GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Teil I: Kurzbericht zum Verbundvorhaben**

# „Nasssiebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen“ (NaMaSK)

**FKZ: 15S9423A**

Prof. Dr.-Ing. S. Gentes, J. Chaudhry, A. Heneka, C.-O. Krauss

Ziel des Vorhabens war, das aus dem WASS-Schnitt stammende Abfallgemisch (Suspension aus Wasser, inaktiven Abrasivpartikeln und Stahlpartikeln des radioaktiven Stahls) zu trennen. Im Vorgängerprojekt „MaSK“ wurde eine Separationsanlage entwickelt, die im Batchbetrieb kleine Mengen des Korngemischs erfolgreich behandeln konnte. Im Projekt „NaMaSK“ wurde die Anlage für den kontinuierlichen Betrieb weiterentwickelt, was zur Skalierbarkeit, höheren Massenströmen und geringerem Verschleiß an der Anlage führte. Die Abrasivbehandlung in der Anlage geschieht wie folgt. Zuerst wird gesiebt, dann die feine Fraktion abfiltriert und die im Sieb zurückgehaltene grobe Fraktion mit einem Magnetfilter nachbehandelt. Durch den Siebvorgang und die magnetische Abtrennung der Stahlpartikel entsteht ein selektiertes Abrasiv, das der WASS-Anlage für einen erneuten Schnitt wieder zugeführt werden kann. So kann die Sekundärabfallmenge um 50-75% reduziert werden. Das KIT-TMB und KIT-INE hat den Einsatz von Korrosionsinhibitoren bei der Herstellung der Korngemische erprobt, um somit das Schneiden ferritischer Stähle und die Aufbereitung dieser Korngemische zu ermöglichen. Zur Erprobung des Separationsverfahrens wurden WASS-Schnitte mit ausgewählten nicht radioaktiven austenitischen und ferritischen Stählen durchgeführt. Danach wurden die einzelnen Prozessschritte, Siebung, Filtration und Magnetseparation verbessert. Dann wurden die Prozessschritte gemeinsam durchgeführt und ermittelt, welche Wiederverwendungsquote erreicht werden kann. Die Versuche mit der Separationsanlage wurden am KIT-TMB durchgeführt, so hatte bei diesen Versuchen das KIT-TMB die Federführung. Besonders die Verbesserung und Erprobung der einzelnen Prozessschritte wurden am KIT-TMB bearbeitet und zur wissenschaftlichen Verwertung genutzt.

Das Arbeitsprogramm wurde in fünf Arbeitspakete unterteilt:

AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen

AP 2: Probenherstellung mit der WASS-Anlage

AP 3: Verbesserung der Separationsanlage

AP 4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen

AP 5: Dokumentation der Ergebnisse

In der Laufzeit des Projekts NaMaSK konnte erfolgreich ein Prototyp einer kontinuierlich betriebenen Siebanlage zur Behandlung eines Abrasiv-Stahl-Korngemischs aus dem WAS-Schneiden entwickelt werden. Zudem wurde ein neuartiger Magnetfilter entwickelt, der mittels Permanentmagneten in einem geschlossenen Aufbau kontinuierlich Stahlpartikel aus einem Stoffstrom entfernen kann. Für diesen Aufbau wurden Schutzrechte angemeldet. Es wurden Verbundversuche mit der Sieb- und Magnetfiltrationsanlage durchgeführt und gezeigt, dass ein wiederverwendbares Abrasiv aus dem Abrasivabfall des WASS-Verfahrens hergestellt werden kann. Es wurden Untersuchungen zur Stahlkonzentration und Siebqualität durchgeführt. Mit der Separationsanlage wurden Abscheidegrade bezüglich des Edelstahls von 97 – 99 Massen-% erreicht. Die Fortschritte und Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden auf verschiedenen Messen und Konferenzen im In- und Ausland wie der KONTEC (2021+2023, Dresden), der DEM (2021, Avignon), Kerntechnik (2022, Leipzig) und bei dem NEA Global Forum „Rising Stars Workshop in Nuclear Education, Science, Technology and Policy“ am Massachusetts Institute of Technology (2023, Cambridge USA) veröffentlicht und einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht. Zudem wurden im Rahmen des Projekts zwei Promotionen erfolgreich abgeschlossen.

Karlsruher Institut für Technologie

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

# Teil II: Eingehende Darstellung zu

# „Nasssiebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen“ (NaMaSK)

## FKZ: 15S9423A


Autoren:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB):

- Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes
- M.Sc. Junaid Chaudhry
- Dr.-Ing. Alexander Heneka
- Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Carla-Olivia Krauss



Dezember 2024

## Inhaltsverzeichnis

**1. Einleitung ... 3**
**2. Durchgeführte Arbeiten ... 3**
2.1 AP1: Untersuchungen zu Korrosionsinhibitoren ... 3
2.2 AP2: Probenherstellung ... 3
2.2.1 Aufbau der WASS-Schneidanlage ... 3
2.2.2 Herstellung der Korngemische bei der Firma ANT ... 4
2.2.3 Schnittversuche ... 6
2.3 AP3: Verbesserung der Separationsanlage ... 7
2.3.1 Ausgangslage – Separation im Batchbetrieb ... 7
2.3.2 Überführung in den kontinuierlichen Betrieb ... 10
2.3.3 Siebkomponente ... 10
2.3.4 Recherche zu kontinuierlichen Magnetfiltern ... 12
2.3.5 Entwicklung des kontinuierlichen Magnetfilters ... 13
2.3.6 Kontinuierlicher Magnetfilter ... 13
2.3.7 Versuche ... 16
2.3.8 Verbundtest von kontinuierlichem Sieb und Magnetfilter ... 19
2.4 AP4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen ... 21
2.5 AP5: Dokumentation der Ergebnisse ... 21
**3. Aufgetretene Schwierigkeiten und Arbeitsplanänderung ... 22**
**4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 22**
**5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ... 23**
**6. Fortschreibung des Verwertungsplanes ... 23**
6.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen ... 23
6.2 Erfolgsaussichten nach Projektende ... 23
6.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussmöglichkeit ... 24
**7. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ... 24**
**8. Zusammenfassung ... 25**
**9. Veröffentlichungen ... 25**
**10. Literaturverzeichnis ... 27**

# 1. Einleitung

Bei dem Projekt „NaMaSK“ (Nasssiebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen) handelt es sich um ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über das Förderkonzept FORKA geförderte Verbundprojekt. Das Forschungsvorhaben war mit einer Laufzeit von 3 Jahren geplant, beginnend am 01.01.2021. Das Verbundvorhaben wird von den Verbundpartnern KIT-TMB und KIT-INE gemeinsam durchgeführt. Ziel der Arbeiten war es, eine Separationsanlage zur Behandlung des Abrasivabfalls aus dem Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden zu entwickeln, um ein wiederverwendbares Abrasiv herzustellen. Durch die Wiederverwendung soll die Abfallmenge reduziert werden. Die Separationsanlage soll für einen kontinuierlichen Betrieb ausgelegt und verbessert werden. Zudem sollen Schnittversuche mit Korrosionsinhibitoren und ferritischem Stahl durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob die Korrosion soweit verzögert werden kann, um den Abrasivabfall in der Separationsanlage behandeln zu können.

# 2. Durchgeführte Arbeiten

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten in Arbeitspakete gegliedert dargestellt. In Kapitel 2 wird auf die aufgetretenen Schwierigkeiten und die Arbeitsplanänderung eingegangen.

Es werden ausschließlich die Arbeiten des KIT-TMB beschrieben. Nach der Arbeitsplanänderung gelten für das KIT-TMB und KIT-INE unterschiedliche Projektlaufzeiten und bestimmte Arbeitspakete werden von den Projektpartnern getrennt bearbeitet. Diese Arbeitspakete werden in den Berichten des jeweils zuständigen Projektpartners beschrieben.

## 2.1 AP1: Untersuchungen zu Korrosionsinhibitoren

Die Untersuchungen zu Korrosionsinhibitoren (AP1) wurden vollständig vom Projektpartner KIT-INE durchgeführt und werden im Abschlussbericht des KIT-INE beschrieben.

## 2.2 AP2: Probenherstellung

### 2.2.1 Aufbau der WASS-Schneidanlage

Beim Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneiden (WASS) wird eine Suspension aus Wasser unter hohem Druck und scharfkantigen Abrasivpartikeln für den Schneidmechanismus eingesetzt. Das Wasser aus der Hochdruckpumpe und die Abrasivpartikel werden über getrennte Zuführungspunkte in die Anlage gegeben. Sie werden in der „Abrasive Mixing Unit“ (AMU) gemischt und in Suspension gebracht. Die Wasser-Abrasiv-Suspension wird durch die Schneiddüse gepresst. Die potentielle Energie des Drucks wird in der Düse in einen Schneidstrahl umgewandelt, der mit fast doppelter Schallgeschwindigkeit austritt. Die wichtigen Prozessparameter sind der Pumpendruck, der Düsenabstand, der Düsendurchmesser, die Qualität des Abrasivmittels und die Vorschubgeschwindigkeit des Schneidstrahls. Die Komponenten der WASS-Anlage sind in Abbildung 1 dargestellt [1].

*Abbildung 1: Prinzip des WASS Verfahrens [1]*

### 2.2.2 **Herstellung der Korngemische bei der Firma ANT**

Für die Herstellung der Korngemischproben wurde die Firma ANT Applied New Technologies AG in Lübeck ausgewählt. Das Unternehmen stellte sein Fachwissen mit viel Engagement und Unterstützung zur Verfügung. Für die Probenmaterialherstellung wurde ein Vierkantstahl mit den Abmessungen 100 x 100 x 550 mm aus ferritischem Stahl 1.6310 ausgewählt.

Die Experten von ANT mit langjähriger Betriebserfahrung entschieden sich für das Abrasivmittel „80 HPX“ von Barton (USA, Glens Falls, NY 12801'). Es handelt sich um einen Granatsand, dessen Hauptbestandteile die Minerale Almandin und Pyropgranat sind und weltweit als Schneidmittel verwendet wird [2].

*Abbildung 2: Ferritischer Vierkantstahl 1.6310 (20MnMoNi5-5)*

Eine WASS-Anlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Hauptkomponenten:

- Hochdruckpumpe: Erzeugt den erforderlichen Hochdruck 1000-2000 bar für den Wasserstrahl.
- Abrasivzumischeinheit (AMU): Hier wird das feinkörnige, scharfkantige Abrasivmittel (z.B. Granat) dem Hochdruckwasserstrahl beigemischt. Das Wasser dient als Träger für das Abrasiv.
- Strahldüse: Die Wasser-Abrasiv-Suspension wird durch eine feine Düse (üblicherweise 0,5 - 0,65 mm Durchmesser) beschleunigt und gebündelt.

- Prozessregler: Die Strahldüse ist auf einem Manipulatorsystem mit drei Freiheitsgraden montiert, um sie präzise über das zu schneidende Material zu führen.

