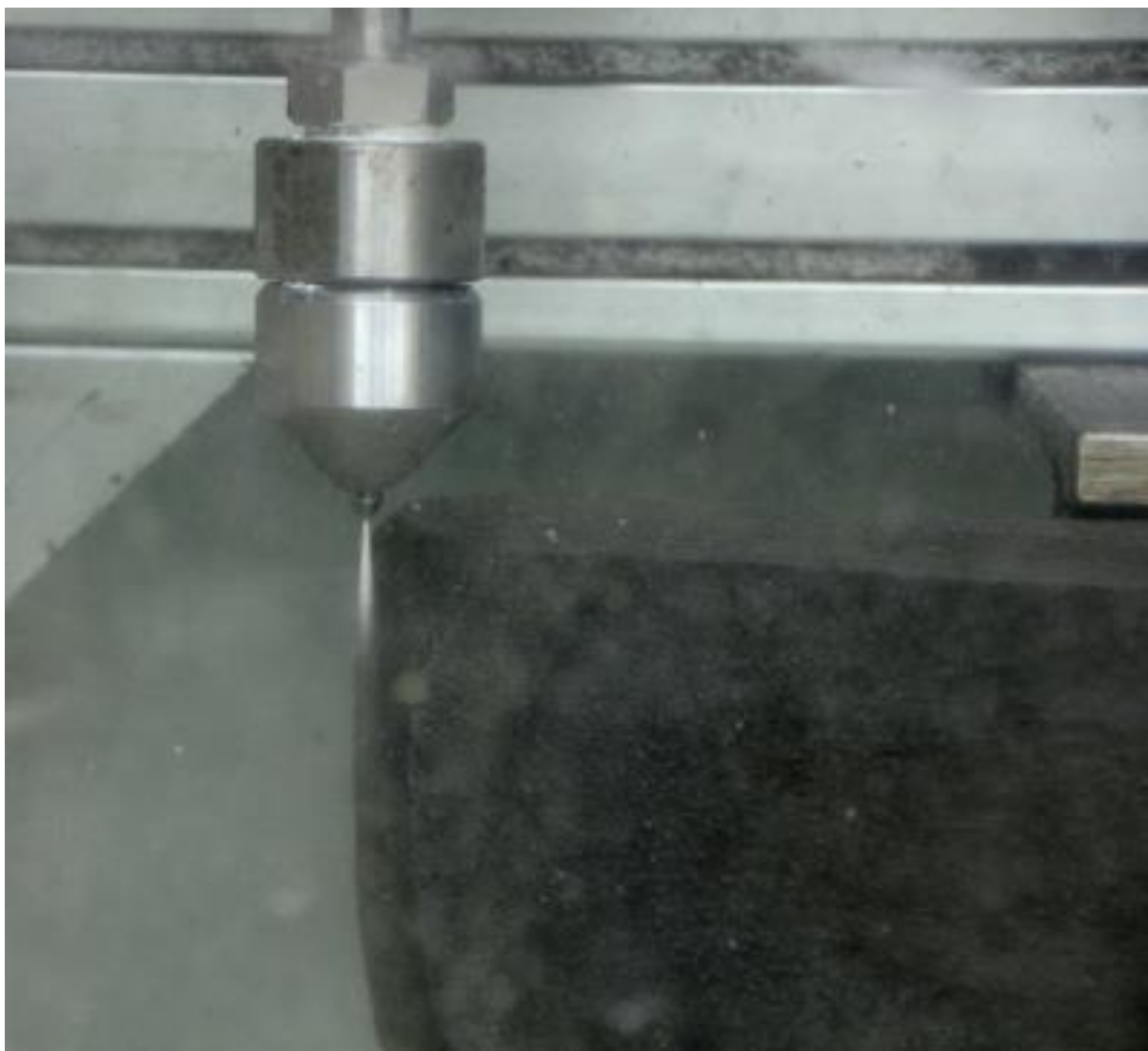


Abbildung 3.19: WASS-Düse am Schnittbeginn

Das Abrasiv und das Schnittfugenmaterial setzten sich am Boden des Schnittbeckens ab und wurden nach jedem Schnitt vollständig gesammelt und verpackt. Tabelle 3.2 führt die Schnittparameter der WASS-Anlage bei den Schnitten auf.

Tabelle 3.2: Betriebsparameter der WASS-Anlage bei der Probenherstellung

Wasserdruck	Volumenstrom Wasser	Massenstrom Abrasiv	Schnittlänge	Schnitt- geschwindigkeit
2000 bar	10 l/min	2 kg/min	570 mm	31 mm/min

Die Massendifferenz zwischen dem Vierkantstahl vor und nach dem Schnitt ist die Masse des Schnittfugenmaterials in der Probe, mit der man die Stahlkonzentration im Abrasivabfall bestimmen kann. Abbildung 3.20 zeigt das gesammelte Probenmaterial.



Abbildung 3.20: Feuchtes Probenmaterial (Gemisch 1.4307): Abrasiv (rot) und Stahlpartikel (grau)

Durch die Restfeuchte liegt das Gemisch in großen Agglomeraten vor. Durch die Partikelgrößen- und Dichteunterschiede von Abrasiv- und Stahlpartikeln, sedimentiert der Stahl langsamer, wodurch sich nach dem Absetzen aller Partikel auf dem Abrasivabfall eine dünne Schicht aus Stahlpartikeln bildet. Nach dem Verpacken der Proben sind diese als graue Bereiche erkennbar. Nach dem Trocknen ist keine elektrostatische Anziehung der Partikel erkennbar. Agglomerate im trockenen Zustand sind auf Haftkräfte aufgrund der Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln vor dem Trocknen zurückzuführen.



Abbildung 3.21: Getrocknetes Probenmaterial (Gemisch 1.4307)

Diese Agglomerate zerfallen beim Bewegen und Umfüllen der Proben. In Abbildung 3.21 ist getrocknetes Probenmaterial gezeigt. Intakte Agglomerate lösen sich beim Suspendieren in Wasser im Rührbehälter bei einer Rührerdrehzahl von 300 u/min auf.

3.2.3 Probenvorbereitung und Homogenisierung

In Kapitel 2.3 wurde das Phänomen der Entmischung von Partikelgemischen detailliert beschrieben. Am Probenmaterial sind zwei Bedingungen zu beobachten, bei denen es zu deutlicher Entmischung des Partikelgemischs kommt. Die erste Bedingung ist, dass das Probenmaterial feucht und mit Wasserüberstand vorliegt. In Abbildung 3.22 ist das Probenmaterial unmittelbar nach dem Abfüllen gezeigt.



Abbildung 3.22: Probenmaterial mit Wasserüberstand nach Abfüllen in Fässer

In diesem Zustand, feucht mit Wasserüberstand, ist das Probenmaterial gelagert. Wie an der grauen Farbe des Wassers und grauen Schlieren auf dem feuchten Probenmaterial erkennbar ist, trennen sich aufgeschwemmte Stahlpartikel aus dem Gemisch. Wie in Kapitel 2.3 anhand der Stokes'schen Sinkgeschwindigkeit beschrieben wurde, sedimentiert der Stahl langsamer als die vergleichsweise großen Abrasivpartikel. Daher bildet sich, sobald ein Wasserüberstand vorhanden ist, eine Schicht aus feinen Stahlpartikeln auf der Oberfläche des Probenmaterials. Durch die Flüssigkeitsbrücken wirken starke Haftkräfte auf die Partikel, wodurch ihre Beweglichkeit eingeschränkt ist. Ein Homogenisieren des Probenmaterials im feuchten Zustand und ein Untermischen der Stahlpartikelschicht werden dadurch erschwert. Das Gewicht der Chargen beträgt

im feuchten Zustand zwischen 65 kg und 85 kg. Die Probenmenge der einzelnen Chargen ist für die Homogenisierung ein weiteres Hindernis. Nach der Trocknung sind lockere Agglomerate aus dem langsam sedimentierten Stahlüberstand erkennbar (Abbildung 3.23, links), die bei Bewegung des Probenmaterials zerfallen (Abbildung 3.23, rechts).



Abbildung 3.23: Getrocknetes Probenmaterial mit Agglomeraten (links), zerkleinerte Agglomerate (rechts)

Entmischung tritt ebenfalls nach der Trocknung auf, wenn das Material umgefüllt wird. Besonders beim Wiegen einzelner Teilproben ist dieser Effekt zu beachten, da die Proben ausschließlich im trockenen Zustand gewogen werden. Getrocknet ist das Material gut fließfähig. Wegen des Größenunterschieds der Partikel im Gemisch und dem Dichteunterschied von Stahl und Abrasiv kommt es beim Bewegen des Probenmaterials zur Entmischung. Besonders bei der Probenahme für die quantitative chemische Analyse führen inhomogene Proben zu Schwankungen von über 100 % des Messwerts bei der ermittelten Stahlkonzentration. Wurde vorher eine Größenklassierung vorgenommen und anschließend aus dem Gemisch mit enger Partikelgrößenverteilung eine Probe entnommen, sind die Schwankungen geringer, da die Entmischung dann hauptsächlich durch den Dichteunterschied verursacht wird. Daher sind die Schwankungen der Stahlkonzentration bei der Charakterisierung der Charge 1.4550 in Kapitel 4.1 nach der Größenklassierung geringer, als bei unbehandelten Abrasivproben. Aufgrund der Fließfähigkeit des trockenen Probenmaterials und der damit verbundenen Entmischung sowie der Staubentwicklung wurde auf eine Trocknung und Mischung einer vollständigen Charge verzichtet.

Da eine Homogenisierung einer kompletten Charge in der Praxis nicht ausreichend umzusetzen ist, wurde für die experimentellen Untersuchungen ein Versuchsplan

gewählt, bei dem die Fraktionen nach der Separation bewertet wurden. Die Fraktionen nach der Separation sind bezüglich Stahlkonzentration und Partikelgröße einheitlicher und lassen sich im Labormaßstab für eine repräsentative Probennahme ausreichend homogenisieren.

3.3 Messmethoden

Im folgenden Abschnitt werden die Messmethoden vorgestellt, die für die Analysen der Proben verwendet wurden.

3.3.1 Siebanalyse

Für die Charakterisierung des Probenmaterials und der Siebfraktionen wurden Siebanalysen durchgeführt. Anhand der Massenanteile der einzelnen Siebfraktionen können Partikelgrößenverteilungen erstellt werden. Je nach Stoffeigenschaften und Zusammensetzung eines Partikelgemischs wird entschieden, ob eine Trockensiebung oder Nasssiebung geeignet ist [48]. In ist schematisch der Ablauf der Siebversuche mit der Separationsanlage und die Art der Siebanalysen dargestellt.

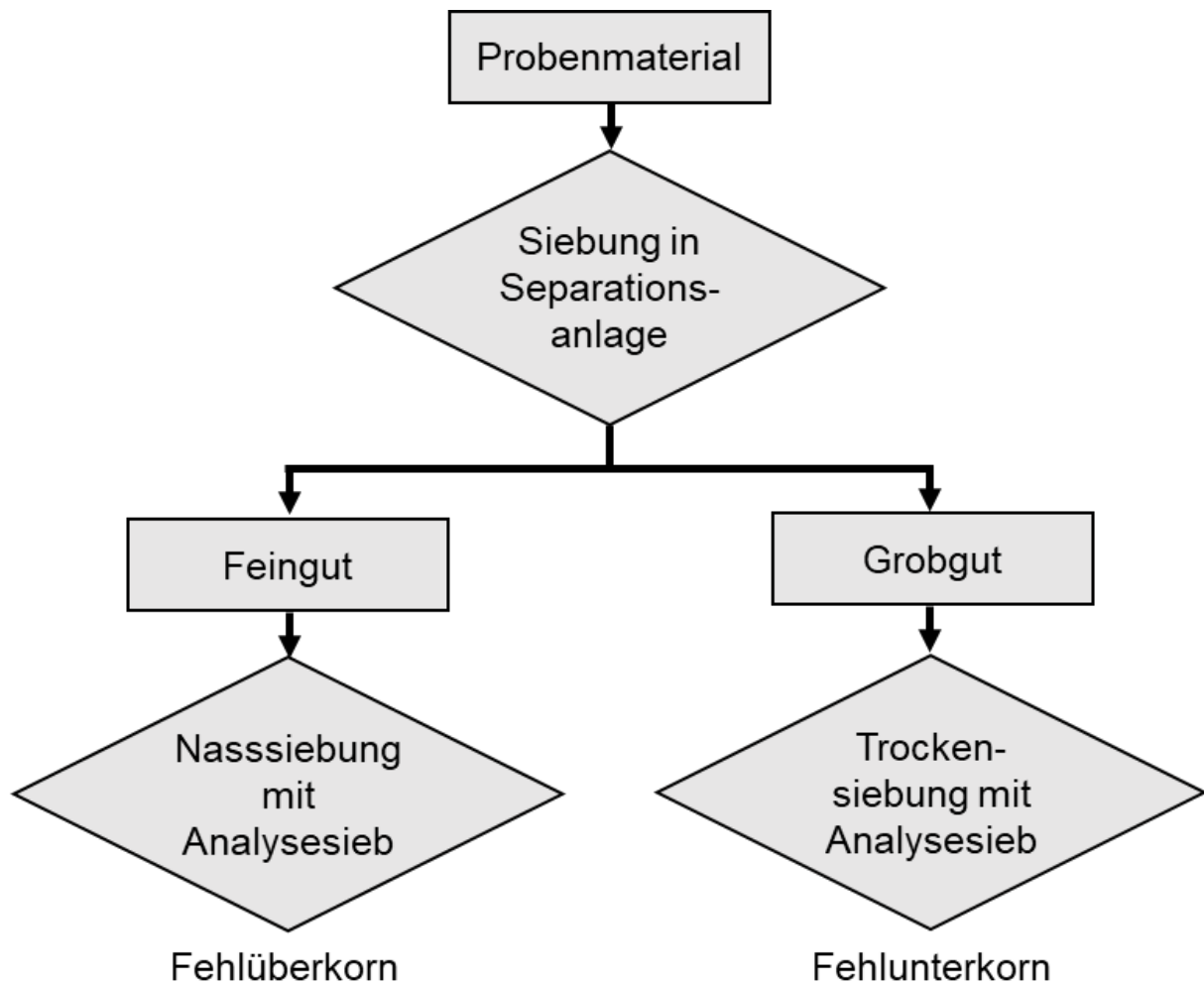


Abbildung 3.24: Siebversuche mit der Separationsanlage und Siebanalysen der Fraktionen

Die untersuchten Proben bestehen aus einem Gemisch aus Granatsand und Stahlpartikeln. Die Partikel besitzen aufgrund ihrer hohen Festigkeit eine große Widerstandsfähigkeit gegen Zerkleinerung. Die Partikel sind chemisch stabil, nicht wasserlöslich und neigen nicht zur Agglomeration. Diese Eigenschaften ermöglichen sowohl eine Trocken- als auch eine Nasssiebung. Je nach untersuchter Probe ist die Partikelgrößenverteilung sehr breit, so dass auch Partikel kleiner $70\ \mu\text{m}$ vorhanden sind. Vor allem beim unbehandelten Probenmaterial und besonders beim Feingut der Separationsanlage ist der Anteil an sehr feinen Partikeln ($<70\ \mu\text{m}$) hoch, wodurch diese Proben zur Staubbildung neigen. Um ein Freisetzen des Staubs zu verhindern, werden daher Nasssiebungen zur Siebanalyse durchgeführt.

Für die Siebanalysen wurde die Vibrationssiebmaschine „AS 200 Control“ der Firma Retsch verwendet (siehe Abbildung 3.25).



Abbildung 3.25: Analysesiebmaschine "AS 200 control"

Der Durchmesser der stapelbaren Siebe beträgt 200 mm. Auf der Siebanlage können bis zu neun Siebböden übereinander eingesetzt werden, wodurch das Probenmaterial in zehn Größenfraktionen klassiert werden kann. Im Deckel über dem obersten Sieb befindet sich eine Düse, mit der Wasser auf dem Sieb versprüht werden kann. Unterhalb des untersten Siebs befindet sich ein Auffangboden mit Ablauf, über den das Wasser samt Feingut des letzten Siebs ablaufen kann. Aufgrund der Stoffeigenschaften des Probenmaterials mussten keine Siebhilfen verwendet werden. Die maximale trockene Probenmenge die auf einmal im Sieb analysiert wurde betrug 750 g. Um die geeignete Siebdauer zu bestimmen, wurde in Vorversuchen die Massenänderung des Grobguts in Abhängigkeit der Zeit untersucht. Die Siebdauer t_s wurde so ermittelt, dass die Massenänderung des Grobguts in einer Minute weniger als 0,1 % des Aufgabeguts betrug. Diese Definition entspricht der Siebdauer abriebfester Stoffe der DIN-Norm zur Siebanalyse [49]. Die minimale Siebdauer bei der Nasssiebung wurde mit 20 min bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt war zudem das

Wasser im Ablauf des Auffangbodens klar und ohne Partikel. Je nach Breite der Partikelgrößenverteilung wurden die Maschenweiten und Anzahl der Siebe für die Fraktionen festgelegt. In Tabelle 3.3 sind die Siebböden aufgelistet, die für die jeweiligen Siebanalysen verwendet wurden.

Tabelle 3.3: Maschenweiten der Siebe für die einzelnen Siebanalysen

neues HPX80 Abrasive [µm]	wiederverwendbares Abrasive [µm]	Feingut der Separations- versuche [µm]	Charakterisierung der Charge 1.4550 [µm]
355	-	-	-
	-	-	315
300	300	300	-
250	250	250	250
212	-	-	-
-	224	224	-
-	200	200	-
180	180	180	180
150	150	150	-
125	125	125	125
-	-	-	106
-	-	-	71

Nach der Siebung wurden die einzelnen Fraktionen gewogen und damit die Partikelgrößenverteilungen in Form von massenbezogenen Dichteverteilungen $q_3(x)$ und massenbezogenen Summenverteilungen $Q_3(x)$ erstellt [25]. Die Summenverteilung $Q_3(x)$ beschreibt den Massenanteil der Partikel, die kleiner sind als die betrachtete Partikelgröße x , bezogen auf die Gesamtmenge, während die Dichteverteilung $q_3(x)$ den Massenanteil der betrachteten Partikelgröße x an der Gesamtmasse beschreibt. Separationsversuche wurden mindestens zweimal durchgeführt. Bei der Darstellung der Partikelgrößenverteilungen wurden als Fehlerbalken die Standardabweichungen der Massenanteile der jeweiligen Größenfraktion abgebildet. Der Fehlerbalken bei der Darstellung des Siebfehlers gibt die Standardabweichung der Mittelwerte der Siebfehler Fehlunterkorn bzw. Fehlüberkorn bei der jeweiligen Maschenweite an.

3.3.2 Quantitative Elementanalyse

Neben der Größenklassierung ist die Reduktion der Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasive die Hauptaufgabe der Separationsanlage. Mittels Mikroskopieaufnahmen kann untersucht werden, in welcher Form der Stahl im Gemisch vorliegt, aber nicht, welchen Massenanteil er in der untersuchten Probe darstellt. Die in dieser

Arbeit verwendeten chemischen Analysen zur Ermittlung der Stahlkonzentration im Abrasiv-Stahl-Gemisch wurden im Labor für Elementanalytik am Institut für Nukleare Entsorgung von Herrn Dr. Markus Plaschke, Frau Tanja Kisely und Frau Sylvia Moisei-Rabung durchgeführt.

Für die Bestimmung der Stahlkonzentration wird die optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. „inductively coupled plasma optical emission spectrometry“), im Folgenden ICP-OES abgekürzt, verwendet [50]. Dies ist eine quantitative analytische Methode, mit der Proben in ein Aerosol überführt und in ein Argon-Plasma injiziert werden. Bei Temperaturen von über 6000 - 8000 °C wird die Probe getrocknet, in Atome zerlegt und thermisch angeregt. Jedes Element sendet nach der Anregung elektromagnetische Strahlung aus, welche über Detektoren aufgenommen werden. Anhand der Wellenlängen der gemessenen Emissionslinien wird auf das Element geschlossen. Für die Analyse der Abrasiv-Stahl-Gemische wurde das ICP-OES Gerät „Optima 8300 DV“ der Firma Perkin Elmer verwendet. Das Gerät benötigt flüssige Proben, die zerstäubt und dann in ein Plasma gegeben werden. Für die Probenherstellung wird das zu untersuchende Abrasiv-Stahl-Gemisch in eine Mischung aus 30 % iger Salzsäure (HCl) und 60 % iger Salpetersäure (HNO₃) im Verhältnis 3:1, bezogen auf das Volumen, gegeben und für etwa zwei Stunden auf einer Heizplatte bei 80 °C erwärmt. Der Stahl im Abrasiv-Stahl-Gemisch löst sich bei diesem Prozess in der Säure, während die mineralischen Bestandteile des Abrasivs nicht gelöst werden und als fester Rückstand auf dem Boden des Probenglases zurückbleiben (siehe Abbildung 3.26).



Abbildung 3.26: Säureaufschluss von Abrasiv-Stahl-Proben auf einer Heizplatte

Nach etwa zwei Stunden ist dieser Vorgang abgeschlossen und der Stahl der Probe ist in der Säure gelöst. Parallel dazu werden Proben des reinen Abrasivs ohne Stahl

nach demselben Vorgehen in Säure vorbereitet, um eine Blindprobe zu erstellen. Die Einwaage der trockenen Proben wurde mit 250 mg pro Probenglas gewählt. Jeder Probe wurden 10 ml der Säuremischung zugegeben. Nach dem Säureaufschluss und dem Abkühlen der Proben wurden die Lösungen in Messkolben überführt und bis 25 ml mit Reinstwasser (MilliQ) aufgefüllt. Da durch die Inhomogenität und Entmischung der Abrasiv-Stahl-Gemische bei der Einwaage immer Schwankungen in der Zusammensetzung auftreten, wurden die Proben mindestens als Dreifachbestimmung oder als Vier- bzw. Fünffachbestimmung für die Abrasiv-Blindproben durchgeführt. Zur Bestimmung der Stahlkonzentration wird ein Element benötigt, welches im Stahl in hoher Konzentration und im reinen Abrasiv in möglichst geringer Konzentration enthalten ist. In vorhergehenden Arbeiten [35], [34] wurde das Element Nickel als geeignetes Leitelement für die Analysen ermittelt. In Tabelle 3.4 ist die Nickelkonzentration der untersuchten Stahlsorten und des Abrasivs dargestellt.

Tabelle 3.4: Nickelkonzentration der untersuchten Stahlsorten nach Herstellerangaben [51], [52], [53]

Stahlsorte (Werkstoffnr.)	1.4307	1.4550	1.4571
Ni-Anteil [Massen-%]	8,53	10,35	11,26

Für die Quantifizierung der Stahlkonzentration wird die Nickelkonzentration des reinen Abrasivs (Blindprobe) von der Nickelkonzentration jeder Abrasiv-Stahl-Probe abgezogen. Da der Messwert der Blindprobe jede Bestimmung der Nickelkonzentration beeinflusst, wird von der Blindprobe eine Vier- bzw. Fünffachbestimmung durchgeführt, um den systematischen Fehler zu senken. Anhand der Nickelkonzentration der Abrasiv-Stahl-Säurelösungen und der Nickelkonzentration des reinen Abrasivs kann dann die Stahlkonzentration der untersuchten Proben berechnet werden. Mögliche Fehlerquellen, die zu Messungenauigkeiten führen, sind neben Pipettierfehlern vor allem die Probenahme bei der Einwaage der Abrasiv-Stahl-Proben. Da das Gemisch bezüglich der Partikelgröße und Materialdichte inhomogen ist, kommt es bei der Probennahme zu Entmischung, was zu einer unterschiedlichen Stahlkonzentration der einzelnen Proben führen kann (siehe Kapitel 2.3).

