

Schlussbericht zum 7. Energieforschungsprogramm

Fördermaßnahme: PT-GRS Reaktorsicherheitsforschung

Förderbereich: Kompetenzerhalt in der Kerntechnik

**3D Turbulenzmessungen in Zweiphasenströmungen zur Validierung von CFD-
Methoden im Bereich der Reaktorsicherheit (2PhaseMRV)**

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.01.2025

Zuwendungsempfänger: Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau- und Schiffstechnik, Lehrstuhl
Strömungsmechanik

Projektleitung: Dr.-Ing. Martin Bruschewski

Berichterstellung: David Frank

Förderkennzeichen: 1501643

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

Die Magnetresonanzvelocimetrie (MRV) wurde in diesem Projekt erfolgreich für die Untersuchung von Zweiphasenströmungen eingesetzt, um „CFD-grade“-Validierungsdaten zu generieren. Im Rahmen des Projekts wurden hochwertige experimentelle Daten zu Luftanteilen, Geschwindigkeitsverteilungen und Turbulenzstatistiken in dispersen Wasser-Luft-Strömungen erhoben. Diese Daten sind essenziell für die Validierung numerischer Simulationen, insbesondere unter Bedingungen, die in der Reaktorsicherheitsforschung relevant sind.

Die Untersuchungen umfassten sowohl akademische als auch industrielle Benchmarks. In beiden Benchmarks wurden detaillierte 3D- und 2D-Messungen durchgeführt, die als Referenzdaten und Randbedingungen für CFD-Modelle dienen können. Diese Messungen wurden im Fall des akademischen Benchmarks mit optischen zeitaufgelösten Messmethoden ergänzt. Der industrielle Benchmark konzentrierte sich auf eine realistische Reaktorströmung, einschließlich einer Lufteinblasung vor einem Mischgitter. Dabei konnten präzise Geschwindigkeitsfelder, Luftanteile und Reynolds-Spannungstensoren mit einer räumlichen Auflösung von 1,5 mm erfasst werden. Diese umfassenden Datensätze bieten nicht nur wertvolle Erkenntnisse für die Reaktorsicherheitsforschung, sondern können auch in anderen ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen eingesetzt werden. Das Projekt demonstriert das Potenzial von MRV als nicht-invasive Messtechnik zur Untersuchung komplexer Strömungsphänomene und stellt einen wichtigen Fortschritt in der Validierung von CFD-Methoden dar.

Abstract

Magnetic Resonance Velocimetry (MRV) was successfully utilized in this project to investigate two-phase flows and generate "CFD-grade" validation data. High-quality experimental datasets were collected, including void fractions, velocity distributions, and turbulence statistics in bubbly flows. These data are essential for validating computational fluid dynamics (CFD) simulations, particularly under conditions relevant to reactor safety research. The research encompassed both academic and industrial benchmarks. The academic benchmark involved detailed 3D and 2D measurements, which serve as validation data and optional boundary conditions for CFD models. The industrial benchmark focused on a realistic reactor environment, featuring air injection before a mixing grid. Innovative MRV methods were employed, enabling three-dimensional analysis of turbulent flows without the limitations of optical techniques. With a spatial resolution of up to 1.5 mm, precise measurements of velocity fields, phase fractions, and Reynolds Stress Tensors were achieved. These comprehensive datasets offer valuable insights for the field of reactor safety research and also have potential applications in other engineering disciplines. The project demonstrates the capabilities of MRV as a non-invasive technique for studying complex flow phenomena and represents a significant advancement in the validation of CFD methods.

