Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Numerische **A**nalyse und **M**odellierung der Blasen- und Schwarmströmung unter **P**ool **S**crubbing Bedingungen
(**NAMPS**)

Zuwendungsempfänger:	**Förderkennzeichen:**
Prof. Dr.-Ing. Xu Cheng Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe xu.cheng@kit.edu	1501652
Vorhabenbezeichnung: Numerische Analyse und Modellierung der Blasen- und Schwarmströmung unter Pool Scrubbing Bedingungen (NAMPS)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 – 31.05.2026	

Fanli Kong, Ludwig Köckert, Zhongkai Mei, Yihui Wu, Xing Chen, Xu Cheng

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit unter dem Förderkennzeichen 1501652 gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Teil 1: Kurzfassung

Motivation und Relevanz des Vorhabens

Ein wesentliches Ziel der Reaktorsicherheitsforschung ist es, die Freisetzung radioaktiver Stoffe bei Stör- und Unfallbedingungen zu verhindern oder zu begrenzen. Bei einem Kernschmelzunfall können radioaktive Aerosole freigesetzt und in das Containment transportiert werden, das als letzte Barriere zwischen der kerntechnischen Anlage und der Umwelt eine besondere Bedeutung besitzt. Für die sicherheitstechnische Bewertung solcher Unfallabläufe ist daher ein möglichst genaues Verständnis des Transports und der Rückhaltung radioaktiver Aerosole erforderlich. Eine Möglichkeit zur Rückhaltung von Aerosolen ist das sogenannte Pool-Scrubbing. Dabei wird aerosolbeladenes Gas durch einen Flüssigkeitspool geleitet und steigt in Form von Blasen auf, wobei Aerosolpartikel abgeschieden und in der Flüssigkeit zurückgehalten werden können. Die Wirksamkeit dieses Prozesses hängt wesentlich von der Blasendynamik und insbesondere von der Blasenoberfläche, Geschwindigkeit und Verweilzeit ab. Das NAMPS-Projekt setzte an bestehenden Unsicherheiten bei der Beschreibung dieser hydrodynamischen Vorgänge an. Durch experimentelle und numerische Untersuchungen sollten die relevanten Prozesse besser verstanden und die Modellierung des Pool-Scrubbings sowie des daraus resultierenden Dekontaminationsfaktors (DF) verbessert werden.

Aufgabenstellung

Das NAMPS-Projekt wurde vom Institut für Angewandte Thermofluidik (IATF) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ), der Becker Technologies GmbH und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) durchgeführt. Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften von Blasenschwärmen unter Pool-Scrubbing-Bedingungen und die Verbesserung der Modellierung wesentlicher Parameter, die den Dekontaminationsfaktor beeinflussen. Hierzu wurden insbesondere die Blasenoberfläche, die Blasengeschwindigkeit und die Verweilzeit der Gasphase im Flüssigkeitspool betrachtet. Experimentell wurde der Einfluss unterschiedlicher Eintauchtiefen, Volumenströme und Gaszusammensetzungen auf die Blasendynamik und den Dekontaminationsfaktor untersucht. Numerische Simulationen einzelner Blasen und von Blasenketten dienten der Untersuchung der Blasendynamik und des Transports von Aerosolpartikeln. Darauf aufbauend wurden die Schwarmströmung und die Verweilzeit der Blasen im Flüssigkeitspool numerisch untersucht. Aus den experimentellen und numerischen Ergebnissen wurde schließlich ein neuer Ansatz zur Modellierung des Dekontaminationsfaktors entwickelt, der erstmals die statistische Verteilung der Verweilzeiten der Blasen und Aerosolpartikel berücksichtigt.

Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Der Pool-Scrubbing-Prozess lässt sich hydrodynamisch in Globulenströmung, Übergangsbereich und Schwarmströmung einteilen. Beim Eintritt des Gas-/Aerosolgemisches entstehen zunächst große Blasen, die während des Aufstiegs in kleinere Blasen zerfallen. Bei hoher Blasenkonzentration bildet sich eine Schwarmströmung mit einem dreidimensionalen Strömungsfeld und Rezirkulationszonen. Die Effizienz des Aerosolauswaschens hängt dabei wesentlich von der Blasengröße, -geschwindigkeit, Turbulenz und Verweilzeit der Gasphase ab. Zur quantitativen Beschreibung der Auswaschleistung wird der Dekontaminationsfaktor verwendet. Bestehende Aerosol-Retention-Modelle, beispielsweise in SPARC und BUSCA, berücksichtigen verschiedene Abscheidungsmechanismen, beruhen jedoch weitgehend auf empirischen Korrelationen und begrenzten experimentellen Datensätzen. Trotz experimenteller und numerischer Untersuchungen bestehen daher weiterhin Unsicherheiten bei der Beschreibung zentraler hydrodynamischer Größen wie Blasenoberfläche, Geschwindigkeitsfeld, Turbulenz und Verweilzeit, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Aerosolabscheidung haben.

Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war ursprünglich für den Zeitraum vom 01.07.2022 bis zum 30.06.2025 geplant. Zunächst wurde der wissenschaftliche und technische Kenntnisstand aktualisiert und damit die Grundlage für die experimentellen und numerischen Untersuchungen geschaffen. Die experimentell gewonnenen Daten dienten sowohl der Untersuchung der Blasendynamik als auch der Validierung der numerischen Modelle. Die Untersuchungen einzelner Blasen und des Partikeltransports lieferten wiederum Erkenntnisse und Eingangsgrößen für die Modellierung der Schwarmströmung. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse flossen schließlich in die Entwicklung eines Modells zur Bestimmung des Dekontaminationsfaktors ein. Der ursprüngliche Zeitplan konnte aufgrund von Personalwechseln, eines erhöhten Aufwands bei der Analyse der Versuchsdaten und des hohen Rechenaufwands der CFD-Simulationen nicht vollständig eingehalten werden. Durch eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.05.2026 konnten die ausstehenden Arbeiten abgeschlossen und die Projektziele erreicht werden.

Wesentliche Ergebnisse im Überblick

1. Aktualisierung des Wissensstandes
   Aktuelle experimentelle Arbeiten, numerische Untersuchungen und Modellierungen wesentlicher hydrodynamischer Parameter der Einzelblasen- und Schwarmströmung wurden analysiert, insbesondere mit Blick auf die letzten fünf Jahre. Eine experimentelle Datenbasis zur Validierung von Simulationsmethoden und zur Entwicklung neuer Modelle wurde aufgebaut. Zudem wurden die Parameter weiterer Versuche und numerischer Simulationen festgelegt.
2. Experimentelle Untersuchungen
   Die detaillierte Versuchsanordnung wurde erstellt und Versuche mit unterschiedlichen Eintauchtiefen und Volumenströmen wurden am FZJ durchgeführt. Die Dekontaminationsfaktoren für Versuche mit löslichen und unlöslichen Partikeln wurden ermittelt. Informationen zur Blasendynamik, einschließlich Blasengeschwindigkeit und -durchmesser, wurden gewonnen. Schließlich dienten die experimentellen Daten auch der Validierung der numerischen Simulationen.
3. Untersuchung des Einzelblasenaufstiegs und des Partikeltransports
   Eine umfassende Korrelation zur Beschreibung der terminalen Blasenform über einen weiten physikalischen Bereich wurde entwickelt. Darüber hinaus wurde ein numerisches Modell zur gekoppelten Beschreibung der Blasendynamik und des Transports von Aerosolpartikeln entwickelt. Damit wurden die Einflüsse von Blasendurchmesser, Partikelgröße, Partikeldichte, Oberflächenspannung und Gasviskosität auf das Partikeltransportverhalten untersucht und die statistische Verteilung der Partikelausscheidung bestimmt.
4. Untersuchung der Schwarmströmung und Blasenverweilzeiten
   Ein numerischer Ansatz zur Beschreibung der Schwarmströmung wurde validiert und zur Untersuchung der Blasendynamik und der Verweilzeit im Flüssigkeitspool eingesetzt. Dabei wurden die Einflüsse von Lufteintrittsgeschwindigkeit, Blasendurchmesser und Eintauchtiefe auf das hydrodynamische Verhalten der Schwarmströmung und die Verweilzeit der Blasen analysiert. Darüber hinaus wurde die statistische Verteilung der Blasenausscheidung bestimmt.
5. Entwicklung eines Dekontaminationsfaktor-Modells
   Ein neuer Ansatz zur Modellierung des Dekontaminationsfaktors im Schwarmströmungsregime wurde entwickelt. Dieser basiert auf einer statistischen Methode zur Bestimmung der Verweilzeiten der Blasen im Flüssigkeitspool sowie der Partikel in den Blasen. Die hohe Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit des neuen Modellierungsansatzes konnten erfolgreich bestätigt werden.

Fazit

Im NAMPS-Projekt wurden neue experimentelle Daten und numerische Methoden zur Beschreibung der Blasendynamik, der Blasenverweilzeit und des Transports von Aerosolpartikeln beim Pool-Scrubbing gewonnen bzw. entwickelt. Darauf aufbauend wurde ein neuer Ansatz zur Modellierung des Dekontaminationsfaktors entwickelt, der erstmalig die statistischen Verteilungen der Verweilzeiten von Blasen und Aerosolpartikeln berücksichtigt.

Damit steht nun eine stärker physikalisch und statistisch begründete Grundlage zur Beschreibung der Aerosolrückhaltung zur Verfügung. Während bisherige Ansätze wesentliche Einflussgrößen überwiegend durch empirische Korrelationen und vereinfachende Annahmen beschreiben, können die im Vorhaben untersuchten Verweilzeitprozesse nun unmittelbar in die Bestimmung des Dekontaminationsfaktors einbezogen werden. Dies schafft die Grundlage für eine weiter verbesserte Modellierung des Pool-Scrubbings und perspektivisch für eine genauere sicherheitstechnische Bewertung von Stör- und Unfallabläufen.

Teil 2: Eingehende Darstellung

Motivation und Relevanz des Vorhabens

Ein wesentliches Ziel der Reaktorsicherheitsforschung ist es, die Freisetzung radioaktiver Stoffe bei Stör- und Unfallbedingungen zu verhindern oder möglichst zu begrenzen. Dabei kommt dem Containment als letzter Barriere zwischen der kerntechnischen Anlage und der Umwelt eine besondere Bedeutung zu. Bei einem Kernschmelzunfall können radioaktive Aerosole aus dem Brennstoff freigesetzt und über den Primärkreislauf in das Containment transportiert werden. Für die sicherheitstechnische Bewertung solcher Unfallabläufe und insbesondere die Bestimmung des möglichen Quellterms ist daher ein möglichst genaues Verständnis des Transports und der Rückhaltung radioaktiver Aerosole erforderlich.

Bei Stör- und Unfallabläufen können radioaktive Spaltprodukte in Form von Gasen und Aerosolen innerhalb der Anlage freigesetzt werden und in das Containment gelangen. Die Rückhaltung dieser Stoffe innerhalb der Anlage ist daher von wesentlicher Bedeutung für die Begrenzung möglicher Freisetzungen in die Umgebung. Neben den Eigenschaften der freigesetzten Stoffe spielen dabei insbesondere die thermohydraulischen Bedingungen und die Wechselwirkungen zwischen Gas-, Flüssigkeits- und Partikelphase eine wichtige Rolle.

Ein für die Rückhaltung von Aerosolen relevanter Prozess ist das sogenannte Pool Scrubbing. Dabei wird ein mit Aerosolpartikeln beladenes Gas durch einen Flüssigkeitspool geleitet. Das Gas steigt in Form von Blasen durch die Flüssigkeit auf, wobei Aerosolpartikel durch verschiedene Abscheidungsmechanismen aus der Gasphase entfernt und in der Flüssigkeit zurückgehalten werden können. Die Wirksamkeit dieses Prozesses wird durch den Dekontaminationsfaktor beschrieben und hängt wesentlich von den hydrodynamischen Bedingungen innerhalb des Flüssigkeitspools ab.

Von besonderer Bedeutung sind dabei die Blasenoberfläche, die Blasengeschwindigkeit und die Verweilzeit der Gasphase. Diese Größen beeinflussen die Wechselwirkung zwischen Gas, Flüssigkeit und Aerosolpartikeln und damit die Effizienz der Aerosolabscheidung. Ihre Beschreibung ist insbesondere im Bereich der Schwarmströmung aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den Blasen weiterhin mit Unsicherheiten verbunden.

Das NAMPS-Projekt setzte an diesen Unsicherheiten an. Durch die Verknüpfung experimenteller Untersuchungen mit numerischen Simulationen sollten die hydrodynamischen Vorgänge beim Pool Scrubbing besser verstanden und die Modellierung der für den Dekontaminationsfaktor relevanten Prozesse verbessert werden. Damit sollte eine verbesserte Grundlage für die Beschreibung und sicherheitstechnische Bewertung des Pool-Scrubbing-Prozesses geschaffen werden.

Aufgabenstellung

Das NAMPS-Projekt wurde vom Institut für Angewandte Thermofluidik (IATF) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ), der Becker Technologies GmbH und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) durchgeführt. Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften von Blasenschwärmen unter Pool-Scrubbing-Bedingungen und die Verbesserung der Modellierung wesentlicher Parameter, die den Dekontaminationsfaktor beeinflussen. Im Fokus standen insbesondere die Blasenoberfläche, die Blasengeschwindigkeit und die Verweilzeit der Gasphase im Flüssigkeitspool.

Hierzu wurden experimentelle und numerische Untersuchungen miteinander verknüpft. Experimentell wurden unter anderem die Einflüsse von Eintauchtiefe, Volumenstrom und Gaszusammensetzung auf

die Blasendynamik und den Dekontaminationsfaktor untersucht. Numerische Simulationen einzelner Blasen und Blasenketten dienten der Untersuchung der Blasendynamik sowie des Transports und der Verweilzeit von Aerosolpartikeln innerhalb der Blasen. Darauf aufbauend wurde die Schwarmströmung numerisch untersucht, wobei insbesondere das Zweiphasenströmungsfeld und die Verweilzeit der Blasen im Flüssigkeitspool betrachtet wurden.

Auf Grundlage der experimentellen und numerischen Ergebnisse sollte schließlich ein neuer Ansatz zur Modellierung des Dekontaminationsfaktors entwickelt werden, der die statistischen Verteilungen der Verweilzeiten der Blasen im Flüssigkeitspool und der Aerosolpartikel innerhalb der Blasen berücksichtigt.

Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Der Pool-Scrubbing-Prozess lässt sich hydrodynamisch in drei Bereiche einteilen: Globulenströmung, Übergangsbereich und Schwarmströmung. Beim Eintritt des Gas-/Aerosolgemisches in den Flüssigkeitspool entstehen zunächst große Blasen, deren Struktur insbesondere von der Düsencharakteristik und dem Gasvolumenstrom abhängt. Während des Aufstiegs zerfallen diese in kleinere, stabilere Blasen. Bei hoher Blasenkonzentration bildet sich eine Schwarmströmung, die durch auftriebsgetriebene Naturkonvektion charakterisiert ist und ein dreidimensionales Strömungsfeld mit Rezirkulationszonen erzeugt. Die Effizienz der Aerosolabscheidung hängt dabei wesentlich von hydrodynamischen Parametern wie Blasengröße, Blasengeschwindigkeit, Turbulenz und Verweilzeit der Gasphase im Flüssigkeitspool ab. Beim Bersten der Blasen an der Flüssigkeitsoberfläche können Aerosole durch die Bildung von Tropfen wieder in die Gasphase freigesetzt werden.

Während des Blasenaufstiegs können Aerosolpartikel durch unterschiedliche Mechanismen an die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche transportiert und anschließend in die Flüssigkeit überführt werden. Die zur Verfügung stehende Grenzfläche sowie die Aufenthaltsdauer der Gasblasen und der darin enthaltenen Partikel beeinflussen daher wesentlich die Partikelabscheidung. Veränderungen der Blasengröße, -form und -geschwindigkeit sowie Wechselwirkungen zwischen den Blasen innerhalb eines Blasenschwarms können die Abscheideeffizienz entsprechend beeinflussen.

Zur quantitativen Beschreibung der Aerosolrückhaltung wird der Dekontaminationsfaktor verwendet. In gängigen Containment-Programmen wird dieser mithilfe von Aerosol-Retention-Modellen berechnet. Hierfür wurden unter anderem die Programme SPARC und BUSCA entwickelt, die verschiedene Abscheidungsmechanismen wie Sedimentation, Diffusion und Zentrifugaldeposition berücksichtigen. Die zugrunde liegenden Modelle beruhen jedoch weitgehend auf empirischen Korrelationen und wurden auf Basis begrenzter experimenteller Datensätze entwickelt. Insbesondere Einflüsse von Stoffeigenschaften sowie die komplexe Blasenstruktur und die Verweilzeit der Gasphase werden dabei nur eingeschränkt berücksichtigt. Dadurch können sich deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Modellansätzen und entsprechende Unsicherheiten bei der Vorhersage des Dekontaminationsfaktors ergeben.