3.4 Versuchsplanung

Mit der Separationsanlage lassen sich im Labormaßstab Abrasiv-Stahlgemischproben mit einem Nasssieb und einem Permanentmagnetfilter behandeln und wiederverwendbares Abrasiv herstellen. Der Versuchsaufbau ermöglicht es, verschiedene Siebmaschenweiten zu variieren und im Magnetfilter die Separation von Abrasiv-Stahlgemischproben mit verschiedenen Stahlsorten bei gleichen Betriebsparametern zu vergleichen.

Eine Auswahl wichtiger Anlagen- und Betriebsparameter sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Auswahl der Anlagen- und Betriebsparameter bzw. Faktoren der Separationsanlage

konstant/festgelegt	variabel
<ul style="list-style-type: none"> • Volumenstrom der Suspension • Feststoffkonzentration der Suspension • Dauer der Magnetfiltration • Siebdauer • Druckluftvolumenstrom zum Unwuchtvibrator des Siebs • Rührgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Siebmaschenweite • Stahlsorte des Abrasiv-Stahlgemischs

Die Parameter der linken Spalte der Tabelle 3.5 umfassen Betriebsparameter, welche entweder konstant gehalten werden oder durch Randbedingungen der Anlage festgelegt sind. Die Bestimmung der Betriebsparameter wird im Anhang in Kapitel 6.1 im Detail beschrieben.

Die variablen Parameter „Siebmaschenweite“ und „Stahlsorte des Abrasiv-Stahlgemischs“ und ihre Auswirkungen auf das Separationsergebnis sind der Fokus der vorliegenden Arbeit.

Konkret sollen die in Kapitel 1.3 gestellten Fragestellungen untersucht werden:

- Welchen Einfluss hat die Maschenweite der Nasssiegung bei der Abrasiv-aufbereitung auf den Wiederverwendungsanteil und somit auf den gesamten Abrasivverbrauch bzw. die Abfallmenge?

Hierfür werden mit der Separationsanlage mit verschiedenen Siebmaschenweiten Trennexperimente durchgeführt, die separierten Fraktionen gewogen und die Partikelgrößenverteilungen mit dem Analysesieb bestimmt. Mit einer Massenbilanz der Trennexperimente wird, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, der Wiederverwendungsanteil bestimmt. Um den Einfluss der Maschenweite genauer zu untersuchen, muss zudem der Siebfehler der Separationsanlage beachtet werden. Der Siebfehler des Fehlüberkorns senkt den Wiederverwendungsanteil, da wiederverwendbares Grobgut im Feingut abgeschieden wird. Zusätzlich wird der Siebfehler des Fehlunterkorns bestimmt, um eine Abhängigkeit zur Maschenweite zu prüfen. Dieser Siebfehler beeinflusst sowohl den Wiederverwendungsanteil, als auch die Qualität des wiederverwendbaren Abrasivs.

- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Maschenweite der Nasssiegung und der Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv?

Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, werden mit der Separationsanlage Trennversuche mit Sieb und Magnetfilter durchgeführt und die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs mittels chemischer Analyse bestimmt. In diesen Versuchen wird die Maschenweite des Siebs variiert, um den Einfluss auf die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs zu untersuchen.

- Die Effektivität des Magnetfilters ist abhängig von den magnetischen Eigenschaften des abzutrennenden Materials. Wie wird die Effektivität des Magnetfilters, und somit die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv, durch den Schnitt von unterschiedlichen Edelstahlsorten beeinflusst?

Um den Einfluss der magnetischen Eigenschaft der Stahlsorte auf die Magnetfiltration zu untersuchen, wird Probenmaterial mit den Stahlsorten 1.4307 und 1.4571 verwendet. Anhand der Stahlkonzentrationen des Ausgangsmaterials und des wiederverwendbaren Abrasivs wird zudem der Abscheidegrad des Stahls bestimmt.

Zur Versuchsplanung werden zuerst die variierten Betriebsparameter bzw. die Faktoren betrachtet. Die Siebmaschenweite ist ein linear veränderbarer Faktor, bei der Stahlsorte der Probengemische handelt es sich um einen kategorischen Faktor [54]. Zur Bestimmung der Stahlkonzentration in Abhängigkeit von der Maschenweite muss die Maschenweite bei beiden Probengemischen variiert werden. Es wurde deshalb ein vollfaktorieller Versuchsplan mit unterschiedlicher Anzahl an Stufen gewählt [55]. Für die Untersuchung des Wiederverwendungsanteils und des Siebfehlers wurde eine fünfstufige Variation der Maschenweite gewählt und mit einem Probengemisch gearbeitet. Drei dieser fünf Varianten (150 μm , 200 μm und 250 μm) wurden zusätzlich hinsichtlich der Stahlkonzentration ausgewertet. Trennversuche mit diesen drei Varianten (150 μm , 200 μm und 250 μm) wurden mit beiden Stahlsorten durchgeführt und verglichen. In Tabelle 3.6 ist eine Übersicht der Trennversuche und Parameter aufgeführt.

Tabelle 3.6: Übersicht des Versuchsplans mit Probenmaterial, Parametern und Analysen

Probe	Separationsversuch		Analyse	
	Siebung	Siebung und Magnetfiltration	Sieb- analyse	chemische Analyse
Probengemisch 1.4307	150 µm	150 µm	150 µm	150 µm
	180 µm	200 µm	180 µm	200 µm
	200 µm	250 µm	200 µm	250 µm
	224 µm		224 µm	
	250 µm		250 µm	
Probengemisch 1.4571	150 µm	150 µm	150 µm	150 µm
	200 µm	200 µm	200 µm	200 µm
	250 µm	250 µm	250 µm	250 µm

Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt. In den Partikelgrößenverteilungen ist jeweils der Mittelwert der Massenfraktion aufgetragen. Die Standardabweichung der Messwerte ist in Fehlerbalken mit zwei Sigma dargestellt [56].

4. Wiederverwendbares Abrasiv

Im vorherigen Kapitel wurde die Versuchsanlage vorgestellt, die Probenherstellung und die Messmethoden beschrieben. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Charakterisierung des Probenmaterials erklärt und das Verfahren der Abrasiv-aufbereitung mit der Separationsanlage genauer untersucht. Im Fokus der experimentellen Untersuchungen stehen der Wiederverwendungsanteil, der Siebfehler und die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs. Die Versuchsreihen zur Bestimmung der Wiederverwendungsanteile und des Siebfehlers wurden mit der Siebkomponente der Separationsanlage ohne anschließende Magnetseparation durchgeführt, da hierfür die Parameter zur Größenklassierung entscheidend sind und nicht Parameter der Magnetseparation. Für die Versuchsreihe zur Bestimmung der Stahlkonzentration wurde die Separationsanlage mit Siebkomponente und Magnetfilter verwendet.

Zuerst wurden das Probenmaterial und das neue Abrasiv charakterisiert. Hierfür wurden die Partikelgrößenverteilungen mittels Siebanalyse (siehe Kapitel 3.3.1) und die Stahlkonzentrationen der Fraktionen mittels chemischer Analyse (siehe Kapitel 3.3.2) bestimmt. Einzelne Proben wurden zudem mikroskopisch untersucht. Anschließend wurde das Probenmaterial mit der Separationsanlage behandelt. Es wurden Separationsversuche mit Probenmaterial aus zwei Chargen (Stahlsorten 1.4307 und 1.4571) mit jeweils drei verschiedenen Maschenweiten und anschließender Magnetseparation durchgeführt. Mit einer Siebanalyse des wiederverwendbaren Abrasivs wurde das Fehlunterkorn und Fehlüberkorn, sowie die Stahlkonzentration mittels Säureaufschluss und ICP-OES, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, bestimmt. Mit Probenmaterial der Charge 1.4307 wurden zudem zwei weitere Siebmaschenweiten in der Separationsanlage getestet, um den Zusammenhang zwischen der Maschenweite und dem Siebfehler und dem Wiederverwendungsanteil genauer zu bestimmen.

4.1 Charakterisierung des Probenmaterials

Das Probenmaterial für die experimentellen Untersuchungen wurde vor den Separationsversuchen umfänglich charakterisiert. Es wurde eine Größenklassierung einer kompletten Charge durchgeführt und die Partikelgrößenverteilung mit der von

neuem Abrasiv verglichen. Mittels ICP-OES wurde eine quantitative chemische Analyse der Stahlkonzentration der einzelnen Siebfractionen der Größenklassierung vorgenommen.

Zudem wurden die Proben mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht und Elektronenrückstreubilder angefertigt. Bei dieser Methode wird über die Detektion der elastisch rückgestreuten Elektronen ein Materialkontrastbild erstellt. Anhand der unterschiedlich starken Rückstreuung verschieden schwerer Atome, sind auf den Aufnahmen die Abrasiv- und Stahlpartikel am Kontrast unterscheidbar. Die Mikroskopieaufnahmen, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden, wurden am Institut für Nukleare Entsorgung von Herrn Dr. Dieter Schild mit einem „FEI QUANTA 650 FEG“ Rasterelektronenmikroskop angefertigt. Mit den Aufnahmen können die Rissbildung am Abrasiv, die Form der Stahlpartikel und Phänomene, wie Stahlanhaftungen an Abrasivpartikeln untersucht werden.

Größenklassierung

Bei dem Probenmaterial handelt es sich um ein Partikelgemisch aus Granat und Edelstahl, welche sich in ihrer Partikelgrößenverteilung, sowie ihrer Dichte stark unterscheiden. Das Abrasiv des WASS-Verfahrens ist Granatsand, welches zu über 90 % aus Almandin ($\text{Fe(II)}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), mit einer Dichte von ca. $4,32 \text{ g/cm}^3$, besteht. Zudem sind unter anderem die Minerale Pyrop, Grossular, Magnetit und Hornblende enthalten. Die Dichte des Granatsands beträgt etwa $4,1 \text{ g/cm}^3$, die des geschnittenen Edelstahls etwa $7,9 \text{ g/cm}^3$.

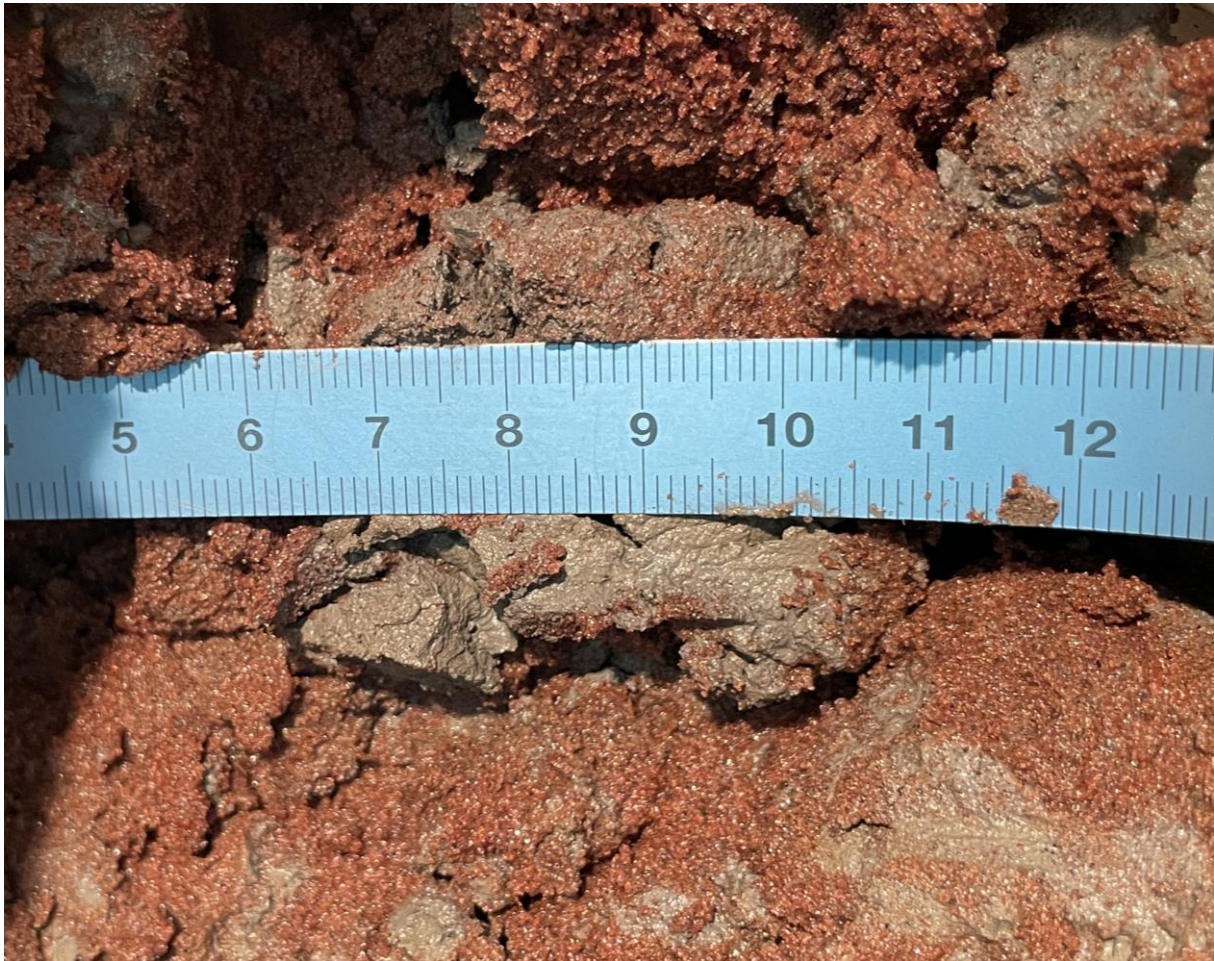


Abbildung 4.1: Entmischungseffekte bei feuchtem Probenmaterial

Aufgrund der starken Entmischung (siehe Abbildung 4.1) sind eine ausreichende Homogenisierung und eine repräsentative Probenahme in der Praxis nicht durchführbar. Besonders bei sensiblen Messmethoden, wie der chemischen Analyse mittels ICP-OES, sind Abweichungen in der Probenzusammensetzung festzustellen.

Um für die Charakterisierung eine Homogenisierung und Probennahme zu umgehen, wurde für die Größenklassierung eine komplette Charge des Probenmaterials gesiebt. Hierfür wurde das Probenmaterial des Schnittes von 1.4550 vollständig mit der Analysesiebmaschine, wie in Kapitel 3.3. beschrieben, mit sechs Siebstufen in sieben Partikelgrößenfraktionen klassiert. Das Probenmaterial wurde feucht in die Siebmaschine gegeben, mittels Nasssiegung klassiert und der Durchgang des feinsten Siebes aufgefangen. Die Fraktionen wurden nach Abschluss der Siebung getrocknet und gewogen. Anhand der Massen wurden dichtebezogene Partikelgrößenverteilungen $q_3(x)$ erstellt, die in Abbildung 4.2 gezeigt sind.

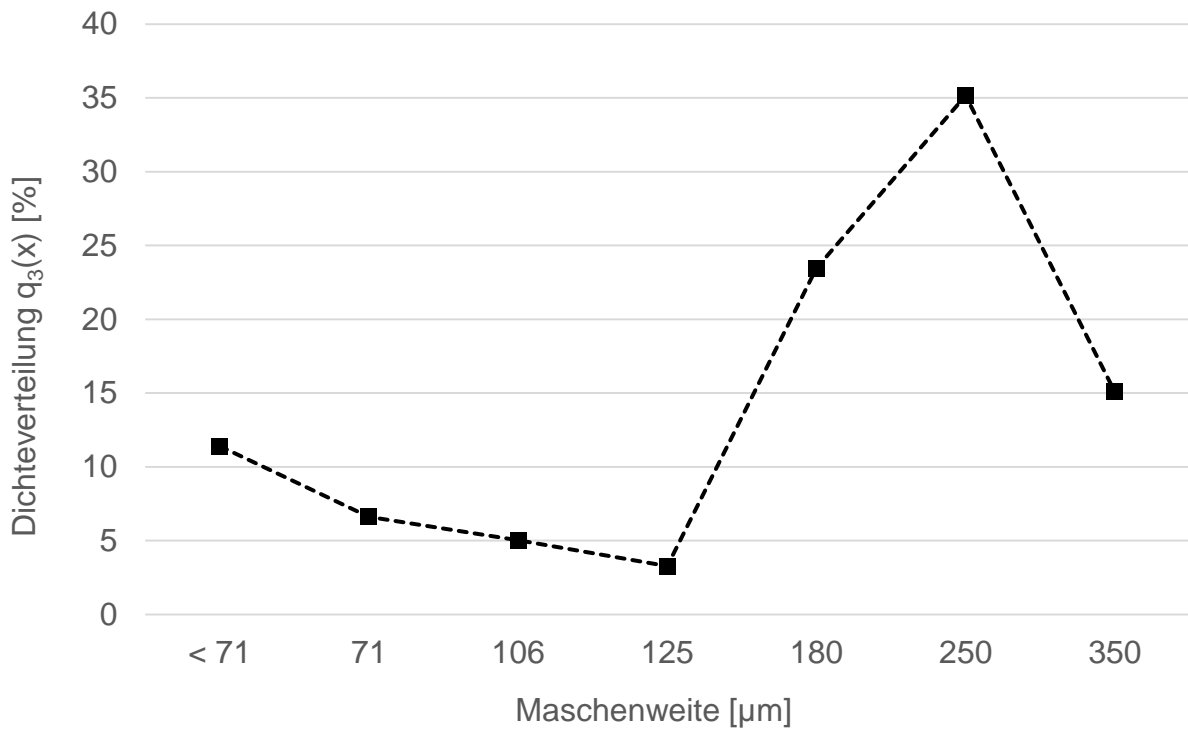


Abbildung 4.2: Partikelgrößenverteilungen des gesamten Probenmaterials 1.4550

Anhand der summierten Massenanteile der Größenfraktionen ist die Summenverteilung $Q_3(x)$ in Abbildung 4.3 dargestellt.

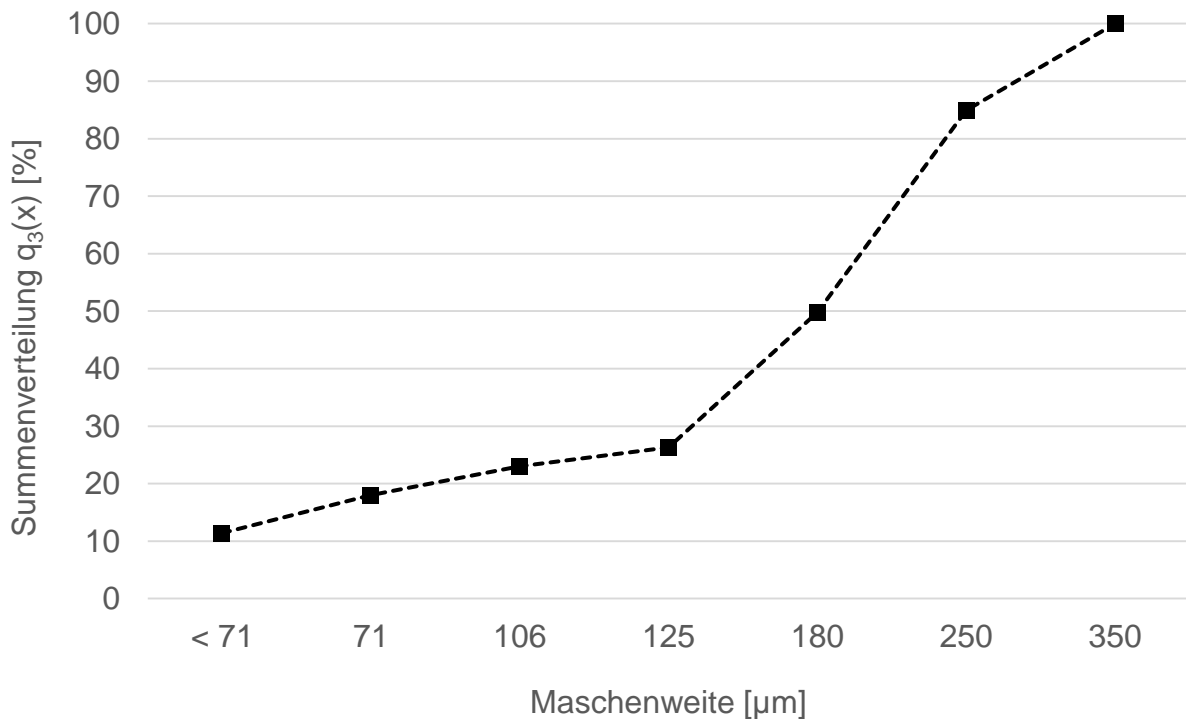









Abbildung 4.3: Summenverteilung des gesamten Probenmaterials 1.4550

In der Darstellung ist erkennbar, dass über 75 % der Gesamtmasse aus Partikeln größer 125 μm besteht. Partikel dieser Größe können potentiell für einen weiteren Schnitt in der WASS-Anlage verwendet werden. Die Fraktionen kleiner 71 μm bis 125 μm bestehen aus Abrasivfragmenten und Stahlpartikeln. In vorherigen Arbeiten wurde festgestellt, dass die Stahlpartikel tendenziell kleiner sind als Abrasivpartikel [35], [36]. Dieser Zusammenhang wurde anhand von chemischen Analysen bezüglich der Stahlkonzentration verifiziert. Hierfür wurden Proben aus den Größenfraktionen entnommen und mittels Säureaufschluss und anschließendem ICP-OES untersucht. Tabelle 4.1 zeigt die Siebfraktionen mit dem entsprechenden Größenintervall, dem Gewicht der jeweiligen Siebfraktion, der Stahlkonzentration und dem Anteil des Stahls in der Fraktion bezogen auf die Stahlmenge im gesamten Probengemisch.

4. Wiederverwendbares Abrasiv

Tabelle 4.1: Siebfraktionen der Charge 1.4550 mit Stahlkonzentration

Partikelgrößenintervall der Siebfraction [µm]	Foto der Probe	Masse der Siebfraction [kg]	Stahlkonzentration der Siebfraction [Massen-%]	Anteil an der Gesamtstahlmenge [%]
<71		7,47	10,04 ± 0,04	88,69 ± 3,2
>71		4,33	1,68 ± 0,03	8,61 ± 1,2
>106		3,29	0,13 ± 0,01	0,51 ± 0,15
>125		2,15	0,05 ± 0,001	0,13 ± 0,02
>180		15,36	0,02 ± 0,003	0,36 ± 0,4
>250		23,02	0,05 ± 0,01	1,36 ± 1,9
>350		9,87	0,03 ± 0,006	0,35 ± 0,5

Die Analyse der Stahlkonzentration zeigt einen direkten Zusammenhang zur Partikelgröße. Bezogen auf die gesamte Probenmenge hat das Abrasiv-Stahlgemisch eine Stahlkonzentration von 1,29 Massen-%, bzw. 0,845 kg Stahl in 65,5 kg Abrasivabfall. Von diesem Stahl befinden sich 98 % in der Größenfraktion kleiner 106 µm. 2 % des Stahls verteilt sich auf 90 % der Masse, welche die Größenfraktion größer 106 µm darstellt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass es für die Separation des Stahls aus dem Gemisch sinnvoll ist, vor der Magnetfiltration eine Größenklassierung durchzuführen. Die inhomogene Verteilung des Stahls im Gemisch wird so genutzt, um die Stahlkonzentration des Ausgangsmaterials für den Magnetfilter zu reduzieren. Dadurch wird der Magnetfilter langsamer beladen, was die Intervalle des Spülens reduziert und die Effektivität der Magnetseparation erhöht.