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	5
1.	Aufgabenstellung	5
2.	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4.	Wissenschaftlich und technischer Stand	6
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II.	Eingehende Darstellung	9
1.	Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse	9
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	21
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	21
4.	Verwertbarkeit der Ergebnisse	23
5.	Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen	23
6.	Erfolge oder geplante Veröffentlichungen	23
III.	Literaturverzeichnis	25

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

In diesem Vorhaben wurde eine experimentelle Methode zur präzisen Bestimmung sicherheitsrelevanter Strömungsgrößen in isothermen Zweiphasenströmungen entwickelt und getestet. Die Methode basiert auf der Magnetic Resonance Velocimetry (MRV), einer Messtechnik, die es ermöglicht, dreidimensionale Strömungsdaten ohne optischen Zugang zu erfassen. Herkömmliche experimentelle Verfahren sind oft durch ihre begrenzte räumliche und physikalische Erfassungsfähigkeit eingeschränkt und erlauben nur punktuelle (z. B. Laser Doppler Velocimetry, LDV) oder zweidimensionale (z. B. Particle Image Velocimetry, PIV) Messungen. Diese Beschränkungen sind besonders kritisch bei der Untersuchung von Zweiphasenströmungen, wie sie in modernen Reaktortypen auftreten, da lokale Phänomene wie die Verteilung von Luft- oder Dampfblasen und turbulente Mischungsvorgänge nicht vollständig erfasst werden können.

Eine detaillierte Analyse solcher Strömungsphänomene ist jedoch entscheidend für die sicherheitstechnische Bewertung zukünftiger Reaktorkonzepte, insbesondere Small Modular Reactors (SMRs) sowie Boiling Water Reactors (BWRs). Numerische Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics, CFD) spielen dabei eine zentrale Rolle, stoßen jedoch an Grenzen, da sie empirische Modelle verwenden, die sorgfältig validiert werden müssen. Ziel dieses Vorhabens war es daher, die Lücke zwischen bestehenden experimentellen Methoden und CFD-Simulationen zu schließen, indem experimentelle Vergleichsdaten generiert werden, die speziell auf die Validierung von CFD-Modellen abzielen.

Die im Projekt weiterentwickelte MRV-Messtechnik ermöglicht die Erfassung dreidimensionaler, zeitlich gemittelter Geschwindigkeitsvektoren sowie der Turbulenzstatistik in Form des Reynolds'schen Spannungstensors in der Flüssigkeitsphase. Überdies können die räumliche Verteilung der Gasphase (Blasenverteilung) und andere kritische Strömungsgrößen in isothermen Gas-Wasser-Strömungen präzise gemessen werden. Diese Daten sind essenziell, um CFD-Modelle zu kalibrieren und die Simulationsergebnisse unter realistischen Bedingungen zu validieren.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei Benchmark-Tests entwickelt und unter Betriebsbedingungen durchgeführt, die typische Strömungsverhältnisse in Reaktoren repräsentieren. Die erfassten Daten dienen nicht nur der Validierung von CFD-Codes, sondern auch der Untersuchung grundlegender Strömungsphänomene in Zweiphasenströmungen.

Ein besonderer Fokus lag auf der Erfassung der Turbulenzmodulation, die durch die Präsenz von Luftblasen unter reaktorspezifischen Bedingungen erfolgen. Bisher gab es keine vergleichbaren Studien zur dreidimensionalen Erfassung des Reynolds'schen Spannungstensors unter diesen Bedingungen. Die generierten Vergleichsdaten

bieten daher einen erheblichen Mehrwert für die Weiterentwicklung und Validierung von CFD-Methoden, um zukünftige Reaktorkonzepte sicherheitstechnisch zu optimieren.

2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Seitens des Antragsstellers wurden während der Projektlaufzeit folgende personelle Rahmenbedingungen bereitgestellt:

- Fachgebietsleiter (wissenschaftliche Betreuung und Anleitung)
- Laborleitung (technische Betreuung)
- Studentische Hilfskräfte (Unterstützung bei der Durchführung der Experimente)
- Hochschulverwaltung (Controlling, Beschaffung, Finanzbuchhaltung)

Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik konnte das MRI Flow Lab genutzt werden, das mit einem 3-Tesla-Ganzkörperscanner (Magnetom Trio, Siemens, Erlangen) ausgestattet ist. Dieser Magnetresonanztomograf (MRT) zeichnet sich durch eine besonders hohe Magnetfeldqualität im Messbereich aus und ermöglicht präzise Messungen für strömungstechnische Untersuchungen. Ergänzend dazu bietet das Labor eine umfassende Infrastruktur mit Pumpen und Sensoren, die den Aufbau vielfältiger Versuchsaufbauten ermöglichen. Das Gebäude ist speziell für strömungsmechanische Studien konzipiert und verfügt über ein Schwerlastsystem zur Bewegung großer Modelle, große Durchführungen zur Integration von Rohrleitungen bei gleichzeitiger Abschirmung elektromagnetischer Störungen sowie einen versiegelten Boden zum Schutz vor Wasserschäden. Die Räumlichkeiten erlauben die Installation und den dauerhaften Betrieb komplexer Strömungssysteme.

Für Vorversuche, Versuchsvorbereitungen und Anwendung optischer Messmethoden stand ein weiteres Labor in der Strömungshalle zur Verfügung. Dieses ist ausgestattet mit einem optischen Tisch, einer zentralen Druckluftversorgung, einem Pumpensystem mit integrierten Sensoren, einem 1-Komponenten-Laser-Doppler Anemometer (LDA) sowie einem Particle Image Velocimetry (PIV)-System mit zwei CCD-Kameras.

Das Budget des Vorhabens für die Ausführung des Vorhabens belief sich auf 246.478,80 €.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß der ursprünglichen Projektplanung war das Vorhaben auf einen Zeitraum von drei Jahren ausgelegt. In diesem Zeitraum sollten planmäßig drei Studien durchgeführt werden: Eine Basisstudie sowie eine akademische und eine industrielle Benchmarkstudie.

Der Projektverlauf war geprägt von iterativen Entwicklungen, technischen Herausforderungen und infrastrukturellen Einschränkungen, die schrittweise überwunden wurden, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Die ursprünglich geplante Basisstudie, die eine Untersuchung einer Gas-Flüssigkeits-Strömung in einem Rohr vorsah, wurde aufgrund von Instabilitäten im Bereich der reaktortypischen Geschwindigkeiten verworfen. Stattdessen wurde ein Versuchsstand mit einer rückwärts gerichteten Stufe entwickelt, der hohe Turbulenzen bei reaktortypischen Geschwindigkeiten erzeugt. Nach umfangreichen Vorversuchen, durchgeführt in enger Zusammenarbeit mit der Framatome GmbH, konnte ein optimierter Aufbau bereitgestellt werden, der sowohl für die Basisstudie als auch für den akademischen Benchmark genutzt wurde.

Da keine geeigneten Literaturdaten für Mehrphasenströmungen vorlagen, war es notwendig, Referenzdaten durch eine aufwendige optische Messkampagne selbst zu generieren. Diese wurden durch die zeitweilige Schließung der Strömungshalle aufgrund eines Schimmelpilzbefalls die Arbeiten verzögert. Durch eine Priorisierung der Laborarbeiten während der begrenzten Nutzungszeit der Halle konnten jedoch die benötigten Daten rechtzeitig erhoben werden.

Die Entwicklung und Durchführung der industriellen Benchmarkstudie verliefen planmäßig und konnten erfolgreich abgeschlossen werden.