Experimentelle und numerische Untersuchungen haben wichtige Erkenntnisse zur Blasendynamik und Schwarmströmung geliefert, sind jedoch häufig auf kleine Maßstäbe und eingeschränkte Parameterbereiche beschränkt. Insbesondere die Beschreibung zentraler hydrodynamischer Größen wie Blasenoberfläche, Geschwindigkeitsfeld, Turbulenzeigenschaften und Verweilzeit der Gasphase war zu Beginn des Vorhabens weiterhin mit Unsicherheiten behaftet. Da diese Größen die Aerosolabscheidung und damit den Dekontaminationsfaktor maßgeblich beeinflussen, bestand weiterer Bedarf an experimentellen Daten sowie an validierten numerischen Methoden und verbesserten Modellierungsansätzen.

Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war ursprünglich für den Zeitraum vom 01.07.2022 bis zum 30.06.2025 geplant und gliederte sich in fünf aufeinander aufbauende Teilaufgaben (TA). Zu Beginn wurde der wissenschaftliche und technische Kenntnisstand aktualisiert (TA1) und damit die Grundlage für die nachfolgenden experimentellen und numerischen Untersuchungen geschaffen. Parallel zu den experimentellen Arbeiten (TA2) wurden numerische Untersuchungen einzelner Blasen und des Partikeltransports durchgeführt (TA3). Die experimentellen Ergebnisse dienten dabei auch der Validierung der numerischen Modelle. Die Erkenntnisse aus den Einzelblasenuntersuchungen bildeten wiederum eine Grundlage für die numerische Untersuchung der Schwarmströmung (TA4). Die experimentellen und numerischen Ergebnisse wurden schließlich in der Modellentwicklung (TA5) zusammengeführt. Der zeitliche Ablauf und die Verzahnung der Teilaufgaben sind in Abbildung 1 dargestellt.

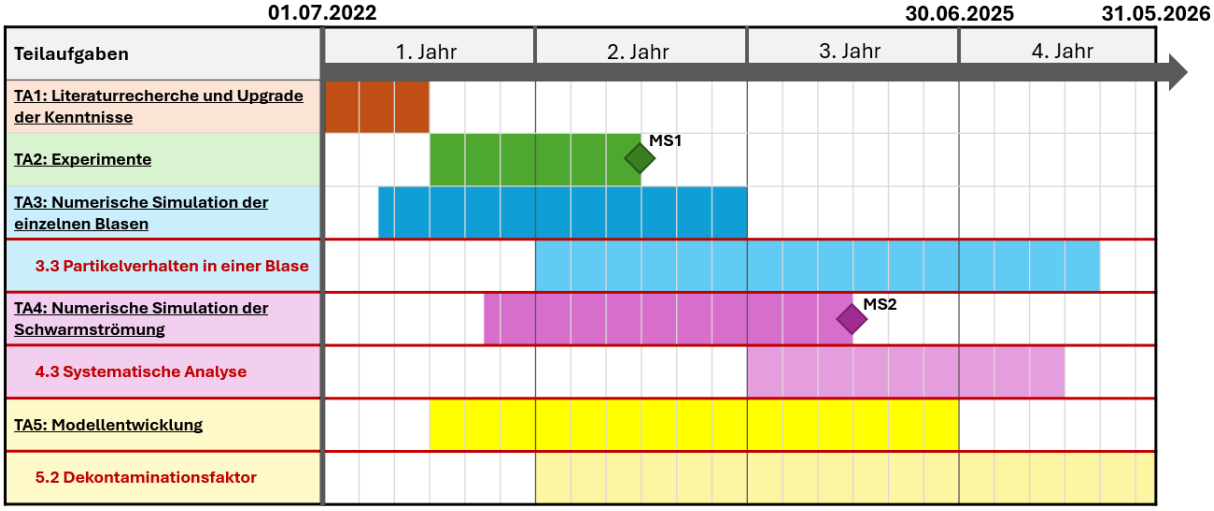


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf der Teilaufgaben des NAMPS-Projekts.

Der ursprüngliche Zeitplan konnte nicht vollständig eingehalten werden. Ursachen hierfür waren Personalwechsel, ein unerwartet hoher Aufwand bei der Analyse der Versuchsdaten sowie der hohe Rechenaufwand der durchgeführten CFD-Simulationen. Zum ursprünglichen Projektende am 30.06.2025 waren noch die in Abbildung 1 rot markierten Arbeiten 3.3 „Partikelverhalten in einer Blase“, 4.3 „Systematische Analyse“ und 5.2 „Dekontaminationsfaktor“ abzuschließen. Diese erforderten weitere umfangreiche Simulationsrechnungen und darauf aufbauende Modellentwicklungen. Insbesondere die langen Rechenzeiten einzelner CFD-Fälle auf dem KIT-Großrechner führten in Verbindung mit den genannten Verzögerungen zu einem zusätzlichen Zeitbedarf. Durch die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.05.2026 konnten die noch ausstehenden Arbeiten vollständig bearbeitet und die Projektziele erreicht werden.

Durchführung und Ergebnisse des Vorhabens

1 Experimentelle Untersuchungen

Teilaufgabe 2 umfasste die experimentellen Untersuchungen des Dekontaminationsfaktors und der Blasendynamik. Dabei wurde analysiert, in welchem Maße diese Größen von der Eintauchtiefe, den Blaseneigenschaften sowie von der Präsenz und Zusammensetzung von Aerosolpartikeln in den Blasen abhängig sind.

1.1 Experimenteller Aufbau und Messtechniken

1.1.1 Beschreibung der SAAB-Versuchsanlage

Die für diese Studie durchgeführten Versuche wurden in der Severe Accident Aerosol Behavior (SAAB)-Versuchsanlage in Jülich durchgeführt. Das Design der Versuchsanlage wird ausführlich in Allelein et al. (2018) beschrieben. Ein 3D-Modell der SAAB-Versuchsanlage sowie die schematische Anordnung des Systems mit den wichtigsten Messinstrumenten und Filtern ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Anlage umfasst einen zylindrischen Pool, welcher aus insgesamt sechs Segmenten besteht und bis zu einer Höhe von 6 m mit Wasser befüllt werden kann. Die Segmente besitzen einen Durchmesser von 1,5 m und besitzen jeweils drei Fenster, um einen optischen Zugang in die Anlage zu erhalten.

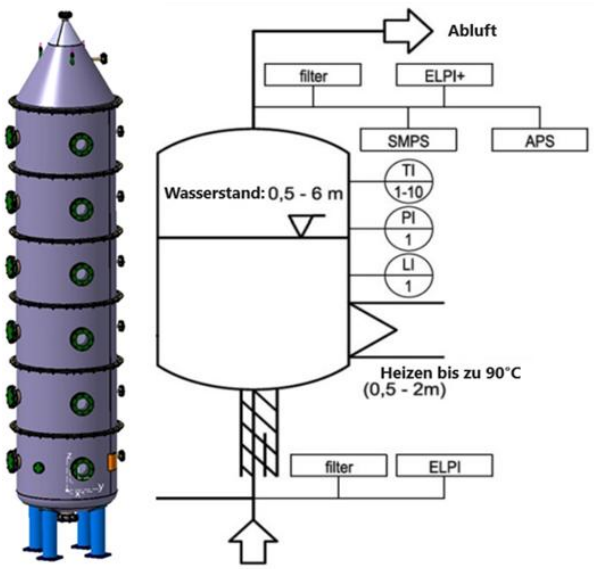
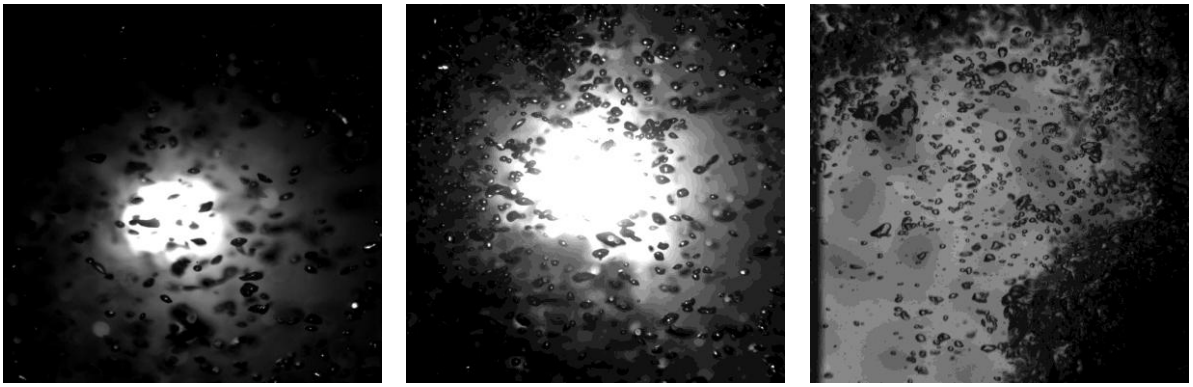


Abbildung 2: SAAB-Versuchsanlage
(Vennemann et al. 2022)

1.1.2 Kameraeinstellungen und Vorversuche

Um die geeigneten Einstellungen für die Messeinrichtungen, wie Kameraposition, Aufbau und insbesondere die Belichtung, zu bestimmen, wurden umfassende Vorversuche sowie begleitende Tests im Verlauf der Experimente durchgeführt. Die Versuche mit unterschiedlichen Volumenströmen bei einer Eintauchtiefe von etwa 5,25 m zeigten, dass die zuvor durchgeführte CFD-Simulation die Ausdehnung des Schwarms deutlich unterschätzte. Nur in zwei unteren Segmenten liegt zumindest eine partielle Schwarmströmung ohne Wandeffekte vor. Der Hauptstrom in der Mitte des Kanals ist nicht stationär, sondern „wandert“ durch den Kanal. Dies erschwert die Aufzeichnungen erheblich aufgrund wechselnder Lichtverhältnisse und eines erhöhten Zeitaufwands. Darüber hinaus ist es dadurch unmöglich, gleichzeitig Messungen mit verschiedenen Kameras in unterschiedlichen Höhen durchzuführen. Mit der Analyse der durchgeführten Aufzeichnungen des wasserdichten Beleuchtungssystems, wie in Abbildung *3* dargestellt, hat sich die Verwendung der MultiLED QT und MultiLED MX als Hintergrundbeleuchtung als beste Lösung erwiesen. Ein Vergleich zwischen dem Beleuchtungssystem der GS Vitec GmbH und den intrusiven Lampen der Becker Technologies GmbH zeigt, dass mit Letzteren ein deutlich gleichmäßigerer Hintergrund erzielt werden kann (vgl. Abbildung 3a) und c)). Neben der Intrusivität weist dieses Setup jedoch den Nachteil auf, dass die Lampen eine vergleichsweise geringe Lichtintensität besitzen und daher nicht über längere Zeit eingesetzt werden können. Auch bei der als beste Lösung bewerteten Variante treten verschiedene Schwierigkeiten bei der Auswertung der Aufnahmen auf. Das System erzeugt einen ungleichmäßigen Hintergrund mit einem

hellen, überbelichteten Bereich im Bildzentrum und oftmals zu dunklen Rändern (vgl. Abbildung 3a) und b)). Dadurch können in jedem Bild nur kleine Bereiche ausgewertet werden. Zusätzlich erschweren Lichtreflexionen von Blasen zwischen Schärfeebene und Flansch die Analyse. Zudem lässt sich nur eine begrenzte und nicht immer gleiche Anzahl an Einzelbildern aus den Videoaufnahmen auswerten. In Verbindung mit der Tatsache, dass aufgrund der hohen Blasendichte im Zentrum lediglich die Randbereiche der Hauptströmung untersucht werden können, ist ein quantitativer Vergleich zwischen den Tests nicht möglich und es ergeben sich teilweise Schwierigkeiten, eine statistisch ausreichende Anzahl von Blasen zu erfassen. Darüber hinaus führen die geometrischen Randbedingungen des Versuchsaufbaus zu Einschränkungen bei den Einstellungen der Schärfentiefe. Dies kann dazu führen, dass Blasen außerhalb der Schärfeebene erfasst werden und dadurch verfälschte Werte entstehen.



a) b) c)

Abbildung 3: Beispiele mit unterschiedlichen Belichtungssystemen a) MultiLED QT (GS Vitec GmbH); b) MultiLED MX (GS Vitec GmbH); c) In-Water LED (Becker Technologies GmbH)

1.1.3 **Versuchsmatrix**

Nach den ersten Vorversuchen wurde die endgültige Versuchsmatrix wie in Tabelle 1 dargestellt festgelegt. Die erste Spalte zeigt die Eintauchtiefe der jeweiligen Messreihe, während die weiteren Spalten nach der Zusammensetzung des Gasstroms gegliedert sind.

Tabelle 1: Versuchsmatrix

	N_2 [m^3/h]	**N_2 + SnO_2[m^3/h]**	**N_2 + SnO_2 + CsI [m^3/h]**
Tiefe = 1,5 m	10		
	15		
	20	20	
	30		
	50	50	50
	70		
Tiefe = 5,25 m	20	20	20
	35		
	50	50	50

Als Trägergas wurde Stickstoff (N_2) verwendet. Zur Untersuchung des Einflusses von Aerosolpartikeln auf die Blasendynamik und den Dekontaminationsfaktor wurden zusätzlich Versuche mit dem wasserunlöslichen Zinnoxid (SnO_2) sowie mit einem Misch-Aerosol aus 40 % SnO_2 und 60 % wasserlöslichem Cäsiumiodid (CsI) durchgeführt. Bei Pool-Scrubbing-Prozessen können sowohl lösliche als auch unlösliche Aerosolbestandteile auftreten, deren unterschiedliche Eigenschaften die

Aerosolabscheidung und damit den Dekontaminationsfaktor beeinflussen können. Die Verwendung unterschiedlicher Aerosolzusammensetzungen ermöglichte daher die Untersuchung des Einflusses der Aerosoleigenschaften auf den Dekontaminationsfaktor sowie auf die hydrodynamischen Eigenschaften der Blasenströmung. Dabei wurde insbesondere untersucht, ob die Präsenz und Zusammensetzung der Aerosolpartikel die Blasencharakteristik und das Ausbreitungsverhalten der Schwarmströmung beeinflussen. Sämtliche Versuche wurden unter Normaldruck und Umgebungstemperatur durchgeführt.

1.2 Experimentelle Ergebnisse

1.2.1 Dekontaminationsfaktor

Der Dekontaminationsfaktor (DF) konnte während der Aerosolversuche durch Messungen am Ein- und Austritt des Testabschnitts bestimmt werden. Hierzu wurden die Aerosol-Massenkonzentrationen am Einlass und Auslass der SAAB-Anlage mit dem ELPI+-Spektrometer erfasst und die entsprechenden DF-Werte für jede Aerosolgrößenklasse abgeleitet. Die detaillierte Datenanalysemethode ist in Vennemann et al. (2022) beschrieben. Wie exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt, nehmen die DF-Werte zunächst mit steigender Aerosolgröße ab und steigen anschließend wieder an. Für kleine und große Partikel sind die DF-Werte relativ hoch, was auf eine bessere Partikelausscheidung durch Pool Scrubbing hinweist. Auffällig ist das Minimum („Filter gap“) bei Partikeln im Submikrometerbereich, welcher in diesem Fall bei 0,75 µm liegt. Hier ist die geringste Partikelabscheidekapazität zu beobachten.