In Tabelle 4.1 ist der Zusammenhang zwischen Farbe der Fraktion und Größenintervall zu erkennen. Je größer die Partikel der Fraktion sind, desto dunkler und intensiver ist ihre rote Farbe. Auffallend ist die Farbe der kleinsten Fraktion, dem Durchgang des 71 µm Siebs. An der grauen Farbe ist ebenfalls erkennbar, dass diese Fraktion die höchste Stahlkonzentration besitzt.

In welcher Form der Stahl in den Fraktionen vorliegt, wurde anhand von Rückstreu-elektronenaufnahmen untersucht. Dafür wurden Proben der Charge 1.4571, mit einer Maschenweite von 250 µm in der Separationsanlage gesiebt und anschließend mit dem Magnetfilter behandelt. Proben aus dem Feingut der Siebung und dem mittels Magnetfilter gereinigten Grobgut wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abbildung 4.4 zeigt ein Rückstreuelektronenbild des Feinguts der Siebung mit 250 µm Maschenweite.

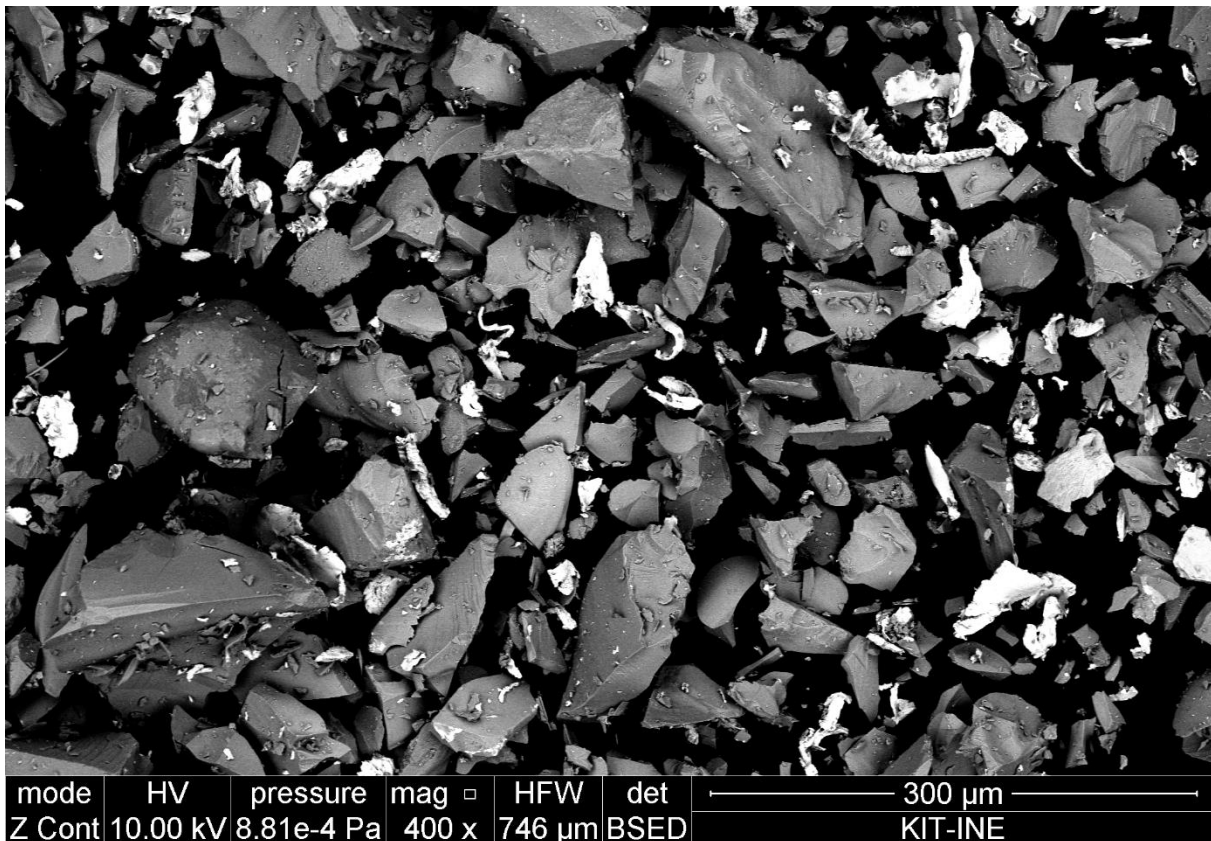


Abbildung 4.4: Feingut der Siebung mit 250 µm Maschenweite

Die Intensität der Elektronenrückstreuung ist abhängig vom Material. Da die Rückstreuung des Edelstahls stärker ist, als die des Granats, sind die beiden Stoffe im Rückstreuelektronenbild über den Helligkeitskontrast unterscheidbar. Die grauen Partikel sind Abrasivpartikel, die hellen bzw. weißen Partikel sind Stahlpartikel. Wie zu erwarten, sind im Feingut überwiegend kleine Abrasivbruchstücke und Stahlpartikel erkennbar. Die chemische Analyse der Proben zeigte, dass 98 % des Stahls aus dem Ausgangsmaterial im Feingut der Siebung zu finden ist. Die Form der Stahlpartikel ist meist länglich, dünn, mit rauen Kanten. Das Abrasiv im Feingut besteht hauptsächlich aus Bruchstücken, scharfen Absplitterungen und wenigen großen Abrasivpartikeln, welche entweder als Grenzkorn durch das Sieb, oder als Fehlüberkorn über den Siebrahmen ins Feingut gelangt sind.

Ein Vergleich des neuen Abrasivs und des wiederverwendbaren Abrasivs ist in Abbildung 4.5 gezeigt. Das neue Abrasiv (Abbildung 4.5, links) besteht aus intakten Partikeln ohne Risse, mit überwiegend geraden, glatten und scharfen Kanten. In Abbildung 4.5 ist rechts das wiederverwendbare Abrasiv nach Siebung und Magnetseparation gezeigt. Durch Absplitterungen wirken einige Partikel rauer als das neue

Abrasiv. Die Kanten sind weiterhin scharf, aber aufgrund von Absplitterungen häufiger gezackt. Auffallend sind an den Ecken einiger Partikel helle Stellen (siehe Markierung). Diese sind Stahlanhaftungen am Aufprallpunkt der Abrasivpartikel, die beim Aufprall auf den Stahl entstanden sind. Die hohe Bewegungsenergie der Abrasivpartikel wird beim Aufprall in Verformung des Stahls, durch Heraustrennen der Stahlpartikel und in Wärme umgewandelt, was ebenfalls an der Erwärmung des Wassers im Schnittbecken und des Schnittguts bemerkbar ist. Dies konnte bei der Herstellung des Probenmaterials während der Probenentnahme und dem Herausnehmen des Schnittguts aus dem Schnittbecken festgestellt werden.

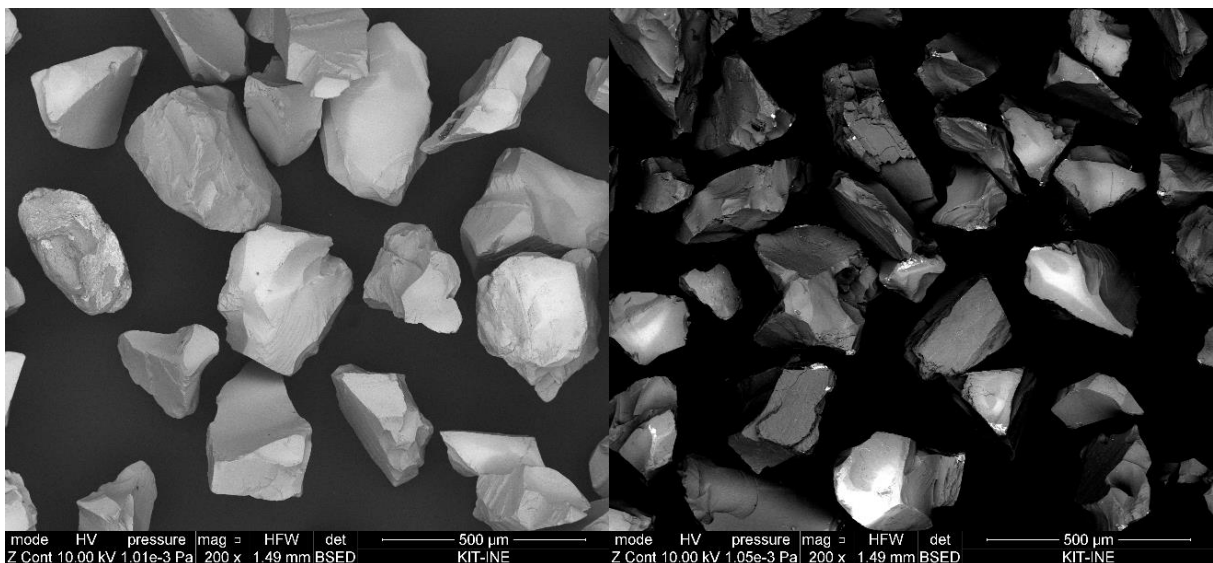


Abbildung 4.5: Neues Abrasiv (links), wiederverwendbares Abrasiv nach Siebung und Magnetseparation (rechts)

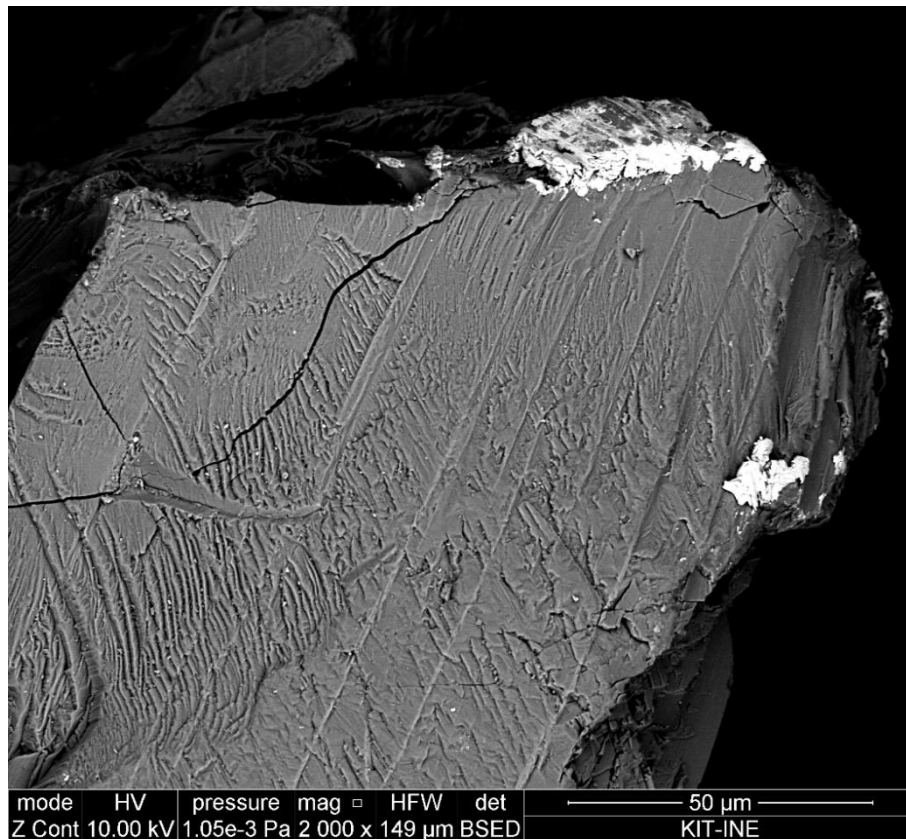


Abbildung 4.6: Abrasivpartikel mit Rissbildung und Stahlanhaftung

In Abbildung 4.6 ist eine vergrößerte Darstellung eines Abrasivpartikels mit Stahlanhaftung gezeigt. Am oberen Teil des Partikels befindet sich der Aufprallpunkt, an dem mehrere Risse beginnen. Kleinere Stahlanhaftungen sind an der Seite erkennbar. Die Anhaftungen lassen sich auf mechanischem Weg, wie z.B. durch Ultraschallbehandlung nicht entfernen oder mittels Magnetseparation abtrennen. Die beobachteten Anhaftungen sind jedoch nicht großflächig und machen nur einen geringen Teil der Stahlkonzentration im Gemisch aus, wie die chemische Analyse bestätigt hat. Die Aufnahmen zeigen, dass in der Praxis eine vollständige Abscheidung des Stahls mit mechanischen Trennverfahren nicht möglich ist [37]. Für die Wiederverwendung des Abrasivs muss daher in der Praxis die Stahlkonzentration und folglich die Radioaktivität des wiederverwendbaren Abrasivs beachtet werden. Je nach Dosisleistung des Schnittguts und Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs kann eine zusätzliche Abschirmung der Schneidanlage benötigt oder andere Anforderungen an die Lagerung des Abrasivabfalls gestellt werden [57].

An der Partikelgrößenverteilung des verwendeten Abrasivs ist erkennbar, dass bei einem WAS-Schnitt das Abrasiv beschädigt und zerkleinert wird. Bei den

Beschädigungen handelt es sich hauptsächlich um Absplitterungen. Der Massenanteil der kleinen Stahlpartikel und Abrasivsplittern kleiner als $71\ \mu\text{m}$ beträgt $11,4\ \%$. Mehr als $75\ \%$ der Abrasivpartikel sind noch intakt und besitzen eine Größe von über $125\ \mu\text{m}$. Mit dieser Partikelgrößenverteilung des Abrasivabfalls ist bei einer einfachen Wiederverwendung des Abrasivs ohne mehrfache Aufbereitung oder Zugabe von neuem Abrasiv eine Reduzierung des Abrasivabfalls um bis zu $75\ \%$ möglich. Bei einer mehrfachen Wiederverwendung des Abrasivs reduziert sich die Abfallmenge weiter. Der Effekt der mehrfachen Aufbereitung und Wiederverwendung auf die Abfallreduzierung wird anhand einer Modellrechnung in Kapitel 4.6 untersucht.

4.2 Anforderungen an das wiederverwendbare Abrasiv

Um aufbereitetes Abrasiv für einen erneuten Schnitt wiederverwenden zu können, sind bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Das wichtigste Kriterium ist die Partikelgrößenverteilung des aufbereiteten Abrasivs, welche möglichst der von neuem Abrasiv entsprechen soll. In diesem Fall wäre eine Zumischung von neuem Abrasiv oder eine Anpassung der Schnittparameter nicht nötig. Ein weiteres Kriterium ist die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs, welche im Hinblick auf die Anwendung im kerntechnischen Bereich so stark wie möglich reduziert werden soll.

Um die Kriterien an das wiederverwendbare Abrasiv zu definieren, wird die Partikelgrößenverteilung des neuen HPX80-Abrasivs benötigt. Diese wird vom Hersteller des Abrasivs zur Verfügung gestellt. Um die Herstellerangaben zu verifizieren, wurden zum Vergleich Siebanalysen des neuen HPX80-Abrasivs durchgeführt. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, wurden Proben des neuen Abrasivs mit der Analysesiebmaschine klassiert und anhand der einzelnen Massen der Fraktionen Partikelgrößenverteilungen erstellt, welche in Abbildung 4.7 dargestellt sind.

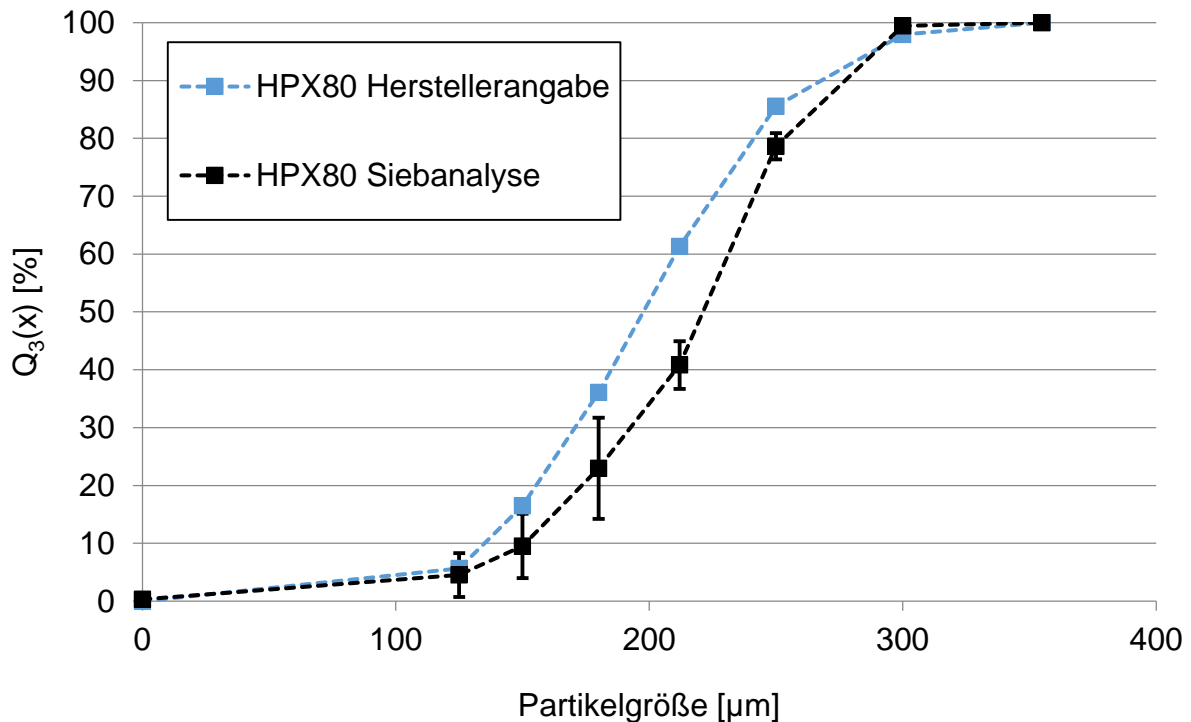


Abbildung 4.7: Summenverteilung des neuen HPX80, gemessen und nach Herstellerangabe [10]

In Abbildung 4.7 wird die Herstellerangabe der Partikelgrößenverteilung mit den Ergebnissen der Siebanalyse des neuen HPX80-Abrasivs verglichen. Die Herstellerangaben zur Partikelgröße sind mit blauen Punkten abgebildet und die Ergebnisse der selbst durchgeführten Siebanalyse mit schwarzen Punkten. Für die Siebanalyse wurden 2 x 500 g Abrasiv, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, klassiert und der Mittelwert der summierten Massenfraktionen mit Angabe der Standardabweichung als Fehlerbalken dargestellt.

Die Herstellerangabe und die Messung zeigen eine ähnliche enge Größenverteilung, bei der über 80 Massen-% des Abrasivs eine Partikelgröße zwischen 250 μm und 300 μm besitzen. Die Partikelgrößen, die experimentell bestimmt wurden, sind größer als die der Herstellerangabe.

Ein zu hoher Anteil an feinsten Partikeln im Abrasiv kann beim Einsatz in der WASS-Anlage Störungen und Verstopfungen der Komponenten hervorrufen. Um beim WASS-Schnitt Störungen zu vermeiden und die Düse vor Beschädigungen zu schützen, darf der Feinanteil des wiederverwendbaren Abrasivs nach der Siebung nicht zu hoch sein [18]. Als Qualitätskriterium für das wiederverwendbare Abrasiv wird der Feinanteil des neuen Abrasivs nach Herstellerangabe bzw. eigener Messung definiert. Das neue

HPX80-Abrasiv ist, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, das Grobgut einer Siebung mit einem 177 μm -Sieb. Das Kriterium wurde als das Fehlunterkorn einer 180 μm -Siebung definiert. Die Umrechnung „Mesh 80“-Siebung (80 Siebmaschen pro Inch) ergibt eine Maschenweite von 177 μm . Die nächste verfügbare Maschenweite ist 180 μm , was zu einer systematischen Abweichung führt. Nach der Partikelgrößenverteilung in Abbildung 4.7 ergibt sich ein Fehlunterkorn der Siebung von 23 Massen-% (Messung) bzw. 36 Massen-% (Herstellerangabe). Mit diesem Anteil an Fehlunterkorn wird der Siebfehler des mit verschiedenen Maschenweiten aufbereiteten, wiederverwendbaren Abrasivs verglichen.

4.3 Abrasivaufbereitung mit unterschiedlicher Maschenweite

Die Partikelgrößenverteilung (PGV), sowie der Siebfehler bei der Herstellung des neuen HPX80-Abrasivs wurden bei der Charakterisierung in Kapitel 4.1 ermittelt. Der entscheidende Parameter für die PGV bei der Abrasivherstellung, sowie bei der Aufbereitung, ist die Siebmaschenweite bei der Siebung. Um den Einfluss der Maschenweite auf die Abrasivaufbereitung und die PGV des aufbereiteten Abrasivs zu untersuchen, wurden mit der Separationsanlage Siebversuche mit verschiedenen Maschenweiten durchgeführt. Für die Separationsversuche wurde die Siebkomponente ohne Magnetseparation eingesetzt. Aus der Charge 1.4307 wurden Proben von 750 g für die einzelnen Versuche verwendet. Es wurden Siebungen mit Maschenweiten von 150 μm , 180 μm , 200 μm , 224 μm und 250 μm mit mindestens einer Wiederholung durchgeführt und sowohl Grobgut als auch Feingut untersucht. Vom Grobgut der Siebungen wurden im Anschluss Partikelgrößenverteilungen mittels Siebanalyse erstellt. Die Ergebnisse sind als massenbezogene Summenverteilungen in Abbildung 4.8 gezeigt. Die Punkte geben die Mittelwerte der summierten Massenfaktionen an, deren Standardabweichung als Fehlerbalken abgebildet ist.