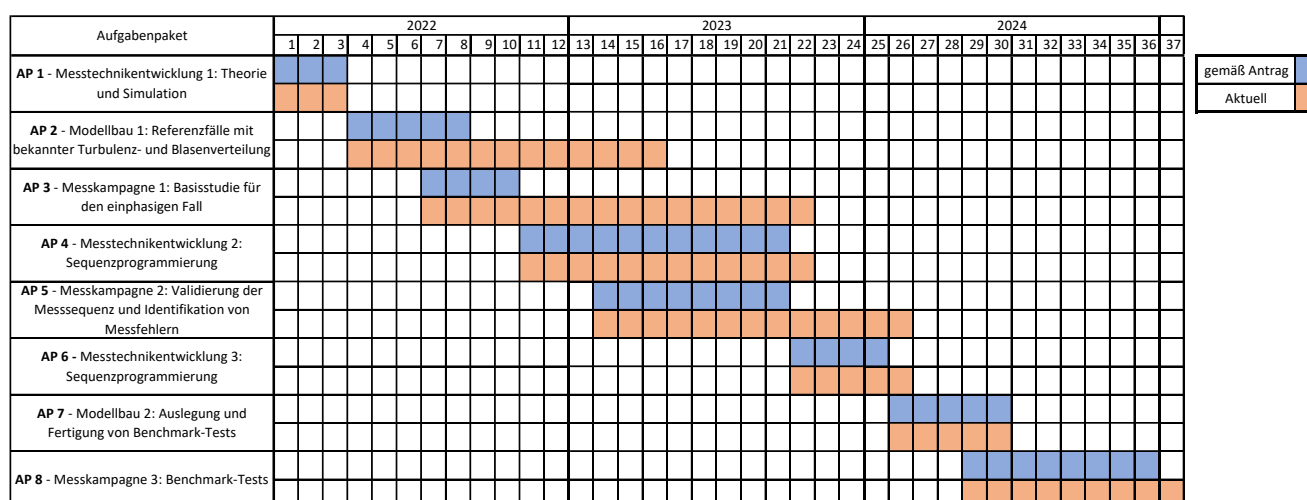


Abbildung 1: geplanter und tatsächlicher Projektverlauf

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Turbulente Zweiphasenströmungen, insbesondere turbulente disperse Flüssigkeit-Gas Strömungen, finden in zahlreichen ingenieurtechnischen, chemischen und umwelttechnischen Anwendungen Verwendung. Sie sind jedoch eines der komplexesten Phänomene der Strömungsmechanik. Die Dynamik solcher Strömungen wird durch die Wechselwirkung zwischen Turbulenz in der Flüssigkeit und der dispersen Gasphase geprägt, wobei unter anderen Effekte wie Blasen-induzierte Turbulenz (Bubble-Induced Turbulence, BIT) auftreten. Diese

Phänomene sind schwer zu modellieren und erfordern umfangreiche experimentelle Daten zur Validierung numerischer Ansätze (Risso, 2018; Mathai et al., 2020).

Die Validierung von Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modellen spielt insbesondere in sicherheitskritischen Anwendungsbereichen, wie der Kernreakorteknik, eine entscheidende Rolle. Die Präzision von CFD-Simulationen ist in entscheidendem Maße von experimentellen Daten abhängig, die zur Verifizierung der Modelle erforderlich sind. Jede Abweichung, die sich aus einer ungenauen Modellierung ergibt, potenziert sich im Simulationsergebnis (Khan et al., 2020). Um CFD-Modelle zu validieren, sind präzise experimentelle Daten unabdingbar. Dazu zählen vorwiegend dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder, Informationen zu den Turbulenzgrößen sowie Daten zur Verteilung und Verhalten der Gasphase (Khan et al., 2020).

Konventionelle Messmethoden wie Wire-Mesh-Sensoren, Gamma-Tomographie oder optische Verfahren wie Particle Imaging Velocimetry (PIV) stoßen bei Zweiphasenströmungen oft an ihre Grenzen. Beispielsweise beeinträchtigt die Gasphase bei PIV-basierten Methoden die optische Zugänglichkeit und erschwert die getrennte Erfassung von Träger- und Dispersionsphase (Poelma, 2020). Nicht-optische, nicht-invasive Verfahren wie Ultraschall-Velocimetrie, Röntgenbildgebung und Magnetresonanz-Velocimetrie (MRV) gewinnen daher zunehmend an Bedeutung, da sie detaillierte Messungen auch unter opaken Strömungsbedingungen ermöglichen (Elkins & Alley, 2007; Heindel, 2011; Poelma, 2017).