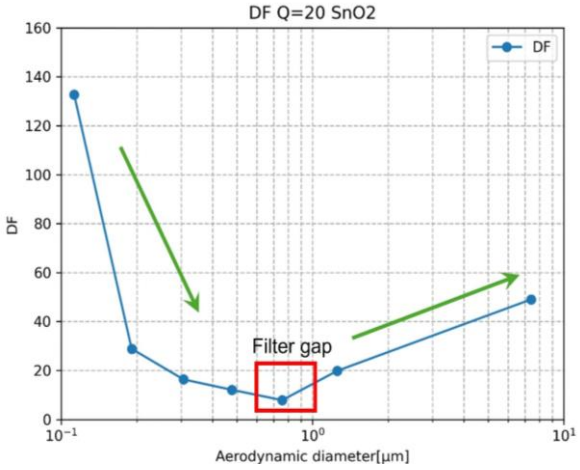
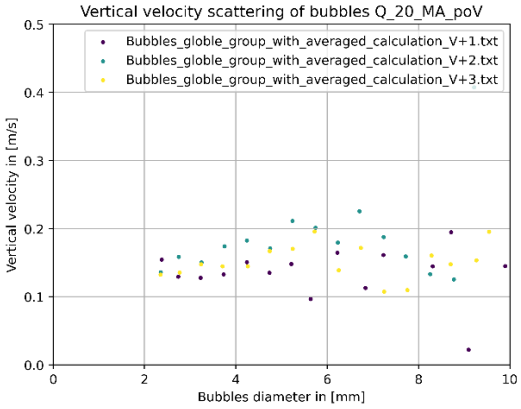


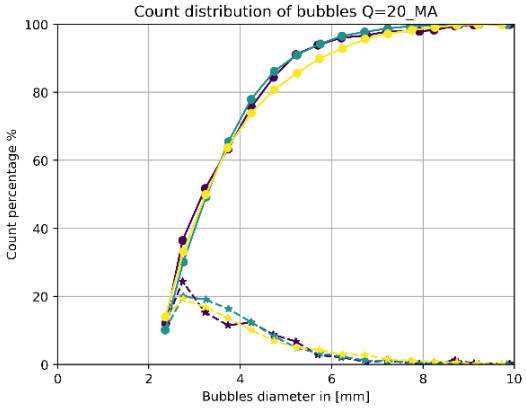
Abbildung 4: DF-Werte für einen Gasvolumenstrom von 20 m³/h mit SnO_2-Aerosolen

1.2.2 Wiederholungsversuche

Mehrere Versuche wurden unter denselben Betriebsbedingungen durchgeführt, wobei entsprechend mehrere Datensätze gewonnen wurden. Die Reproduzierbarkeit der Experimente, insbesondere der Geschwindigkeitsverteilung und die Verteilung der Anzahl der Blasendurchmesser, wird überprüft. Die Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeits- und Durchmesserverteilungen wird unter spezifischen Bedingungen bewertet. Abbildung 5 zeigt die Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeits- und Durchmesserverteilungen in drei Versuchen unter denselben Bedingungen. Dabei beläuft sich die Wassertiefe auf 5,25 m und es wurde ein Mischgasstrom (N_2, SnO_2 und CsI) mit einem Volumenstrom von 20 m³/h eingestellt. Die mittleren vertikalen Blasengeschwindigkeiten in den verschiedenen Blasengrößenklassen liegen im akzeptablen Bereich, wobei die Abweichungen in der Gruppe großer Blasen größer sind als bei kleinen Blasen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Durchmesserverteilung. Mehrere Datensätze unter denselben Bedingungen, die eine gute Reproduzierbarkeit aufweisen, werden für die weitere statistische Analyse zusammengeführt.



a) Vertikale Blasengeschwindigkeit



b) Percentil Blasen-Durchmesserverteilung

Abbildung 5: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse am 3. Segment, bei einer Wassertiefe von 5,25 m und einem Mischgasvolumenstrom von 20 m³/h (N_2, SnO_2 und CsI)

1.2.3 **Blasendynamik**

Die Analyse der Blasendynamik konzentrierte sich auf den Einfluss unterschiedlicher Volumenströme und der Zusammensetzung des Gasstroms auf den Blasendurchmesser sowie auf die horizontale und vertikale Blasengeschwindigkeit. Darüber hinaus wurde auch der Zusammenhang zwischen Blasengröße und Geschwindigkeit untersucht. Dabei bezeichnet der äquivalente Durchmesser den Durchmesser eines Kreises mit derselben Fläche wie die zu untersuchende Blase. Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der Eintauchtiefe, des Volumenstroms und der jeweiligen Gasstromzusammensetzung auf den äquivalenten Blasendurchmesser und die Blasengeschwindigkeit untersucht. Für beide Eintauchtiefen wurde bei zunehmendem Volumenstrom ein leichter Anstieg des mittleren Blasendurchmessers beobachtet. Dieser Anstieg betrug bei einer Eintauchtiefe von 1,5 m zwischen einem Volumenstrom von 15 m³/h und 70 m³/h etwa 10 %, bei einer Eintauchtiefe von 5,25 m und Volumenströmen von 20 bzw. 35 m³/h etwa 15 %. Der geringere Unterschied bei niedrigerer Eintauchtiefe könnte auf die kürzere Distanz und Verweilzeit von der Entstehung des Blasenschwarms bis zur Wasseroberfläche im Vergleich zur größeren Eintauchtiefe zurückzuführen sein. Der beobachtete Blasendurchmesser lag im Bereich von etwa 3 bis 3,5 mm. Abbildung 6 zeigt die Verteilung für drei unterschiedliche Volumenströme bei kleiner Eintauchtiefe.

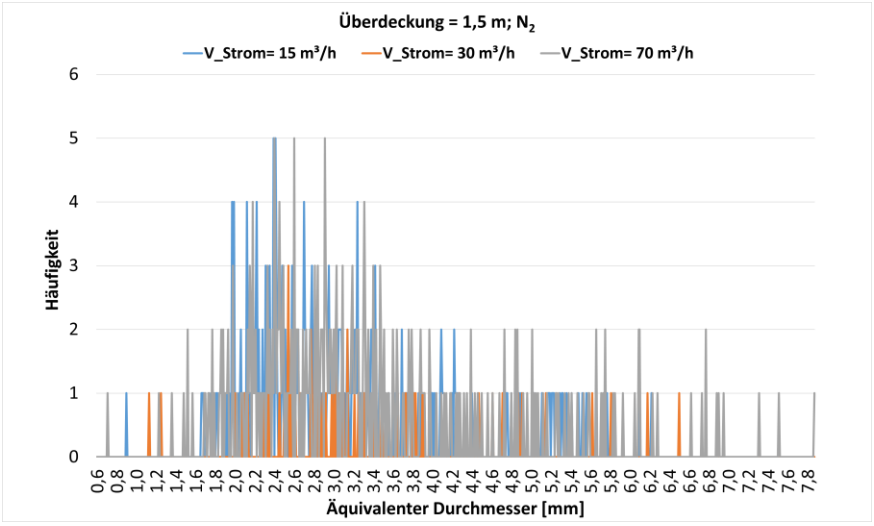


Abbildung 6: Durchmesserverteilung in Abhängigkeit des Eintrittsvolumenstroms

Der Einfluss der Aerosole auf den mittleren Blasendurchmesser variiert. Dabei reduziert sich der Durchmesser bei reinem SnO_2 um etwa 6 %, während er sich bei Misch-Aerosole um etwa 15 % vergrößert. Zusätzlich verändert die Zugabe von Misch-Aerosolen die Verteilungsform von einer gamma-ähnlichen Kurve bei reinem Stickstoff oder Stickstoff mit SnO_2 hin zu einer annähernd konstanten Kurve.

Abbildung 7 zeigt die beobachteten Trends für einen Volumenstrom von 20 m³/h, die auch für die untersuchten höheren Volumenströme gelten. Die gemessenen Blasendurchmesser lagen zwischen 2,95 und 3,45 mm.

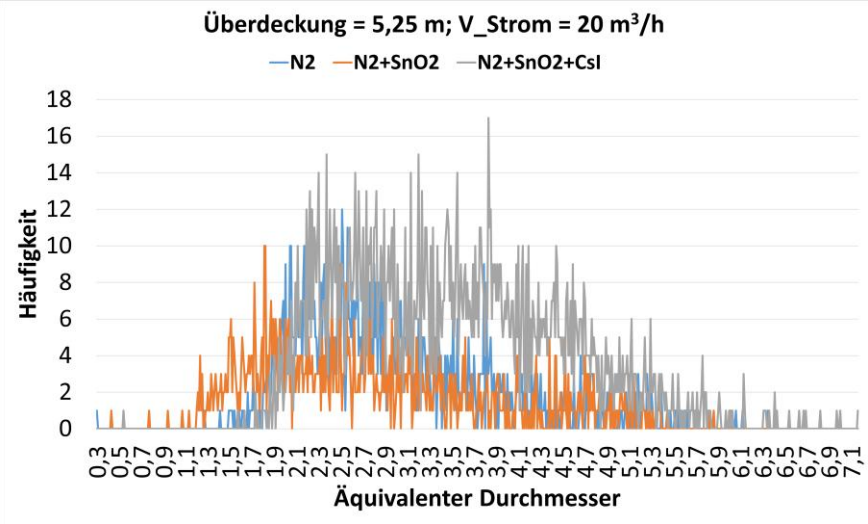


Abbildung 7: Durchmesserverteilung in Abhängigkeit der Eintrittsgaszusammensetzung

Die vertikalen Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Volumenströmen sind annähernd normalverteilt, wie exemplarisch in Abbildung 8 für hohe Eintauchtiefe gezeigt. Die mittleren Geschwindigkeiten liegen zwischen -0,03 und 0,18 m/s, wobei 89 % der Blasen (für Q = 50 m³/h) bis 96 % der Blasen (für Q = 20 m³/h) innerhalb eines Intervalls von ±1 m/s liegen. Auch bei niedrigerer Eintauchtiefe lässt sich für die jeweiligen Volumenströme eine normale Verteilungsform beobachten.

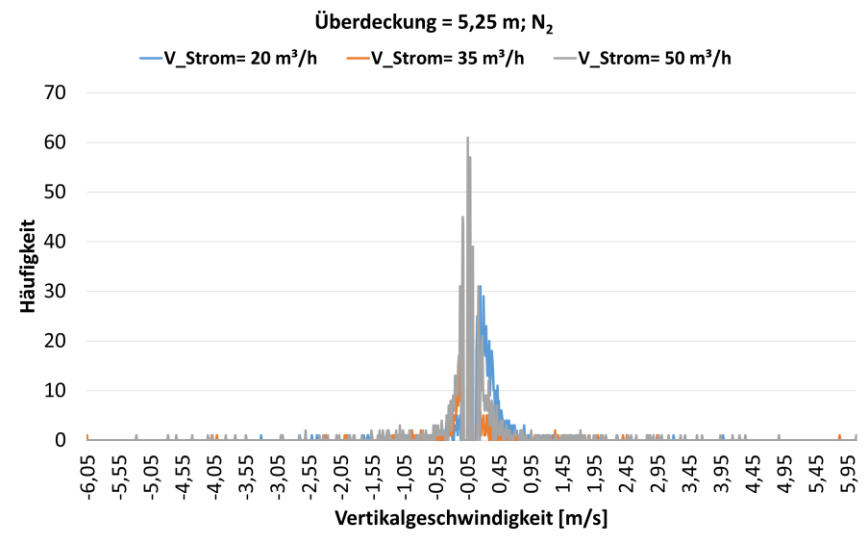


Abbildung 8: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit des Eintrittsvolumenstroms

Allerdings liegen die mittleren Geschwindigkeiten bei niedriger Eintauchtiefe zwischen 0,4 und 0,47 m/s, was deutlich höher ist als die mittleren Geschwindigkeiten bei größerer Eintauchtiefe. Dieser

Unterschied könnte auf die kürzere Strecke bis zum Einlass zurückzuführen sein, sodass die Blasen aufgrund der kürzeren zurückgelegten Distanz noch nicht so stark abgebremst wurden. Trotzdem deuten die geringen Unterschiede in den mittleren Geschwindigkeiten bei verschiedenen Volumenströmen darauf hin, dass zu diesem Zeitpunkt und an dieser Position kein signifikanter Einflusseffekt des Einlasses besteht. Bei niedriger Eintauchtiefe hatten 86 % bis 94 % der Blasen eine mittlere Geschwindigkeit von weniger als ±1 m/s. Ein Beispiel für die Verteilung bei Zugabe von Aerosolen ist in Abbildung 9 dargestellt, die ebenfalls eine Normalverteilung für die verschiedenen Gasstromzusammensetzungen zeigt. Die Zugabe von SnO_2 führt zu der höchsten mittleren Geschwindigkeit von 0,31 m/s, während Misch-Aerosole die mittlere Geschwindigkeit auf 0,01 m/s im Vergleich zum Referenzfall reiner Stickstoff reduzieren. In allen Fällen liegen etwa 97 % der Blasen innerhalb des Bereichs von ±1 m/s. Der gleiche Trend lässt sich auch bei höheren Volumenströmen beobachten, wobei die mittleren Geschwindigkeiten zwischen 0,01 und 0,23 m/s sowie 89 bis 97 % der Blasen innerhalb des genannten Geschwindigkeitsbereichs liegen.

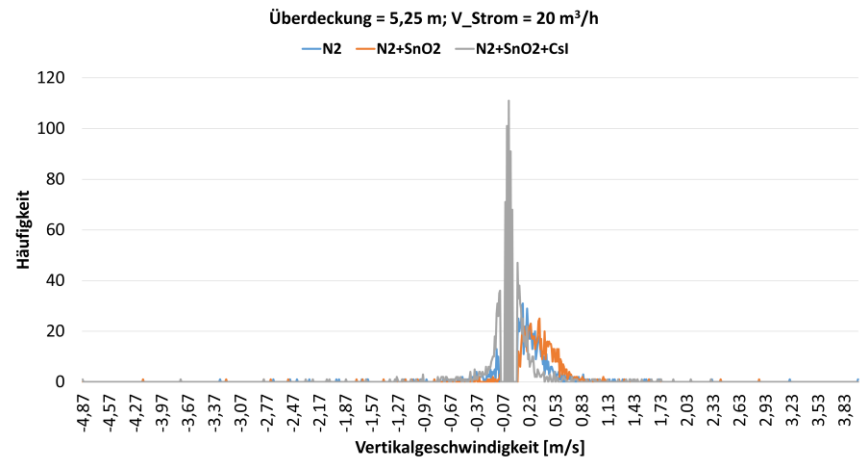


Abbildung 9: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Eintrittsgaszusammensetzung

1.2.4 Vergleich der experimentellen Daten der SAAB-Anlage mit Simulationen

Die vorläufige Berechnung mit der Euler-Euler-Methode bei einem Luftvolumenstrom von 20 m³/h wurde mit den experimentellen Daten der SAAB-Anlage verglichen (siehe Abbildung 10). Die mittleren vertikalen Geschwindigkeiten der Gasphase für 1 Sekunde im gleichen Positionsbereich liegen für die Simulation etwa 30 % niedriger als im Experiment (Experiment: 0,039 m/s; Simulation: 0,027 m/s). Mögliche Ursachen hierfür sind im Folgenden beschrieben:

1) Einschränkungen durch die Messtechnik und die Abtastzeit:
   Große Mengen an Blasen befanden sich im Zentrum des Strömungsfelds, was zu einem dunklen Hintergrund führte, sodass die experimentellen Daten fast ausschließlich am Randbereich des Schwarms erfasst wurden, um die Bildqualität zu gewährleisten. Zudem wurden die experimentellen Ergebnisse nur über etwa 1 Sekunde gemittelt.
2) Abweichungen der numerischen Simulation:
   Die Geschwindigkeit folgt in radialer Richtung einer Gauß-Verteilung, jedoch kann die berechnete Strömung im Vergleich zum Experiment in anderen radialen Bereichen auftreten. Da die experimentellen Daten ausschließlich am Rand der Strömung gewonnen wurden, erschwert dies den Vergleich an derselben Position zusätzlich.

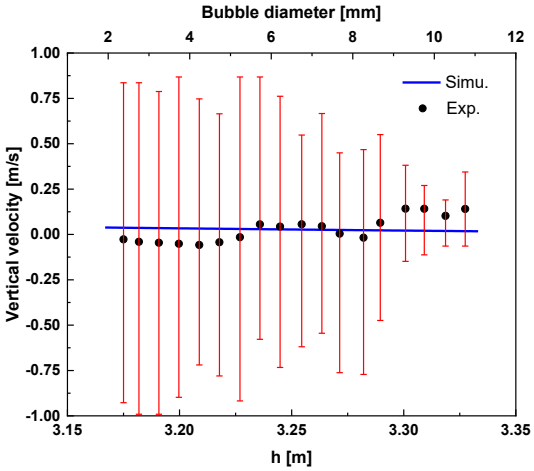


Abbildung 10: Vergleich der experimentellen Daten der SAAB-Anlage mit Simulationen für die vertikale Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Blasendurchmessers

2 Numerische Simulationen der Strömung einzelner Blasen

Teilaufgabe 3 konzentriert sich auf das dynamische Verhalten von Einzelblasen sowie auf die Bewegung von Partikeln innerhalb dieser. Die numerischen Methoden, die Entwicklung der Blasentopologie, die Modellierung der Partikelkräfte sowie die Analysen der Verweilzeiten werden im Detail vorgestellt.