Zum Schneiden des niedrig legierten Stahls musste ein Aufbau gewählt werden, der das Fixieren der Vierkantstähle in einem Schneidbecken und das Auffangen der Korngemische ermöglicht. Es wurde ein Schneidbecken (Maße ca. 600 x 800 x 800 mm, Gesamtvolumen ca. 380 Liter) gebaut mit einer Halterung für den Vierkantstahl. Das gesamte System wurde auf einem großen Schneidtisch platziert, der eine Abdeckung für das Schneiden unter Wasser bot.

*Abbildung 3: Schneidbecken und Schneidtisch*

Zur Führung der Strahldüse wurde ein linearer Manipulator eingesetzt, der eine vollständige Steuerung des Systems ermöglichte. Die Hochdruckpumpe, die Abrasivzumischeinheit und die Schneidanlage „Consus 1500“ sind in Abbildung 4 dargestellt.

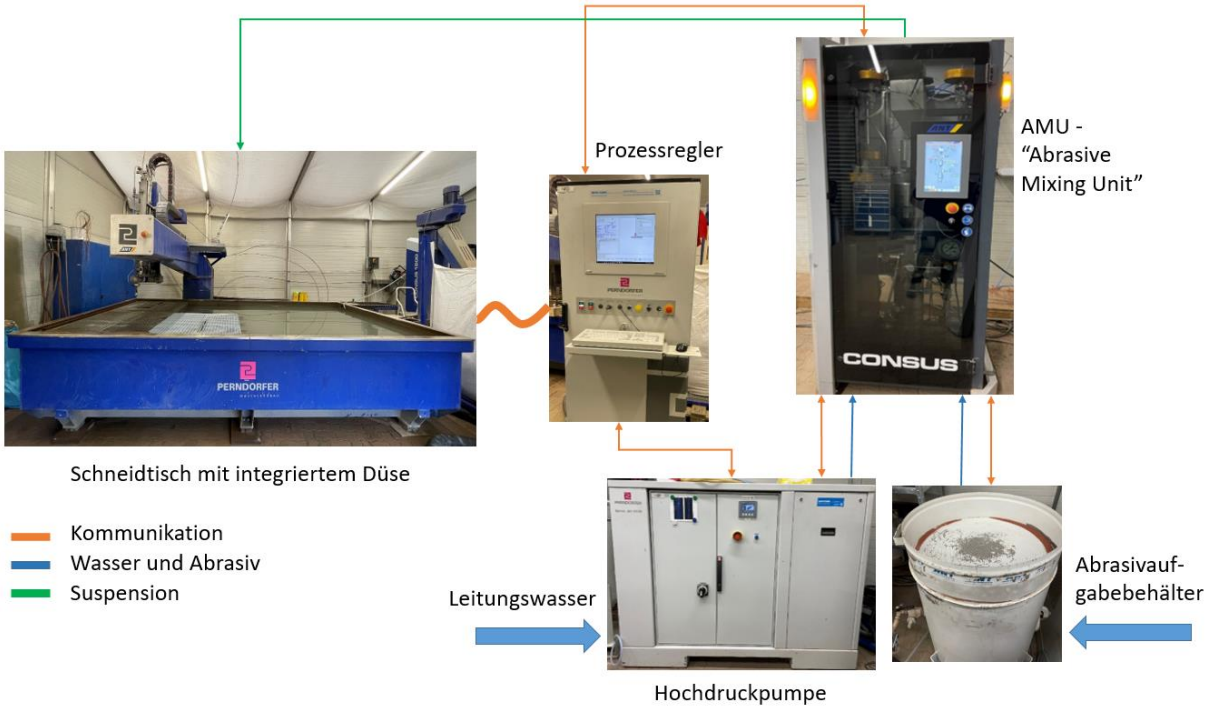


*Abbildung 4: WASS-Anlage „Consus“ zur Herstellung der Korngemische bei ANT (Lübeck)*

### 2.2.3 **Schnittversuche**

Zur Durchführung der geplanten inaktiven Trennversuche mit der kleinskaligen Na-MaSK Anlage wurden Korngemische bestehend aus den Abrasivpartikeln des Schneidmittels (80 HPX) und den ferritischen Stahlpartikeln aus dem Schnittfugenmaterial des Stahls K4 (Werkstoff Nr.: 1.6310) hergestellt. Die Schnitte wurden auf dem Werksgelände der Firma ANT in Lübeck von ANT-Mitarbeitern unter Beteiligung zweier Mitarbeiter aus dem KIT-TMB und einem Mitarbeiter aus dem KIT-INE im November 2022 ausgeführt. Die Vorgehensweise zur Herstellung der Korngemische wurde festgelegt und der Stahl K4 geschnitten. Zum Auffangen der Suspension wurde das Schneidbecken mit einem Volumen von ca. 100 Litern benutzt. Nach dem Schnitt wurden die Wasserproben aus dem Schneidbehälter entnommen. Das Wasser aus dem Schneidbehälter wurde zusammen mit den Abrasiv- und Stahlpartikeln mit Schaufel in die bereitstehenden 90 l Plastikwannen gefüllt. Das Schnittstück wurde aus dem Schneidbecken entnommen, abgespült und gekennzeichnet. Der Schneidbehälter wurde mehrfach nachgespült. Nach Sedimentation der Abrasiv- und Stahlpartikel auf dem Boden der Kunststoffwanne wurde das überstehende Wasser vorsichtig abgeschüttet und die sedimentierten Partikel in die Schraubdeckelbehälter mit der Kennzeichnung „K4, 26.11.2022, 1.4450“ gefüllt.

*Abbildung 5: Abfüllen des Korngemischs in Schraubdeckelbehälter*

## 2.3 **AP3: Verbesserung der Separationsanlage**

### 2.3.1 **Ausgangslage – Separation im Batchbetrieb**

Die in diesem Forschungsprojekt entwickelte NaMaSK-Separationsanlage ist eine Weiterentwicklung der MaSK-Separationsanlage. Im Folgenden wird die Ausgangslage und das Funktionsprinzip der MaSK-Anlage beschrieben und anschließend die Weiterentwicklung erklärt.

Beim Schnitt von radioaktiven Edelstahlkomponenten mit dem WASS-Verfahren vermischt sich das Abrasiv mit den radioaktiven Stahlpartikeln des Schnittfugenmaterials, wodurch sich die Menge des radioaktiven Abfalls stark vergrößert. Da ein Teil des Abrasivs nach dem WAS-Schnitt noch intakt ist, ist die Wiederverwendung von Abrasiv eine Möglichkeit, die Menge dieses Sekundärabfalls zu reduzieren. Dazu müssen die intakten Abrasivpartikel aus dem Abrasivabfall abgetrennt werden. Es 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 deponiert. 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 aufgrund der Radioaktivität die Handhabung und können zudem 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 Partikelfraktion, welche geeignet ist, in der WASS-Anlage für einen weiteren Schnitt verwendet zu werden. Dieses Aufbereiten und Wiederverwenden kann mehrmals geschehen und ist bereits in konventionellen WASS-Anwendungen wie z.B. der Fertigung verbreitet [3], [4]. Bei jedem Schnitt werden Abrasivpartikel zerkleinert und der Anteil an wiederverwendbarem Abrasiv verringert sich mit jedem Wiederverwendungszyklus. Die Menge an eingespartem Sekundärabfall hängt ab von der Menge des wiederverwendeten Abrasivs.

Die Verfahren der Siebung, Magnetfiltration und Beutelfiltration wurden in einer kompakten Versuchsanlage für kleine Probenmengen umgesetzt. 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 bis zu 10 Massen-% in der Suspension kann von der Anlage behandelt werden. Die Suspension wird mittels einer druckluftbetriebenen Doppelmembranpumpe durch die Rohrleitungen gepumpt. 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 und Verstopfungen 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 Förderrohre bzw. Rücklaufrohre von denen die Suspension aus oder in den Behälter gefördert werden kann.

Im Folgenden wird der Ablauf der Separation im Batch-Betrieb anhand der Abbildung 6 erklärt.

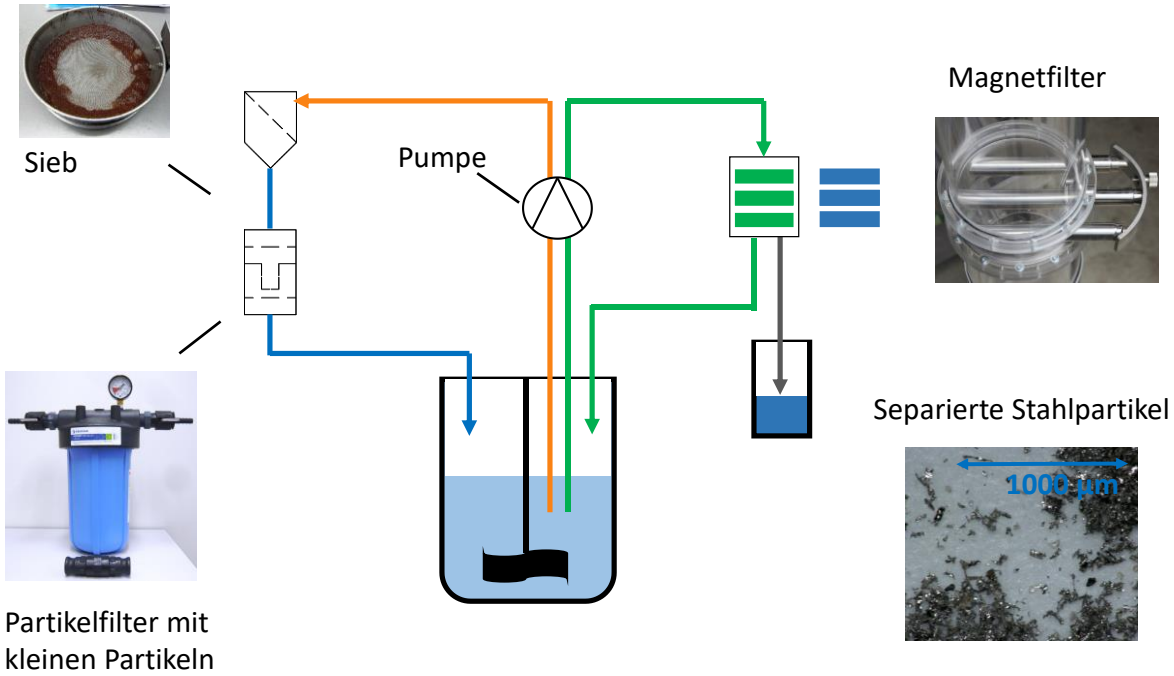


*Abbildung 6: Schematische Darstellung des Prozesses*

Der erste Verfahrensschritt ist die Nasssiebung. Das Probenmaterial wird im Rührbehälter in Suspension gebracht und mit einer Membranpumpe auf ein Vibrationssieb gepumpt. Das Grobgut wird auf dem Siebboden zurückgehalten, während das Feingut das Sieb passiert und am Gehäuseboden abgepumpt wird. Das Feingut wird direkt in

einen Beutelfilter gepumpt und dort gesammelt. Klares Wasser fließt aus dem Beutelfilter in den Rührbehälter zurück.