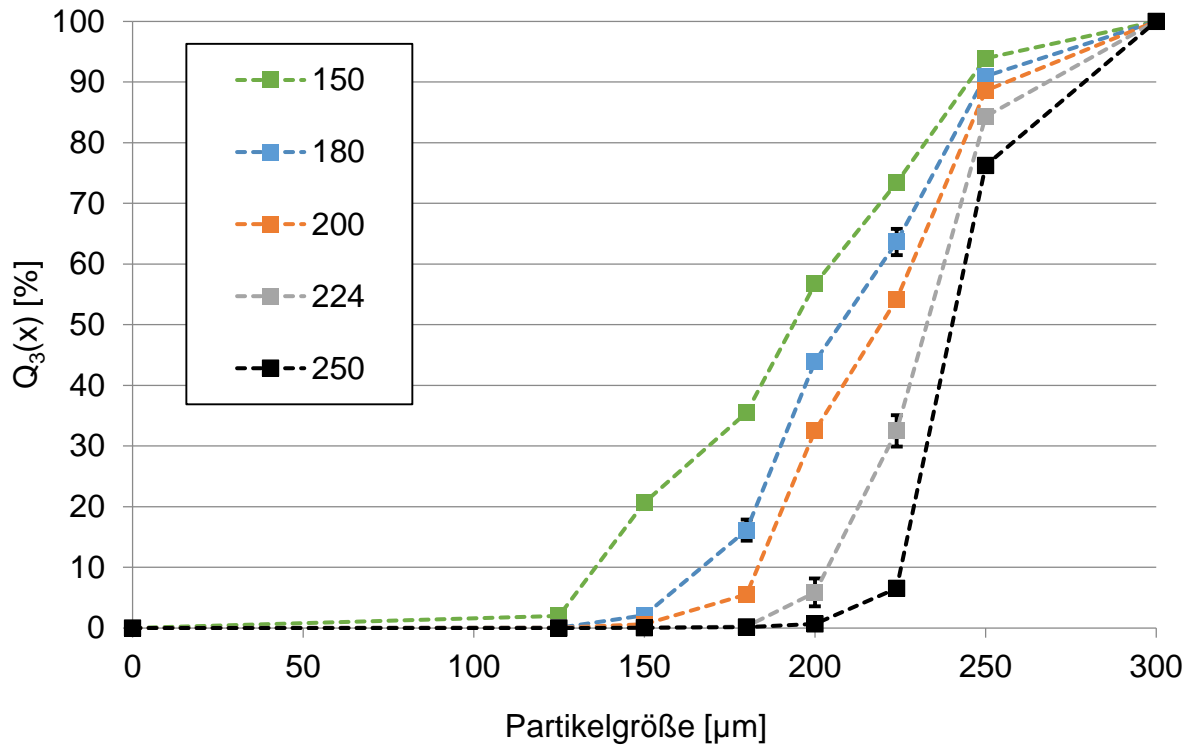


Abbildung 4.8: PGV des Grobguts von Separationsversuchen mit fünf verschiedenen Maschenweiten

Die PGV des Grobguts der Siebung mit 150 µm Maschenweite (grüne Kurve) beginnt am weitesten links im Bereich der kleinen Partikel und besitzt die breiteste Verteilung. Mit größerer Maschenweite verschieben sich die Größenverteilungen des Grobguts weiter nach rechts und werden schmäler. Die PGV des Grobguts der größten verwendeten Maschenweite (schwarze Kurve, 250 µm Maschenweite) liegt am weitesten rechts und zeigt die engste Größenverteilung.

Die Größenverteilung des Grobguts zeigt eine Abhängigkeit zur Maschenweite, bei der die Verteilungskurven bei größeren Maschenweiten weiter rechts, im Bereich der größeren Partikel liegen. Größere Maschenweiten führen zudem zu einer engeren Größenverteilung. Die prozentuale Schwankung der Massenfraktionen bei der Wiederholung der Versuche betrug maximal 3 % und befindet sich überwiegend im Bereich des Grenzkorns.

Die Größenverteilungen in Abbildung 4.8 zeigen eine hohe Trennschärfe der Siebung mit einem geringen Anteil an Fehlunterkorn. Da der Anteil dieses nicht vollständig abgetrennten Feinguts ein wichtiges Kriterium des wiederverwendbaren Abrasivs ist, wird der Zusammenhang zwischen Maschenweite und Fehlunterkorn genauer untersucht. In Abbildung 4.9 ist der Anteil des Fehlunterkorns an der Gesamtmasse

des Grobguts bei der Siebung mit verschiedenen Maschenweiten dargestellt. Das Fehlunterkorn ist als der Massenanteil des nicht vollständig abgetrennten Feinguts bezogen auf die jeweilige Maschenweite der Siebung definiert (siehe Definition und Erklärung in Kapitel 2.2).

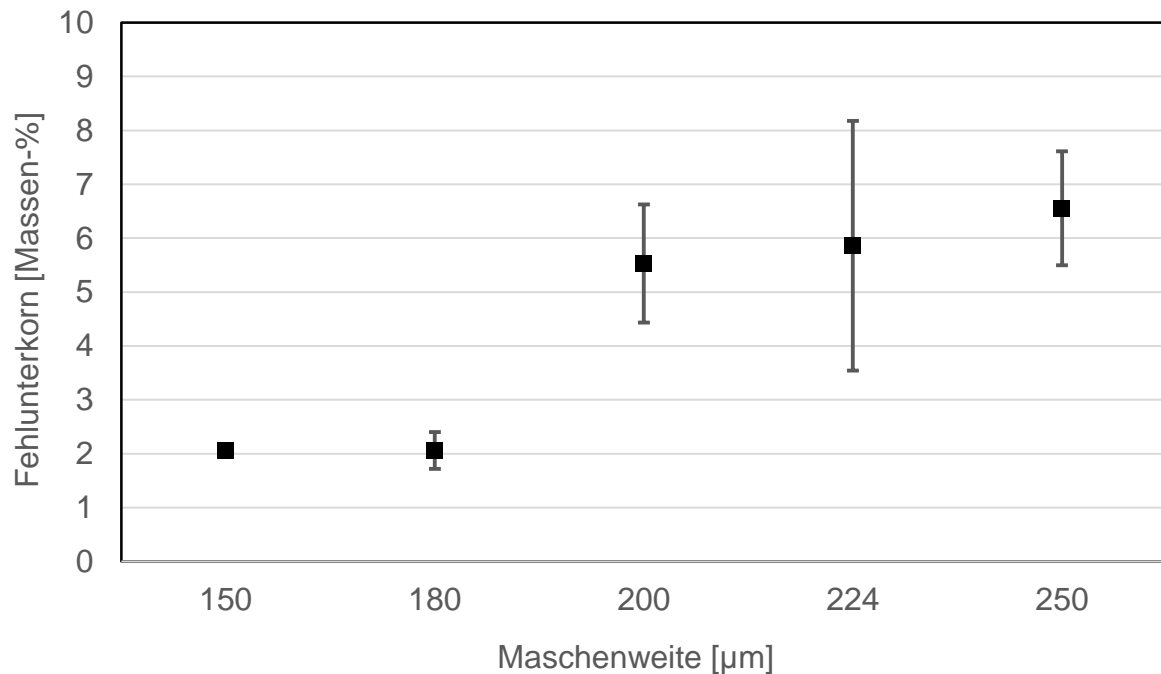


Abbildung 4.9: Anteil des Fehlunterkorns in Abhängigkeit der Maschenweite

Der Anteil des Fehlunterkorns im Grobgut ist bei allen Maschenweiten unter 9 Massen-%. Wie auch in Abbildung 4.10 erkennbar ist, stammt der überwiegende Anteil des Fehlunterkorn aus der nächstkleineren Fraktion der Siebung. Als Beispiel stammt das Fehlunterkorn bei der Siebung mit 200 μm zu etwa 90 % aus der Größensfraktion 180 $\mu\text{m} > x > 200 \mu\text{m}$. Es handelt sich damit überwiegend um sogenannte Grenzkörner, also Partikel im Größenbereich der Maschenweite, mit einer geringen Durchtrittswahrscheinlichkeit bei der Siebung.

In Abbildung 4.10 wird eine Auswahl an Partikelgrößenverteilungen des mit unterschiedlichen Maschenweiten gesiebten, wiederverwendbaren Abrasivs mit neuem HPX80-Abrasiv verglichen.

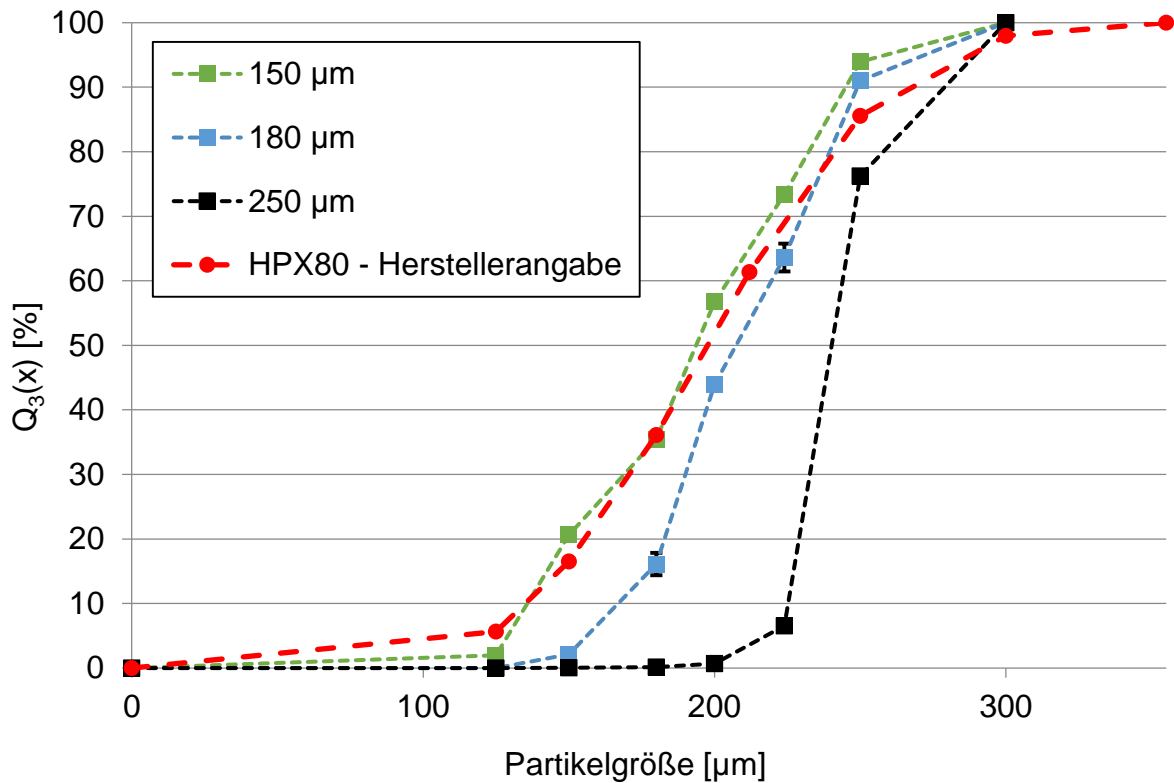


Abbildung 4.10: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von neuem HPX80 Abrasiv mit wiederverwendbarem Abrasiv

Im Vergleich ist erkennbar, dass das neue HPX80-Abrasiv eine breitere Verteilung besitzt als das wiederverwendbare Abrasiv, welches mit den Maschenweiten über 180 µm hergestellt wurde. Bei dem mit 150 µm und 180 µm gesiebten wiederverwendbaren Abrasiv ist erkennbar, dass der Anteil der großen Partikel geringer ist als beim neuen Abrasiv. An den Summenverteilung der 150 µm und 180 µm Siebungen ist ablesbar, dass etwa 93 % und etwa 91 % der Partikel kleiner als 250 µm sind. Beim neuen Abrasiv ist vergleichsweise nur etwa 86 % der Partikel kleiner als 250 µm. Der Grund hierfür ist die Zerkleinerung der größten Partikel beim Schneidvorgang. Die PGV des mit 150 µm gesiebten wiederverwendbaren Abrasivs entspricht der Herstellerangabe des neuen Abrasivs. Der Feinanteil beider Verteilungen ist ähnlich. Der Vergleich in Abbildung 4.10 zeigt, dass bei der Aufbereitung ein Zusammenhang zwischen der Maschenweite und dem Feinanteil, Verteilungsbreite und Größenverteilung des aufbereiteten Abrasivs besteht. In Abbildung 6.2 (Anhang, Kapitel 6.2.2) ist ein vollständiger Vergleich der PGV der wiederverwendbaren Abrasive von allen untersuchten Maschenweiten und dem neuen Abrasiv gezeigt. Bei allen getesteten Maschenweiten ist der Feinanteil ähnlich oder kleiner dem von neuem Abrasiv, so dass

bei der Wiederverwendung in der WASS-Anlage keine Zumischung von neuem Abrasiv notwendig ist, um die Partikelgrößenverteilung anzupassen.

4.4 Wiederverwendungsanteil

Bei der Planung eines WAS-Schnitts mit Abrasivaufbereitung und Wiederverwendung muss für die Bestimmung der Abfallmenge der Wiederverwendungsanteil berücksichtigt werden. Der Wiederverwendungsanteil beschreibt, wie viel des Abrasivabfalls nach der Aufbereitung als wiederverwendbares Abrasiv in der WASS-Anlage eingesetzt werden kann. Mathematisch wird der Wiederverwendungsanteil definiert als:

$$\text{Wiederverwendungsanteil} = \frac{\text{Masse}_{\text{wiederverwendbares Abrasiv}}}{\text{Masse}_{\text{Abrasivabfall}}} \times 100 \% \quad (4.1)$$

Bereits in Kapitel 4.3 wurde der Zusammenhang zwischen der Maschenweite bei der Abrasivaufbereitung und der PGV des wiederverwendbaren Abrasivs festgestellt. Die Maschenweite der Siebung ist daher der wichtigste Faktor beim Wiederverwendungsanteil.

In Kapitel 4.4 wurden Separationsversuche mit verschiedenen Maschenweiten durchgeführt. Aus den Massenbilanzen der Siebfraktionen kann nach Formel 4.1 der Wiederverwendungsanteil der einzelnen Versuche bestimmt werden. In Abbildung 4.11 sind die Wiederverwendungsanteile bei verschiedenen Maschenweiten dargestellt.

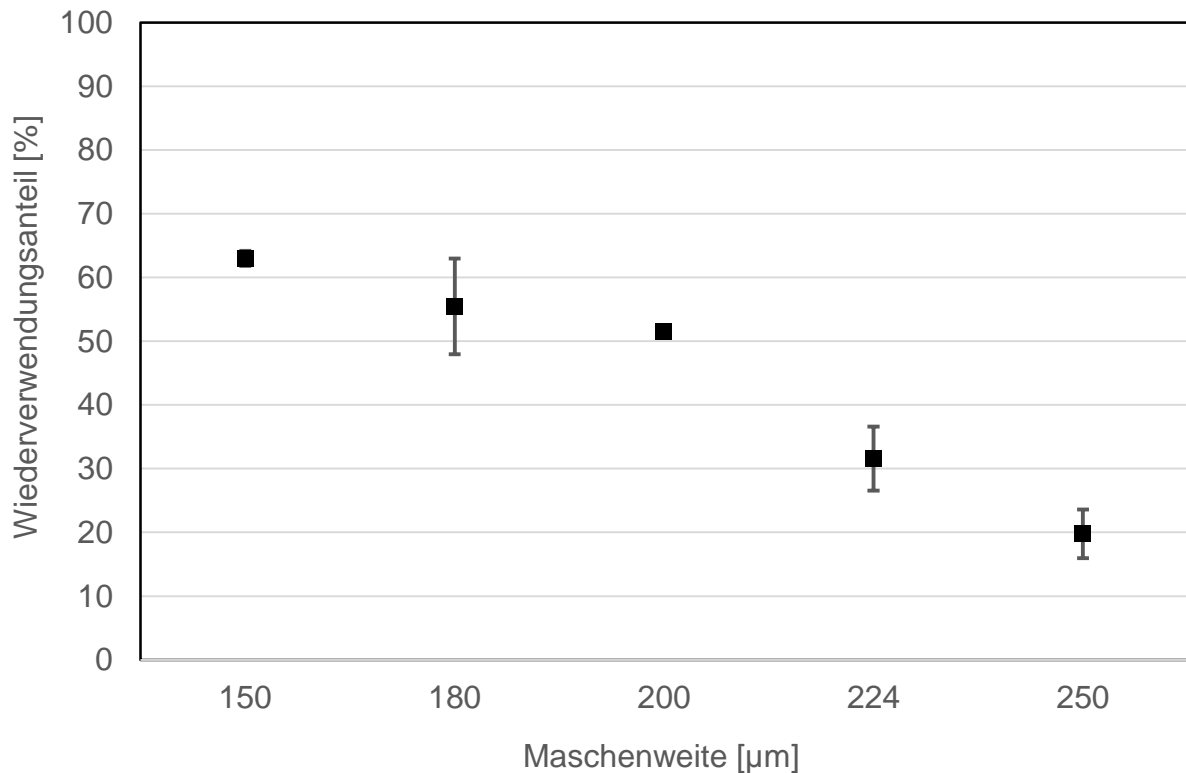


Abbildung 4.11: Wiederverwendungsanteile bei Separationsversuchen mit unterschiedlichen Maschenweiten

Wie zu erwarten, sinkt der Wiederverwendungsanteil mit größerer Maschenweite, da bei der Siebung der Anteil des Grobguts geringer wird. Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, können aufgrund der Entmischungseffekte keine homogenen Einzelproben aus dem Probengemisch entnommen werden. Für eine allgemeine Aussage über den Wiederverwendungsanteil wird die Massenbilanz der Charakterisierung des Probenmaterials der Charge 1.4550 aus Kapitel 4.1 verwendet. Bei dieser Massenbilanz wurde das vollständige Probenmaterial eines Schnitts verwendet, um dadurch die Problematik der Homogenisierung der Proben zu umgehen. Abbildung 4.12 zeigt die Partikelgrößenverteilung des Probenmaterials eines WAS-Schnitts. In der Darstellung als Summenverteilung ist erkennbar, dass die Massenfraktion der Partikel kleiner $125 \mu\text{m}$, welche aus Abrasivbruchstücken, Absplittierungen und Stahlpartikeln besteht, einen Anteil von 26,3 % der Gesamtmasse ausmacht. Der Anteil an der Gesamtmasse kann für jede weitere Massenfraktion kleiner als die betrachtete Partikelgröße an der y-Achse links abgelesen werden. Der sich daraus ergebende Wiederverwendungsanteil für die untersuchten Maschenweiten ist in Abbildung 4.12 als Säulendiagramm dargestellt.

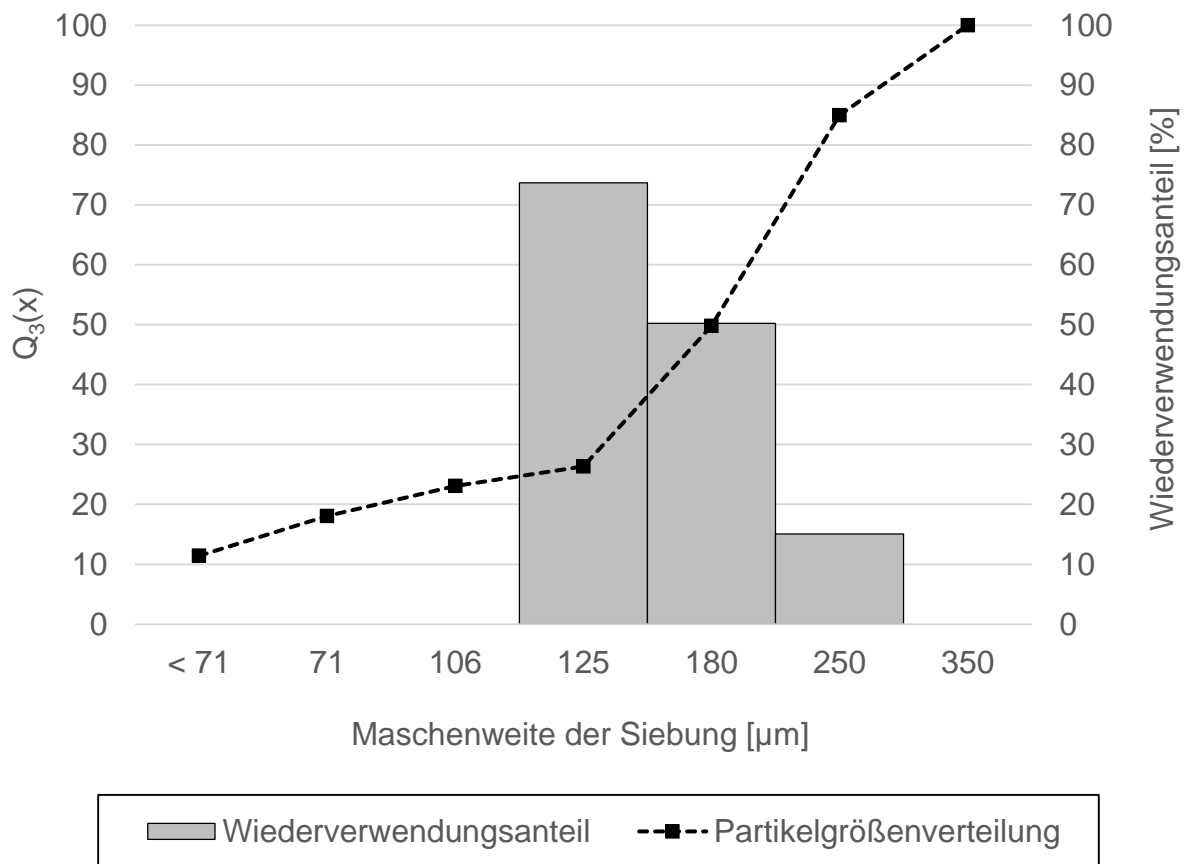


Abbildung 4.12: Wiederverwendungsanteil in Abhängigkeit der Maschenweite der Siebung

Im Säulendiagramm sind die Wiederverwendungsanteile der relevanten Maschenweiten, beginnend ab einer Größe von 125 μm , aufgetragen und auf der rechten Seite ablesbar. Nach der Massenbilanz der Einzelproben sinkt der Wiederverwendungsanteil mit steigender Maschenweite. In Kapitel 4.2 wurde bei der Untersuchung von wiederverwendbarem Abrasiv, das mit verschiedenen Maschenweiten hergestellt wurde, festgestellt, dass eine Siebung mit 150 μm bis 180 μm Maschenweite eine Partikelgrößenverteilung ergibt, das der des neuen Abrasivs entspricht. Eine Siebung mit einer Maschenweite von über 180 μm verringert den Wiederverwendungsanteil, aber verbessert nicht die Qualität des wiederverwendbaren Abrasivs bezüglich Feingutanteil, Verwendbarkeit und Schnitteigenschaften.

Ein weiterer Faktor, der den Wiederverwendungsanteil beeinflusst, ist der Siebfehler des Fehlüberkorns, welcher in Kapitel 2.2 beschrieben wurde. Es handelt sich dabei um Partikel, die bei der Siebung ins Feingut gelangen, obwohl sie größer als die Maschenweite sind. Grund hierfür können Beschädigungen am Sieb sein oder

Grobgut, welches über den Siebrahmen gespült wird. Um bei den Separationsversuchen den Einfluss des Fehlüberkorns auf den Wiederverwendungsanteil zu bestimmen, wurde das Feingut der Siebungen bei verschiedenen Maschenweiten mittels Siebanalyse untersucht. In Abbildung 4.13 ist der Anteil des Fehlüberkorns an der Gesamtmasse der Proben über der Maschenweite aufgetragen.