2.1 Simulationsmethodik und Validierung

Die numerische Simulation verwendet die gekoppelte Volume of Fluid (VOF)- und Lagrangian Particle Tracking (LPT)-Methode. Die VOF-Methode wurde eingesetzt, um die isolierten, einzelnen Blasen und somit die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche zu verfolgen (Mei & Cheng 2022, Mei & Cheng 2024), während LPT verwendet wurde, um die Bewegung einzelner Aerosolpartikel zu simulieren. Der Solver wurde durch das isoAdvector-Schema erweitert, um eine scharfe Blasengrenzfläche zu erhalten. Das Rechengebiet für die Blasendynamik wurde als $5D_B \times 5D_B \times 20D_B$ definiert, wobei D_B = 6 mm beträgt. Die initiale Blasenform ist kugelförmig und auf der vertikalen Achse zentriert. Die Gitterempfindlichkeit wurde überprüft, und die Gitterunabhängigkeit hinsichtlich Blasenaufstiegsgeschwindigkeit und Formentwicklung wurde bestätigt (Mei et al. 2022). Die Partikeldynamik berücksichtigt Auftriebs-, Gravitations- und Brownsche Kräfte, wobei der Cunningham-Slip-Korrekturfaktor auf die Drag-Korrelation angewendet wurde (Mei & Cheng 2022c). Um den Einfluss der Blasenverformung in der Anfangsphase des Aufstiegs, verursacht durch die Auftriebskraft, zu eliminieren, wurde die Partikeleinbringung bis t = 1 s verzögert. Zu diesem Zeitpunkt hat die Blase einen quasi-stationären Zustand erreicht (Mei & Cheng 2022a).

Eine umfassende Modellvalidierung erfolgte durch den Vergleich zentraler Simulationsgrößen mit experimentellen und Literatur-Benchmarks. Berücksichtigt wurden unter anderem das Blasen-Seitenverhältnis, die Endgeschwindigkeit, der Blasenverformungsfaktor, die Oberfläche, die Partikelgrößenverteilung, der Partikel-Dekontaminationsfaktor sowie die Aufstiegsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung in allen zentralen Kennzahlen (Mei & Cheng 2022b, 2023; Mei et al. 2022).

2.2 Blasendynamik und -topologie

Die Entwicklung des Blasenverhaltens während des Aufstiegs kann grob in zwei Hauptphasen unterteilt werden. Zum einen in eine gedämpfte oszillierende Phase und zum anderen eine quasi-stabile

Endphase, wie in Abbildung 11 dargestellt. Zunächst steigt die Blase nahezu vertikal auf, wobei nach kurzer Zeit jedoch ein helikaler Aufstiegspfad folgt, der auf asymmetrische interne Strömungen und formbedingte laterale Bewegungen zurückzuführen ist. Während dieser frühen dynamischen Phase beschleunigt die Auftriebskraft die Blase nach oben, während die Oberflächenspannung als rückstellende Kraft wirkt, was zu ausgeprägten Oszillationen sowohl in der Geschwindigkeit als auch in der Verformung führt (Mei et al. 2022). Das Interfacial-Sharpening-Schema stellt einen entscheidenden Faktor für die Blasenoberfläche dar, da die Erreichung der terminalen Grenzfläche eine scharf definierte Grenzregion erfordert.

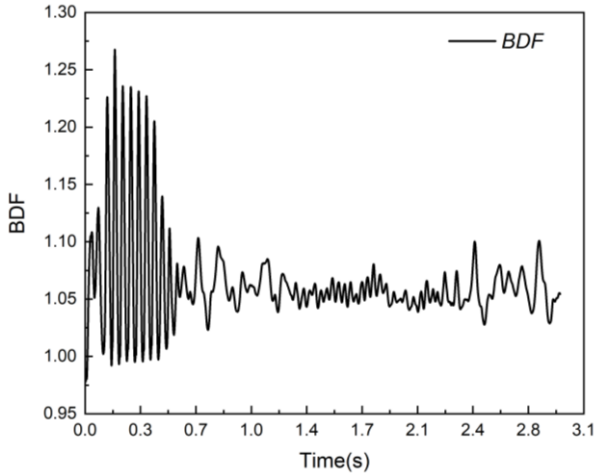


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des Blasenverformungsfaktors (BDF)

Die Form und das Verhalten von Blasen lassen sich über die Galilei-Zahl (*Ga*) und die Eötvös-Zahl (*Eo*) klassifizieren. Diese Zahlen teilen die Blaseneigenschaften in fünf Regionen ein, wie in Abbildung 12 dargestellt. Anschließend wurde der Blasenverformungsprozess für verschiedene Kombinationen von Fluid-Eigenschaften simuliert und in Bezug auf die *Eo*- und *Ga*-Bereiche validiert. Die initiale Übergangsphase zeigte ausgeprägte Verformungen und Beschleunigungen, die durch die rückstellenden Kräfte der Oberflächenspannung sowie den auftriebsbedingten Aufstieg verursacht wurden.

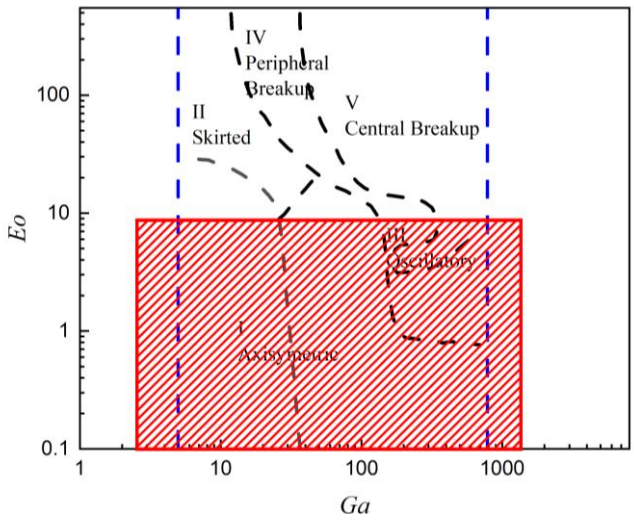


Abbildung 12: Bereich der *Ga*- und *Eo*-Zahlen für die Korrelationsentwicklung

Bei niedriger Eötvös-Zahl stabilisiert die Oberflächenspannung die Blasenform und begrenzt die Verformung, während bei hoher *Eo* Wellenbildungen und Dellen auftreten. Eine Erhöhung der Galilei-

Zahl führt zu einer stärker ellipsoiden Blase, die sich allmählich abflacht, was das Zusammenspiel von viskosen und Trägheitseffekten widerspiegelt.

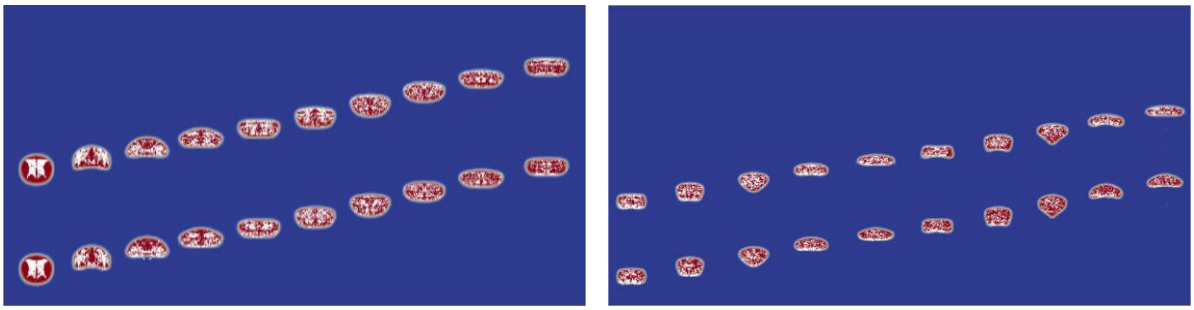
Um die endgültige Blasenverformung über ein breites Spektrum von Gas-Flüssigkeits-Eigenschaften beschreiben zu können, wurde eine umfassende Korrelation für den Blasenverformungsfaktor (BDF) auf der Basis dieser beiden dimensionslosen Zahlen entwickelt:

$$BDF = \begin{cases} 1 + 0.013 \cdot Eo^{0.63} \cdot Ga^{0.65} & 2 \leq Ga \leq 22, \quad 2 \leq Eo \leq 9 \\ 1 + 0.106 \cdot Eo^{0.79} \cdot Ga^{-0.07} & 22 < Ga \leq 200, \quad Eo < 4.5 \\ 1 + 0.056 \cdot Eo^{0.96} & Ga > 200, \quad Eo < 4.5 \end{cases} \quad (1)$$

Dieser abschließende Ausdruck liefert ein praktisches Modell, um die dreidimensionale, terminale Grenzfläche einer aufsteigenden Blase über ein breites Spektrum von Gas-Flüssigkeits-Bedingungen zu beschreiben (Mei & Cheng 2024).

2.3 Interaktion zwischen aufsteigenden Blasen

Das Verhalten der aufsteigenden Blase hat dabei direkten Einfluss auf das Verhalten der nachströmenden Blasen. Diese Wechselwirkung zwischen den Blasen kann die Dynamik der Blase als auch den Transport von Aerosolen beeinflussen. Dabei spielt der Effekt der sogenannten Wake-Acceleration eine Rolle, welche dafür sorgt, dass nachfolgende Blasen beschleunigt werden, wenn sie sich im Nachlauf (Wake) einer vorausströmenden Blase befinden. Für die numerische Simulation wurden dabei die Anfangsbedingungen für die voraus- und nachströmende Blase nahezu identische gehalten. Einzig die initiale Höhe, an der die Blasen starten wurde verändert (0,03 m und 0,048 m). So besitzen beide Blasen eine Größe von 6 mm und eine initiale kugelförmige Form sowie die gleiche Anzahl an Partikeln (N = 4000, ρ_P = 1500 kg/m³, D_P = 1 µm). Bevor der Effekt der Wake-Acceleration stattfindet, zeigt sich, dass die Form der voraus- und nachströmenden Blase nahezu identisch ist, siehe Abbildung 13a). Nach einer kurzen Zeit von 0,15 s zeigt sich, dass der Nachlauf einen Einfluss auf die nachströmende Blase aufweist, siehe Abbildung 13b).

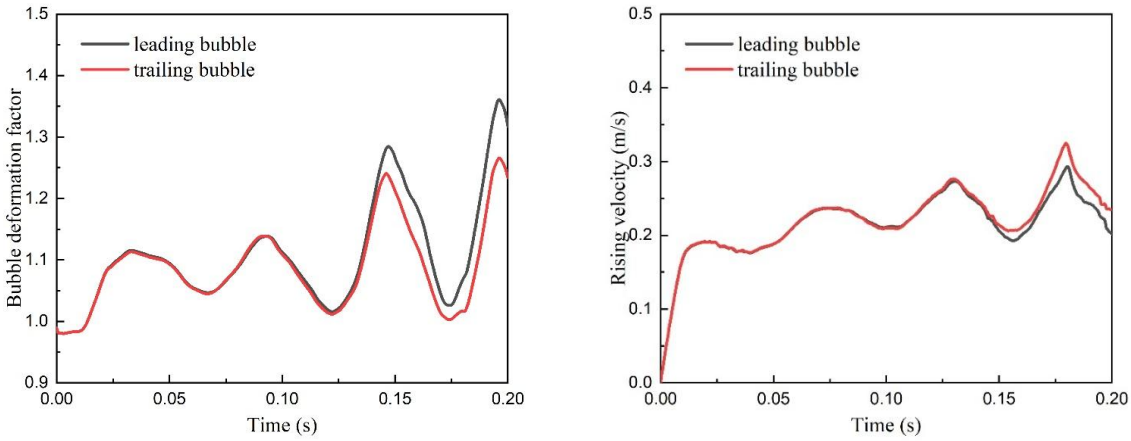


a) Blasenform von 0 bis 0,1 s b) Blasenform von 0,11 bis 0,2 s

Abbildung 13: Entwicklung der Blasenform bei Interaktion zweier Blasen

Dieses Verhalten zeigt sich noch einmal deutlich, sobald sich der BDF sowie die Geschwindigkeit der beiden Blasen über die Zeit aufgetragen werden. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeit der nachströmenden Blase (trailing bubble) ab dem Zeitpunkt 15 s größer wird als von der vorausströmenden Blase (leading bubble) und das eine Veränderung des BDF zu erkennen ist, siehe Abbildung 14a+b).

Die nachströmende Blase näher sich nun immer weiter der vorausströmenden Blase an (Zeitraum 0,21 bis 0,3 s), was auf den Wake-Acceleration-Effekt zurückzuführen ist, siehe Abbildung 15. Im Allgemeinen zeigt die nachströmende Blase eine eher rundere Form auf, im Vergleich zur vorausströmenden Blase.



a) Blasenverformungsfaktor (BDF) b) Blasengeschwindigkeit

Abbildung 14: Entwicklung des Blasenverhalten bei Interaktion zweier Blasen über die Zeit

Abbildung Abbildung 16a) zeigt die Verformung der beiden Blasen über die Zeit mittels des BDFs. Außerdem zeigt Abbildung Abbildung 16b) die Geschwindigkeiten der beiden Blasen, wobei zu erkennen ist, dass die nachströmende Blase eine maximale Geschwindigkeit von 0,55 m/s erreicht, wohingegen die vorausströmende Blase 0,3 m/s erreicht.

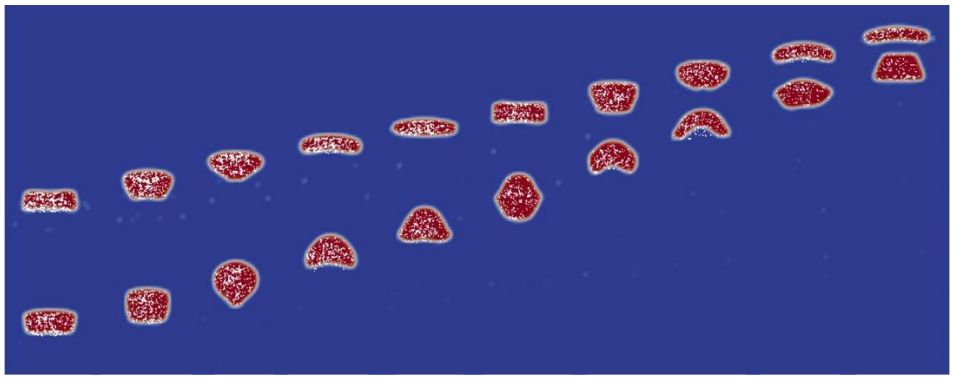
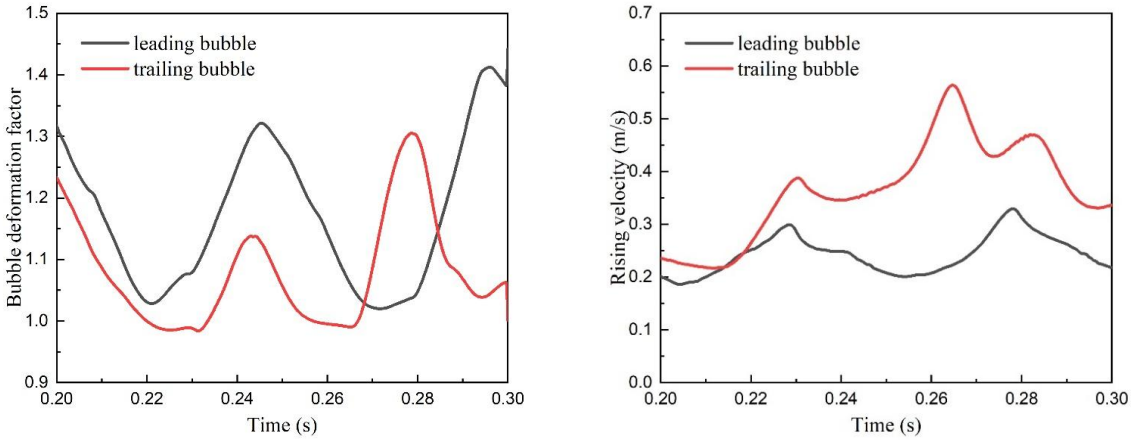


Abbildung 15: Entwicklung der Blasenform im Zeitraum von 0,21 bis 0,3 s



a) Blasenverformungsfaktor (BDF) b) Blasengeschwindigkeit

Abbildung 16: Entwicklung des Blasenverhalten bei Interaktion zweier Blasen über die Zeit sowie Einfluss des Wake-Acceleration-Effekts

Nach dem Wake-Acceleration-Effekt kommt es zu Kollision der beiden Blasen, was dazu führt, dass die beiden Blasen koalisieren, siehe Abbildung 17. Somit bildet sich eine große Blase (merged bubble), die anschließend wie eine große taumelnde (wobbling) Blase weiter aufsteigt. Abbildung 18a+b) zeigen die zeitliche Entwicklung im Zeitraum 0,31 bis 0,5 s des BDFs und der Aufstiegsgeschwindigkeit nach der Koaleszenz. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Aufstiegsgeschwindigkeit als auch der BDF im Moment der Koaleszenz deutlich abnehmen. Im Anschluss daran, erreich die Blase allmählich ihre Endgeschwindigkeit sowie einen stabilen BDF.