Zu Beginn des Siebvorgangs befinden sich alle Partikel des Probenmaterials 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.

Der Siebvorgang wird nach etwa 20 Minuten gestoppt, wenn sich annährend alle Partikel entweder als Grobgut im Sieb oder als Feingut im Beutelfilter befinden. 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. Anschließend werden die Stahlpartikel aus dem Magnetfilter gespült 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 7 zeigt die Separationsanlage mit Bezeichnung der einzelnen Komponenten.

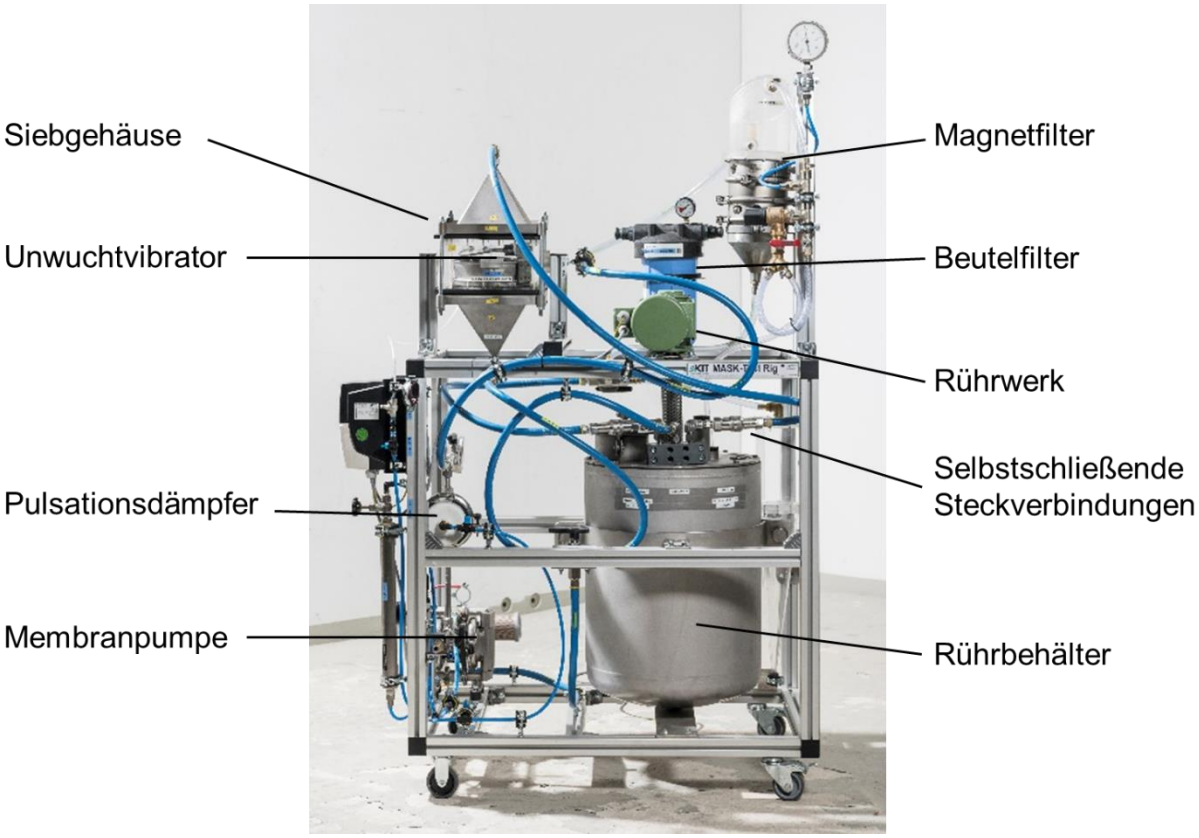


*Abbildung 7: Separationsanlage mit Bezeichnung der Komponenten*

Mit der Separationsanlage wurden Sieb- und Magnetseparationsversuche mit verschiedenen Maschenweiten und Probenmaterialien durchgeführt. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden chemische Analysen zur Bestimmung der Stahlseparation, sowie

Siebanalysen für den Siebfehler durchgeführt. Der Siebfehler des Fehlunterkorns, welcher den Massenanteil der feinen Partikel im Grobgut beschreibt, betrug bei Maschenweiten zwischen 150 µm und 250 µm zwischen ca. 2 - 7 %. Die Qualität der Siebung ist somit sehr gut, da das neue Abrasiv nach Herstellerangaben [5] einen Siebfehler von etwa 15 % besitzt. Das bedeutet, dass das wiederverwendbare Abrasiv ohne Zumischung anderer Abrasive direkt in der Schneidanlage verwendet werden kann. Eine Siebung mit relevanten Maschenweiten von 125 µm bzw. 180 µm führen zu Wiederverwendunganteilen von etwa 50 % bzw. 75 % beim ersten Schritt der Abrasivaufbereitung. Die Stahlkonzentration nach der Magnetseparation liegt bei verwendeten Maschenweiten der Siebung von 150 – 250 µm zwischen ca. 0,01 – 0,06 Massen-%. Der Abscheidegrad bezüglich des Stahls im Gesamtprozess liegt somit zwischen ca. 97-99 % [6].

### 2.3.2 **Überführung in den kontinuierlichen Betrieb**

Mit der Separationsanlage konnte der Prozess der Siebung und Magnetseparation verbessert und untersucht werden. Der Aufbau der Anlage im Batchbetrieb eignet sich besonders für die Untersuchungen, da die Probenmenge begrenzt und die Probennahme einfach ist. Nach der Analyse des Prozesses ist jedoch die Überführung der Anlage in einen kontinuierlich laufenden Betrieb notwendig, um die Anlagenentwicklung weiterzuführen. Hierfür sind neben der Änderung des Fließschemas grundlegende Änderungen der Komponenten nötig. In Abbildung 8 ist der Fließschema des kontinuierlichen Prozesses dargestellt.

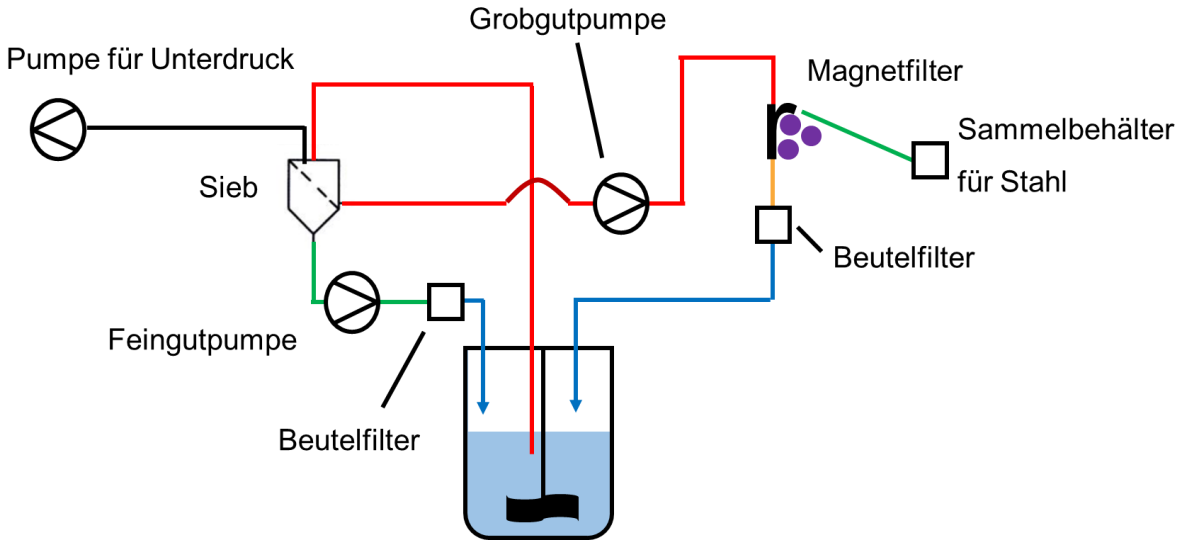


*Abbildung 8: Fließschema der kontinuierlich betriebenen Separationsanlage*

Da die Komponenten Sieb und Magnetfilter bisher speziell für den Batchbetrieb ausgelegt waren, mussten sie für den kontinuierlichen Betrieb neu entwickelt werden. Im Folgenden wird die Entwicklung des Siebs genauer beschrieben.

### 2.3.3 **Siebkomponente**

Im Batchbetrieb wurde das Grobgut durch Drehen des Siebs entfernt. Kontinuierlicher Betrieb bedeutet, dass das zu siebende Material kontinuierlich auf das Sieb gepumpt wird, sowie dass das Grobgut und Feingut kontinuierlich abgepumpt werden können.

Eine Herausforderung war die Stoffströme nach der Separation effektiv abzupumpen, um Akkumulation im Gehäuse zu vermeiden. In einem ersten Siebaufbau konnte das Grobgut von oben erfolgreich aus dem Sieb gepumpt werden. Das Feingut sollte sich auf dem Boden des Gehäuses ansammeln und von dort abgepumpt werden. Das Feingut konnte auf diese Weise jedoch nicht erfolgreich entfernt werden (siehe Abbildung 9).

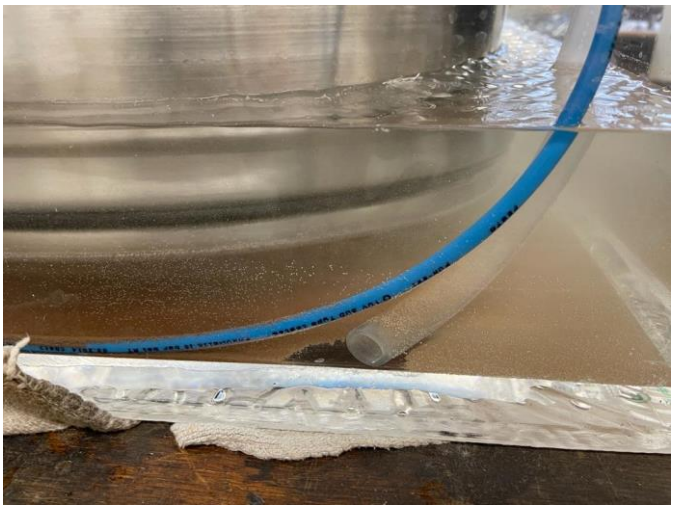

*Abbildung 9: Sedimentiertes Feingut am Gehäuseboden*

Um dieses Problem zu lösen wurde ein weiterer Siebaufbau getestet, nach einer Idee des Projektpartners KIT-INE (siehe Abbildung 10). Bei diesem Aufbau wird die Suspension auf das Sieb gepumpt und durch Vibration das Grobgut über den niedrigen Siebrand befördert. Dort fällt es auf den Gehäuseboden und wird dort an einem trichterförmigen Ausgang abgepumpt. Unterhalb des Siebs ist ebenfalls ein Trichter angebracht an dessen Ende das Feingut abgepumpt wird.