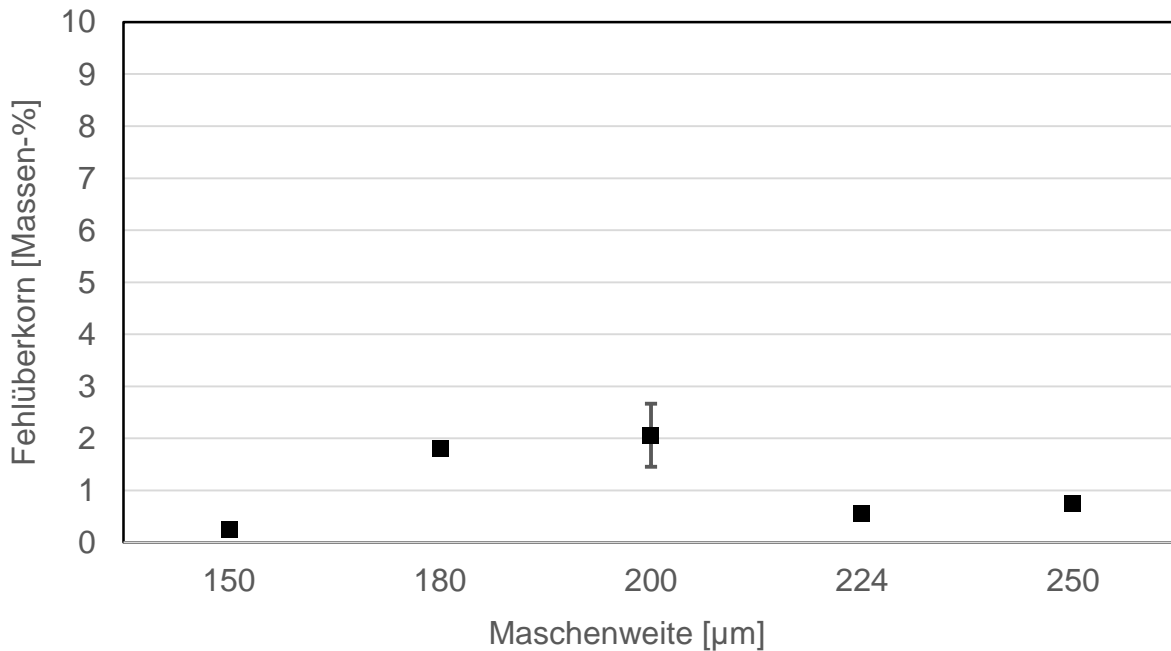


Abbildung 4.13: Anteil des Fehlüberkorns an der Gesamtmasse bei verschiedenen Maschenweiten

Der Anteil des Fehlüberkorns beträgt zwischen 0,5 % bis 2,5 % der Gesamtprobenmasse. Um diesen Anteil sinkt der Wiederverwendungsanteil durch den Verlust von Grobgut. Da es sich um einen systematischen Fehler bei der Siebung handelt, besteht kein Zusammenhang zur Maschenweite. Durch eine zu starke Siebgutbewegung durch den Unwuchtvibrator und einen zu hohen Wasserstand im Siebgehäuse kann bei den Separationsversuchen Grobgut über den Siebrahmen gespült werden. Dies kann durch konstruktive Änderungen an der Siebkomponente verbessert werden. Der Anteil des Fehlunterkorns senkt zwar den Wiederverwendungsanteil, beeinflusst jedoch nicht die Qualität oder Einsetzbarkeit des wiederverwendbaren Abrasivs.

4.5 Stahlkonzentration

Die Stahlkonzentration im aufbereiteten Abrasiv und in der zu entsorgenden Fraktion ist für den Einsatz im kerntechnischen Bereich eine wichtige Information, da es sich um aktivierten Stahl handelt. Bereits bei der Planung des Schnittes und der Beladung

der Lagerbehälter muss die Stahlkonzentration und Radioaktivität der Stoffströme und des zu entsorgenden Abfalls berechnet werden. Abhängig von der Aktivität der geschnittenen Stahlkomponente gibt die Stahlkonzentration einen Hinweis auf die Aktivität des aufbereiteten Abrasivs. Da bei der Abrasivaufbereitung die Stahlkonzentration durch die Größenklassierung und Magnetfiltration beeinflusst wird, werden bei den folgenden Untersuchungen die Siebkomponente und der Magnetfilter der Separationsanlage im Verbund eingesetzt.

In den vorherigen Kapiteln wurde der Einfluss der Maschenweite auf die PGV des wiederverwendbaren Abrasivs, den Siebfehler und die Stahlkonzentration untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Stahlkonzentration mit größerer Maschenweite sinkt und sich der Hauptanteil des Stahls in den Fraktionen kleiner 106 µm befindet.

Im zweiten Schritt der Abrasivaufbereitung wird das Grobgut mit einem Magnetfilter behandelt, um die Stahlkonzentration im Filtrat zu senken. Im Magnetfeld des Filters werden Stahlpartikel im Gemisch, sowie magnetische Anteile des Abrasivs abgeschieden. Die Effektivität der Abscheidung im Magnetfilter hängt von der magnetischen Permeabilität und der Größe der Stahlpartikel ab. Je größer die Stahlpartikel sind, desto besser werden sie im Filter abgeschieden. Bei den Separationsversuchen mit Sieb und Magnetfilter wurden die Probengemische der Stahlsorten 1.4307 und 1.4571 verglichen.

Beim Einsatz des Magnetfilters ist zu beobachten, dass neben Stahlpartikeln auch Abrasiv an den Hüllrohren zurückgehalten wird. Bei langsamer Fließgeschwindigkeit und ohne Einsatz von Luftblasen befinden sich überwiegend rote Abrasivpartikel auf der Oberseite der Hüllrohre. Bei hoher Fließgeschwindigkeit und der Umspülung der Hüllrohre mit Luftblasen, wird der Großteil des Abrasivs abgespült, so dass dunkle Partikel auf den Hüllrohren zu beobachten sind.



Abbildung 4.14: Hüllrohre mit Abrasivpartikeln (links) und mit Einsatz von Druckluftumspülung (rechts)

Abrasivpartikel, welche nur schwache magnetische Eigenschaften aufweisen, werden durch die Luftblasen entfernt. In Abbildung 4.14 rechts ist erkennbar, dass überwiegend dunkle bzw. schwarze Partikel an den Hüllrohren haften. Neben dem Hauptbestandteil Almandin besteht das Abrasiv unter anderem aus den Mineralien Pyrop, Hornblende und Magnetit. Almandin und Pyrop haben eine dunkelrote Färbung, Hornblende dunkelgrau bis grünlich-schwarz und Magnetit dunkelgrau bis schwarz. Aufgrund der Farbe der abgeschiedenen Abrasivpartikel und der magnetischen Eigenschaften handelt es sich wahrscheinlich um Magnetit. In vorhergehenden Arbeiten [35] wurden bei Untersuchungen der einzelnen Abrasivbestandteile die abgeschiedenen Partikel dem Magnetit zugeordnet. Ähnlich wie der Siebfehler des Fehlüberkorns senkt das im Magnetfilter abgetrennte Abrasiv den Wiederverwendungsanteil. Daher wurde bei den Versuchen durch die Druckluftumspülung der Hüllrohre das schwach angezogene Abrasiv entfernt. Die maximale Beladung des Magnetfilters ohne Druckluftumspülung war aufgrund der Strömungsverhältnisse und Materialzusammensetzung in der Suspension unregelmäßig. Die maximale Beladung des Magnetfilters von etwa 50 g - 70 g konnte mit der Druckluftumspülung auf etwa 20 g - 30 g reduziert werden.

Bei der Charakterisierung der Charge 1.4550 in Kapitel 4.1 wurde der Zusammenhang zwischen Partikelgrößenfraktion und Stahlkonzentration festgestellt.

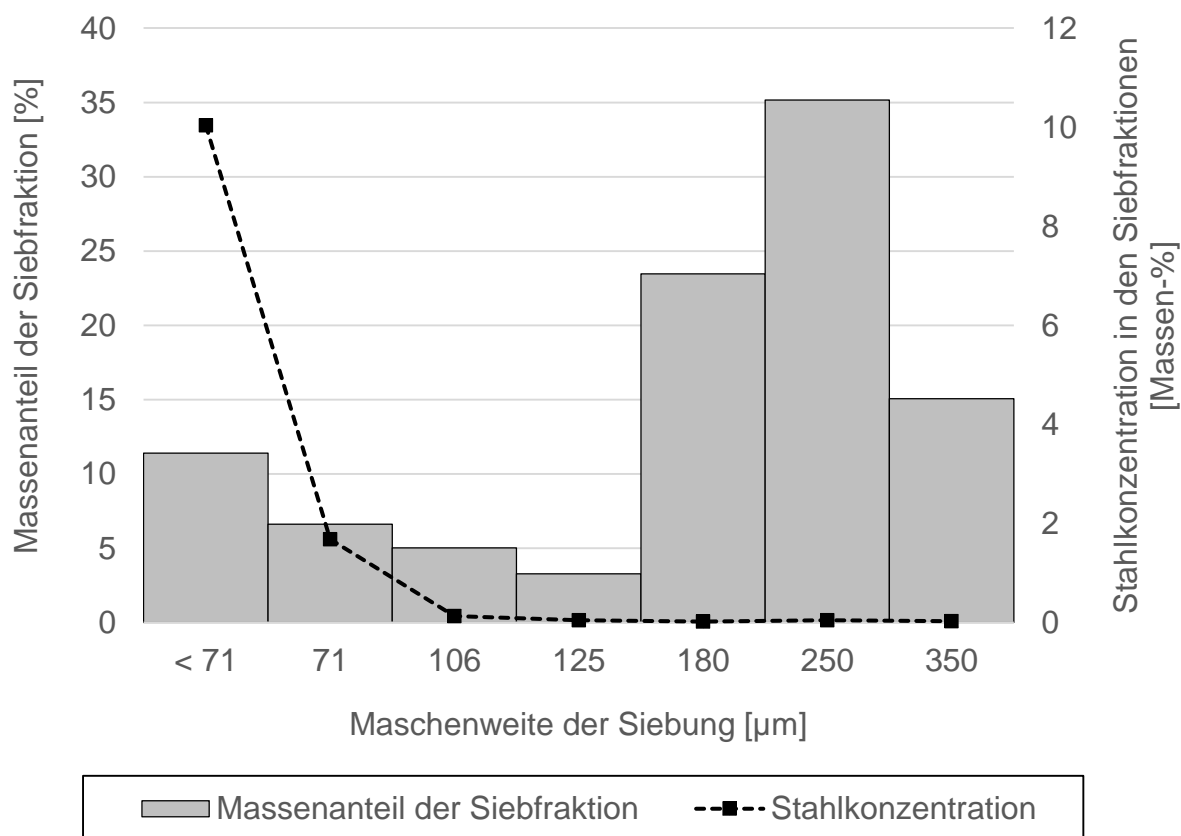


Abbildung 4.15: Zusammenhang zwischen Partikelgrößenfraktion und Stahlkonzentration nach der Siebung

In Abbildung 4.15 ist erkennbar, dass die Stahlkonzentration bis zu einer Maschenweite von $106 \mu\text{m}$ stark abfällt. Bei den Fraktionen über $125 \mu\text{m}$ beträgt die Stahlkonzentration weniger als $0,05 \%$. Ein hoher Anteil des Fehlunterkorns in diesen Fraktionen würde die Stahlkonzentration erhöhen, was jedoch in Kapitel 4.3 nicht festgestellt wurde. Der Anteil des Fehlunterkorns sinkt mit kleinerer Maschenweite. Zudem besteht das Fehlunterkorn überwiegend aus Grenzkörnern mit ähnlicher Größe der Maschenweite und nicht aus Feingut kleiner $71 \mu\text{m}$, welches die höchste Stahlkonzentration besitzt.

Um parallel den Einfluss der Maschenweite bei der Siebung und der Stahlsorte bei der Magnetseparation auf die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv zu untersuchen, wurden Separationsversuche mit Siebung und anschließender Magnetseparation durchgeführt. Mittels quantitativer chemischer Analyse wurde die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv festgestellt. Für die Versuche wurden aus den Chargen des Probenmaterials mit dem Stahl 1.4307 und 1.4573 Einzelproben von jeweils 750 g entnommen und in der Separationsanlage bei

verschiedenen Maschenweiten gesiebt und mit dem Magnetfilter behandelt. Die Stahlkonzentration im Probengemisch der Einzelproben vor der Separation wurde aufgrund der inhomogenen Proben, der Entmischung und den daraus folgenden ungenauen Messwerten nicht ermittelt. Die durchschnittliche Stahlkonzentration der gesamten Charge ist durch die Masse des Stahls (Schnittfugenmaterial des Edelstahl) und die Gesamtmasse der Charge bekannt. Zum Vergleich der Separationsergebnisse wurde daher die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs gewählt. Dieser Wert ist mittels chemischer Analyse genauer und sicherer zu ermitteln als die Stahlkonzentration des Ausgangsmaterials und ist zudem die relevante Größe bei der Bewertung des wiederverwendbaren Abrasivs.

Die Siebung wurde mit den Maschenweiten 150 μm , 200 μm und 250 μm durchgeführt und das Grobgut anschließend bei gleichen Betriebsparametern im Magnetfilter behandelt. In Abbildung 4.16 ist die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs bei der Siebung mit verschiedenen Maschenweiten dargestellt.

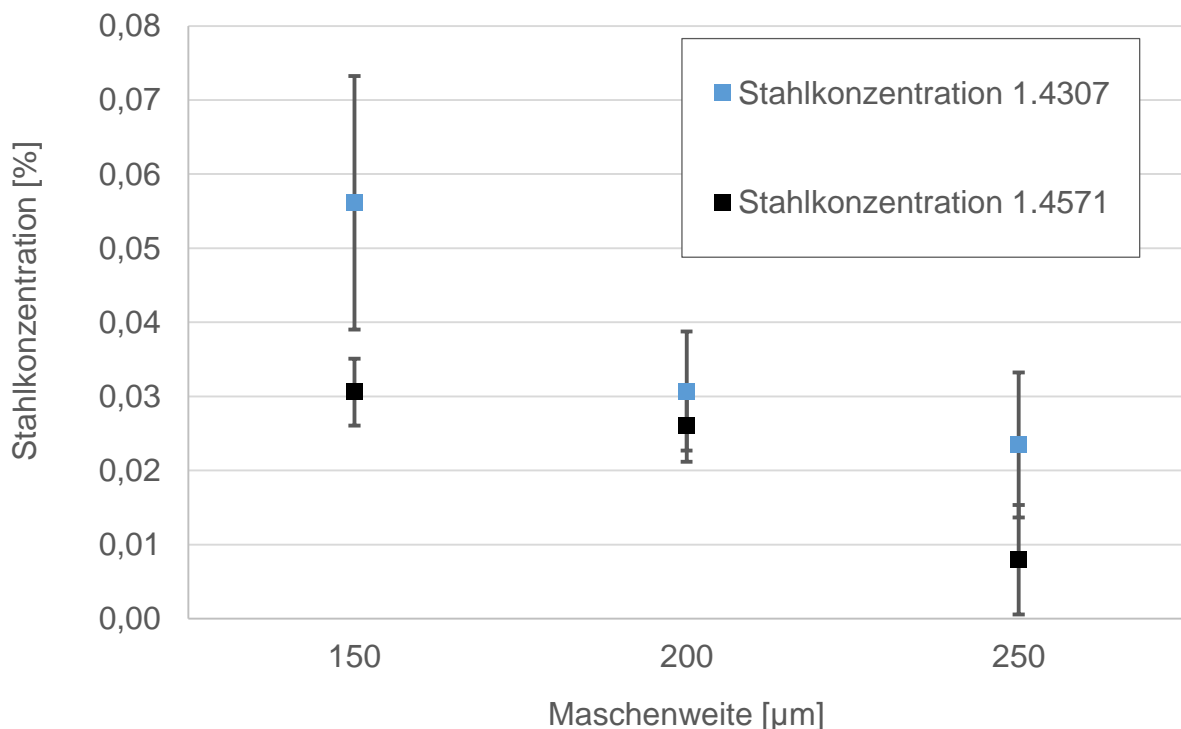


Abbildung 4.16: Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv in Abhängigkeit der Maschenweite der Siebung und Stahlsorte des Probenmaterials

Für die beiden Stahlsorten 1.4307 und 1.4571 sind die Stahlkonzentrationen des mit Sieb und Magnetfilter behandelten Abrasivs für die Maschenweiten 150 μm , 200 μm und 250 μm aufgetragen. Mit beiden Stahlsorten ist ein Zusammenhang zwischen

Maschenweite und Stahlkonzentration erkennbar. Die Charakterisierung des Probenmaterials in Kapitel 4.1 hat gezeigt, dass die Stahlpartikel tendenziell kleiner sind als die Abrasivpartikel. Im Grobgut verbleibender Stahl ist daher entweder auf das Fehlunterkorn zurückzuführen oder auf große Stahlpartikel, die mittels Siebung nicht abgetrennt werden können. Je größer die Stahlpartikel sind, desto besser werden sie vom Magnetfilter abgeschieden. Eine größere Maschenweite bei der Siebung führt daher zu einer kleineren Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv. Auffallend ist, dass die Proben mit 1.4307 eine höhere Stahlkonzentration aufweisen als die Proben mit 1.4571. Die magnetischen Eigenschaften der Proben mit 1.4307 ermöglichen eine bessere Abscheidung mit dem Magnetfilter, was zu einer geringeren Konzentration im wiederverwendbaren Abrasiv führen sollte. Für einen genaueren Vergleich werden die Stahlkonzentrationen der Chargen und der wiederverwendbaren Abrasive betrachtet. In Tabelle 4.2 ist für beide Stahlsorten die Stahlkonzentration in der Charge vor der Separation und die Stahlkonzentration nach der Separation für jede untersuchte Maschenweite eingetragen.

Tabelle 4.2: Stahlkonzentrationen des wiederverwendbaren Abrasivs bei verschiedenen Maschenweiten und Stahlsorten

Maschenweite [μm]	1.4307			1.4571		
	Stahlkonz. in Charge vor Separation [Massen-%]	Stahlkonz. nach Separation [Massen-%]	Ab- scheide- grad [%]	Stahlkonz. in Charge vor Separation [Massen-%]	Stahlkonz. nach Separation [Massen-%]	Ab- scheide- grad [%]
150	1,8	0,056±0,017	97	1,15	0,031±0,005	97
200	1,8	0,031±0,008	98	1,15	0,026±0,005	98
250	1,8	0,023±0,01	99	1,15	0,008±0,007	99

Anhand der massenbezogenen Stahlkonzentrationen vor und nach Siebung und Magnetseparation wird zudem der Abscheidegrad nach folgender Formel definiert:

$$\text{Abscheidegrad } \eta = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \times 100 \% \quad (4.2)$$

Mit c_0 ist die Stahlkonzentration des Probenmaterials vor der Separation bezeichnet und mit c_1 die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs.

Die nach Gleichung (4.2) bestimmten Abscheidegrade sind mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet, bedingt durch die erwähnte Inhomogenität der Stahlverteilung in Proben aus den für die Experimente verwendeten Chargen (Kapitel 3.2.3). Dennoch ist zu erkennen, dass der Abscheidegrad für die Charge 1.4307 möglicherweise leicht niedriger liegt als für die Charge 1.4571. Dies, obwohl der Stahl 1.4307 bessere magnetische Eigenschaften aufweist. Ein möglicher Grund hierfür kann die maximale Beladung des Magnetfilters sein. Die durchschnittliche Stahlkonzentration ist in der Charge 1.4307 höher, was zu einer höheren Beladung des Magnetfilters führt. Bei der Separation wurde jeweils eine Reinigung des Magnetfilters durchgeführt, was bei einer zu hohen Stahlkonzentration im Abrasiv-Stahlgemisch zu einer Überladung des Magnetfilters und somit einer schlechteren Stahlabscheidung führen kann. Um den Einfluss des Magnetfilters auf die Stahlabscheidung in der Separationsanlage genauer zu untersuchen, wird in Abbildung 4.17 der Abscheidegrad der Siebung ohne Magnetfiltration (Charge 1.4550) und der Siebung mit anschließender Magnetseparation (Charge 1.4307 und 1.4571) verglichen.

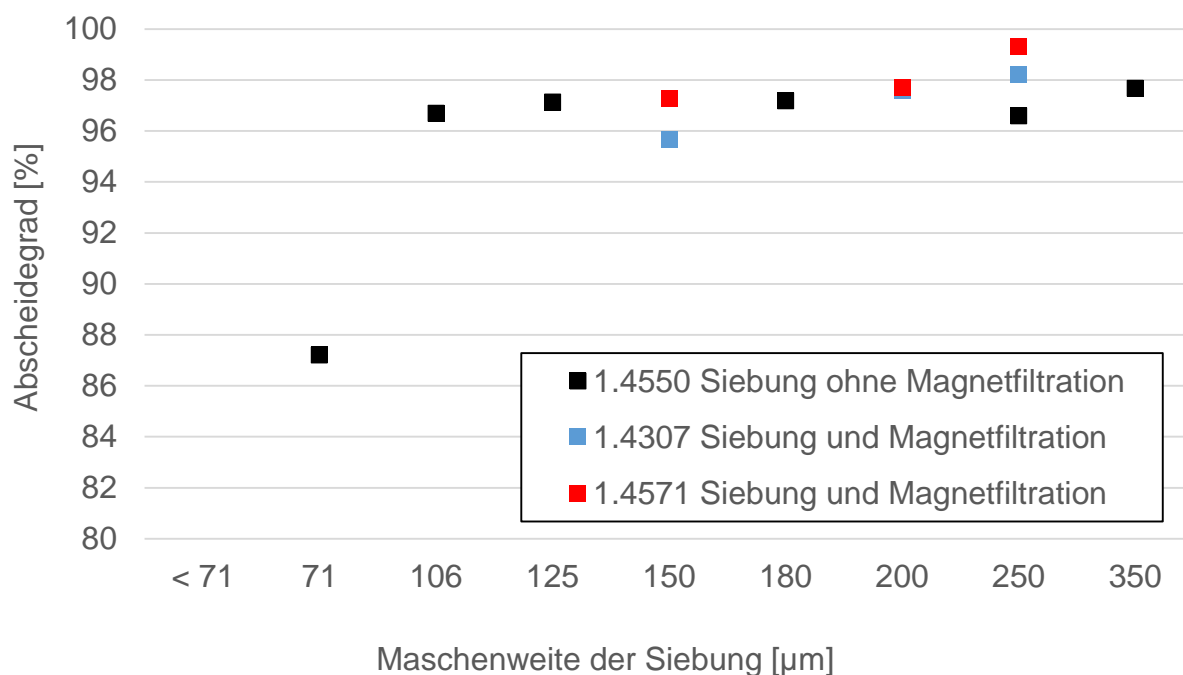


Abbildung 4.17: Abscheidegrad des Stahls: Siebung ohne Magnetfiltration und Siebung mit anschließender Magnetseparation in Abhängigkeit der Siebmaschenweite

Der Abscheidegrad bei der Siebung ohne Magnetfiltration (schwarze Symbole) steigt bis zur Siebung mit 106 µm stark an auf über 96 % und befindet sich bei allen getesteten Maschenweiten über 106 µm bei etwa 97 %. Der Abscheidegrad bei der

Siebung mit 71 μm Maschenweite ohne Magnetfiltration beträgt nur ca. 87 %, da Stahlpartikel größer 71 μm nicht abgetrennt werden können und im Grobgut bleiben. Erst ab einer Maschenweite von über 106 μm bleibt der Abscheidegrad konstant bei über 96 %.