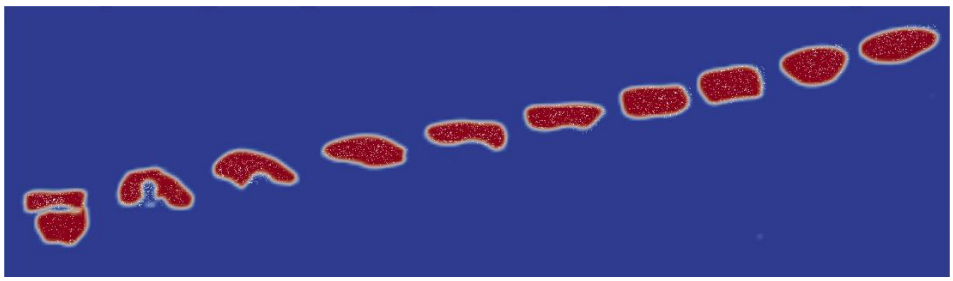
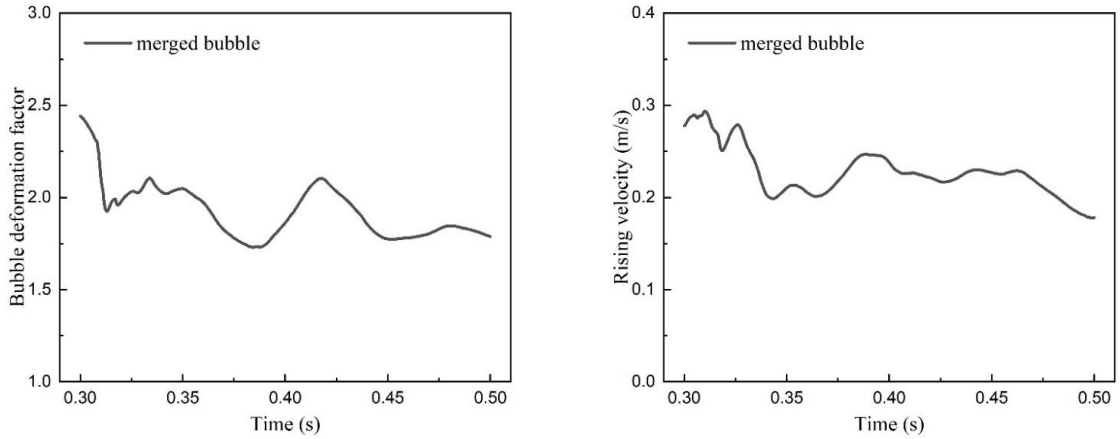


Abbildung 17: Koaleszenz der beiden Blasen von 0,31 bis 0,5 s



a) Blasenverformungsfaktor (BDF) b) Blasengeschwindigkeit

Abbildung 18: Entwicklung der koalisierten Blase im Zeitraum 0,31 bis 0,5 s

2.4 Partikelbewegung innerhalb einer Blase

Das entwickelte Modell zur Grenzflächenpenetration wurde kalibriert und anhand experimenteller Daten aus Einzelblasen-Aerosol-Dekontaminationsmessungen bewertet. Die Partikel-Weber-Zahl (We_P) wurde als zentrales Kriterium eingeführt, um zu bestimmen, ob ein Partikel die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche durchdringt oder in die Gasphase zurückgeworfen wird. Die Modellvalidierung umfasste parametrische Studien über eine Bandbreite von Parametern, wie z. B. Partikeldurchmesser. Die Ergebnisse zeigen, dass das Weber-Zahl-Kriterium eine genauere Vorhersage der Partikelausscheidung liefert als geometrische oder positionsbasierte Kriterien, sowohl hinsichtlich der quantitativen Ausscheidungseffizienz als auch des qualitativen Grenzflächenverhaltens.

Die Analyse der Aerosoltrajektorien zeigt, dass die interne Zirkulation durch zeitliche Blasenform-Oszillationen beeinflusst wird, was zu Variationen im inneren Feld der Blasen führt, was sich dadurch wiederum auf die Partikelbewegung auswirkt.

Zusätzlich wurde der Einfluss der Blasendynamik durch Variation der Eötvös- und Galilei-Zahlen auf das Aerosoltransportverhalten untersucht. Die Auswirkungen der Blasendynamik auf die Ausscheidungsverteilungen sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt. Wie in Abbildung 19

gezeigt, werden bei kleineren *Eo*-Zahlen Partikel hauptsächlich am Blasenboden abgeschieden, bedingt durch auftriebsbedingtes Abprallen und anschließende nach unten gerichtete Impaktion. Mit zunehmenden *Eo*-Zahlen erleichtert jedoch die verringerte Oberflächenspannung das Eindringen an den Blasenflanken, und Ausscheidungsereignisse verschieben sich zur lateralen Oberfläche, was auf einen Übergang von einer boden-dominierten zu einer seitlich-dominierten Ablagerung hinweist.

Abbildung 20 zeigt den Einfluss der Galilei-Zahlen. Bei hoher Ga halten ausgeprägte Blasen-Oszillationen die trägheitsbedingte Impaktion aufrecht und erzeugen lokalisierte Ausscheidungszonen, während bei niedriger Ga die Oszillationen stark gedämpft werden und der viskose Widerstand dominiert, was zu einer gleichmäßigeren und stärker verstreuten Ausscheidungsverteilung über die Grenzfläche führt.

Der gesamte Mechanismus der Aerosolausscheidung hängt stark von der Oberflächenspannung ab, ist jedoch relativ unempfindlich gegenüber der Flüssigkeitsviskosität, insbesondere für submikronische Partikel (Mei & Cheng 2023).

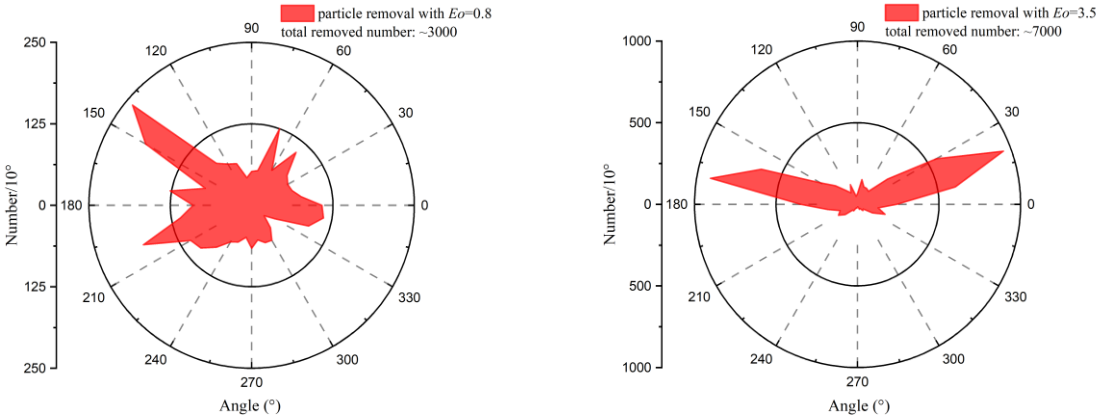


Abbildung 19: Einfluss der Eötvös-Zahlen auf die Aerosolausscheidungsverteilung

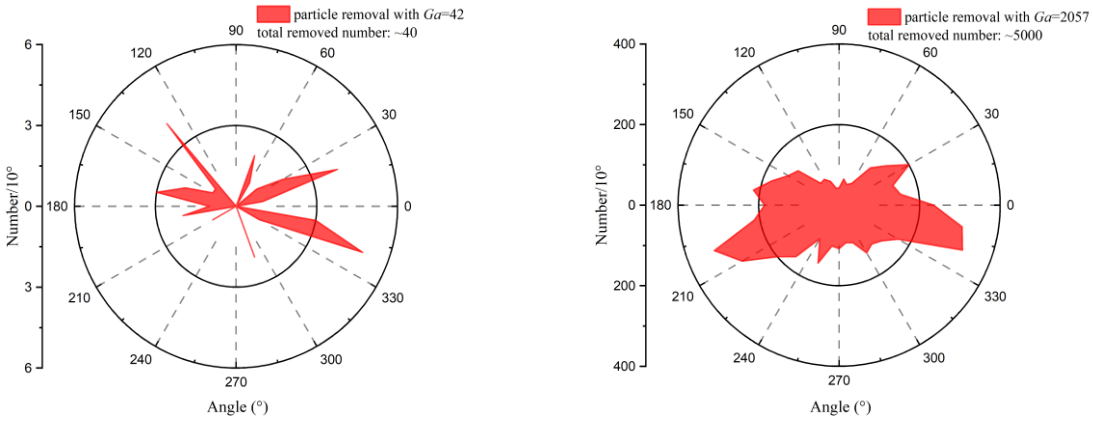


Abbildung 20: Einfluss der Galilei -Zahlen auf die Aerosolausscheidungsverteilung

2.5 Partikelverweilzeit

Um die Partikelausscheidungseffizienz innerhalb aufsteigender Blasen zu quantifizieren, wird die zeitliche Entwicklung der Partikelpopulation analysiert. Der Abfall der Partikelanzahl über die Zeit dient als Indikator für die Ausscheidungseffizienz. Der Großteil der Ausscheidung erfolgt in den ersten Zeitschritten nach der Injektion, wie in Abbildung 21 dargestellt.

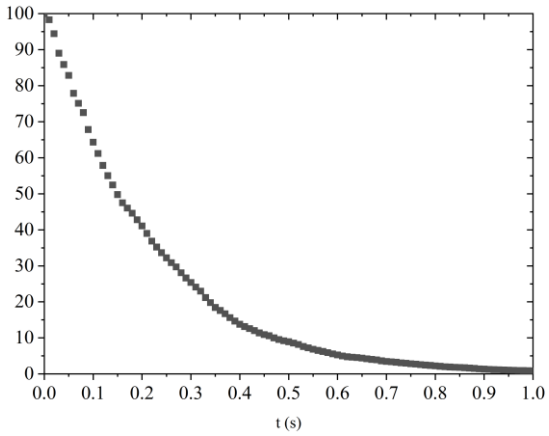


Abbildung 21: Prozentualer Anteil der verbleibenden Partikel über die Zeit

Die zeitabhängige Anzahl der verbleibenden Partikel *N(t)* folgt einem exponentiellen Abklingverhalten, das wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$N(t) = N_0 e^{-\alpha_P t} \tag{2}$$

Dabei ist N_0 die Anfangsanzahl der Partikel, und α_P ist die Abklingkonstante, die die Entfernungsrate charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen einen klaren exponentiellen Abfall der Partikelanzahl. Der stärkste Rückgang erfolgt in den ersten 0 bis 0,5 Sekunden, was darauf hinweist, dass starke Ausscheidungsmechanismen wie Trägheit und Grenzflächenwechselwirkungen dominieren. Mit der Zeit stabilisiert sich die Ausscheidungsrate, was auf ein quasi-stationäres Gleichgewicht hindeutet. Die Abklingkonstante des exponentiellen Trends ergibt sich wie folgt:

$$ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\alpha_P t \tag{3}$$

Dieses quantitative Modell zeigt, dass die Partikelausscheidung innerhalb aufsteigender Blasen effektiv durch einen exponentiellen Verlauf beschrieben werden kann, wobei die Abklingkonstante als zentraler Parameter zur Vergleichbarkeit verschiedener Betriebsbedingungen dient.

3 Numerischen Simulationen der Schwarmströmung

Teilaufgabe 4 behandelt die numerische Untersuchung der Schwarmströmungen und deren Verhalten. Es wird auf die Geschwindigkeitsprofile, sowie die Verweilzeit der Gasblasen im Wasserbecken und die Volumenverteilung der Gasphase eingegangen

3.1 Simulationsmethodik und Validierung

Bei der Simulation des gesamten Schwarms stehen die Geschwindigkeit und die Verweilzeit der Gasphase im Mittelpunkt. Der Euler-Euler-Lagrange-Ansatz wurde entwickelt, um die Entwicklung der Blasenbewegung zu verfolgen und die Verweilzeit der Blasen im Flüssigkeitspool zu bestimmen. Konkret wird der Euler-Euler Zwei-Fluid-Ansatz verwendet, um das Strömungsfeld der Gas- und Flüssigkeitsphasen aufzulösen, während der Lagrange-Ansatz eingesetzt wird, um die diskreten Blasen zu verfolgen und die Blasenverweilzeit zu ermitteln. Die spezifischen numerischen Einstellungen des Lagrange-Ansatzes beziehen sich auf die veröffentlichten Arbeiten aus diesem Projekt (Kong & Cheng 2025). Für die Validierung und den Vergleich wurden die experimentelle Daten von Abe et al. (2018) bei einem Luftvolumenstrom von 8,48 L/min ausgewählt. Die Vergleiche (Abbildung 22) zeigen, dass die Simulation die Trends des Volumenanteils und der Geschwindigkeitsverteilung gut vorhersagt, mit einem unimodalen Verlauf, bei dem die Werte in der Mitte höher sind und nach außen abnehmen. Es

bestehen jedoch weiterhin Abweichungen in Maximalwert und Verteilungsbereich. Der Volumenanteil verteilt sich über einen größeren Bereich und weist einen kleineren Spitzenwert auf als die experimentellen Daten oberhalb von 300 mm. Diese Abweichung kann auf das Modell mit konstantem Blasendurchmesser zurückgeführt werden, das die physikalische Verteilung für unterschiedliche Blasendurchmesser nicht reproduzieren kann. In der Simulation wurde der Blasendurchmesser auf 4 mm gesetzt. Kleine Blasen neigen dazu, sich bedingt durch die Auftriebskraft zur Wand hinzubewegen und eine Doppelspitzen- oder Wandspitzenverteilung zu bilden.

Bezüglich der Geschwindigkeit wird oberhalb von z = 500 mm eine Überschätzung im Vergleich zum Experiment festgestellt. Ein Grund für diese Abweichung liegt ebenfalls im konstanten Blasendurchmesser-Modell, das die physikalische Blasendurchmesser-Verteilung nicht widerspiegelt. Ein weiterer Grund könnte sein, dass das Modell der Grenzflächenkräfte und die auf empirischen Ergebnissen basierenden Korrelationen für hohe Einlassgeschwindigkeiten unter Pool Scrubbing Bedingungen nicht vollständig geeignet sind, da sie von unterschiedlichen Strömungsmustern und Bedingungen abhängen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Anwendung des Basismodells grundsätzlich geeignet ist, um die Strömungscharakteristik und -tendenzen zu erfassen. Verbesserte Ergebnisse sollten durch die Anwendung eines Modells für die Blasendurchmesser-Verteilung sowie die Optimierung des empirischen Modells unter Pool Scrubbing Bedingungen erreichbar sein.