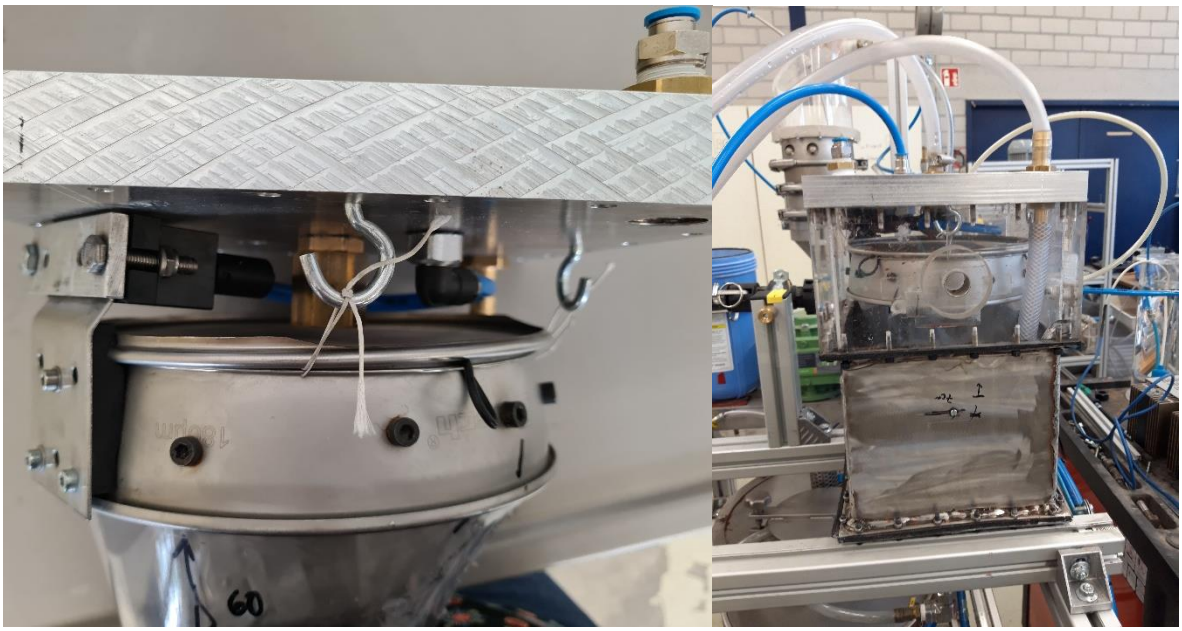

*Abbildung 10: Siebaufbau des Projektpartners KIT-INE, Siebung im Überdruck*

Mit diesem Aufbau konnte das Feingut vollständig und effektiv entfernt werden. Das Abpumpen des Grobguts war jedoch aufgrund des niedrigen Wasserspiegels am Gehäuseboden nicht möglich und eine Steuerung des Betriebszustands somit nicht möglich.

Die Erkenntnisse beider Aufbauten wurden genutzt um die finale Siebkomponente zu konstruieren. Die funktionierende Grobgutentfernung des ersten Siebs und das Prinzip der Feingutentfernung des zweiten Siebs wurden kombiniert. Das Ergebnis ist in Abbildung 11 gezeigt.

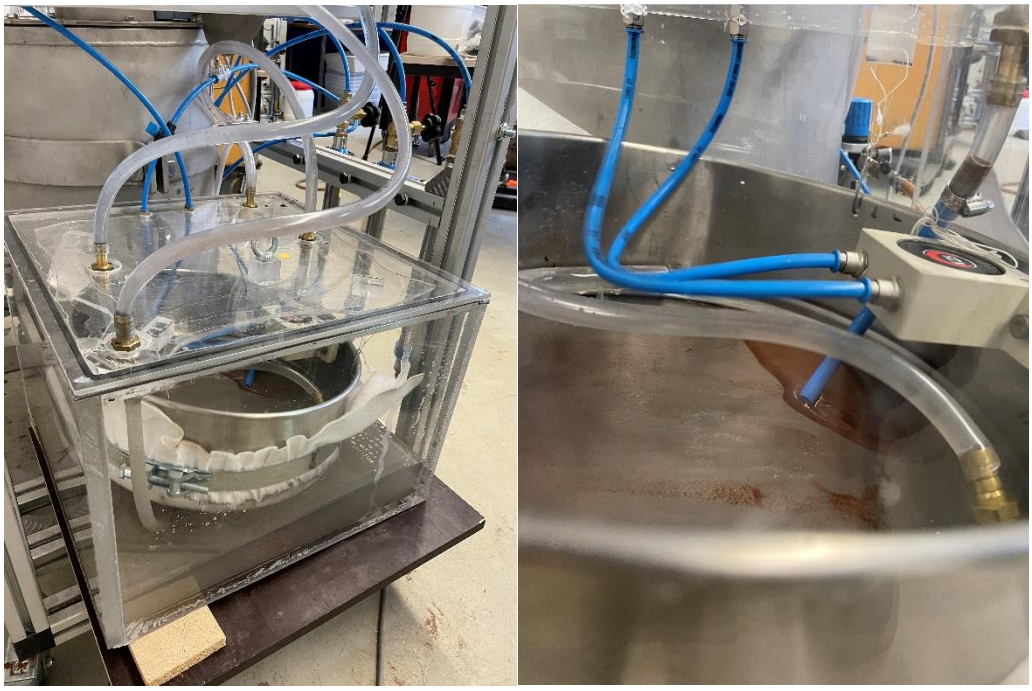

*Abbildung 11: Finaler Aufbau des kontinuierlich, im Unterdruck betrieben Siebs (links); Absaugung des Grobguts (rechts)*

Das Sieb wird im Unterdruck betrieben. Die Membranpumpen saugen konstant Grob- und Feingut aus dem Gehäuse ab. Eine weitere Membranpumpe entfernt Luft aus dem Gehäuse und sorgt so für einen Unterdruck, wodurch über eine Steigleitung passiv Suspension vom Rührbehälter auf das Sieb gezogen wird. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass im Fall einer Leckage der Prozess stoppt, ohne dass Flüssigkeit austritt.

Mit der kontinuierlich betriebenen Separationsanlage wurden Siebversuche durchgeführt und analysiert. Auf Basis der Versuche im Vorgängerprojekt „MaSK“ wurde hierfür die Maschenweite 180 µm gewählt. Untersucht wurde der Siebfehler des Fehlunterkorns. Dieser beschreibt den Massenanteil an kleinen, nicht abgetrennten Partikeln im Grobgut. Dieser lag bei den Siebversuchen unter 5 Massen-%. Der angestrebte Wert liegt bei unter 10 Massen-%, was etwa dem Siebfehler des neuen Abrasivs entspricht [5], [6]. Das aufbereitete Abrasiv kann aufgrund des geringen Siebfehlers direkt in der WASS-Anlage verwendet werden.

### 2.3.4 **Recherche zu kontinuierlichen Magnetfiltern**

Es wurde eine Recherche zu kontinuierlichen Magnetfilter durchgeführt, dabei sollte dieser sowohl geschlossen sein, als auch kontinuierlich betrieben werden können. Die Recherche ergab, dass es derzeit kein System gibt, das diese Kriterien erfüllt.

### 2.3.5 **Entwicklung des kontinuierlichen Magnetfilters**

Nach der erfolglosen Recherche zu kontinuierlichen Magnetfilter wurde ein eigenes Magnetfiltersystem entwickelt, das die Kriterien erfüllt. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 13 dargestellt.

Zu Beginn wurde die Funktionalität mit einem einfachen Aufbau an der bestehenden Separationsanlage getestet. Der Aufbau ist in Abbildung 12 abgebildet. Hierbei wurde für die Rotationsbewegung eine Handkurbel verwendet. Mit diesem Aufbau konnte gezeigt werden, dass der neu entwickelte Magnetfilter funktioniert und Partikel mit magnetischen Eigenschaften separieren kann.

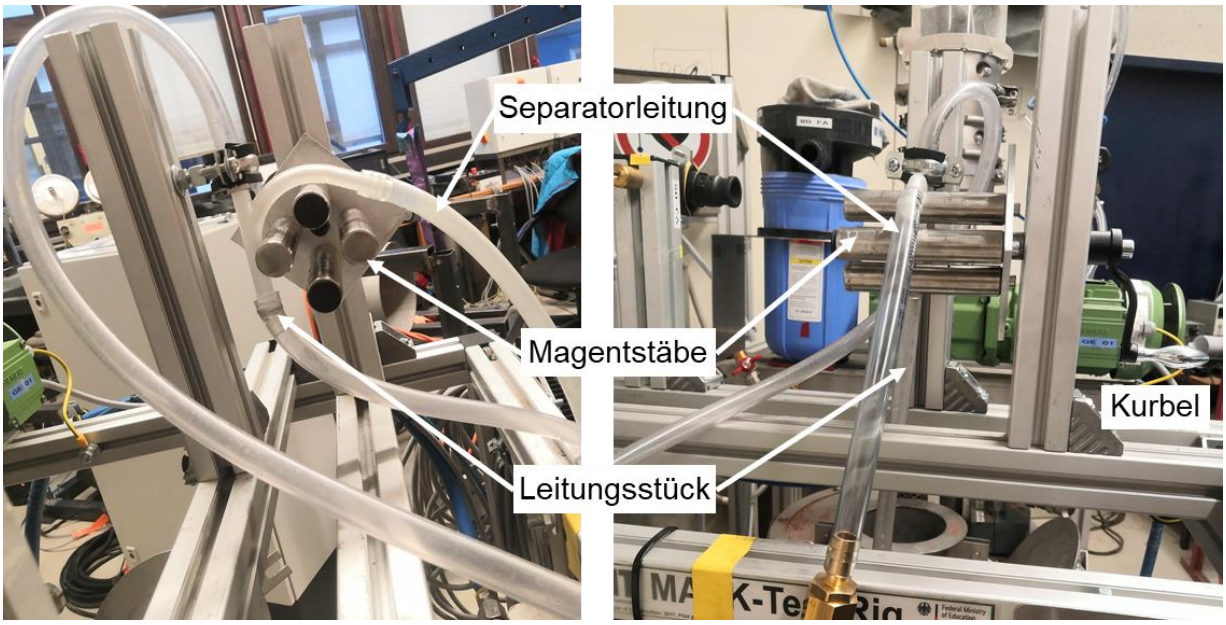


*Abbildung 12: Magnetfilter mit Handkurbel*

### 2.3.6 **Kontinuierlicher Magnetfilter**

#### Aufbau und Funktionsweise

Der Magnetfilter besteht aus einem Schlauchteiler, der als r-Teiler bezeichnet wird. Dieser r-Teiler besteht aus einem Leitungsstück, in dem die Suspension den Magnetfilter passiert, und einer Separatorleitung, die mit einem ruhenden Fluid befüllt ist. Entlang des Leitungsstücks und der Separatorleitung bewegen sich Magnetstäbe, die so positioniert sind, dass das Magnetfeldmaximum die Innenseiten des Leitungsstücks und der Separatorleitung berührt. Während ein Partikelgemisch durch das Leitungsstück fließt, durchläuft es das Magnetfeld der Magnetstäbe. Dies bewirkt, dass die magnetischen Partikel von dem Magnetfeld angezogen werden. Diese werden dann durch die Rotation der Magnetstäbe in die Separatorleitung abgeführt. Im Falle einer Separation eines Partikelgemischs durchlaufen die nichtmagnetischen Partikel das Leitungsstück vom Einlass bis zum Auslauf. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 13 dargestellt.