Aus Abbildung 4.17 ist ein Trend erkennbar, dass der Abscheidegrad generell mit zunehmender Maschenweite der Siebung ansteigt. Aus den Ergebnissen der Experimente mit einer Siebmaschenweite bei 250 μm lässt sich eine leicht erhöhte Abscheidung bei Zuschaltung der Magnetabscheidung zusätzlich zur Siebung erkennen. Es ist allerdings zu beachten, dass, wie oben bereits diskutiert, die Unsicherheitsbereiche für die bestimmten Abscheidegrade relativ groß sind. Ein weiterer Grund, dass der Einfluss des Magnetfilters erst bei größeren Maschenweiten erkennbar wird, kann neben der Beladung des Magnetfilters auch die verbesserte Abscheidung großer Stahlpartikel sein. Wie in Kapitel 3.1.3.2 beschrieben, sind die Magnetfilter in der Lage, Partikel ab ca. 30 μm abzuscheiden, die Anziehung steigt jedoch mit der Partikelgröße. Eine wichtige Funktion des Magnetfilters ist es, große längliche Stahlpartikel, welche bei der Siebung aufgrund ihrer Form die Maschen passieren können, abzutrennen. Bei schneller Durchflussgeschwindigkeit im Filtergehäuse, sowie einer hohen Beladung der Hüllrohre, wird die Abscheidung kleiner Stahlpartikel erschwert. Daher führt eine hohe Trennschärfe bei der Siebung und ein geringer Anteil an Fehlunterkorn im Gesamtprozess zu einer niedrigen Stahlkonzentration.

4.6 Modellrechnung zur Sekundärabfallreduzierung durch Abrasivwiederverwendung

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Nasssiebung und Magnetseparation haben den Zusammenhang von Maschenweite und Stahlsorte auf die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv, sowie den Einfluss der Maschenweite der Siebung auf den Wiederverwendungsanteil bei der Abrasivaufbereitung gezeigt. Bei den Experimenten konnten keine weiteren Schnittversuche mit wiederverwendbarem Abrasiv durchgeführt werden und somit auch keine Ergebnisse zur mehrmaligen Aufbereitung gewonnen werden. Es wurde daher nur der erste Durchgang der Abrasivaufbereitung betrachtet. In der Praxis durchläuft das Abrasiv mehrere Durchgänge des Kreislaufs der Aufbereitung, bis durch die Partikelzerkleinerung kein weiterer Schnitt mehr möglich ist. Untersuchungen zur Partikelzerkleinerung und den

Wiederverwendungsanteilen bei wiederholter Abrasivaufbereitung von Granatsand-abrasiven sind in der Literatur zu finden [14], [18], [21].

Das Ziel des Modells ist es, für ein Schnittszenario eine Modellierung über die zu erwartende Abfallmenge und die Zusammensetzung bezüglich der Stahlkonzentration des Abrasivabfalls zu treffen. Die Grundlage für dieses Modell sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen für den ersten Durchgang der Wiederverwendung und Wiederverwendungsanteile aus der Literatur für die Partikelzerkleinerung und mehrfache Abrasivaufbereitung [21].

Ausgangssituation und Annahmen

Für die Abschätzung der Sekundärabfallreduzierung beim Einsatz der Abrasivwiederverwendung wird beispielhaft eine Ausgangssituation betrachtet, bei der mit einer WASS-Anlage ein RDB samt Einbauten zerlegt wird. Hierbei wird ohne Abrasivwiederverwendung 100 t neues Abrasiv verwendet. Der Sekundärabfall, welcher durch das verbrauchte Abrasiv verursacht wird, beträgt in diesem Beispiel 101,5 t und setzt sich aus 100 t Abrasivabfall, sowie 1,5 t Stahlpartikeln (Schnittfugenmaterial) zusammen. Daraus ergibt sich rechnerisch für die Gesamtmasse des zu entsorgenden Abrasivabfalls eine massenbezogene Stahlkonzentration von 1,48 %. In der Ausgangssituation bestehen die zu zerlegenden Stahlkomponenten aus den Edelstahlorten 1.4307 und 1.4550, welche vergleichbare magnetische Eigenschaften besitzen.

Es werden drei Szenarien verglichen, welche die Abfallmengen bei einer Abrasivaufbereitung mit 150 µm, bzw. 200 µm Maschenweite und beim WAS-Schnitt ohne Abrasivwiederverwendung betrachten.

Es werden insgesamt vier Wiederverwendungen des Abrasivs geplant, bevor der Abrasivabfall entsorgt wird. Der Wiederverwendungsanteil der ersten Wiederverwendung wurde bei einer Aufbereitung mit einem 150 µm Sieb mit 63 % und mit einem 200 µm Sieb mit 51 % experimentell bestimmt. Für die Wiederverwendungsanteile der zweiten bis vierten Wiederverwendung liegen Literaturwerte für Granatsandabrasive vor [18], [21]. Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilungen der Abrasive wird eine gleiche Zerkleinerungsrate der Abrasivpartikel beim WAS-Schnitt angenommen [1], [58].

Grundlage der Rechnung sind die Wiederverwendungsanteile der Trennversuche mit der Separationsanlage, die mittels Siebanalyse bestimmt wurden. Die Messgenauigkeit der Siebanalyse wird durch den Siebfehler, Fehler beim Wiegen der Proben und durch am Sieb haftende Partikel, bzw. Klemmkörner beeinflusst. Der größte Einfluss hat hierbei der Siebfehler des Fehlunterkorns, da die Siebdauer, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, begrenzt ist. Durch diesen Siebfehler wird ein größerer Grobgutanteil und folglich ein größerer Wiederverwendungsanteil ermittelt. Das inhomogene Probenmaterial und die Probennahme für die Separationsversuche verursachen die größte Schwankung des experimentell bestimmten Wiederverwendungsanteils.

Wiederverwendungsanteil und Sekundärabfallmenge

Der Wiederverwendungsanteil bei der ersten Wiederverwendung wurde experimentell bestimmt und in Kapitel 4.3 beschrieben. Unter der Annahme der gleichen Zerkleinerungsrate der Abrasivpartikel wird anhand der Änderung des Wiederverwendungsanteils nach der ersten Wiederverwendung der zweite bis vierte Wiederverwendungsanteil bei einer Abrasivaufbereitung mit 150 μm bzw. 200 μm berechnet. Der Wiederverwendungsanteil der ersten Abrasivaufbereitung wird als Basis für eine Extrapolation verwendet, um die Wiederverwendungsanteile der zweiten bis vierten Abrasivaufbereitung zu modellieren. Da die Zerkleinerung des Abrasiv in dieser Arbeit nur für die erste Verwendung des Abrasivs experimentell untersucht wurde, werden für die Modellrechnung Literaturwerte für die zweite bis vierte Abrasivaufbereitung genutzt. In Abbildung 4.18 sind die Wiederverwendungsanteile aus der Literatur, die experimentell bestimmten (150 μm und 200 μm , 1. Wiederverwendung) und die extrapolierten Wiederverwendungsanteile dargestellt.

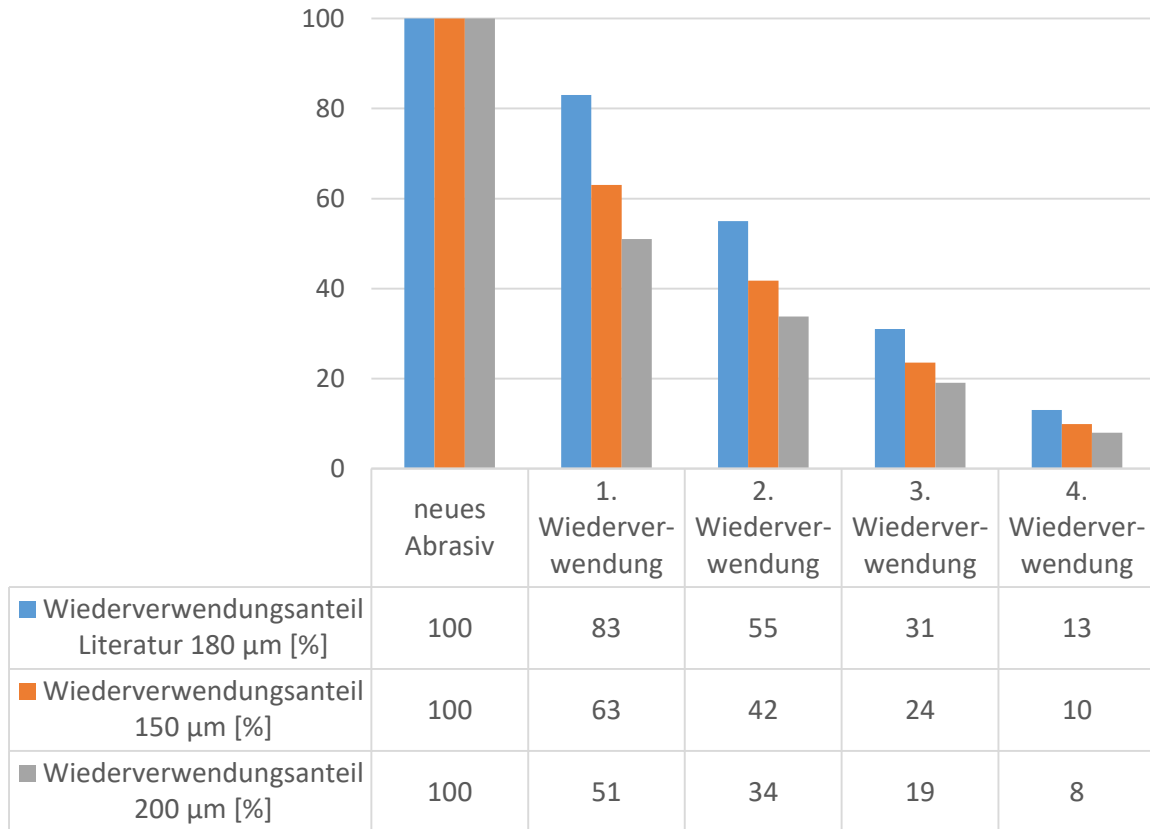


Abbildung 4.18: Wiederverwendungsanteile (Literatur, experimentell bestimmten und extrapoliert) für mehrfache Aufbereitung und Wiederverwendung von Granatsandabradrasiv

Um die Reduzierung des Abrasivabfalls durch die Wiederverwendung zu bewerten, wird berechnet, wie viel Abrasiv bei vier Wiederverwendungszyklen benötigt wird, um den WAS-Schnitt durchzuführen, der ohne Wiederverwendung eine Abrasivmenge von 100 t benötigt. In Formel 4.3 wird der Zusammenhang zwischen den Wiederverwendungsanteilen der einzelnen Wiederverwendungen (w_1 und die extrapolierten Werte w_2' bis w_4') und den benötigten Abrasivmengen ohne Wiederverwendung (m_0) und mit Wiederverwendung (m_w) beschrieben.

$$m_w = \frac{m_0}{1+w_1+w_1*w_2'+w_1*w_2'*w_3'+w_1*w_2'*w_3'*w_4'} \quad (4.3)$$

m_w = Masse des benötigten Abrasivs mit Abrasivwiederverwendung

m_0 = Masse des benötigten Abrasivs ohne Abrasivwiederverwendung

w_1 = experimentell bestimmter Wiederverwendungsanteil für erste Aufbereitung

w_2' bis w_4' = extrapoliertes Wiederverwendungsanteil für zweite bis vierte Aufbereitung

Die Wiederverwendungsanteile w_1 bis w_4' und die nach Formel (4.3) resultierenden Mengen von neuem Abrasiv, um den Schnitt in den jeweiligen Szenarien durchzuführen, sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Wiederverwendungsanteile und Verbrauch von neuem Abrasiv bei Abrasivaufbereitung mit 150 μm und 200 μm Maschenweite

Maschenweite bei Abrasiv- aufbereitung	Wiederverwendungsanteile				Abrasivverbrauch mit Wiederverwendung m_w
	experimentell bestimmt	extrapoliert			
		w_1	w_2'	w_3'	
150 μm	0,63	0,42	0,24	0,10	45 t
200 μm	0,51	0,34	0,19	0,08	53 t

Mit den extrapolierten Wiederverwendungsanteilen lässt sich der Gesamtabrasivverbrauch für einen WAS-Schnitt bei mehrfacher Abrasivaufbereitung für die jeweiligen Maschenweiten berechnen. So reduziert sich z.B. der Abrasivverbrauch bei vier Wiederverwendungszyklen und einer Maschenweite von 150 μm bei der Abrasivaufbereitung rechnerisch von 100 t auf 45 t.

Stahlkonzentration des Abrasivabfalls

In der Ausgangssituation ist die Masse des Schnittfugenmaterials mit 1,5 t festgelegt. Bei der Abrasivaufbereitung wird der Großteil des Schnittfugenmaterials im Feingut der Siebung und am Magnetfilter abgeschieden. Für die beiden Szenarien der Abrasivwiederverwendung wird die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs anhand der experimentellen Daten abgeschätzt. Nach Ende der WAS-Schnitte ist das gesamte Schnittfugenmaterial in Form von Stahlpartikeln Teil des zu entsorgenden Abrasivabfalls. Für die Handhabung des wiederverwendbaren Abrasivs ist die Stahlkonzentration sowie die Radioaktivität des Schnittfugenmaterials eine wichtige Information. Anhand der Abrasivmenge der Wiederverwendung m_w lässt sich die Stahlkonzentration des zu verpackenden Abrasivabfalls bestimmen. Die Stahlkonzentrationen des wiederverwendbaren Abrasivs werden über die experimentellen Daten abgeschätzt. In Tabelle 4.4 sind die genannten Stahlkonzentrationen für die Szenarien der Wiederverwendung angegeben.

Tabelle 4.4: Abrasivverbrauch und Stahlkonzentrationen bei der Abrasivaufbereitung mit 150 µm und 200 µm Maschenweite

Maschenweite bei Abrasiv- aufbereitung	Masse		Stahlkonzentration	
	Abrasivverbrauch (neu) mit Wieder- verwendung m_w	Abrasiv- abfall	Wieder- verwendbares Abrasiv	Abrasiv- abfall
150 µm	45 t	46,5 t	0,056 ± 0,017 %	3 %
200 µm	53 t	54,5 t	0,031 ± 0,008 %	3 %

Die Stahlkonzentration des zu entsorgenden Abrasivabfalls kann bei bekannter Aktivität des Schnittfugenmaterials verwendet werden, um die Dosisleistung des Gemischs zu berechnen. Diese Information ist für die Handhabung und Lagerung des Abrasivabfalls relevant.

Fazit

Die Berechnungen der Wiederverwendungsanteile des Abrasivs zeigen, dass bei einer Abrasivaufbereitung mit Maschenweiten von 150 µm bzw. 200 µm die Abfallmenge des zu entsorgenden Abrasivs um ca. 55 % bzw. 47 % reduziert werden kann. Für die gesamte Menge des Sekundärabfalls muss beachtet werden, dass die Abrasivaufbereitungsanlage ebenfalls zu entsorgen ist. Je nach Ausführung ist die Masse der Anlage im Vergleich zur Einsparung des Sekundärabfalls jedoch vernachlässigbar.

Potential zur weiteren Reduzierung des Sekundärabfalls liegt in der Reduzierung der Maschenweite bei der Abrasivaufbereitung. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Schnittleistung des Abrasivs geringer ist und die WASS-Anlage mit einem größeren Anteil an kleinen Abrasivpartikeln umgehen muss. Zudem steigt die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs, was bei der Handhabung beachtet werden muss. Um das Potential kleinerer Maschenweiten zu vergleichen, sind in Tabelle 4.5 die Wiederverwendungsanteile, Abrasivverbrauch und Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs bei der Aufbereitung mit 106 µm und 125 µm Siebmaschenweite eingetragen.

4. Wiederverwendbares Abrasiv

Tabelle 4.5: Wiederverwendungsanteile, Stahlkonzentration und Abrasivverbrauch bei Abrasivaufbereitung mit 106 µm und 125 µm Maschenweite

Maschenweite bei Abrasivaufbereitung	Wiederverwendungsanteile				Stahlkonzentration wiederverwendbares Abrasiv (ohne Magnetfiltration) [Massen-%]	Abrasivverbrauch mit Wiederverwendung m_w
	experimentell bestimmt	extrapoliert				
		w_1	w_2'	w_3'		
106 µm	0,82	0,54	0,31	0,13	$0,041 \pm 0,006$	21 t
125 µm	0,77	0,51	0,29	0,12	$0,036 \pm 0,007$	25 t

Bei den Stahlkonzentrationen des wiederverwendbaren Abrasivs ist die Magnetseparation nicht berücksichtigt. Mit Magnetseparation des Grobguts sinkt zwar die Stahlkonzentration des Abrasivs, aber auch der mögliche Wiederverwendungsanteil. Je nach Dosisleistung des Schnittguts kann entschieden werden, ob mit dem Einsatz eines Magnetfilters die Handhabung des wiederverwendbaren Abrasivs vereinfacht werden kann und z.B. zusätzliche Abschirmung der Abrasivzumischeinheit vermieden werden kann. Mit einer Abrasivaufbereitung mit 106 µm bzw. 125 µm Siebmaschenweite könnte die zu entsorgende Abrasivmenge um bis zu 79 % bzw. 75 % reduziert werden.

5. Zusammenfassung

Das Ziel der Abrasivaufbereitung ist es, ein wiederverwendbares Abrasiv herzustellen, das einen ähnlich geringen Anteil an Fehlunterkorn wie das neue Abrasiv besitzt. Unter dieser Voraussetzung kann es der WASS-Anlage ohne Zumischen von neuem Abrasiv zugeführt werden. Nach der Aufbereitung soll zudem die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs so niedrig wie möglich sein, da es sich beim Stahl um radioaktives Schnittfugenmaterial aus dem RDB oder den Einbauten handelt. Anhand von Separationsversuchen und verschiedenen Analysemethoden wurde der Einfluss der Siebmaschenweite und der Stahlsorte auf den Wiederverwendungsanteil, den Siebfehler, die Partikelgrößenverteilung und die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs untersucht.

Es wurde ein Zusammenhang zwischen Wiederverwendungsanteil und Siebmaschenweite festgestellt. Bei einer Siebung mit 150 µm Maschenweite besitzt das Abrasiv eine Partikelgrößenverteilung, die der von neuem HPX80-Abrasiv entspricht. Der Wiederverwendungsanteil bei dieser Maschenweite beträgt zwischen 63 - 75 %. Der Siebfehler des Fehlunterkorns bei der Nasssiebung in der Separationsanlage ist bei allen Maschenweiten unter 8 Massen-% und besteht überwiegend aus Grenzkorn. Der Anteil des Fehlunterkorns ist ein Maß für die Qualität des Abrasivs, da ein zu großer Anteil an Feingut im Abrasiv zu Beschädigungen und Verstopfungen der WASS-Düse führen kann. Zudem reduziert ein zu hoher Feingutanteil die Schnitteigenschaften des Abrasivs. Eine größere Maschenweite bei der Siebung senkt den Wiederverwendungsanteil auf bis zu 25 % bei einer Siebung mit 250 µm Maschenweite, aber verbessert die Qualität des wiederverwendbaren Abrasivs bezüglich des Fehlunterkorns nicht. Eine Siebung mit Maschenweiten zwischen 150 µm - 180 µm stellt wiederverwendbares Abrasiv mit ausreichender Qualität her, ohne die Notwendigkeit der Beimischung von neuem Abrasiv, mit einem Wiederverwendungsanteil zwischen 50 - 76 %. Bei den Separationsversuchen gelangen bis zu 3 Massen-% des Grobguts unbeabsichtigt ins Feingut und senkt somit den Wiederverwendungsanteil. Ein Zusammenhang zur Maschenweite oder zum Probenmaterial konnte nicht festgestellt werden. Dieser Siebfehler des Fehlüberkorns kann durch eine Verbesserung der Siebkonstruktion reduziert werden, bei der z.B. die Höhe des Siebrahmens vergrößert wird. Nach dieser Verbesserung der Separationsanlage erhöht sich der Wiederverwendungsanteil um bis zu 3 %.

Die Auswahl der Maschenweite hat ebenfalls einen Einfluss auf die Stahlkonzentration des Abrasivs. Je kleiner die Maschenweite bei der Siebung, desto größer ist die Stahlkonzentration des wiederverwendbaren Abrasivs. Es wurden z.B. bei Siebungen mit 150 μm und anschließender Magnetfiltration Stahlkonzentrationen von 0,031 - 0,056 Massen-% gemessen und bei Siebungen mit 250 μm 0,008 - 0,023 Massen-% (siehe Tabelle 4.2). Bei der Planung des WAS-Schnitts muss daher die Stahlkonzentration bei der Wiederverwendung beachtet werden. Bei bekannter Radioaktivität der geschnittenen Komponente kann anhand der zu erwartenden Stahlkonzentrationen im Abrasiv die Radioaktivität im wiederverwendbaren Abrasiv abgeschätzt werden. Bei der Planung des Schnittes und der Handhabung des Abrasivs ist die zu erwartende Stahlkonzentration eine wichtige Information. Durch die Wahl einer größeren Maschenweite kann die Stahlkonzentration reduziert werden, allerdings sinkt damit der Wiederverwendungsanteil. Mittels Siebung und anschließender Magnetfiltration können, je nach Maschenweite, zwischen 96 % - 99 % des Stahls abgeschieden werden. Die Siebung entfernt dabei den überwiegenden Teil des Stahls. Nach der Siebung ist bereits über 95 % des Stahls aus dem Grobgut entfernt. Verbleibende große Stahlpartikel können mittels Magnetfilter entfernt werden. Rückstreuelektronenbilder des Probenmaterials zeigen Stahlanhaftungen an Abrasivpartikeln, welche mit mechanischen Verfahren nicht entfernt werden können. Aus diesem Grund ist eine vollständige Abscheidung des Stahls aus dem Gemisch nicht möglich. Bei den Versuchen wurde Probenmaterial mit Stahlsorten verwendet, die im Reaktorbau eingesetzt werden. Beim Schnitt mit der WASS-Anlage haben sich aufgrund der starken plastischen Verformung die magnetischen Eigenschaften der Stahlpartikel verändert. Stahlpartikel der beiden Edelstahlsorten 1.4307 und 1.4571, welche für einen Vergleich ausgewählt wurden, lassen sich unterschiedlich stark mittels eines Permanentmagneten aus der Suspension anziehen. In den Separationsversuchen mit Sieb und Magnetfilter war der Abscheidegrad des Stahls 1.4307, welcher bessere magnetische Eigenschaften aufweist, jedoch geringer. Die Schnittparameter der WASS-Anlage bei der Probenherstellung, sowie die mechanischen Eigenschaften beider Stähle sind gleich oder ähnlich. Eine unterschiedliche Form oder Größe der Stahlpartikel, auf die der Unterschied im Abscheidegrad zurückzuführen wäre, konnte nicht festgestellt werden. Eine mögliche Ursache liegt an der Beladung des Magnetfilters. Die Effektivität des Magnetfilters sinkt, je mehr Partikel an den Hüllrohren abgeschieden sind. Die Beladung des Filters

und die Auswirkungen auf die Partikelabscheidung hängt von den Betriebsparametern und Filtergeometrie ab, was die Ermittlung der maximalen Beladung erschwert [59]. Für die Reduzierung der Effektivität des Magnetfilters ist dabei irrelevant, ob Stahlpartikel oder andere magnetische Bestandteile des Abrasivs, wie z.B. Magnetit, an den Hüllrohren abgeschieden werden. Beide Probengemische unterscheiden sich in der durchschnittlichen Stahlkonzentration. Die Charge des Stahls 1.4307 mit geringerem Abscheidegrad besitzt eine höhere durchschnittliche Stahlkonzentration, was bei einem überladenen Filter zu einer geringeren Effektivität führen kann.