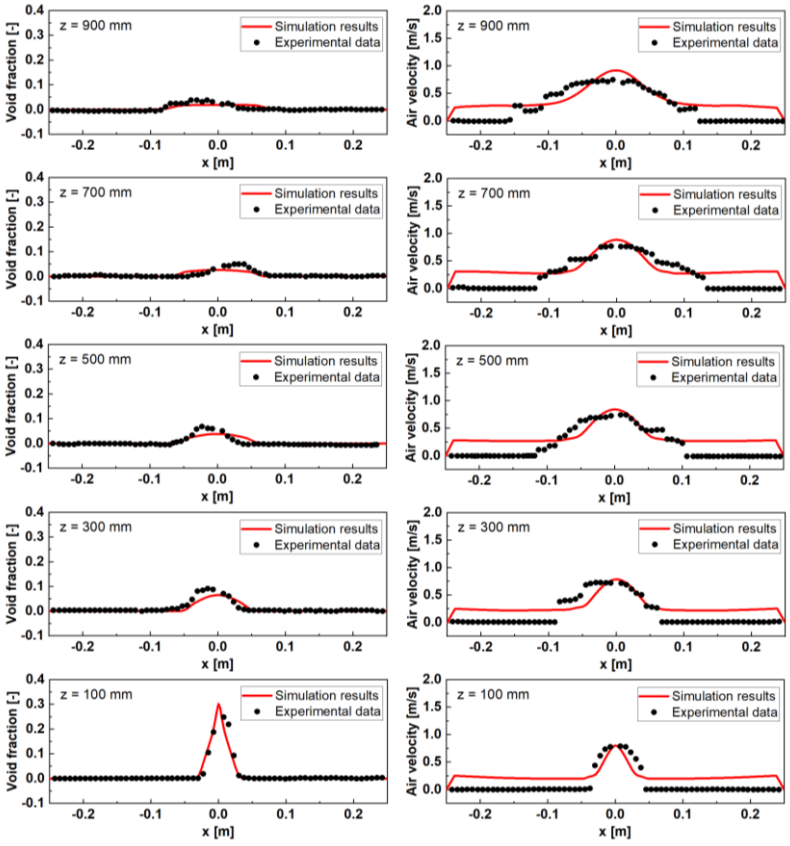


Abbildung 22: Vergleich des berechneten Volumenanteils und der Luftgeschwindigkeit mit den experimentellen Daten (Abe et al. 2018)

Da es experimentell schwierig ist, die Bewegung einzelner Blasen zu verfolgen und die Verweilzeit aufzuzeichnen, erfolgt die Bewertung des Lagrange-Ansatzes durch den Vergleich mit den Euler-Euler-Ergebnissen. Abbildung 23 zeigt den Vergleich der vertikalen Geschwindigkeit bei z = 1000 mm

zwischen Euler-Euler- und Lagrange-Ansatz. Die mit dem Lagrange-Ansatz berechnete Blasengeschwindigkeit stimmt nahezu mit den Euler-Euler-Ergebnissen überein, abgesehen von der Wandregion. Dies liegt daran, dass sich die Luftbewegung im Lagrange-Ansatz entsprechend der Wassergeschwindigkeit entwickelt und dieselbe Tendenz wie die Wasserströmung aufweist.

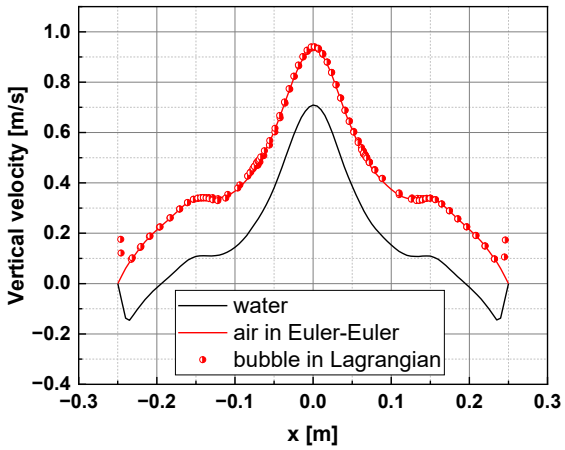


Abbildung 23: Vergleich der vertikalen Geschwindigkeit im Euler-Euler- und Lagrange-Ansatz bei *z* = 1000 mm

3.2 Verhalten der Schwarmströmung

Das Schwarmströmungsverhalten wurde intensiv untersucht und in der Veröffentlichung von Kong and Cheng (2025) dokumentiert. Das Schwarmströmungsverhalten wird unter verschiedenen Pool Scrubbing Bedingungen untersucht, d. h. Lufteinlassgeschwindigkeit, Blasendurchmesser, Volumenstrom und Eintauchtiefe, um das Verhalten der Schwarmblasen zu analysieren.

3.2.1 Volumenanteil und Geschwindigkeitsfeld

Abbildung 24 zeigt die Profile für die Volumenanteile für die minimalen und maximalen Lufteinlassgeschwindigkeiten (5 m/s und 50 m/s) bei einem definierten Blasendurchmesser von 4 mm und einer Eintauchtiefe von 1,1 m. Nach der Injektion der Luft in den Wasserpool von unten bildet sich die Strömung zu einer invertierten Kegelform, die sich vollständig ausprägt. Mit zunehmender Höhe breitet sich die Strömung über einen größeren Bereich aus, bedingt durch den intensiven Impuls- und Energieaustausch. Es fällt auf, dass im Fall mit dem maximalen Volumenstrom, die Luft in der Nähe der Wasseroberfläche einen größeren Bereich einnimmt, da einige kleine Blasen zusammen mit der Wasserrezirkulation nach unten bewegt werden. Abbildung 25 zeigt den Vergleich der zeitlich gemittelten Luftgeschwindigkeitsvektoren für unterschiedliche Lufteinlassgeschwindigkeiten. Mit zunehmendem Volumenstrom entwickelt sich die Schwarmströmung über einen größeren horizontalen Bereich und weist eine intensive Interaktion mit dem umgebenden Wasser auf. Dabei entstehen große Mengen kleiner Blasen, die sich in der Nähe der Oberfläche nach unten bewegen. Folglich tritt eine Luftrezirkulation unterhalb der Wasseroberfläche auf, und die Strömung breitet sich radial weiter aus. Die Luftrezirkulation ist in den Fällen mit einer Lufteinlassgeschwindigkeit von 25 m/s und 50 m/s sichtbar. Die zeitlich gemittelte vertikale Luftgeschwindigkeitsverteilung bei *z* = 1000 mm, dargestellt in Abbildung 26, zeigt die Luftrezirkulation anhand der negativen Werte in Wandnähe. Die Rezirkulation kann die Verweilzeit der Blasen verlängern, wobei quantitativere Ergebnisse zur Verweilzeit in der nachfolgenden Analyse zu finden sind.

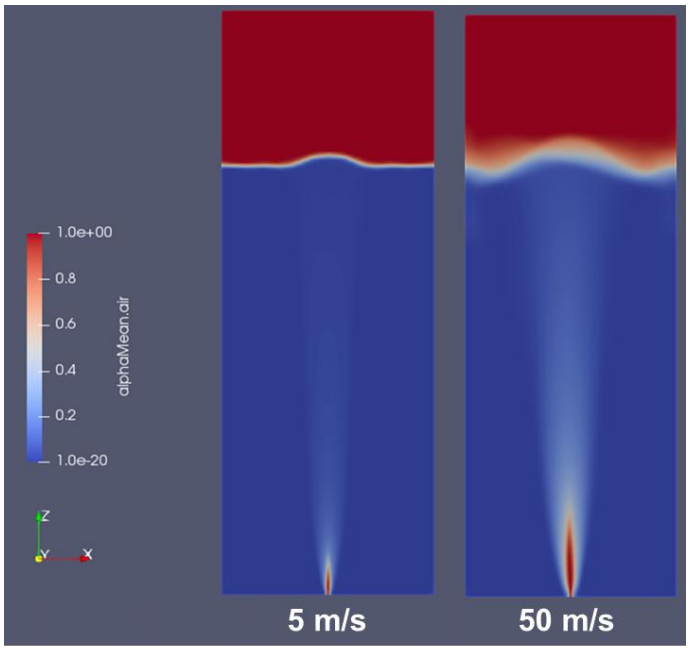


Abbildung 24: Zeitlich gemitteltes Volumenanteilsprofil für unterschiedliche Lufteinlassgeschwindigkeiten

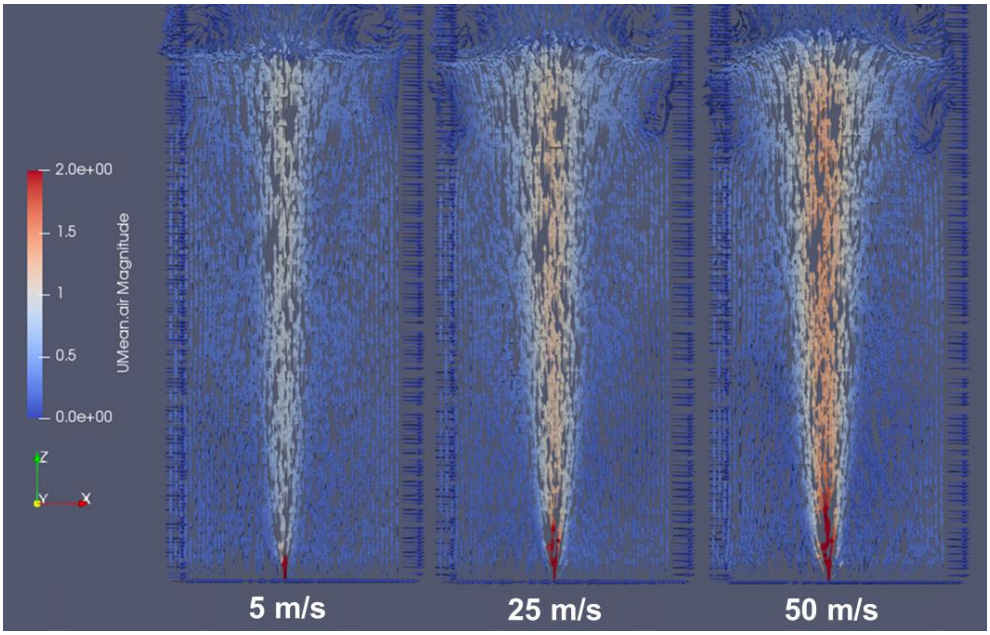


Abbildung 25: Zeitlich gemittelter Luftgeschwindigkeitsvektor in der x-z-Ebene für unterschiedliche Lufteinlassgeschwindigkeiten

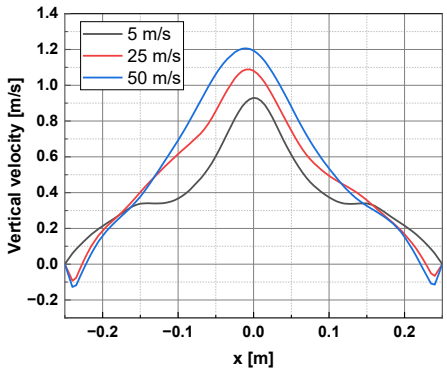


Abbildung 26: Vergleich der vertikalen Luftgeschwindigkeitsverteilung bei *z* = 1000 mm für unterschiedliche Lufteinlassgeschwindigkeiten

Zudem zeigt Abbildung 27 den Einfluss der Eintauchtiefe auf die zeitlich gemittelte Luftgeschwindigkeit im Zentrum der Blasenströmung. Es zeigt sich, dass mit steigender Höher eine größere Maximalgeschwindigkeit erreicht wird und dass das Abfallen der Geschwindigkeit mit steigender Höhe nach dem Maximum langsamer ist.

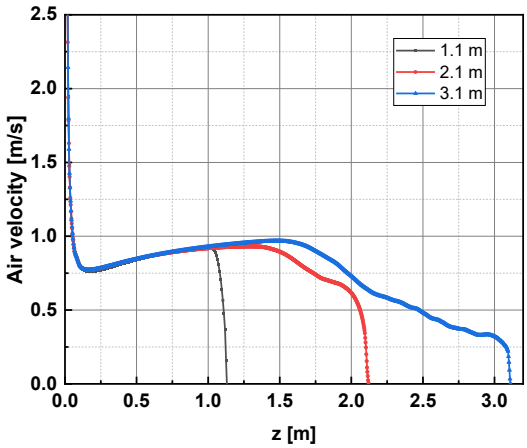


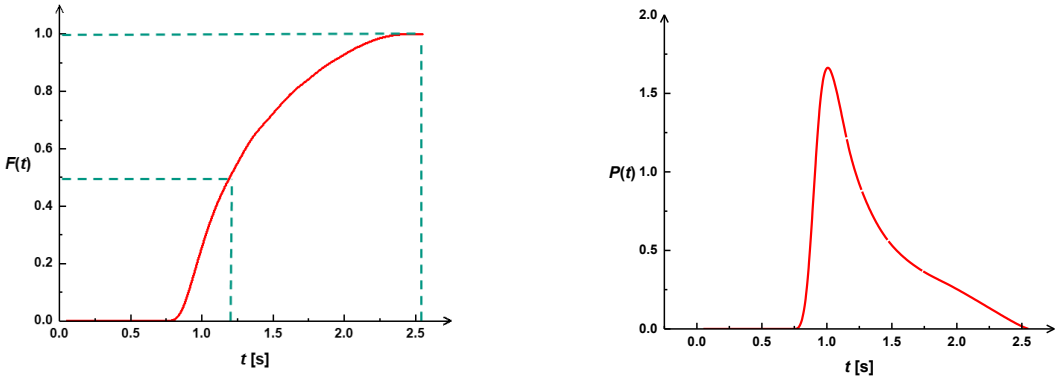
Abbildung 27: Zeitlich gemittelte Luftgeschwindigkeit im Zentrum der Blasenströmung

3.3 Blasenverweilzeit

Der Simulationsfall mit einer Lufteinlassgeschwindigkeit von 5 m/s wurde herangezogen, um die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Blasenausscheidung zu bestimmen. Im PS-Prozess verlassen die erzeugten Blasen schließlich das Becken. Zur Beschreibung dieses Verhaltens kann der Ausscheidungsanteil zum Zeitpunkt *t* durch die kumulative $F_B(t)$-Kurve dargestellt werden als:

$$F_B(t) = \frac{N(t)}{N_{initial}} = \int_0^t P_B(t)\, dt \tag{4}$$

Dabei ist $N_{initial}$ die Gesamtzahl der Blasen zu Beginn des Schwarmströmungsbereichs und $N(t)$ bezeichnet die Anzahl der Blasen, die den Behälter zum Zeitpunkt t bereits verlassen haben. Die kumulative $F_B(t)$-Kurve stellt das Integral der Wahrscheinlichkeitsdichte $P_B(t)$-Kurve dar. Abbildung 28 zeigt die geglättete kumulative $F_B(t)$-Kurve sowie die Wahrscheinlichkeitsdichte $P_B(t)$-Kurve für den Fall mit einer Lufteinlassgeschwindigkeit von 5 m/s, um einen ersten Ausdruck der Verweilzeitverteilung der Blasen zu geben. Im Abschnitt der Modellentwicklung wird das Modell der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Blasenausscheidung eingehend untersucht.



a) b)

Abbildung 28: kumulative $F_B(t)$-Kurve a) und Wahrscheinlichkeitsdichte $P_B(t)$-Kurve

4 Modellentwicklung

Teilaufgabe 5 konzentriert sich auf die Modellentwicklung des Dekontaminationsfaktors, der Partikel- und Blasenverweilzeit unter Berücksichtigung verschiedener Blasen- sowie Partikeleigenschaften.

4.1 Konventionelle Modellierungsmethoden

In Aerosolrückhalte-Codes wie SPARC (Owczarski & Burk 1991), wird der Ausscheidungsfaktor wie folgt bestimmt:

$$DF = e^{\left\{\frac{1}{V}\int_0^\tau \int_A u_n \cdot dA \cdot dt\right\}} \tag{5}$$

Wobei *V* und *A* jeweils für das Volumen und die Oberfläche der Blase stehen, u_n für die Ausscheidungsgeschwindigkeit des Partikels und τ für die Verweilzeit der Blase im Wasserbecken. Es wird angenommen, dass Partikel, sobald sie die Grenzfläche erreichen, dort abgeschieden werden und somit an die Flüssigkeit abgegeben werden. Es lässt sich erkennen, dass der Ausscheidungsfaktor nicht nur vom Blasenverhalten, wie etwa der Blasengeometrie und der Blasenverweilzeit abhängt, sondern auch vom Partikelverhalten innerhalb der Blase, z.B. von der Grenzflächen-Ausscheidungsgeschwindigkeit u_n. Aufgrund des Mangels an zuverlässig validierten Submodellen für die genannten Parameter sind die Anwendbarkeit und Genauigkeit der konventionellen Aerosolrückhaltemodelle fragwürdig. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die in verschiedenen Codes verwendeten Aerosolrückhaltemodelle erhebliche Abweichungen voneinander aufweisen und keines von ihnen hinreichend bestätigt oder ausreichend validiert ist (Herranz & Sánchez 2019).