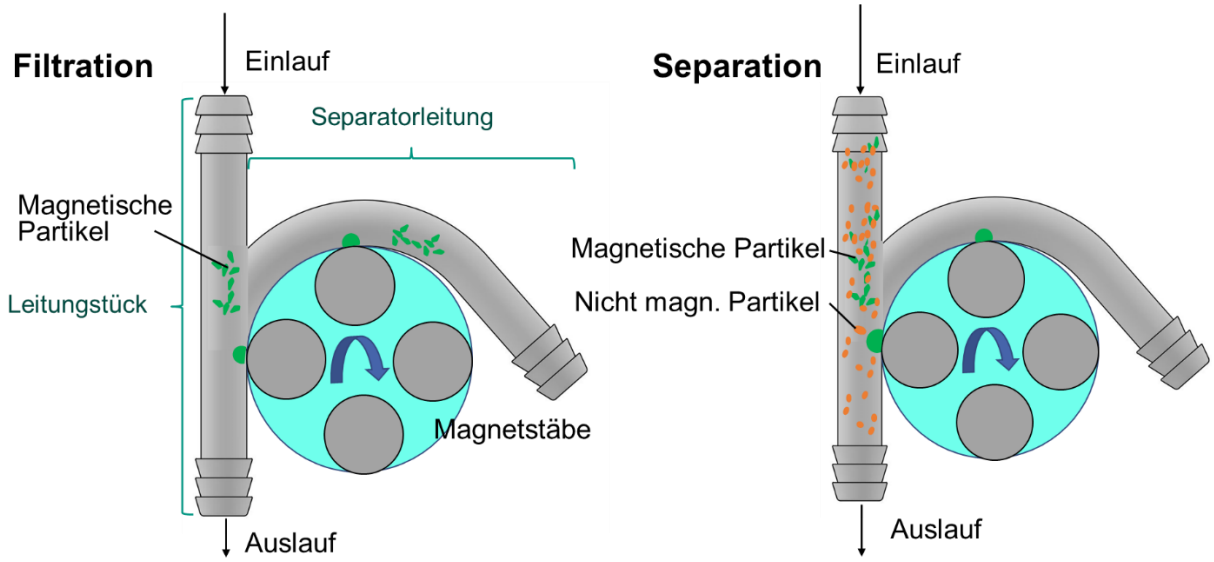


*Abbildung 13: Funktionsprinzip des kontinuierlichen Magnetfilters (Links: Filtration, rechts: Separation)*

In Abbildung 14 ist links die technische Umsetzung des Magnetfilters zu sehen. Man sieht vorne den r-Teiler. Derzeit ist dieses Bauteil ein 3D-Druck aus transparentem Material, wie man in Abbildung 14 rechts auf der Fotografie erkennen kann. Dies ermöglicht eine schnelle, optische, qualitative Beurteilung der Versuche. In der Rundung des r-Teilers sind die Magneten angebracht. Diese Magnete sind auf einer Platte verschraubt. Durch eine Welle und einen Motor wird die Platte und die Magnete rotiert. Der Motor ist ein Schrittmotor, wodurch die Geschwindigkeit präzise eingestellt werden kann.

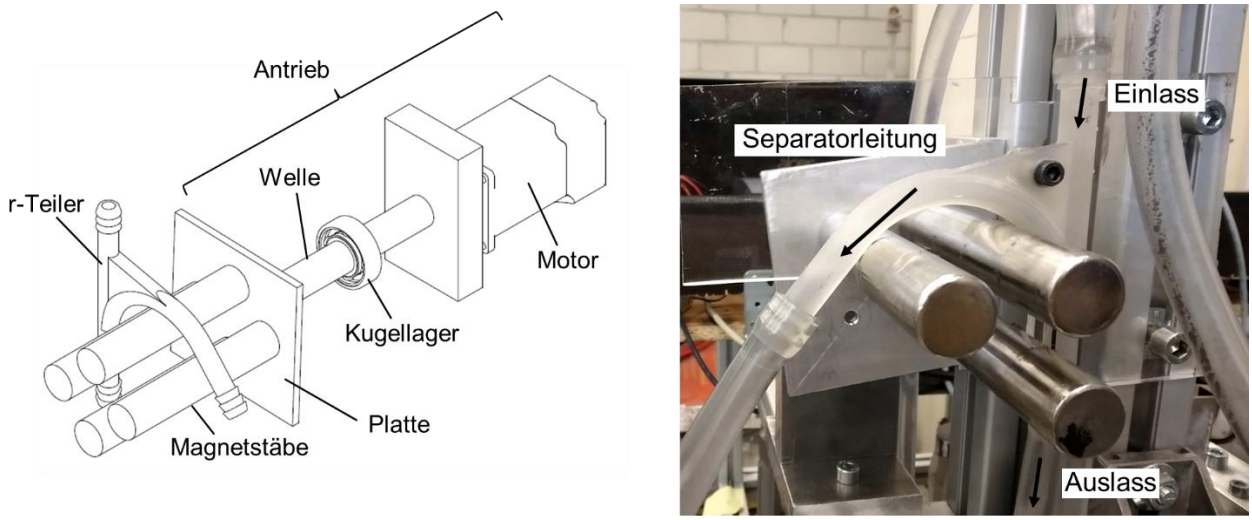


*Abbildung 14: Links: Technische Umsetzung des Magnetfilters. Rechts: Fotografie des Magnetfilters*

### Entwicklung des r-Teilers

In Abbildung 15 sind die CAD-Zeichnungen des r-Teilers mit fortlaufendem Projekt dargestellt. Diese wurden für die Separationsversuche mittels 3D-Druck erstellt und verwendet und nach der Erprobung wurde der jeweilige r-Teiler verbessert, im Folgenden werden diese mit Version 1, 2, 3 und 4 bezeichnet. Version 1 weist im Vergleich zu Version 2 eine geringere Krümmung in der Separatorleitung in dem Bereich auf, wo die Partikel das Magnetfeld verlassen. In Version 1 sammelten sich die separierten

Partikel an diesem Punkt und wurden erst nach Überladung weiter in die Separatorleitung befördert. Version 2 löste diese Einschränkung. Version 2 hatte eine kürzere Leitung am Ende der Separatorleitung, wo der Schlauch an der Separatortleitung angebracht wird, als Version 3. Dies führte dazu, dass die rotierenden Magnetstäbe mit dem Schlauch an der Separatorleitung in Kontakt kamen. Bei Version 4 wurde ein Zwischenstück zwischen Leitungsstück und Separatorleitung eingefügt. Dies stabilisierte den r-Teiler und ermöglichte eine einfachere Anbringung am Magnetfilter (siehe Abbildung 14, rechtes Bild).

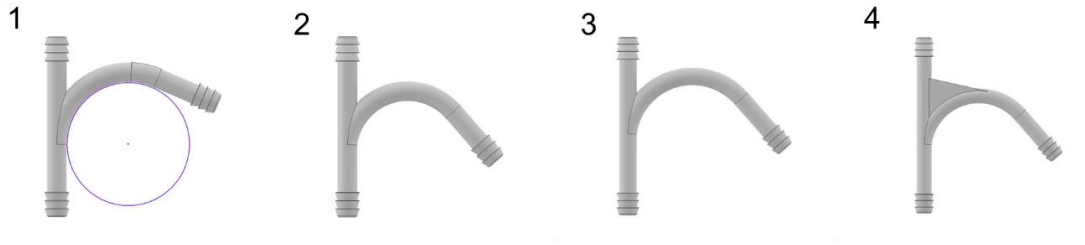


*Abbildung 15: Verschiedene Geometrien des r-Teilers*

**Strömungssimulation**

In Abbildung 16 ist das Ergebnis der numerischen Strömungsanalyse graphisch dargestellt. Es wurde mit einer Eintrittsgeschwindigkeit von 3,5 m/s berechnet. Man sieht im Leitungsstück die zu erwartende turbulente Rohrströmung. In dem Bereich der Separatorleitung gibt es dann ebenfalls am Übergang eine Strömung in der Separatorleitung. Dies konnte man auch an den Partikelbewegungen während der Separationsprozesse beobachten. Die Separatorleitung an sich weist keine Strömung auf.

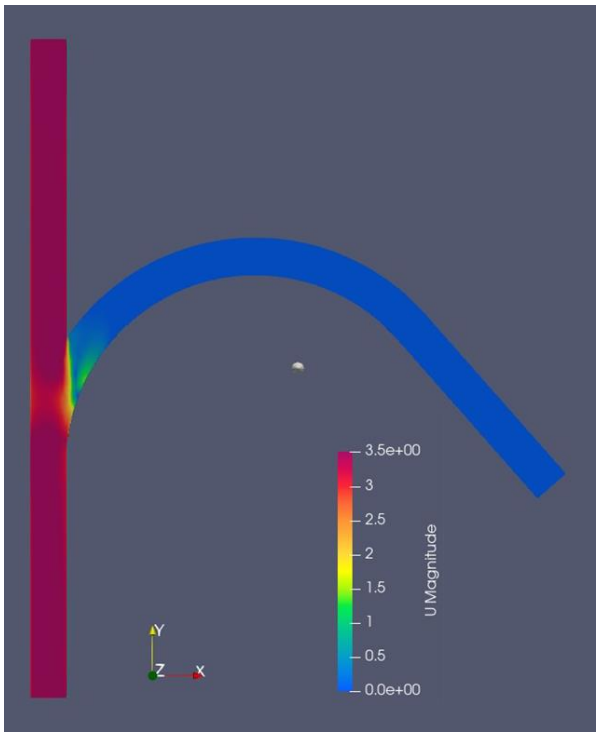


*Abbildung 16: CFD-Analyse der r-Teilers*

### 2.3.7 **Versuche**

**Experimente mit Stahlpartikeln (im Batchbetrieb)**

In dem Rührbehälter wird mithilfe des Rührers eine homogene Suspension aus Stahlpartikeln und Wasser erzeugt. Diese Suspension wird mithilfe einer Membranpumpe durch den Magnetfilter gepumpt. Die nach der Separation übrige Suspension wird wieder in den Rührbehälter zurückgeführt, d.h. die Anlage wurde zur Bestimmung des Abscheidegrads im Batchbetrieb betrieben. In Abbildung 17 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