Bei dem verwendeten Magnetfilter handelt es sich um einen modifizierten Permanentmagnetfilter aus Magnetrost. Eine Verbesserung des Magnetfilters, welche auch die Problematik der Beladung behandelt, ist Thema der Dissertation von Dr.-Ing. Carla-Olivia Krauß. Ein Ergebnis der Untersuchungen war, dass die Effektivität, sowie die maximale Beladung des Magnetfilters, durch die Erweiterung mit einem zusätzlichen Magnetrost gesteigert werden können [36]. Die Separationsversuche wurden mit dem Magnetfilter ohne die untersuchten Verbesserungen durchgeführt. In der Dissertation von Dr.-Ing. Martin Brandauer wurde ein ähnlicher Magnetfilter mit geringerer maximaler Beladung verwendet. Die Magnetfiltration wurde direkt am Probenmaterial vorgenommen, ohne vorherige Siebung, wodurch die Ausgangskonzentration an Stahl zu Beginn der Separation höher ist und die Hüllrohre schneller beladen werden. Durch wiederholtes Unterbrechen der Separation und Spülen des Magnetfilters wurde die Abnahme der Effektivität des Magnetfilters verhindert [35].

Durch die Siebung allein wird bei Maschenweiten größer $106\ \mu\text{m}$ bereits über 96 % des Stahls abgetrennt, da die Stahlpartikel meist deutlich kleiner als intakte Abrasivpartikel sind. Der Zweck des Magnetfilters in dieser Separationsanlage ist es, große Stahlpartikel, welche die Düse oder die WASS-Anlage beschädigen können, zu entfernen. Der im wiederverwendbaren Abrasiv verbleibende Stahl stammt von nicht im Magnetfilter abgeschiedenen Stahlpartikeln und Stahlanhaftungen an Abrasivpartikeln, die in Rückstreuelektronenaufnahmen (Abbildung 4.6) gezeigt sind.

Der Zusammenhang von Maschenweite und Stahlsorte zum Wiederverwendungsanteil und Stahlkonzentration kann in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt werden.

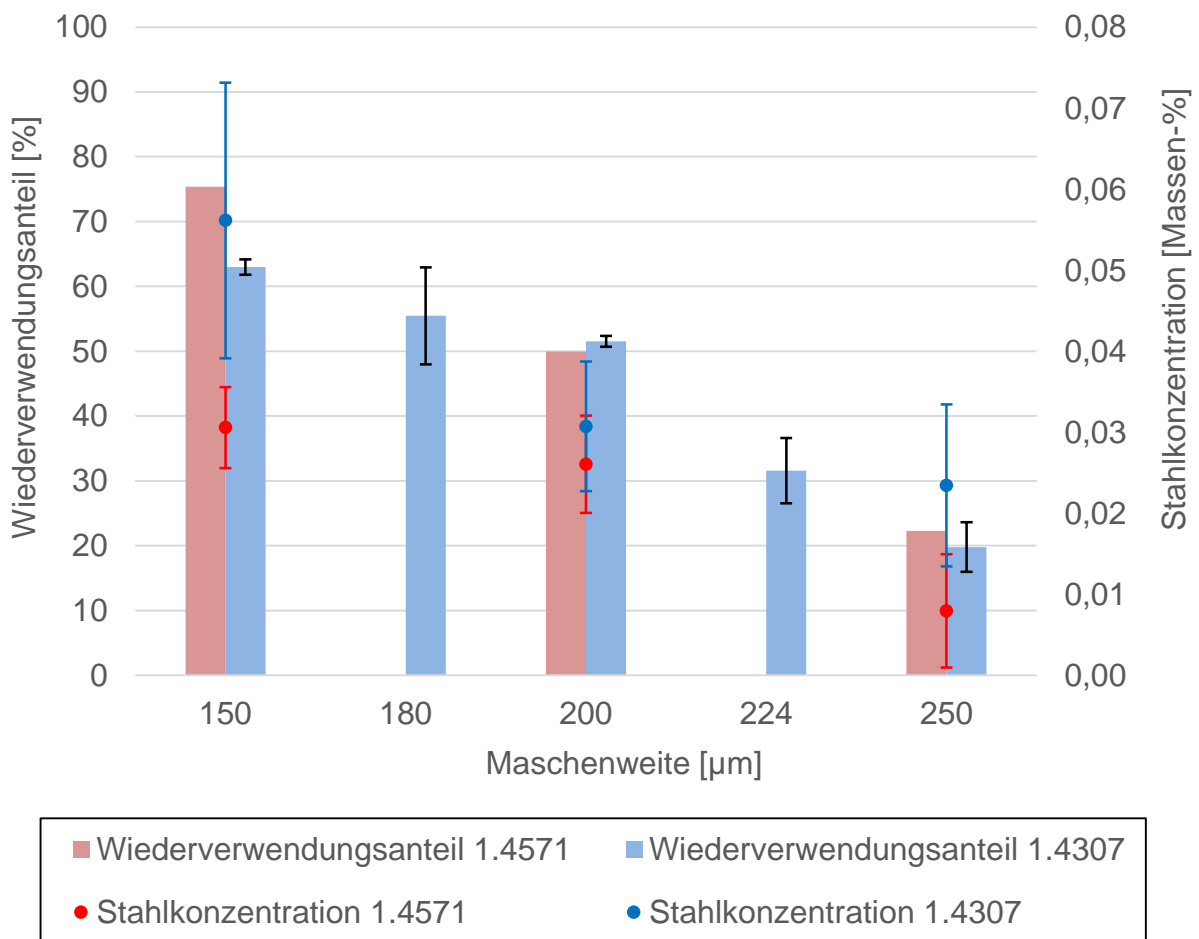


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen Maschenweite, Stahlsorte, Wiederverwendungsanteil und Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv

In Abbildung 5.1 sind als Säulendiagramm die Wiederverwendungsanteile für Maschenweiten zwischen 150 μm und 250 μm aufgetragen. Für die Maschenweiten 150 μm , 200 μm und 250 μm sind zudem die Stahlkonzentrationen der wiederverwendbaren Abrasive abgebildet. Anhand der Darstellung ist die abnehmende Tendenz des Wiederverwendungsanteils und Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv mit steigender Siebmaschenweite erkennbar. Das wiederverwendbare Abrasiv der beiden Stahlsorten unterscheidet sich zwar in der jeweiligen Stahlkonzentration, die abnehmende Tendenz zur steigenden Maschenweite ist jedoch bei beiden Stahlsorten gleich.

Eine kleinere Maschenweite bei der Abrasivaufbereitung erhöht zwar den Wiederverwendungsanteil, was die Effektivität der Abfallreduzierung verbessert. Damit steigt allerdings auch die Stahlkonzentration und somit die Radioaktivität im wiederverwendbaren Abrasiv. Dies erschwert die Handhabung des wiederverwendbaren Abrasivs

und muss bei der Bedienung der Schneidanlage, sowie der Entsorgung des Abrasivabfalls berücksichtigt werden. Beim Schneiden wird das wiederverwendbare Abrasiv in die Abrasivzumischeinheit zurückgeführt. Ist die Stahlkonzentration bzw. die Dosisleistung dieses Abrasivs zu hoch, dass die Anlage abgeschirmt werden muss, wird der Schneidprozess, sowie die Montage der Anlage aufwendiger. Je nach Dosisleistung des Schnittguts ist auch die Stahlkonzentration der zu entsorgenden Abrasivfraktion, welche von der Separationsanlage abgetrennt wurden, relevant. Die Dosisleistung der zu entsorgenden Fraktion bestimmt, wie das Material zu lagern ist. Bei hohen Dosisleistungen kann die Fraktion nach Konditionierung in MOSAIK-Behältern gelagert werden [57].

Die Messwerte des Diagramms, sowie die Informationen zum Siebfehler und zum Abscheidegrad befinden sich in einer Gesamtübersicht in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Gesamtübersicht von Wiederverwendungsanteil, Stahlkonzentration, Abscheidegrad und Siebfehler in Abhängigkeit der Siebmaschenweite bei Probenmaterial mit zwei unterschiedlichen Stahlsorten

Maschenweite der Siebung	Probenmaterial 1.4307 Stahlkonzentration ca. 1,8 Massen-%				Probenmaterial 1.4571 Stahlkonzentration ca. 1,15 Massen-%			
	Wiederverwendungsanteil	Stahlkonzentration [Massen-%]	Abscheidegrad Stahl	Siebfehler Fehlkorn [Massen-%]	Wiederverwendungsanteil	Stahlkonzentration [Massen-%]	Abscheidegrad Stahl	Siebfehler Fehlkorn [Massen-%]
150 µm	63 %	0,056 ± 0,017	97 %	2,0 %	75 %	0,031 ± 0,005	97 %	-
180 µm	56 %	-	-	2,1 %	-	-	-	-
200 µm	52 %	0,031 ± 0,008	98 %	5,5 %	50 %	0,026 ± 0,005	98 %	-
224 µm	32 %	-	-	5,9 %	-	-	-	-
250 µm	20 %	0,023 ± 0,01	99 %	6,6 %	22 %	0,008 ± 0,007	99 %	-

Bei der Planung von WAS-Schnitten zur Zerlegung radioaktiver Stahlkomponenten wird die Radioaktivität des Stahls einbezogen. Mit den Schnittparametern der WASS-Anlage lassen sich die Abrasivmenge und die Menge des Stahls im entstehenden Abrasivabfall berechnen. Ziel der Abrasivwiederverwendung ist es, einen möglichst hohen Wiederverwendungsanteil und möglichst viele Wiederverwendungszyklen zu nutzen. Mit der Radioaktivität im Bereich der Schnittfuge der zu schneidenden Stahlkomponente, kann man anhand des erreichbaren Abscheidegrads der Stahlpartikel die Radioaktivität des wiederverwendbaren Abrasivs abschätzen. Um einen möglichst hohen Wiederverwendungsanteil zu erreichen, wird die kleinstmögliche Maschenweite gewählt, sofern das wiederverwendbare Abrasiv mit diesen geschätzten Werten der Radioaktivität noch handhabbar ist. Mit Maschenweiten zwischen 125 μm bis 150 μm ist ein Wiederverwendungsanteil von etwa 75 % im ersten Wiederverwendungszyklus erreichbar.

Experimentell konnte im Rahmen der Arbeit nur der Wiederverwendungsanteil im ersten Wiederverwendungszyklus beachtet werden. Um die Reduktion des Abrasivverbrauchs durch Wiederverwendung beim gesamten Schnittprozess abzuschätzen, wurden Literaturwerte für die Abrasivzerkleinerung und Wiederverwendungsanteile bei vier Wiederverwendungszyklen als Grundlage für ein Modell des Abrasivverbrauchs verwendet. Die Literaturwerte der Abrasivzerkleinerung von Granatsand beim wiederholten Einsatz in einer WASS-Anlage wurden in dieser Arbeit verwendet um, ausgehend vom Wiederverwendungsanteil im ersten Wiederverwendungszyklus, die Wiederverwendungsanteile der folgenden Wiederverwendungszyklen zu extrapolieren. Vier Szenarien zur Abrasivaufbereitung bei 106 μm , 125 μm , 150 μm und 200 μm Maschenweite wurden modelliert, woraus eine Reduktion des Abrasivverbrauchs zwischen 47 % bis 79 % folgt.

Vorherige Untersuchungen aus der Literatur zur Schnittleistung von wiederverwendbarem Abrasiv weisen auf eine Erhöhung der maximalen Schnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit beim Zumischen von neuem Abrasiv hin [18], [21]. Da bei der Anwendung im kerntechnischen Bereich das Abrasiv nur direkt vor Ort wiederverwendet werden kann und zudem eine hohe Schnittgeschwindigkeit von Vorteil ist, eignet sich die Mischung von neuem und wiederverwendbarem Abrasiv. In diesem Fall werden die WAS-Schnitte mit neuem Abrasiv gestartet und der entstehende Abrasivabfall kontinuierlich abgesaugt und zur Separationsanlage gepumpt. Das dort

separierte wiederverwendbare Abrasiv wird anschließend zusammen mit einem Teil neuen Abrasivs dem Abrasivaufgabebehälter der WASS-Anlage zugeführt. Ab einem bestimmten Zeitpunkt der WAS-Schnitte kann die Zugabe von neuem Abrasiv reduziert werden, um bis zum Ende der Schnitte eine mehrfache Verwendung des letzten Abrasivs zu erreichen. Auf diese Weise kann die Menge an wiederverwendbarem Abrasiv, die nach Abschluss der Schnitte übrig bleibt, möglichst gering gehalten werden. Anhand des erreichbaren Wiederverwendungsanteils und Abscheidegrads des Stahls, sowie der Schnittparameter der WASS-Anlage und Eigenschaften des zu schneidenden Materials, können die Massenströme des neuen und des wiederverwendbaren Abrasivs und die Betriebsparameter der Separationsanlage geplant werden. Auf diese Weise lässt sich die Menge des radioaktiven Sekundärabfalls stark reduzieren, wodurch die begrenzten Endlagerkapazitäten geschont und hohe Entsorgungskosten eingespart werden können.

Für den Einsatz im Rückbau kerntechnischer Anlagen ist die Kombination von Sieb und Magnetfilter zur Abrasivaufbereitung sinnvoll, wenn es sich in diesem Fall beim Schnittgut um radioaktiven Stahl handelt. In der konventionellen Anwendung kann eine zusätzliche Magnetseparation als Ergänzung der Abrasivaufbereitung zur Metallrückgewinnung aus dem Abrasivabfall genutzt werden. Besonders in der Fertigung, wenn große Mengen sortenreiner Abrasivabfälle mit bekannten Stahlsorten anfallen, kann mit einer Kombination aus Sieb und Magnetseparation über 90 % (siehe Tabelle 4.1) des Schnittfugenmaterials zurückgewonnen werden und dem Metallrecycling zugeführt werden. Besonders bei hohen Rohstoff- und Energiepreisen kann eine Magnetseparation in konventionellen Anwendungen wirtschaftlich sein, da dieser zusätzliche Verfahrensschritt einen geringen Energieverbrauch und Wartungsaufwand hat.

6. Anhang

6.1 Betriebsparameter

6.1.1 Dauer der Siebung und Magnetfiltration

Am Beispiel der Siebung sinkt mit fortschreitender Siebdauer die Feststoffkonzentration im Rührbehälter asymptotisch gegen null. Separationsexperimente wurden beendet, wenn über 99,5 % der Partikel das Sieb erreicht haben bzw. mindestens einmal den Magnetfilter passiert haben. Bei einem Suspensionsvolumenstrom von 11,8 l/min beträgt die Siebdauer 20 Minuten.

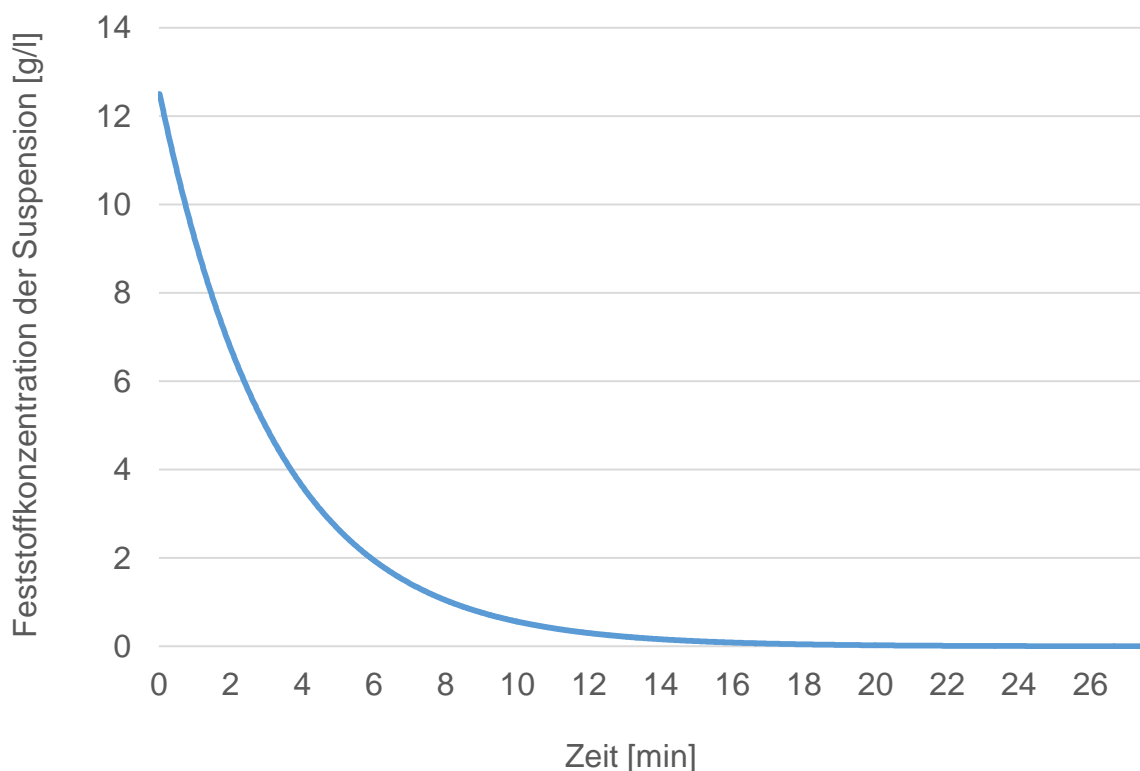


Abbildung 6.1: Feststoffkonzentration im Rührbehälter in Abhängigkeit der Zeit, Volumenstrom der Suspension = 15,5 l/min. Feststoffkonzentration zu Beginn = 0,75 kg/60 l

Am Beispiel der Siebung sinkt mit fortschreitender Siebdauer die Feststoffkonzentration im Rührbehälter asymptotisch gegen null. Separationsexperimente wurden beendet, wenn über 99,5 % der Partikel das Sieb erreicht haben bzw. mindestens einmal den Magnetfilter passiert haben. Bei einem Suspensionsvolumenstrom von 11,8 l/min beträgt die Siebdauer 20 Minuten.

In einer Massenbilanz werden die in den Rührbehälter eingehenden Ströme und ihre Feststoffkonzentration (zurückgeführtes Wasser aus dem Beutelfilter) und

ausgehende Ströme (über Membranpumpe abgepumpte Suspension mit ihrer Feststoffkonzentration zum jeweiligen Zeitpunkt) bilanziert

6.2 Versuchsergebnisse

6.2.1 Siebanalyse

In Tabelle 6.1 sind die Messdaten der Siebanalysen der Separationsversuche mit dem Probengemisch 1.4307 aufgeführt. Untersucht wurde das Grobgut nach der Separation in der Siebkomponente. Grau hinterlegt ist der Anteil des Fehlunterkorns, welcher mittels Trockensiebung ermittelt wurde. Die Ergebnisse des Fehlunterkorns sind in Kapitel 4.3 zur Bewertung der Qualität des wiederverwendbaren Abrasivs verwendet.

Tabelle 6.1: Siebanalysen des Grobguts der Separationsversuche in der Separationsanlage mit Probengemisch 1.4307

Siebfractionen [μm]	Maschenweite der Siebung in der Separationsanlage				
	180 μm	200 μm	200 μm	224 μm	250 μm
125	0,05	0,25	0,1	0,1	0,05
150	10,45	2,35	2,2	0,1	0,25
180	68,55	21,5	16,3	0,8	0,25
200	122,95	103	105,65	18,7	1,45
224	80,9	81,65	85,8	70,7	10,3
250	133	129,2	136,7	132,5	119,65
300	39,8	44,05	44,14	40,55	44,95
Summe [g]	455,75	382,2	391	262,75	176,6

Zum Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von wiederverwendbarem und neuem Abrasiv wurden Siebanalysen des neuen Abrasivs bei verschiedenen Siebkonfigurationen durchgeführt. Im Folgenden sind Messdaten der Siebanalyse zur Charakterisierung des neuen HPX80 Abrasivs aufgeführt.

Tabelle 6.2: Siebanalyse des neuen HPX80 mit neun Siebstufen

Maschenweite [μm]	Masse der Siebfraction [g]
0	0,59
106	0,86
125	34,57
180	31,38
200	78,20
224	72,93
250	136,29
280	46,15
300	97,18
355	1,69
Summe	499,84

In Tabelle 6.3 sind die Herstellerangaben [38] zur Partikelgrößenverteilung des neuen HPX80 Abrasivs dargestellt.

Tabelle 6.3: Herstellerangaben der Siebanalyse des neuen HPX80

Maschenweite [μm]	Masse der Siebfraction [g]
0	0
125	5,5
150	10,5
180	19
212	24,5
250	23,5
300	12
355	2
Summe	97

Zur Ergänzung der Herstellerangaben wurden mehrere Siebanalysen des zur Herstellung des Probenmaterials verwendeten neuen Abrasivs durchgeführt. Die Messwerte dieser Analysen sind in aufgeführt.

Tabelle 6.4: Siebanalyse des neuen HPX80 mit Wiederholungen

Maschenweite [μm]	Masse der Siebfraktion [g]		
	1. Messung	2. Messung	3. Messung
0	2,1	2,33	1,8
125	8,85	9,88	7,39
150	26,81	30,62	18,94
180	65,83	73,53	55,73
212	125,24	130,17	105,76
250	186,48	179,87	195,57
300	83,97	72,71	110,92
355	1,14	0,92	3,9
Summe	500,42	500,03	500,01

6.2.2 Partikelgrößenverteilungen

In Kapitel 4.3 wurden die PGV des neuen HPX80-Abrasivs (Herstellerangaben) mit den PGV der mit verschiedenen Maschenweiten hergestellten wiederverwendbaren Abrasive verglichen. Zur besseren Übersicht wurden in Abbildung 4.10 nur die Kurven der Maschenweiten 150 μm , 180 μm und 250 μm dargestellt. In Abbildung 6.2 werden alle untersuchten Maschenweiten verglichen. Zusätzlich zu den Herstellerangaben des neuen Abrasivs ist in dieser Darstellung die PGV der Siebanalyse zur Verifizierung der Daten ergänzt.