4.2 Neue Modellmethodik

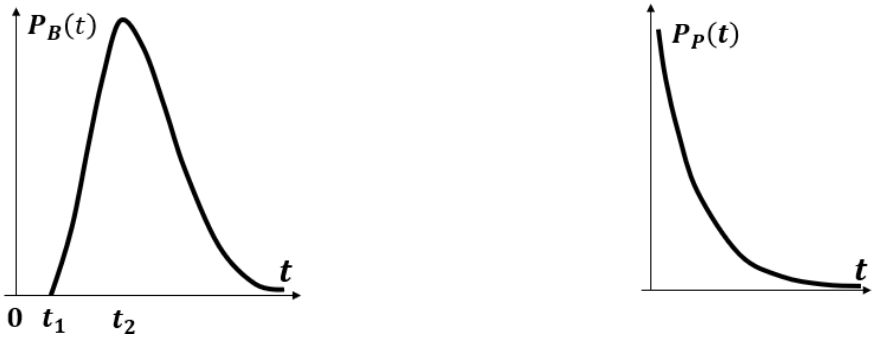
Die neue Methodik konzentriert sich auf die statistische Behandlung der Verweilzeiten sowohl der Blasen im Wasserbecken als auch der Aerosolpartikel innerhalb einer Blase. Zur Erklärung dieser Methodik werden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs) sowohl für die Blasenausscheidung $P_B(\tau)$ als auch für die Partikelausscheidung $P_P(t)$ eingeführt. Sind beide PDFs bekannt, kann der gesamte Ausscheidungsfaktor einfach aus dem Ausscheidungsverhältnis abgeleitet werden als

$$DF = \frac{1}{1 - RR(\infty)} = \frac{1}{1 - \int_0^\infty \left\{1 - \int_0^t P_B(\tau) \cdot d\tau\right\} \cdot P_P(t)\, dt} \tag{6}$$

Das Verhältnis *RR* wird in dieser Arbeit als Ausscheidungsverhältnis bezeichnet. Aus Gleichung (6) ergibt sich, dass der Ausscheidungsfaktor leicht bestimmt werden kann, wenn sowohl die PDFs $P_B(\tau)$ als auch $P_P(t)$ bekannt sind. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Modellen für beide PDFs.

Die erwartete Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Blasenausscheidung im Wasserbecken ist schematisch in Abbildung *29*a) dargestellt. Mit Ausnahme des Zeitintervalls (t_1, t_2), welches durch Anfangsbedingungen beeinflusst wird, kann das gesamte Verhalten in drei Bereiche unterteilt werden, wobei ein monotoner Abfall der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erwartet wird. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Partikelausscheidung innerhalb einer Blase ist qualitativ in Abbildung *29*b) dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Partikelausscheidung könnte gut mit einer abnehmenden Exponentialfunktion korreliert werden:

$$P_P(t) = -\frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN}{dt} = \alpha_P \cdot e^{-\alpha_P \cdot t} \tag{7}$$



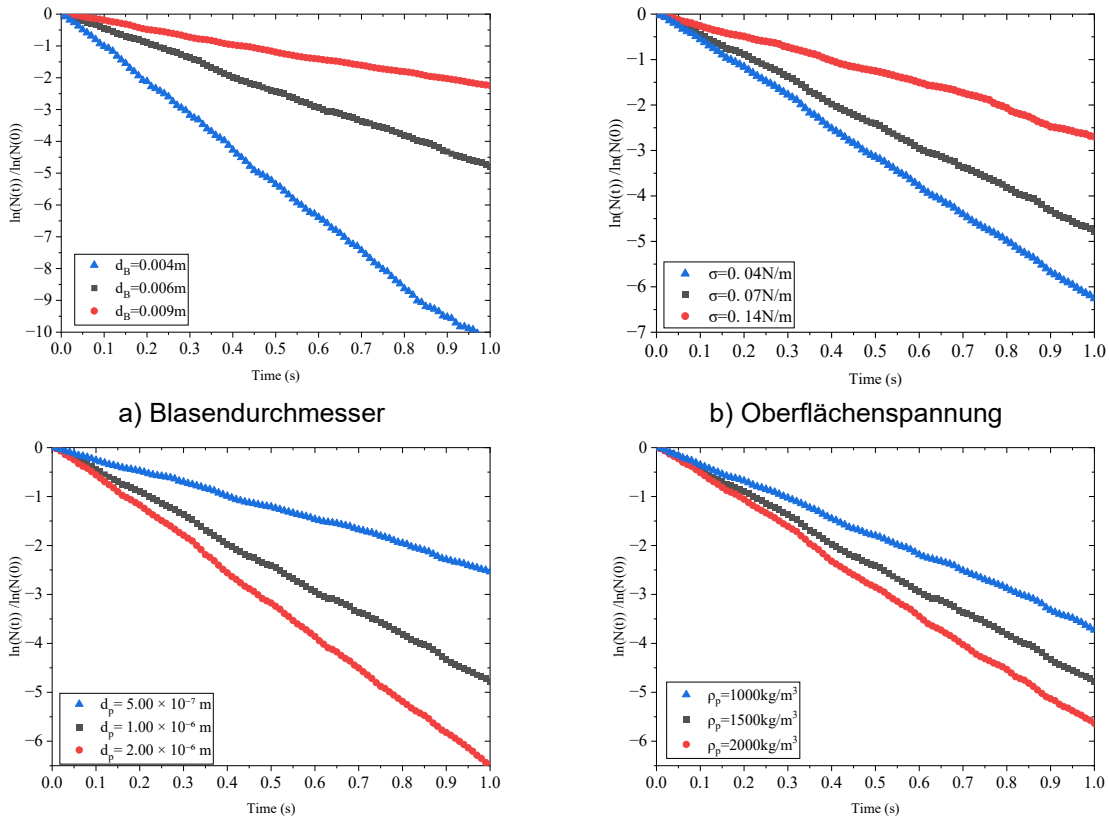
a) b)

Abbildung 29: PDF für die Blasenausscheidung a) und die Partikelausscheidung b)

4.3 Partikelverweilzeit

Um die Faktoren zu untersuchen, die die Verweilzeit der Partikel beeinflussen, wurde eine parametrische Studie durchgeführt, bei der die wichtigsten physikalischen Eigenschaften systematisch variiert wurden. Die Simulationsmatrix baut auf dem Referenzfall auf, wobei Blasendurchmesser, Partikelgröße, Partikeldichte, Oberflächenspannung und Gasviskosität jeweils über repräsentative Bereiche verändert wurden. Da das Ziel hier darin besteht, allgemeine Trends zu erfassen und nicht jeden einzelnen Fall im Detail zu analysieren, werden nicht alle Simulationsergebnisse dargestellt. Stattdessen werden drei repräsentative Datensätze in den Abbildungen präsentiert, um die wichtigsten parametrischen Einflüsse zu veranschaulichen. In Abbildung 30 geben die linearen Trends aus der parametrischen Studie einen klareren Einblick in den Partikelabbauprozess und zeigen, wie verschiedene Parameter die Verweilzeit der Partikel innerhalb der Blase beeinflussen. Bezüglich des Blasendurchmessers (Abbildung 30a)) beeinflusst die Blasengröße erheblich die Streck, die ein Partikel zurücklegt, bevor die Partikel die Grenzfläche bei gegebener Geschwindigkeit erreichen. Dies verringert die Ausscheidungsrate und führt zu einem kleineren α_P. Wie in Abbildung 30b) gezeigt, bestimmt die Oberflächenspannung die Partikel-Weber-Zahl, die die Partikelpenetration an der Grenzfläche steuert. Eine höhere Oberflächenspannung führt zu einer niedrigeren Weber-Zahl, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Grenzflächenpenetration sinkt und somit α_P abnimmt. Die Partikelgröße (Abbildung 30c)) beeinflusst die Relaxationszeit der Partikel in der Gasströmung, also die Fähigkeit des Partikels, sich der Strömungsgeschwindigkeit anzupassen. Ein größeres Partikel führt zu einer längeren Relaxationszeit. Diese Trägheit begünstigt ein früheres Ablösen und eine schnellere Ausscheidung, wodurch α_P steigt. Eine höhere Dichte erhöht die relative Geschwindigkeit zwischen Partikel und Blasengrenzfläche aufgrund der Gravitationsbeschleunigung, wie in Abbildung 30d) gezeigt. Dadurch treffen dichtere Partikel die Grenzfläche mit höheren Geschwindigkeiten, was zu einer schnelleren Ausscheidung führt. Diese Ergebnisse zeigen, dass Blasengröße und Partikeleigenschaften das Verhalten der Verweilzeit dominieren, während die Oberflächenspannung die

Penetrationswahrscheinlichkeit an der Grenzfläche steuert. Im Gegensatz dazu sind die Effekte der Gasviskosität unter den untersuchten Bedingungen minimal.



a) Blasendurchmesser b) Oberflächenspannung

c) Partikeldurchmesser d) Partikeldichte

Abbildung 30: Logarithmischer Verfall der Partikelausscheidung bei variierenden Parametern

Die Parameterstudie ermöglichte ein tieferes Verständnis des Partikelausscheidungsmechanismus und zeigt eine enge Korrelation zwischen der Zerfallskonstanten und den wichtigen Parametern. Auf Basis dieser Beziehung kann ein zuverlässiges Modell für das Partikelausscheidungsverhalten entwickelt und skaliert werden.

4.4 Blasenverweilzeit

In diesem Abschnitt wird die selbe numerische Methode wie in Abschnitt 3 verwendet (Kong & Cheng 2025). Das gesamte Berechnungsgebiet wurde als typische Zylindergeometrie festgelegt mit den Dimensionen *D*×*H* = 0,5 m × 3,5 m. Die Eintauchtiefe h_0 beträgt 3 m. Die Querschnittsfläche der Lufteinströmung befindet sich in einer Höhe von $h_{in} = 0{,}3$ m vom Boden des Wasserbeckens. Die Düse besitzt einen rechteckigen Querschnitt, dessen Fläche so variiert wird, dass die Lufteintrittsgeschwindigkeit konstant 0,5 m/s beträgt.

Der Schwerpunkt dieses Abschnitts liegt auf der Analyse der Blasenverweilzeit. Zur Untersuchung auf die Blasenverweilzeit werden die folgenden beiden Parameter variiert:

- Gasvolumenstrom, $[\mathrm{L/s}]$: 0,1; 0,5; 1,5
- Blasengröße, $[\mathrm{mm}]$: 4; 6; 8

Für die Verteilung der Blasenausscheidungsrate, dargestellt in der vereinfachten Abbildung 31a), folgt im Zeitinterfall (t_2, ∞) die $P_B(t)$-Kurve einem exponentiellen Abfallverhalten und wird daher ausgedrückt als:

$$P_B(t) = \alpha_2 e^{-\alpha_B(t-t_2)} \tag{8}$$

Die Integration der $P_B(t)$-Kurve über das Intervall (t_2, ∞) entspricht dem Blasenanteil der Zone ②, der in diesem Zeitbereich ausgeschieden wird. Um auch den Blasenanteil der ersten Phase ① (t_1, t_2) zu berücksichtigen, wird der Integrationsbereich auf $(t_2 - \tau_0,\ \infty)$ erweitert, wobei das Integral den Wert 1 ergibt, siehe Abbildung 31b). Zur Analyse der Verteilung der Blasenverweilzeit wird der Referenzfall simuliert. Der Blasendurchmesser wird auf 4 mm und der Volumenstrom der eingespeisten Luft auf 0,5 L/s gesetzt. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Blasenausscheidung wird erzeugt und in Abbildung 32 dargestellt.

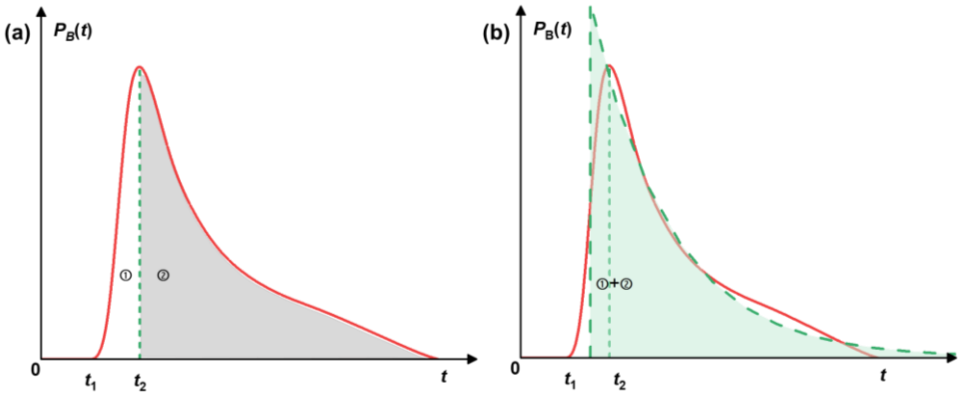


Abbildung 31: Darstellung der vereinfachten $P_B(t)$-Kurve

Die Koeffizienten α_B und α_2 sowie die weiteren Parameter t_2, τ_0 und der Blasenanteil I wurden ermittelt und in

Tabelle 2 zusammengefasst. Mit zunehmendem Volumenstrom steigt die Abbaugeschwindigkeit (α_B) und das Maximum der Ausscheidungsrate (t_2) verschiebt sich zu kleineren Werten. Zudem verändert sich der Blasenanteil, der im zweiten Stadium das Wasserbecken verlässt, unregelmäßig.

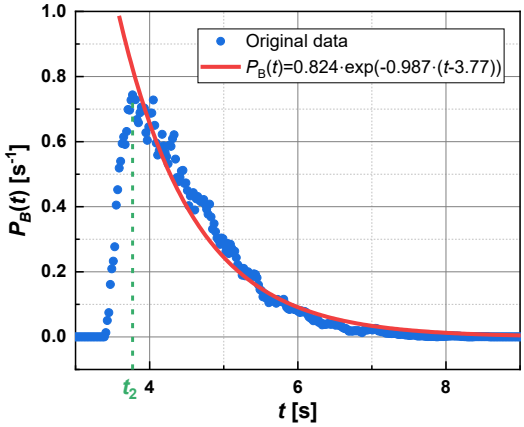


Abbildung 32: Darstellung der Simulationsergebnisse sowie der korrelierten Kurve

Mit steigendem Volumenstrom erhöht sich auch der lokale Volumenanteil, was zu höherem Auftrieb und folglich zu einer höheren Aufstiegsgeschwindigkeit führt. Im Fall von 1,5 L/s wird der Wandeinfluss insbesondere ab der Hälfte der Eintauchtiefe bis zur Wasseroberfläche bedingt durch den hohen Volumenstrom größer. Aufgrund der Wasserzirkulation neigen mehr Blasen dazu, sich zur Wand zu bewegen, infolge steigen Blasen in der Mitte langsamer und mehr Blasen verlassen das Becken vor dem Maximum der Ausscheidungsrate. Hinsichtlich des Blasendurchmessers steigt α_B stark an, der Blasenanteil nimmt ab, und t_2 reduziert sich ebenfalls signifikant mit zunehmendem Blasendurchmesser. Dies liegt daran, dass Blasen mit größerem Durchmesser einen höheren Auftrieb erfahren, was zu einer

höheren Aufstiegsgeschwindigkeit führt. Gleichzeitig neigen größere Blasen aufgrund der Auftriebskraft der Strömung (auch Lift-Force genannt) dazu, sich in der Strömungsmitte zu verteilen. Beides bewirkt, dass die meisten Blasen das Becken schneller verlassen und ein größerer Teil der Blasen bereits im ersten Stadium ausgeschieden wird. Der Blasendurchmesser zeigt einen stärkeren Einfluss auf die Blasenausscheidung, da sowohl die Auftriebs- als auch die Lift-Force proportional zum Quadrat des Blasendurchmessers sind.

Tabelle 2: Parameter zur Entwicklung der PDF für die Blasenausscheidung

Gasvolumenstrom $[\mathbf{L/s}]$	$\mathbf{D_B}$ $[\mathbf{mm}]$	$\boldsymbol{\alpha_2}$ $[\mathbf{1/s}]$	$\boldsymbol{\alpha_B}$ $[\mathbf{1/s}]$	$\mathbf{I}$ $[-]$	$\mathbf{t_2}$ $[\boldsymbol{s}]$	$\boldsymbol{\tau_0}$ $[\boldsymbol{s}]$
0,5	4,0	0,824	0,987	0,835	3,77	0,18
0,5	6,0	4,329	6,288	0,688	2,49	0,06
0,5	8,0	9,451	14,936	0,633	1,91	0,03
0,1	4,0	0,660	0,921	0,717	4,73	0,36
1,5	4,0	0,930	1,133	0,821	3,43	0,17

4.5 Dekontaminationsfaktor

Die numerische Simulation des Einzelblasenaufstiegs mit Partikeltransport wurde mit unterschiedlichen Werten für Blasengröße, Partikelgröße und Partikeldichte durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Partikelausscheidungsverhalten P_P in allen Fällen gut durch eine abklingende Exponentialfunktion beschrieben werden kann, siehe Gleichung (9).

$$P_P(t) = \alpha_P e^{-\alpha_P t} \tag{9}$$

Die Abklingkonstante α_P ist in jedem Fall nahezu konstant. Der Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf die Abklingkonstante wurde physikalisch erklärt.