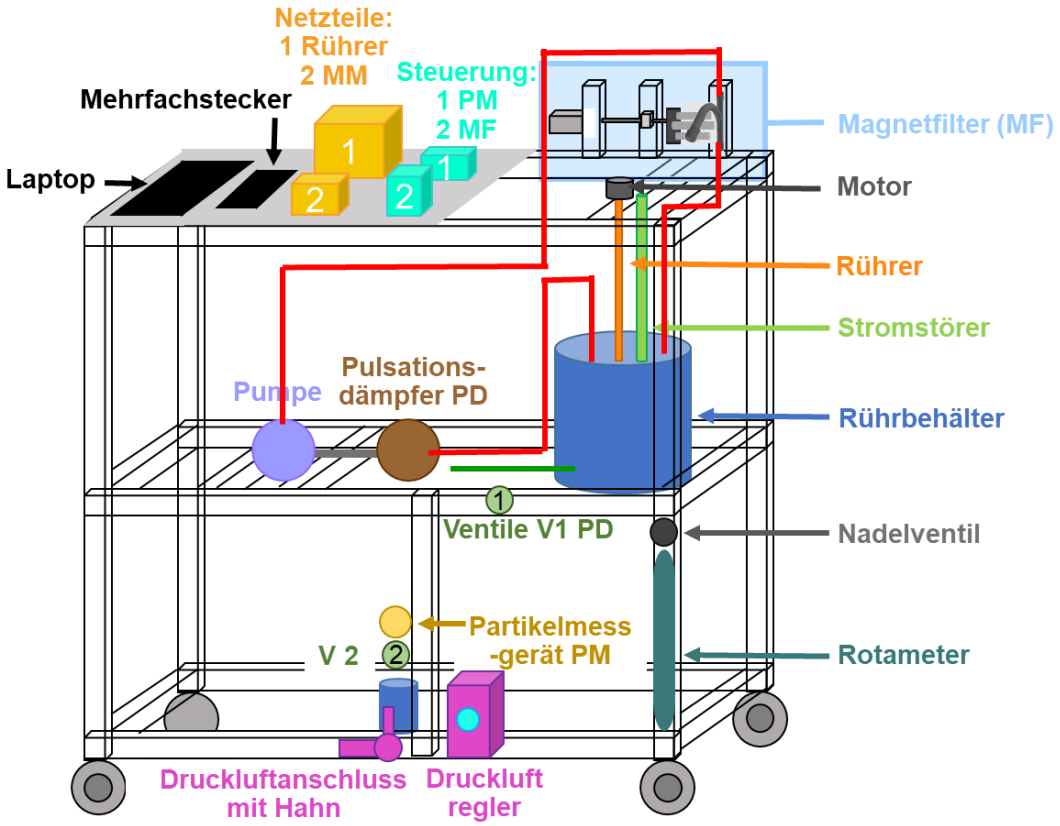


*Abbildung 17: Versuchsaufbau kontinuierlicher Magnetfilter*

Zur Bestimmung der Abscheidemenge wurde ein Partikelmessgerät verwendet. Dieses misst, wie viele Partikel in einem bestimmten Größenspektrum in einer vorgegebenen Zeit das Messgerät passieren.

Zu Beginn wurde der Rührbehälter mit 10 l destilliertem Wasser und 5 g Stahlpartikeln befüllt. Dieses wurde in eine homogene Suspension gebracht und durchlief das Partikelmessgerät. Das bestimmte Volumen der Partikel wurde den 5 g Stahlpartikel gleichgesetzt. Nun liefen fünf Separationszyklen mit einer Dauer von 20 Minuten ab. Nach jedem Separationszyklus wurde wieder eine Partikelmessung durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnte die vom Magnetfilter separierte Stahlpartikelmenge bestimmt werden.

**Ergebnisse**

In Abbildung 18 ist die Abnahme der Stahlpartikel über die Zeit dargestellt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den theoretischen Ergebnissen, erhält man, dass der Magnetfilter mit einem Durchlauf zwischen 0,5 -1 % der Stahlpartikel filtern kann.

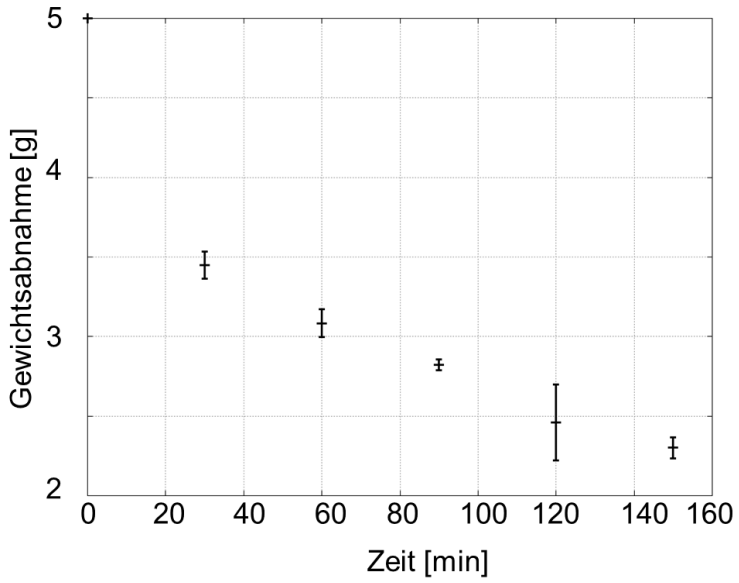


*Abbildung 18: Abnahme der Stahlpartikel in Gramm aufgetragen über die Zeit in Minuten*

Anmerkung: Man muss beim dem Ergebnis erwähnen, dass der Magnetfilter mit Überladung betrieben wurde. Dieses wurde so durchgeführt, da das verwendete Partikelmessgerät in niedriger Beladungen leider keine verwertbaren Ergebnisse liefert. Zudem besteht gerade bei der Geometrie des r-Teilers viel Verbesserungspotential.

**Experimente mit Abrasiv**

Zur Erprobung, bei welcher Magnetfeldstärke Abrasivpartikel und Stahlpartikel mit dem kontinuierlichen Magnetfilter angezogen werden, wurden vier Magnetstäbe mit unterschiedlicher Magnetfeldstärke angeschafft und getestet. Die Variation der Magnetfeldstärke beträgt 1000 Gauss, 3000 Gauss, 5000 Gauss und 10000 Gauss, zudem wurden die Magnetstäbe, die von Beginn an für den kontinuierlichen Magnetfilter verwendet (>10000 Gauss), erprobt.

Für die Versuchsdurchführung wurden die Magnetstäbe einzeln auf die Platte des kontinuierlichen Magnetfilters gebracht. Danach wurde der Magnetfilter mit einer Abrasiv-Wasser- Suspension und einer Stahl-Wasser-Suspension durchlaufen. Es wurde dabei das Verhalten der Partikel bei rotierendem und am Leitungsstück stehenden Magnetstab, beobachtet und dokumentiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 dargestellt.

*Abbildung 19: Aufbau zur Erprobung des Einflusses der Magnetfeldstärke auf die Separation*

Ergebnis: Bei allen Magnetfeldstärken werden keine Abrasiv-Partikel angezogen auch bei ruhenden Magnetstab, wohingegen bei den Stahlpartikeln sich bis 3000 Gauss Partikel vom Magnetfilter separiert werden konnten. Die Menge an separierten Stahlpartikeln nahm aber mit steigender Magnetfeldstärke deutlich zu.

Um zu zeigen, dass auch das Abrasiv magnetische Eigenschaften besitzt, wurde trockenes Abrasiv über die Magnetstäbe gegeben und beobachtet, ab welcher Magnetfeldstärke die Partikel sich nicht mehr nach dem Magnetfeld auf dem Magnetstab anordnen.

In Abbildung 20 ist das Ergebnis dargestellt. Man sieht deutlich, dass die Abrasivpartikel bis 3000 Gauss durch das Magnetfeld beeinflusst werden und dass der Einfluss mit zunehmender Magnetfeldstärke ebenfalls wächst.

*Abbildung 20: Verhalten von getrocknetem Abrasiv, bei variierender Magnetfeldstärke*

### 2.3.8 **Verbundtest von kontinuierlichem Sieb und Magnetfilter**

**Kontinuierliches Sieb**

Mit dem kontinuierlichen Sieb wurden drei Proben zur Versuchsdurchführung mit dem kontinuierlichen Magnetfilter erstellt.

**Kontinuierlicher Magnetfilter**

Der Versuchsstand des kontinuierlichen Magnetfilters wurde für die Versuche vorbereitet. Unter anderem mussten die Komponenten von den aus den vorherigen Versuchen stammenden Stahlpartikel gereinigt werden. Hierfür wurde die ganze Anlage mehrmals mit Wasser gespült. Bei der Durchführung des ersten Versuchs sah man nach kurzer Zeit, dass die Anlage nicht ausreichend gereinigt wurde, da immer mehr Stahlpartikel in dem Abrasiv-Stahl-Gemisch zu sehen waren. Der Versuch wurde abgebrochen und die einzelnen Komponenten auseinander gebaut und einzeln gereinigt. In den darauffolgenden Versuchen zogen die Pumpe und der Pulsationsdämpfer Luft, wodurch sich auch im r-Teiler Luftblasen ansammelten und die Separation nicht weiter durchführbar war. Die Proben aus dem kontinuierlichen Sieb waren verbraucht und die Herstellung neuer Proben mit dem kontinuierlichen Sieb hätte zu viel Zeit in Anspruch genommen, so dass bereits vorhandene Proben aus den Siebanalysen verwendet wurden.

Das Probenmaterial stammt aus der Charakterisierung des Abrasivs [6], dabei wurde Stahl 1.4550 mit dem WASS-Verfahren geschnitten. Es wurde die Fraktion >250 µm verwendet. Diese Fraktion weist einen Stahlgehalt von ca. 0,05 Massen-% auf.

Dieses Probenmaterial (ca. 870 g) wurde der Separationsanlage mit dem kontinuierlichen Magnetfilter beigefügt. Die Separation wurde über eine Dauer von 4,5 Stunden durchgeführt, wobei auch bei diesem Experiment festgestellt wurde, dass die Anlage

noch immer Verunreinigungen von Stahlpartikeln aus den vorherigen Versuchen aufwies, die dann während der Versuchsdurchführung in die Suspension gelangten. Es wurden nach 38, 100 und 274 Minuten Proben aus dem Rührbehälter entnommen. Diese wurden getrocknet und chemisch und mikroskopisch analysiert.