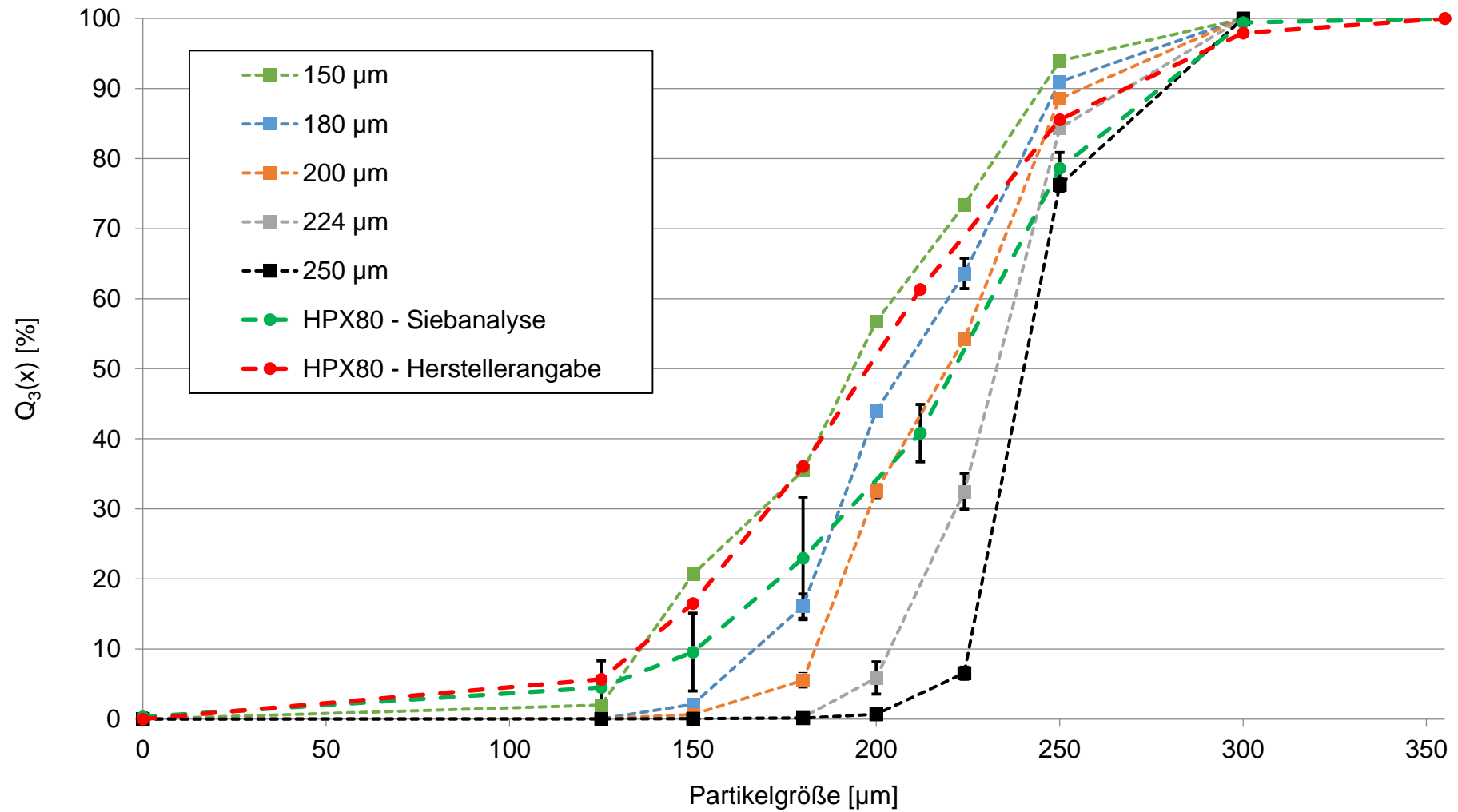


Abbildung 6.2: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von neuem HPX80 mit wiederverwendbarem Abrasiv (vollständige Darstellung)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufbau und Komponenten einer WASS-Anlage	6
Abbildung 2.2: Darstellung eines WAS-Schnitts	7
Abbildung 2.3: Schnittfläche eines WAS-Schnitts. Schnittrichtung von rechts nach links	8
Abbildung 2.4: Lichtmikroskopaufnahme des neuen HPX80 Abrasivs	10
Abbildung 2.5: Einfluss der Abrasivpartikelgröße auf die max. Schnitttiefe verschiedener Materialien [15]	11
Abbildung 2.6: Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv bei 3 Wiederverwendungszyklen [14]	13
Abbildung 2.7: Definition der verwendeten Begriffe	15
Abbildung 2.8: Klassierung von Aufgabegut in Feingut und Grobgut als Partikelgrößenverteilung dargestellt	16
Abbildung 2.9: Trombenbildung im Rührbehälter ohne Stromstörer (links) und mit Stromstörern (rechts)	22
Abbildung 2.10: Zustände der Suspension in Abhängigkeit der Rührerdrehfrequenz	23
Abbildung 3.1: Prinzip der Wiederverwendung [37]	28
Abbildung 3.2: Partikelgrößenbereich des Probenmaterials und der Trennverfahren	30
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Prozesses	32
Abbildung 3.4: Feststoffanteil der Suspension im Rührbehälter in Abhängigkeit der Zeit	33
Abbildung 3.5: Separationsanlage mit Bezeichnung der Komponenten	35
Abbildung 3.6: Aufbau der Siebkomponente	36
Abbildung 3.7: Leeren und Rückspülen des Siebs	38
Abbildung 3.8: Selbstschließende Steckverbindungen getrennt (links) und verbunden (rechts)	38
Abbildung 3.9: Magnetfilter mit Bezeichnung der Komponenten	39
Abbildung 3.10: Aufbau der Magnetstäbe und des Magnetfilters [36]	41
Abbildung 3.11: Wasserstand im Magnetfilter bei Start der Filtration (links), Betriebszustand (rechts)	42
Abbildung 3.12: Magnetfilter ohne Einsatz von Druckluft am Gehäuseboden (links) und mit Druckluft (rechts)	43
Abbildung 3.13: Beladung der Hüllrohre nach Magnetfiltration mit und ohne Druckluftumspülung	44
Abbildung 3.14: Beutelfiltergehäuse (links), neuer Filterbeutel, 1 µm (Mitte), mit Feingut beladener Filterbeutel nach Siebung (rechts)	45
Abbildung 3.15: Behälter eines Druckwasserreaktors mit Einbauten [41]	47
Abbildung 3.16: Vergleich der magnetischen Eigenschaften der Stahlpartikel (links 1.4307, rechts 1.4571)	49
Abbildung 3.17: Vierkantstähle aus Edelstahl vor der Probenherstellung	50
Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Komponenten der WASS-Anlage	51
Abbildung 3.19: WASS-Düse am Schnittbeginn	52
Abbildung 3.20: Feuchtes Probenmaterial (Gemisch 1.4307): Abrasiv (rot) und Stahlpartikel (grau)	53

Abbildung 3.21: Getrocknetes Probenmaterial (Gemisch 1.4307)	53
Abbildung 3.22: Probenmaterial mit Wasserüberstand nach Abfüllen in Fässer	54
Abbildung 3.23: Getrocknetes Probenmaterial mit Agglomeraten (links), zerkleinerte Agglomerate (rechts).....	55
Abbildung 3.24: Siebversuche mit der Separationsanlage und Siebanalysen der Fraktionen	57
Abbildung 3.25: Analysesiebmaschine "AS 200 control"	58
Abbildung 3.26: Säureaufschluss von Abrasiv-Stahl-Proben auf einer Heizplatte.....	60
Abbildung 4.1: Entmischungseffekte bei feuchtem Probenmaterial.....	69
Abbildung 4.2: Partikelgrößenverteilungen des gesamten Probenmaterials 1.4550.....	70
Abbildung 4.3: Summenverteilung des gesamten Probenmaterials 1.4550	71
Abbildung 4.4: Feingut der Siebung mit 250 µm Maschenweite.....	74
Abbildung 4.5: Neues Abrasiv (links), wiederverwendbares Abrasiv nach Siebung und Magnetseparation (rechts)	75
Abbildung 4.6: Abrasivpartikel mit Rissbildung und Stahlanhaftung.....	76
Abbildung 4.7: Summenverteilung des neuen HPX80, gemessen und nach Herstellerangabe [10].....	78
Abbildung 4.8: PGV des Grobguts von Separationsversuchen mit fünf verschiedenen Maschenweiten	80
Abbildung 4.9: Anteil des Fehlunterkorns in Anhängigkeit der Maschenweite.....	81
Abbildung 4.10: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von neuem HPX80 Abrasiv mit wiederverwendbarem Abrasiv	82
Abbildung 4.11: Wiederverwendungsanteile bei Separationsversuchen mit unterschiedlichen Maschenweiten	84
Abbildung 4.12: Wiederverwendungsanteil in Abhängigkeit der Maschenweite der Siebung	85
Abbildung 4.13: Anteil des Fehlüberkorns an der Gesamtmasse bei verschiedenen Maschenweiten	86
Abbildung 4.14: Hüllrohre mit Abrasivpartikeln (links) und mit Einsatz von Druckluftumspülung (rechts)	88
Abbildung 4.15: Zusammenhang zwischen Partikelgrößenfraktion und Stahlkonzentration nach der Siebung	89
Abbildung 4.16: Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv in Abhängigkeit der Maschenweite der Siebung und Stahlsorte des Probenmaterials	90
Abbildung 4.17: Abscheidegrad des Stahls: Siebung ohne Magnetfiltration und Siebung mit anschließender Magnetseparation in Abhängigkeit der Siebmaschenweite	92
Abbildung 4.18: Wiederverwendungsanteile (Literatur, experimentell bestimmten und extrapoliert) für mehrfache Aufbereitung und Wiederverwendung von Granatsandabrasiv.....	96
Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen Maschenweite, Stahlsorte, Wiederverwendungsanteil und Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv.....	103
Abbildung 6.1: Feststoffkonzentration im Rührbehälter in Abhängigkeit der Zeit, Volumenstrom der Suspension = 15,5 l/min. Feststoffkonzentration zu Beginn = 0,75 kg/60 l	108
Abbildung 6.2: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von neuem HPX80 mit wiederverwendbarem Abrasiv (vollständige Darstellung)	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung in Massen-% des Abrasivs Barton HPX [10]	9
Tabelle 2.2: Kategorisierte Auswahl wichtiger Einflussgrößen bei der Nasssiebung	18
Tabelle 3.1: Stahlsorten des Probenmaterials [42]	47
Tabelle 3.2: Betriebsparameter der WASS-Anlage bei der Probenherstellung	52
Tabelle 3.3: Maschenweiten der Siebe für die einzelnen Siebanalysen	59
Tabelle 3.4: Nickelkonzentration der untersuchten Stahlsorten nach Herstellerangaben [51], [52], [53]	61
Tabelle 3.5: Auswahl der Anlagen- und Betriebsparameter bzw. Faktoren der Separationsanlage	62
Tabelle 3.6: Übersicht des Versuchsplans mit Probenmaterial, Parametern und Analysen ..	65
Tabelle 4.1: Siebfraktionen der Charge 1.4550 mit Stahlkonzentration	72
Tabelle 4.2: Stahlkonzentrationen des wiederverwendbaren Abrasivs bei verschiedenen Maschenweiten und Stahlsorten	91
Tabelle 4.3: Wiederverwendungsanteile und Verbrauch von neuem Abrasiv bei Abrasivaufbereitung mit 150 µm und 200 µm Maschenweite	97
Tabelle 4.4: Abrasivverbrauch und Stahlkonzentrationen bei der Abrasivaufbereitung mit 150 µm und 200 µm Maschenweite	98
Tabelle 4.5: Wiederverwendungsanteile, Stahlkonzentration und Abrasivverbrauch bei Abrasivaufbereitung mit 106 µm und 125 µm Maschenweite	99
Tabelle 5.1: Gesamtübersicht von Wiederverwendungsanteil, Stahlkonzentration, Abscheidegrad und Siebfehler in Abhängigkeit der Siebmaschenweite bei Probenmaterial mit zwei unterschiedlichen Stahlsorten	105
Tabelle 6.1: Siebanalysen des Grobguts der Separationsversuche in der Separationsanlage mit Probengemisch 1.4307	109
Tabelle 6.2: Siebanalyse des neuen HPX80 mit neun Siebstufen	110
Tabelle 6.3: Herstellerangaben der Siebanalyse des neuen HPX80	110
Tabelle 6.4: Siebanalyse des neuen HPX80 mit Wiederholungen	111

Literaturverzeichnis

- [1] D. Zaremba, P. Heese, M. Bauer, H. Maier und T. Hassel, „PARTICLE DISINTEGRATION IN THE ABRASIVE WATER INJECTION JET,“ in *WJTA-IMCA Conference and Expo*, New Orleans, Louisiana, 2015.
- [2] H. Louis, F. Pude, C. von Rad und R. Verseemann, „Abrasive Water Suspension Jet Technology Fundamentals, Application and Developments,“ *Welding in the World - The International Journal of Materials Joining*, pp. 11-16, 2007.
- [3] D. Summers, O. Mitchell, S. Thompson, R. Denier und E. Bames, „Waterjet use dealing with the problem of anti-personnel landmines,“ in *10th American Waterjet Conference*, Houston, Texas, 1999.
- [4] A. Momber und R. Kovacevic, *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, London: Springer, 1998.
- [5] M. Putz, M. Dixb, F. Morczinek und M. Dittrich, „Suspension Technology for Abrasive Waterjet (AWJ) Cutting of Ceramic,“ in *8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)*, 2018.
- [6] L. Denissen, V. Massaut, M. Klein und J. Dadoumont, „High Pressure Abrasive Water Jet Cutting as a dismantling tool,“ in *The 8th International Conference on Radioactive waste management and Environmental remediation*, Brügge, Belgien, 2001.
- [7] ANT, *Rückbau von Nuklearanlagen - a cut ahead*, Lübeck: ANT Applied New Technologies AG.
- [8] H. Louis, D. Peter, F. Pude und R. Verseemann, „Flexible and mobile abrasive waterjet cutting system for dismantling applications,“ in *2005 WJTA American Waterjet Conference*, Houston, Texas, 2005.
- [9] F.-W. Bach, W. Pfeifer, R. Verseemann, P. Wilk, L. Valencia, B. Eisenmann und G. Hammer, „Decommissioning technologies, including recent developments and special features of the dismantling of nuclear research and prototype facilities,“ *Kerntechnik*, Nr. 70, pp. 31-46, 2005.
- [10] Barton Mines Co. LCC, *Technical Data & Physical Characteristics for Barton Garnet Abrasives*, Lake George, New York: www.barton.com.
- [11] A. Perec, „Research into the Disintegration of Abrasive Materials in the Abrasive Water Jet Machining Process,“ *Materials*, Bd. 14, Nr. 3940, 2021.
- [12] A. Perec, A. Radomska-Zalas, A. Fajdek-Bieda und E. Kawecka, „Efficiency of Tool Steel Cutting by Water Jet with Recycled Abrasive Materials,“ *Materials*, Bd. 15, Nr. 3978, 2022.
- [13] T. J. Labus, „Factors Influencing the Particle Size Distribution in an Abrasive Waterjet,“ *Journal of Engineering for Industry*, p. Vol. 113 / 411, November 1991.
- [14] V. N. Pi, *Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting*, Delft: Technische Universiteit Delft, 2008.
- [15] J. Ohlsen, „Recycling von Feststoffen beim Wasserabstrahlverfahren,“ *VDI Fortschritt-Berichte*, Bd. Nr. 175, 1997.
- [16] G. Aydin, „Recycling of abrasives in abrasive water jet cutting with different types of granite,“ *Arabian Journal of Geosciences*, pp. 4425-4435, 2014.

- [17] M. Kretschmer und E. Aust, „Recycling von Abrasivmittel und Prozeßwasser in der Wasserabstrahl-Technik,“ *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 71, pp. 401-406, 1999.
- [18] M. Kantha Babu und O. Krishnaiah Chetty, „Studies on Recharging of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 19, pp. 697-703, 2002.
- [19] A. Schramm, F. Morczinek und U. P. M. Götze, „Technical-economic evaluation of abrasive recycling in the suspension fine jet process chain,“ *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 106, pp. 981-992, 2020.
- [20] Y. Dong, W. Liu, H. Zhanga und H. Zhang, „On-line recycling of abrasives in abrasive water jet cleaning,“ in *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2014.
- [21] M. Kantha Babu und O. Krishnaiah Chetty, „A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining,“ *Wear*, Bd. 254, p. 763–773, 2003.
- [22] N. Guo, H. Louis, G. Meier und J. Ohlsen, „Recycling Capacity of Abrasives in Abrasive Water Jet cutting,“ *Jet Cutting Technology*, pp. 503-523, 1992.
- [23] P. Schmidt, R. Körber und M. Coppers, *Sieben und Siebmaschinen*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA, 2003.
- [24] T. Smith, *Test Sieving Methods - Guidelines for Establishing Sieve Analysis Procedures*, ASTM International, 2018.
- [25] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie*, Springer, 2009.
- [26] A. Meinel, „Zur Theorie und Praxis des Siebbodeneinsatzes in der Wurfsiebung,“ *AUFBEREITUNGS TECHNIK*, Bd. 46, Nr. 7, pp. 6-22, 2005.
- [27] F. W. Mayer, „Probleme der Erfolgsermittlung bei Trennungsvorgängen an körnigem Massengut,“ *Chemie-Ing.-Technik*, Bd. 3, Nr. 32, pp. 155-163, 1960.
- [28] H. G. Merkus und G. Meesters, *Production, Handling and Characterization of Particulate Materials*, Springer Verlag, 2016.
- [29] D. Schulze, *Pulver und Schüttgüter - Fließeigenschaften und Handhabung*, Berlin: Springer Verlag, 2008.
- [30] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik*, Berlin: Springer Verlag, 2012.
- [31] G. I. Kelbaliyev, D. Tagiyev und S. R. Rasulov, *Transport phenomena in dispersed media*, Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [32] D. I. f. Normung, *DIN 28131 - Rührer und Stromstörer für Rührbehälter; Formen, Benennungen und Hauptmaße*, 1992.
- [33] F. Becker, M. Brandauer, H. Geckeis, S. Gentes, A. Heneka, C.-O. Krauß, M. Plaschke, D. Schild und W. Tobie, „Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben "MaSK",“ *Karlsruher Institut für Technologie*, Karlsruhe, 2019.
- [34] S. Gentes, H. S. Müller, U. Kraps, M. Brandauer, S. Stiefel, J.-D. Eckhardt, M. Haist, C.-O. Krauß, U. Arnold, D. Schneider und J. H. Bruhn, „Abschlussbericht - Neuartige Entsorgungswege für Abrasivmittel aus der Wasserstrahl-Schneidtechnik (NENAWAS),“ *BMBF*, Karlsruhe, 2015.
- [35] M. Brandauer, *Experimentelle Untersuchungen zur Separation von Korngemischen in einem Stabmagnetfilter*, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2017.
- [36] C.-O. Krauß, *Experimentelle und numerische Untersuchungen eines Magnetfiltersystems zur Minimierung von Sekundärabfall beim Rückbau kerntechnischer Anlagen*, Karlsruhe: Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2021.

- [37] A. Heneka, C. O. Krauß, S. Gentes, F. Becker, H. Geckeis, J. Lützenkirchen, M. Plaschke, D. Schild und W. Tobie, „A new technical approach for the minimization of secondary waste produced by water abrasive suspension cutting during disassembling of nuclear facilities,“ *atw - International Journal for Nuclear Power*, Bd. 66, Nr. 1, pp. 34-40, 2021.
- [38] „Barton,“ [Online]. Available: <https://www.barton.com/wp-content/uploads/2018/10/PSD-HPX-ADIRONDACK-Garnet-Abrasives.pdf>. [Zugriff am 10 10 2019].
- [39] Goudsmit Magnetic Systems, Magnetscheider für Pulver, Flüssigkeiten und Schüttgüter, Niederlande: Goudsmit Magnetics.
- [40] E.ON Kernkraft GmbH, *Kernkraftwerk Würgassen - Erfolgreicher Rückbau*, Beverungen, 2014.
- [41] A. Schmitz und P. Knoll, „Rückbau der Reaktordruckbehälter-Einbauten im Kernkraftwerk Stade,“ *atw - International Journal for Nuclear Power - Vol. 54*, p. 514, August/September 2009.
- [42] U. Ilg, G. König und M. Erve, „Das Werkstoffkonzept in deutschen Leichtwasserreaktoren – Beitrag zur Anlagensicherheit, Wirtschaftlichkeit und Schadensvorsorge,“ *atw - International Journal for Nuclear Power*, Bd. 53, Nr. 12, pp. 766-780, Dezember 2008.
- [43] Informationsstelle Edelstahl, *Merkblatt 827 - Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle*, Düsseldorf: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei.
- [44] C. Müller-Bollenhagen, *Verformungsinduzierte Martensitbildung bei mehrstufiger Umformung und deren Nutzung zur Optimierung der HCF- und VHCF-Eigenschaften von austenitischem Edelstahlblech*, Universität Siegen, 2011.
- [45] S. Tavares, „Phase transformation induced by severe plastic deformation in the AISI 304L stainless steel,“ *Materials Science and Engineering*, pp. A358 S 32-36, 2003.
- [46] J. Musekamp, H. Hoche, P. M. Reinders und P. Kaestner, „Einfluss von Werkstoffzustand und chemischer Zusammensetzung auf die Eigenschaften plasmanitrierter austenitischer Stähle,“ *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, pp. 177-192, 02 2021.
- [47] ANT AG, „www.ant-ag.com,“ [Online]. Available: https://ant-ag.com/wp-content/uploads/2022/01/AMU_2500-100_Rev.3_de_20190729.pdf. [Zugriff am 08 04 2023].
- [48] DIN-Normenausschuss Bauwesen und Materialprüfung, *DIN 66165-2: Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 2: Durchführung*.
- [49] DIN-Normenausschuss Bauwesen und Materialprüfung, *DIN 66165-1: Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 1: Grundlagen*, Deutsche Norm, 2016.
- [50] PerkinElmer, „<https://perkinelmer.com/>,“ PerkinElmer, [Online]. Available: https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/TCH_Optima-8300-Optical-Sys-SCD_006270C_01.pdf. [Zugriff am 11 02 2022].
- [51] Edelstahl Rosswag GmbH, *Abnahmeprüfzeugnis 3.1 1.4307*, Pfinztal, 2016.
- [52] Edelstahl Rosswag GmbH, *Abnahmeprüfzeugnis 3.1 1.4550*, Pfinztal, 2016.
- [53] Edelstahl Rosswag GmbH, *Abnahmeprüfzeugnis 3.1 1.4571*, Pfinztal, 2016.
- [54] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*, Berlin: Springer Verlag, 2017.

- [55] A. Dean, D. Voss und D. Draguljić, *Design and Analysis of Experiments*, Springer Verlag, 2017.
- [56] D. Meintrup, *Angewandte Statistik*, CreateSpace, 2018.
- [57] B. Wealer, C. Gerbault, J. P. Seidel und C. von Hirschhausen, „Stand und Perspektiven des Rückbaus von Kernkraftwerken in Deutschland (»Rückbau-Monitoring 2015«),“ Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, 2015.
- [58] T.-M. Oh, G.-W. Joo, Y. Cha und G.-C. Cho, „Effect of Garnet Characteristics on Abrasive Waterjet Cutting of Hard Granite Rock,“ *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [59] N. Ebner, C. Gomes, T. Hoble, O. Thomas und M. Franzreb, „FilterCapacity Predictions for the Capture of Magnetic Microparticles by High-Gradient Magnetic Separation,“ *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Bd. 43, Nr. 5, pp. 1941 - 1949, 2007.