Die numerische Simulation der Schwarmströmung mit Blasenverfolgung wurde mit unterschiedlichen Gasinjektionsraten und Blasendurchmessern durchgeführt. Eine Methode wurde entwickelt, um den Einfluss der Anfangsbedingungen zu eliminieren. Das Verhalten der Blasenausscheidung P_B, ohne den Einfluss der Anfangsbedingungen, ließ sich ebenfalls gut mit einer abklingenden Exponentialfunktion korrelieren, siehe Gleichung (10):

$$P_B(t) = \begin{matrix} 0\,, & t < t_0 \\ \alpha_B e^{-\alpha_B (t - t_0)}, & t \geq t_0 \end{matrix} \tag{10}$$

Die Abhängigkeit der Abklingkonstante von den Eingangsparametern wurde nachvollziehbar erläutert. Durch die Kombination der Beziehung zwischen dem Dekontaminationsfaktor und den beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Gleichung (6)) mit den oben genannten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (9) und (10), lässt sich der Dekontaminationsfaktor wie folgt einfach bestimmen:

$$DF = \frac{\alpha_B + \alpha_P}{\alpha_B} e^{\alpha_P t_0} \tag{1}$$

Sobald Modelle für die drei Parameter α_B , α_P und t_0 abgeleitet sind, lässt sich der Dekontaminationsfaktor leicht bestimmen. Dies bestätigt eindeutig die Machbarkeit des vorgeschlagenen neuen Ansatzes. Die bisher erzielten numerischen Ergebnisse zeigen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sowohl der Blasenausscheidung als auch der Partikelausscheidung gut durch einfache abklingende Exponentialfunktionen beschrieben werden können. Damit wird die hohe Praktikabilität des neuen Modellierungsansatzes erfolgreich bestätigt.

Fazit

Im NAMPS-Projekt wurden die hydrodynamischen Vorgänge beim Pool-Scrubbing experimentell und numerisch untersucht und wesentliche Unsicherheiten bei der Beschreibung von Blasendynamik, Partikeltransport und Blasenverweilzeit adressiert. Die experimentellen Untersuchungen erweiterten die Datenbasis zur Blasendynamik und zum Dekontaminationsfaktor. Für den Einzelblasenaufstieg wurden numerische Methoden zur Beschreibung der Blasenform und des Transports von Aerosolpartikeln entwickelt und validiert. Darüber hinaus wurde die Schwarmströmung numerisch untersucht und die Verweilzeit der Blasen im Flüssigkeitspool statistisch erfasst.

Ein zentrales Ergebnis des Vorhabens ist die statistische Beschreibung der Ausscheidung von Aerosolpartikeln aus einzelnen Blasen sowie der Ausscheidung von Blasen aus dem Flüssigkeitspool. Für beide Prozesse konnte unter den untersuchten Bedingungen ein exponentielles Abklingverhalten beschrieben werden. Auf dieser Grundlage wurde ein neuer Ansatz zur Modellierung des Dekontaminationsfaktors entwickelt, der die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Partikel- und Blasenverweilzeiten miteinander verknüpft. Die Machbarkeit dieses Ansatzes konnte anhand der numerischen Ergebnisse gezeigt werden.

Damit ist nach Abschluss des Vorhabens eine Beschreibung des Dekontaminationsfaktors möglich, bei der die Verweilzeitprozesse von Blasen und Aerosolpartikeln nicht nur über einzelne charakteristische Größen, sondern über ihre statistischen Verteilungen berücksichtigt werden. Dies stellt gegenüber bestehenden Ansätzen, die wesentliche hydrodynamische Größen vielfach durch empirische Korrelationen auf Basis begrenzter Datensätze beschreiben, eine erweiterte physikalisch-statistische Modellierungsgrundlage dar. Die entwickelten Methoden und Modelle können nach weiterer Validierung und Verfeinerung als Grundlage für eine Implementierung in sicherheitsrelevante Systemcodes dienen und damit perspektivisch zu einer verbesserten Vorhersage der Aerosolrückhaltung beim Pool-Scrubbing beitragen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Verwendung der Mittel erfolgte entsprechend dem wissenschaftlichen Arbeitsprogramm und entspricht der genehmigten Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung. Die Personalmittel wurden zur teilweisen Finanzierung von Doktorandenstellen sowie teilweisen Finanzierung von Postdoc-Stellen verwendet. Die Mittel zur Vergabe von Aufträgen wurden für die experimentellen Untersuchungen am Forschungszentrum Jülich (FZJ) sowie bei der Becker Technologies GmbH aufgewendet. Mietkosten wurden dabei fällig, da sich ein Doktorand für die experimentellen Untersuchungen am Standort in Jülich aufgehalten haben. Des Weiteren wurden die Mittel für die Dienstreisen verwendet, um Meetings für das Projekt in Präsenz abhalten zu können sowie Konferenzen und Forschungsaufenthalte wahrnehmen zu können.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die Arbeiten wurden stehts nach dem vorliegenden Arbeitsplan zur Erreichung der vorgesehenen Projektziele durchgeführt.

Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans

Im Rahmen des Projekts wurden neue Erkenntnisse zur besseren Beschreibung der Schwarmströmung und der Verweilzeit der Blasen sowie der Partikel gewonnen, die als Grundlage für weitere wissenschaftliche und anwendungsnahe Projekte verwendet werden können. Durch weitere experimentelle Untersuchungen kann das Verständnis erweitert werden und das neu entwickelte Modell

mit weiteren Daten verfeinert werden. Anschließend kann das neu entwickelte Modell in sicherheitsrelevante Systemcodes implementiert werden und somit die Vorhersagegenauigkeit dieser verbessern.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurden keine relevanten Publikationen von Dritten veröffentlich, die den Ablauf des Projekts beeinflusst haben.

Veröffentlichungen

Die Forschungsergebnisse wurden in gemeinsamen Publikationen in Fachzeitschriften und Abschlussarbeiten veröffentlicht, was ihre langfristige Zugänglichkeit gewährleistet. Zusätzlich wurden die aktuellen Ergebnisse während der Projektdauer auf verschiedenen Konferenzen durch Vorträge präsentiert und/oder veröffentlicht.

Fachzeitschriften:

Mei, Z., Kong, F., & Cheng, X. (2022): Modeling of submicron particle transport based on VOF-LPT method. Chemical Engineering Science, 264. doi:10.1016/j.ces.2022.118168

Mei, Z., & Cheng, X. (2023): Impact of bubble dynamics on aerosol transport based on CFD analysis. Progress in Nuclear Energy, 161. doi:10.1016/j.pnucene.2023.104723

Mei, Z., & Cheng, X. (2024): Analysis of single bubble dynamics based on VOF method. Annals of Nuclear Energy, 208. doi:10.1016/j.anucene.2024.110757

Kong, F., & Cheng, X. (2025): Analysis of swarm flow and bubble residence time under pool scrubbing conditions. Annals of Nuclear Energy, 211. doi:10.1016/j.anucene.2024.110956

Cheng, X., Kong, F., & Chen, X. (2025): Modelling of decontamination factor in swarm flow based on residence times. Nuclear Engineering and Design, 444. doi:10.1016/j.nucengdes.2025.114390

Thesis:

Mei, Z. (2024): CFD simulation of bubbly flow under pool scrubbing conditions, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000167970

Konferenz-Veröffentlichungen:

Mei Z. & Cheng X. (2023): Influence of gas-liquid surface tension on aerosol removal based on CFD method, Computational Fluid Dynamics for Nuclear Reactor Safety (CFD4NRS-9), February 20-21, 2023.

Kong, F., Chen, X., & Cheng, X: (2025). Investigation on bubble residence time of swarm flow in pool scrubbing process. 21st International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-21), Busan, Korea, 31 Aug. – 5 Sep. 2025.

Konferenzbeiträge:

Kong, F.; Mei, Z.; Cheng, X. (2024): CFD simulation of swarm flow behavior and bubble residence time under pool scrubbing conditions, Presentation report at 35. CFD Verbund Meeting, 12.-13. March 2024, GRS Garching, Germany.

Chen, X., Kong, F., & Cheng, X. (2025): Statistical method for the modeling of decontamination factor based on CFD simulation, Presentation report at 36. CFD Verbund Meeting, 18.-19. March 2025, GRS Garching, Germany.

Literaturverzeichnis

Abe, Y., Fujiwara, K., Saito, S., Yuasa, T., & Kaneko, A. (2018). Bubble dynamics with aerosol during pool scrubbing. Nuclear Engineering and Design, 337, 96-107. doi:10.1016/j.nucengdes.2018.06.017

Akbar, M. K., & Ghiaasiaan, S. M. (2006). Monte Carlo simulation of aerosol transport in rising gas bubbles undergoing shape deformation. Journal of Aerosol Science, 37(6), 735-749. doi:10.1016/j.jaerosci.2005.06.006

Allelein, H. J., Klauck, M., Vennemann, R., & Wu, Y. (2019). Proposal for a procedure to ensure comparability of measured results in aerosol-related experiments. 3rd Meeting of the IPRESCA, Frankfurt/Main, Germany.

Allelein, H. J., Kobalz, J., Kubelt, C., Küpper, J., Steffen, P. M., & de Winter, R. (2018). Severe accident aerosol behaviour. Final report. Research Project No.: 1501454. Aachen, Germany.

Bicer, E., Cho, H. K., & Joon, H. S. (2021). CFD simulation of high inlet velocity air flow into a large tank at pool scrubbing conditions. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting.

Bicer, E., Hong, S.-J., & Cho, H. K. (2024). Investigation of equivalent spherical bubble diameter at high inlet velocity pool scrubbing conditions. Nuclear Engineering and Technology, 56(10), 4307-4326. doi:10.1016/j.net.2024.05.036

Cao, Y., & Macián-Juan, R. (2021). The wobbling motion of single and two inline bubbles rising in quiescent liquid. Physics of Fluids, 33(7), 073305. doi:10.1063/5.0055804

Cook, D. H. (1984). Pressure suppression pool thermal mixing (NUREG/CR-3471). https://inis.iaea.org/records/h9v2t-8kb85

Fujiwara, K., Kikuchi, W., Nakamura, Y., Yuasa, T., Saito, S., Kaneko, A., & Abe, Y. (2019). Experimental study of single-bubble behavior containing aerosol during pool scrubbing. Nuclear Engineering and Design, 348, 159-168. doi:10.1016/j.nucengdes.2019.04.015

Hänsch, S., Evdokimov, I., Schlegel, F., & Lucas, D. (2021). A workflow for the sustainable development of closure models for bubbly flows. Chemical Engineering Science, 244, 116807. doi:10.1016/j.ces.2021.116807

Herranz, L. E., Escudero, M. J., Peyrés, V., Polo, J., & Lopez, J. (1996). Review and assessment of pool scrubbing models (CIEMAT--784). CIEMAT. https://inis.iaea.org/records/v0d3k-nhb76

Herranz, L. E., & Sánchez, F. (2019). Critical assessment of the pool scrubbing database. 3rd Meeting of the IPRESCA Project, Frankfurt, Germany.

Hill, M. J. M. (1894). On a spherical vortex. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A, 185, 213-245.

Kong, F., & Cheng, X. (2025). Analysis of swarm flow and bubble residence time under pool scrubbing conditions. Annals of Nuclear Energy, 211. doi:10.1016/j.anucene.2024.110956

Laker, T. S., & Ghiaasiaan, S. M. (2004). Monte-carlo simulation of aerosol transport in rising spherical bubbles with internal circulation. Journal of Aerosol Science, 35(4), 473-488. doi:10.1016/j.jaerosci.2003.10.007

Lalanne, B., Tanguy, S., & Risso, F. (2013). Effect of rising motion on the damped shape oscillations of drops and bubbles. Physics of Fluids, 25(11), 112107. doi:10.1063/1.4829366

Le Moullec, Y., Potier, O., Gentric, C., & Pierre Leclerc, J. (2008). Flow field and residence time distribution simulation of a cross-flow gas–liquid wastewater treatment reactor using CFD. Chemical Engineering Science, 63(9), 2436-2449. doi:10.1016/j.ces.2008.01.029

Lee, D. G., & Kim, H. Y. (2008). Impact of a superhydrophobic sphere onto water. Langmuir, 24, 142-145.

Lee, Y. H., & Cho, Y. J. (2019). Results on benchmark problem for bubble hydrodynamics & preliminary sensitivity studies on size distribution of bubbles to decontamination factor via I-COSTA. 3rd Meeting of the IPRESCA Project, Frankfurt, Germany.

Li, S., Apanasevich, P., Lucas, D., & Liao, Y. (2023). Euler-Euler CFD simulation of high velocity gas injection at pool scrubbing conditions. Experimental and Computational Multiphase Flow, 5(4), 365-380. doi:10.1007/s42757-022-0149-3

Liao, Y., Li, J., & Lucas, D. (2022). Investigation on pool-scrubbing hydrodynamics with VOF interface-capturing method. Nuclear Engineering and Design, 390, 111713. doi:10.1016/j.nucengdes.2022.111713

Lucas, D., & Schlegel, F. (2019). Coordination of work on multiphase CFD in OpenFOAM. Private Communication.

Mei, Z., & Cheng, X. (2022a). CFD simulation of instantaneous shape oscillation with rising velocity fluctuation for single bubble rising in water. Annals of Nuclear Energy, 174. doi:10.1016/j.anucene.2022.109153
Mei, Z., & Cheng, X. (2022b). Modeling of interfacial area for single deformed bubble based on VOF method. Nuclear Engineering and Design, 395. doi:10.1016/j.nucengdes.2022.111864
Mei, Z., & Cheng, X. (2022c). Parametric study of aerosol deposition on gas bubble surface based on CFD method. Paper presented at the 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-13), Taichung, Taiwan.
Mei, Z., & Cheng, X. (2023). Impact of bubble dynamics on aerosol transport based on CFD analysis. Progress in Nuclear Energy, 161. doi:10.1016/j.pnucene.2023.104723
Mei, Z., & Cheng, X. (2024). Analysis of single bubble dynamics based on VOF method. Annals of Nuclear Energy, 208. doi:10.1016/j.anucene.2024.110757
Mei, Z., Kong, F., & Cheng, X. (2022). Modeling of submicron particle transport based on VOF-LPT method. Chemical Engineering Science, 264. doi:10.1016/j.ces.2022.118168
Motegi, K., Yasuteru, S., & and Kukita, Y. (2022). Nonuniform particle distribution and interference between removal mechanisms during unsteady aerosol deposition from a rising spherical bubble. Journal of Nuclear Science and Technology, 59(8), 1037-1046. doi:10.1080/00223131.2022.2029724
Owczarski, P. C., & Burk, K. W. (1991). SPARC-90: A code for calculating fission product capture in suppression pools (NUREG/CR-5765). United States. https://www.osti.gov/biblio/6120360
Tomiyama, A., Celata, G. P., Hosokawa, S., & Yoshida, S. (2002). Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime. International Journal of Multiphase Flow, 28(9), 1497-1519. doi:10.1016/S0301-9322(02)00032-0
Vennemann, R., Klauck, M., & Allelein, H. J. (2022). Experimental Investigation on the Retention of Soluble Particles by Pool Scrubbing. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 8(4). doi:10.1115/1.4051250
Wang, A., Song, Q., & Yao, Q. (2015). Behavior of hydrophobic micron particles impacting on droplet surface. Atmospheric Environment, 115, 1-8. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.05.053
Yoshida, K., Fujiwara, K., Nakamura, Y., Kaneko, A., & Abe, Y. (2022). Experimental study of interfacial area of bubble plume based on bubble tracking by wire-mesh sensor. Nuclear Engineering and Design, 388, 111645. doi:10.1016/j.nucengdes.2021.111645
Zhu, S., Zhao, C., Lin, J., Zhang, W., Sheng, Y., & Chen, X. (2020). Impact behavior of hydrophilic microparticles on the particle-laden interface. Chemical Engineering Science, 227. doi:10.1016/j.ces.2020.115913