**Ergebnisse**

Die Ergebnisse der chemischen Analyse sind in Tabelle 1 dargestellt. Man sieht, dass es zu Beginn (nach 38 Minuten) zu einer deutlichen Reduktion der Stahlkonzentration gekommen ist. Der kontinuierliche Magnetfilter kann also den Stahlgehalt fast um 1/3 reduzieren. Bei den darauffolgenden Proben nimmt der Stahlgehalt wieder zu. Dies liegt an den Verunreinigungen aus den vorherigen Versuchen. Analysiert man Probe 5 mit dem Rasterelektronenmikroskop, sieht man, dass die Probe zwar auch noch Stahlpartikel aus dem WAS-Schnitt enthält, aber auch Stahlpartikel aus den vorherigen Versuchen. Dies kann man zum einen optisch erkennen, so sind die Stahlpartikel aus dem WAS-Schnitt eher länglich und rau. Die Stahlpartikel aus den vorherigen Versuchen sind rund und glatt. Zudem wurde eine quantitative Elementanalyse durchgeführt. Da nur die Stahlpartikel aus den vorherigen Versuchen Molybdän aufwiesen, konnte man mit der Elementanalyse bestätigen, dass es sich bei einigen Stahlpartikeln um Verunreinigungen handelt. Die Ergebnisse der Elementanalyse sind in Abbildung 22 dargestellt. Der Molybdänanteil im Stahl aus den vorherigen Versuchen war leider nicht ausreichend, um auch bei der chemischen Analyse einen Unterschied feststellen zu können.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass nicht nur Stahlpartikel aus der Suspension separiert werden, sondern ein Großteil ist das Mangan, das aus dem Abrasiv stammt.

*Tabelle 1: Stahlkonzentration in Abhängigkeit der Filterdauer*

| Probe | Filterdauer [min] | Stahlkonzentration [Massen-%] |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0,138 |
| 2 | 0 | 0,039 |
| 3 | 38 | 0,014 |
| 4 | 100 | 0,021 |
| 5 | 274 | 0,046 |
| 6 | 478 | 0,456 |

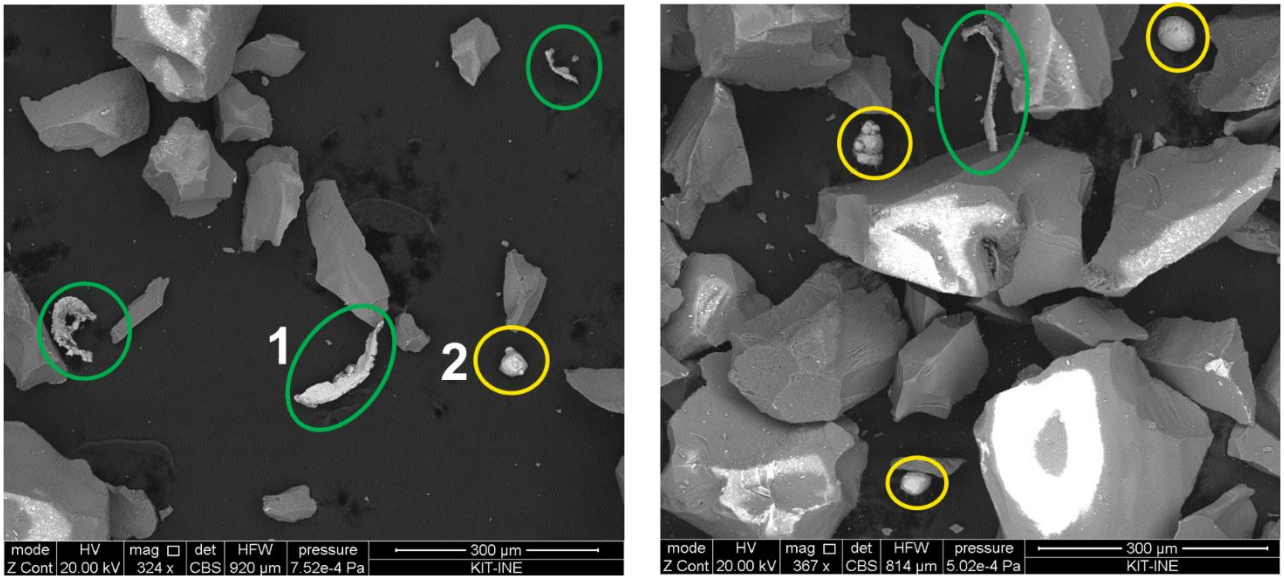


*Abbildung 21: Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Probe 5*

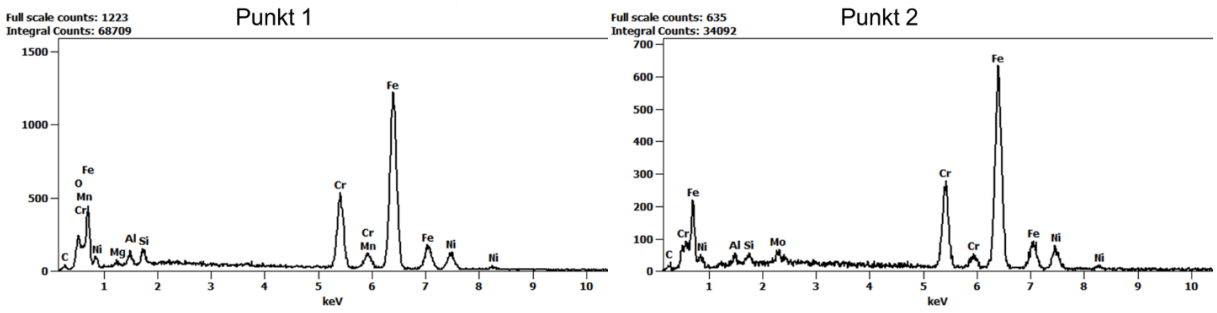


*Abbildung 22: Ergebnis Elementanalyse der Stahlpartikel aus Probe 5*

## 2.4 AP4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen

Die Versuche mit radioaktiven Proben (AP4) entfallen.

## 2.5 AP5: Dokumentation der Ergebnisse

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Projekts wurden dokumentiert und zusammengefasst.

# 3. Aufgetretene Schwierigkeiten und Arbeitsplanänderung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens NaMaSK wurde eine Arbeitsplanänderung, beantragt. Ursprünglich war im Forschungsvorhabens NaMaSK geplant, dass mit der Separationsanlage Trennversuche mit radioaktivem Korngemisch im Kontrollbereich des KIT-INE durchgeführt werden. Da es während der Projektlaufzeit nicht möglich war, radioaktive Proben aus der Zerlegung eines Reaktordruckbehälters zu erhalten, wurde eine Arbeitsplanänderung beantragt. Mit den Änderungen des Arbeitsplans wurde die Verbesserung der Separationsanlage (AP3) in den Fokus der Arbeiten gestellt. Die Anlage soll in einen kontinuierlichen Betrieb überführt werden und Verbundversuche von Sieb und Magnetfilter durchgeführt werden. Die Versuche mit radioaktiven Proben (AP4) entfallen somit. Die Untersuchungen zu Korrosionsinhibitoren (AP1) wurden vollständig vom Projektpartner KIT-INE durchgeführt.

Neben den Schwierigkeiten bezüglich des radioaktiven Probenmaterials traten zudem technische Herausforderungen auf. Für die Entwicklung des Siebs mussten drei Aufbauten der Siebanlage gebaut und in Betrieb genommen werden, bis ein konstanter Betriebszustand mit gutem Siebergebnis erreicht werden konnte.

Die Analytik der im Magnetfilter separierten Fraktionen ist weiterhin aufwendig. Zur genauen Bestimmung der Stahlkonzentration im Abrasiv-Stahl-Gemisch wird weiterhin der Säureaufschluss mit anschließendem ICP-OES eingesetzt. Diese Methode ist sehr präzise, aber auch Zeit- und Arbeitsintensiv.

Die größte technische Schwierigkeit war die Entwicklung des kontinuierlichen Magnetfilters. Der bisherige Magnetfilter konnte nicht umgebaut werden, da das Prinzip nur im Batchbetrieb funktioniert und sonst eine Reinigung unmöglich ist. Da es bisher kein geschlossenes und kontinuierliches Magnetfiltersystem gab, musste ein eigenes Funktionsprinzip entwickelt werden und Prototypen entworfen und gefertigt werden. Dies forderte mehr Zeit- und Arbeitsaufwand als geplant war. Um die Testversuche des Magnetfilters noch im Rahmen des Projekts abzuschließen, wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt.

# 4. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt NaMaSK wurde gemäß Zuwendungsbescheid mit einer Summe von insgesamt 672.256,85 € inkl. 20%-Projektpauschale für das KIT-TMB durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Im Laufe des Projekts kam es zu einer Mittelkürzung und der damit verbundenen neuen Zuwendungssumme von insgesamt 645.305,19 € inkl. 20%-Projektpauschale.

Der Hauptanteil der Ausgaben umfasst Aufwendungen für ***wissenschaftliches und technisches Personal***. Wie den durchgeführten Arbeiten in Kapitel 1 zu entnehmen ist, waren die Personalausgaben u.a. für die Konstruktion und Herstellung des Versuchstandes sowie für die umfangreichen Versuchsreihen inkl. Datenauswertung und -analyse erforderlich. Die Planung und Inbetriebnahme des Versuchstands wurde von drei wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt. Der Aufbau des Versuchstandes und die Anfertigung der hierfür benötigten Sonderbauteile wurde durch technisches Personal vorgenommen, das ebenfalls aus dem Projekt gefördert wurde. Bei Recherchearbeiten und bei der Durchführung von Versuchsreihen in der Versuchshalle des TMBs konnten verschiedene ***studentische Hilfskräfte*** unterstützend tätig sein.

Die im Projekt getätigten ***Sachausgaben*** beziehen sich auf den Aufbau des Versuchsstandes und die Verbrauchsgüter für die Separationsversuche. Diese beinhalten u.a. Profile, Halbzeuge, Plexiglas, Dichtungsmaterial, Armaturen und 3D-Drucke, sowie als Verbrauchsmaterial u.a. Filterbeutel, Schläuche, Probenbehälter, Werkstattmaterial und Siebe.

Die ***Vergabe von Aufträgen*** war für die Herstellung des Probenmaterials nötig, da nur so reale Probengemische in der Anlage behandelt und anschließend analysiert werden können.

Die im Projekt angefallenen ***Reisekosten*** dienten der Vorstellung des Projekts auf verschiedenen Konferenzen wie z.B. KONTEC, Kerntechnik, DEM, safe $^{ND}$. In Vorträgen und Posterpräsentationen wurden die aktuellen Arbeiten und Ergebnissen vorgestellt.

# 5. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das WASS-Verfahren kann für die Zerlegung des Reaktordruckbehälters verwendet werden. Besonders für die Zerlegung der Einbauten besitzt es viele technische Vorteile gegenüber anderen Zerlegeverfahren. Eine Stärke des Verfahrens liegt in der Zerlegung von Bauteilen mit komplexen Geometrien und Komponenten unter mechanischer Spannung. Diese können sicher fernhantiert, ohne Emission von Aerosolen zerlegt werden und ohne die Gefahr, dass das Schneidwerkzeug eingeklemmt wird. Der größte Nachteil des Verfahrens ist die Entstehung von großen Mengen des radioaktiven Sekundärabfalls. Diesen zu reduzieren war das Ziel des Projekts. Durch die Aufbereitung und Wiederverwendung des Abrasivs mit der in diesem Projekt entwickelten Separationsanlage kann der Sekundärabfall stark reduziert werden, wodurch der Einsatz des sicheren und schnellen WASS-Verfahren erleichtert wird.

# 6. Fortschreibung des Verwertungsplanes

## 6.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen

Für die Überführung der Separationsanlage in den kontinuierlichen Betrieb wurde ein geschlossener, kontinuierlich betriebener Magnetfilter entwickelt. Hierfür wurde am 03.05.2023 eine Schutzrechtsanmeldung beim Deutschen Patent- und Markenamt unter dem Titel: „Magnetabscheidevorrichtung“ eingereicht.

## 6.2 Erfolgsaussichten nach Projektende

Der neu entwickelte Magnetfilter bietet verschiedene technische Erfolgsaussichten, da die Anwendung nicht auf die Abrasivaufbereitung beschränkt ist. Die besonderen Eigenschaften (geschlossen, kontinuierlich, mit Permanentmagneten) ermöglichen eine Vielzahl von Anwendungen wie z.B. im Recycling, der Phosphatabscheidung in Abwässern und Lithiumphosphatrückgewinnung beim Batterierecycling. Derzeit handelsübliche Magnetfilter besitzen nicht die Voraussetzungen, da sie entweder kontinuierlich oder geschlossen sind, aber nicht beides kombinieren.

Die Separationsanlage zur Abrasivaufbereitung kann ebenfalls im konventionellen WASS-Bereich eingesetzt werden. Die kleinskalige Anlage ermöglicht die Abrasivbehandlung vor Ort. Dadurch werden Entsorgungs- und Transportkosten gespart. Die

Energie zur Abrasivtrocknung wird eingespart und das Schnittfugenmaterial kann, statt wie bisher entsorgt, dem Recyclingkreislauf zugeführt werden.

### 6.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussmöglichkeit

Auf Basis der Ergebnisse des Forschungsprojekts NaMaSK wurde ein Forschungsantrag zur Weiterentwicklung und Validierung der Separationsanlage und des Magnetfilters gestellt. Dieser Antrag wurde bewilligt und mit dem vom BMBF geförderten Projekt „Komasi“ (FKZ: 03VP12080) wurde die Validierungsphase der Separationsanlage begonnen, wodurch der wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschluss zum Projekt NaMaSK ermöglicht wird.

Nach der Vorstellung des neu entwickelten Magnetfilters wurde die mögliche Anwendung zur Eisenphosphatrückgewinnung aus Klärschlämmen geprüft. Dieses Verfahren ist technisch und wirtschaftlich vielversprechend und kann die Grundlage für weitere Entwicklungen bieten.

Zudem wurde Interesse an einem geschlossenen und kontinuierlichen Magnetfilter zur Lithiumeisenphosphatabscheidung beim Batterierecycling bekundet. Die Anpassung des Magnetfilters auf die Behandlung von Lithiumeisenphosphatlösungen bietet einen erfolgversprechenden Lösungsansatz. Da bei einem Wachstum der Elektromobilität das Recycling der Batterien in Zukunft eine immer größere Rolle spielt, sind einfach skalierbare Ansätze für das Recycling mit geringem Energieaufwand, die mechanische Separationsverfahren nutzen interessant.

## 7. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Firma ANT hat die Entwicklung des kontinuierlichen WAS-Schneidsystems „Consus“ abgeschlossen. Bei älteren WASS-Anlagen musste der Schneidvorgang für das Nachfüllen des Abrasivaufgabebehälters unterbrochen werden. Diese neue Anlage ermöglicht es mit einer kontinuierlichen Abrasivzugabe zu schneiden. Mit einem Sieb ausgestattet ist sie somit in der Lage das Abrasiv direkt nach dem Schneidvorgang bezüglich der Partikelgrößenverteilung aufzubereiten und direkt wiederzuverwenden. Der Einsatz ist derzeit auf die konventionelle Anwendung beschränkt. Ein Magnetfilter zur Separation des Schnittfugenmaterials wird nicht eingesetzt. [7]

# 8. Zusammenfassung

Es wurde eine Separationsanlage für den kontinuierlichen Betrieb entwickelt. Hierfür mussten Sieb- und Magnetfilter entwickelt werden, welche ebenfalls kontinuierlich betrieben werden können. Eine Recherche zu handelsüblichen Magnetfiltersystemen ergab, dass bisher kein Magnetfiltersystem existiert, das geschlossen und kontinuierliche betrieben werden kann. Es musste daher ein eigenes Magnetfiltersystem neu entwickelt werden. Zudem wurde ein kontinuierlich betriebenes Sieb entwickelt. Es wurden Versuche mit verschiedenen Siebmaschenweiten, sowie mit Abrasiv-Stahl-Gemischen mit unterschiedlicher Stahlsorte durchgeführt. Analysiert wurde unter anderem die Partikelgrößenverteilung des Grobguts, um den Siebfehler und die Abrasivqualität zu bestimmen und die Stahlkonzentration im wiederverwendbaren Abrasiv. Die Partikelgrößenverteilung des Grobguts der Siebung wurde mit der des neuen Abrasivs verglichen. Die Qualität der Siebung bezüglich des Anteils der kleinen Partikel ist gut genug, um das Abrasiv direkt in der WASS-Anlage wiederzuverwenden. Beide Komponenten wurden in einer Anlage zur Siebung und Magnetfiltration kombiniert. Ursprünglich waren Separationsversuche mit radioaktivem Probenmaterial aus einem realen WAS-Schnitt geplant. Dieses Probenmaterial konnte allerdings nicht während der Projektlaufzeit beschafft werden. Daher wurde eine Arbeitsplanänderung vorgenommen und stattdessen Versuche mit beiden Komponenten in Kombination durchgeführt. Zudem wurden erweiterte Versuche mit dem Magnetfilter, insbesondere mit verschiedenen Magnetfiltergeometrien durchgeführt.

# 9. Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse der Arbeiten auf verschiedenen Konferenzen und Veranstaltungen veröffentlicht. Durch die Veröffentlichungen konnten u.a. die Ergebnisse auf dem Gebiet des Vorhabens einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht werden sowie die Sichtbarkeit des Projektes national und auch international gesteigert werden.

*Tabelle 2: Veröffentlichungen NaMaSK*

| Nr. | Titel | Namen | Konferenz/ Journal | Ort | Datum | Seiten-anzahl | Art |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Separation System for the Treatment of Secondary Waste from the Waterjet-Abrasive-Suspension-Cutting | C.-O. Krauß, F. Becker, H. Geckeis, S. Gentes, A. Heneka, M. Plaschke, D. Schild | DEM 2021 | Avignon | 13.-15.09.2021 | 2 | Abstract |
| 2 | Separation System for the Treatment of Secondary Waste from the Waterjet-Abrasive-Suspension-Cutting | C.-O. Krauß, F. Becker, M. J. Chaudhry, H. Geckeis, S. Gentes, A. Heneka, M. Plaschke, D. Schild | DEM 2021 | Avignon | 13.-15.09.2021 | 8 | Full-Paper |
| 3 | Separation System for the Treatment of Secondary Waste from the Waterjet-Abrasive-Suspension-Cutting | A. Heneka | DEM 2021 | Avignon | 13.-15.09.2021 | 14 | Präsentation |
| 4 | Nasssiebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung | A. Heneka | FORKA-Statusseminar 2022 | Berlin | 24.-25.05.2022 | 11 | Präsentation |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen | | | | | | |
| 5 | Treatment of secondary waste produced from the Waterjet Abrasive Suspension Cutting using separation techniques and to recycle the abrasive material (NaMaSK) | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | Helmholtz Energy Young Scientists Workshop 2022 | Frankfurt | 30.05-31.05.2022 | 1 | Poster |
| 6 | Treatment of radioactive secondary waste from Waterjet Abrasive Suspension Cutting using separation techniques | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | Kerntechnik 2022 | Leipzig | 29.03-30.03.2022 | 2 | Abstract |
| 7 | Treatment of radioactive secondary waste from Waterjet Abrasive Suspension Cutting using separation techniques | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | Kerntechnik 2022 | Leipzig | 29.03-30.03.2022 | 5 | Full-Paper |
| 8 | Treatment of radioactive secondary waste from Waterjet Abrasive Suspension Cutting using separation techniques | M. J. Chaudhry | Kerntechnik 2022 | Leipzig | 29.03-30.03.2022 | 11 | Präsentation |
| 9 | Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | KONTEC 2023 | Dresden | 30.08-01.09.2023 | 2 | Abstract |
| 13 | Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärab-falls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | KONTEC 2023 | Dresden | 30.08-01.09.2023 | 5 | Full-Paper |
| 14 | Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik | C.-O. Krauß | KONTEC 2023 | Dresden | 30.08-01.09.2023 | 14 | Präsentation |
| 15 | Wet sieving and magnetic separation for the treatment of radioactive secondary waste produced from waterjet abrasive suspension cutting | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka | safeND 2023 | Berlin | 13.09-21.09.2023 | 1 | Abstract |
| 16 | Wet sieving and magnetic separation for the treatment of radioactive secondary waste produced from waterjet abrasive suspension cutting | M. J. Chaudhry | safeND 2023 | Berlin | 13.09-21.09.2023 | 15 | Präsentation |
| 17 | Separation process for reduction of secondary waste from waterjet abrasive suspension cutting | C.-O. Krauß | NEA Global forum rising stars workshop 2023 | Cambridge | 20.09-21.09.2023 | 1 | Poster |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18 | Kontinuierlich betriebene Separationsanlage zur Abrasivaufbereitung für das Wasser-Abrasiv-Suspensions Schneidverfahren | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka, J. Ruoff | Kerntechnik 2024 | Leipzig | 11.06-13.06.2024 | 1 | Abstract |
| 19 | Continuously operated separation system for the processing of reusable abrasive for the water abrasive suspension cutting process | C.-O. Krauß, M. J. Chaudhry, S. Gentes, A. Heneka, J. Ruoff | Kerntechnik 2024 | Leipzig | 11.06-13.06.2024 | 5 | Full-Paper |
| 20 | Kontinuierlich betriebene Separationsanlage zur Abrasivaufbereitung für das Wasser-Abrasiv-Suspensions Schneidverfahren | C.-O. Krauß | Kerntechnik 2024 | Leipzig | 11.06-13.06.2024 | 8 | Poster |

# 10. Literaturverzeichnis

[1] ANT Applied New Technologies AG, 09 07 2024. [Online]. Available: https://ant-ag.com/was-ist-wasserstrahlschneiden.

[2] B. M. C. LCC, „Technical Data & Physical Characteristics for Barton Garnet Abrasives," www.barton.com, 2024.

[3] 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.

[4] 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.

[5] „Barton," [Online]. Available: https://www.barton.com/wp-content/uploads/2018/10/PSD-HPX-ADIRONDACK-Garnet-Abrasives.pdf. [Zugriff am 10 10 2019].

[6] A. Heneka, Abrasivaufbereitung aus dem Wasser-Abrasiv-Suspensionsschneideverfahren mittels Nasssiebung und Magnetseparation, Karlsruhe: Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2024.

[7] A. N. T. AG, „ANT - ConSus," [Online]. Available: https://ant-ag.com/kontinuierliches-schneidverfahren. [Zugriff am 19 11 2024].