Die MRV-Technik, ursprünglich aus der Medizintechnik stammend, ermöglicht die dreidimensionale Messung von Strömungsgrößen und eignet sich in besonderem Maße für die Untersuchung von Mehrphasensystemen. Die Methode basiert auf der Magnetresonanz der Atomkerne (NMR – Nuclear Magnetic Resonance) und nutzt Magnetfeldgradienten sowie Hochfrequenzanregungen, um Informationen über Geschwindigkeits- und Stoffgrößen im Strömungsfeld zu codieren und auszulesen. Ein wesentlicher Vorteil der MRV-Technik besteht darin, dass keine optische Zugänglichkeit erforderlich ist, wodurch sie sich insbesondere für dichte Blasenströmungen oder schwer zugängliche Geometrien eignet.

Im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung wurden bereits mehrere "CFD-grade"-Studien unter einphasigen, isothermen, turbulenten, reaktorähnlichen Strömungsbedingungen durchgeführt (Piro et al. 2017 & 2020, Bruscheckski et al. 2020 & 2021a, Oliveira et al. 2020). Überdies wird die Methode als unabdingbar erachtet, um das Verständnis komplexer dreidimensionaler Mehrphasenströmungen zu vertiefen und dem Mangel an mehrdimensionalen Validierungsdaten für Mehrphasenströmungen zu begegnen (Lemmonier, 2010). In den vergangenen Jahren wurden hochauflösende MRV-Daten zur Validierung numerischer Simulationen von partikelbeladenen Rohrströmungen, genauer gesagt des hydraulischen Transports einer Auftriebs-neutralen dispersen Phase herangezogen (Hogendoorn et al. 2023; Leskovec et al. 2024). Des Weiteren findet die Methode Anwendung bei der Messung von dispersen Flüssigkeit-Gas-Strömungen, wobei bisher keine Untersuchungen

unter reaktorähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden (Lemonnier, 2011; Mastikhin et al., 2012; Arbabi et al., 2012).

Dieses Projekt adressiert die Herausforderungen turbulenter Zweiphasensysteme unter reaktorähnlichen Bedingungen, indem gezielte Benchmarks erstellt werden, mit dem Ziel, das physikalische Verständnis zu erweitern und bei der Modellierung solcher Strömungen zu unterstützen. Diese Benchmarks bieten eine geeignete Grundlage für die MRV-gestützte Validierung von CFD-Modellen. Ergänzend zu den MRV-Messungen wird die Gasphasendynamik durch Schattengrafie-Methoden analysiert, die statistische Daten zu Blasengrößen und -formen liefern. Die hier entwickelte Methodik stellt ein Rahmenwerk zur Erstellung von Validierungsdaten von mehrdimensionalen dispersen Mehrphasenströmungen dar, welches auch in Zukunft Anwendung finden wird.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde ausschließlich vom Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock bearbeitet. Im Verlauf des Projektes erfolgte ein regelmäßiger Austausch mit der Framatome GmbH in Erlangen, die mit ihrer langjährigen Expertise in diesem Bereich einen wertvollen Beitrag leisten konnte.

- Framatome GmbH
Paul-Gossen-Straße 100
91052 Erlangen

II. Eingehende Darstellung

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Die planmäßige Durchführung der Benchmark-Tests sollte in drei Etappen ablaufen. Als Erstes soll ein Referenzsystem entworfen werden, das eine kontrollierbare Blasenverteilung in einer horizontalen Zweiphasenströmung bereitstellt und für die es hochwertige Literaturdaten gibt. Dieses Referenzsystem soll dann anhand der bereits entwickelten MRV-Turbulenzmesstechnik in Schmidt et al. (2021) vermessen werden und somit als Basisstudie dienen für die weiteren Entwicklungen. Daraufhin folgt eine iterative Entwicklungsphase, wo Messfehler identifiziert werden und die Messmethode dementsprechend optimiert wird. In der letzten Etappe werden in Kooperation mit der Framatome GmbH ein akademischer und ein industrienaher Benchmark-Test entwickelt und in einer abschließenden Messkampagne mit den verbesserten Methoden gemessen. Die Messdaten werden anschließend veröffentlicht.

Der tatsächliche Ablauf gestaltete sich allerdings anders, wie aus den folgenden Kapiteln ersichtlich sein wird. Als geplante Referenzstudie wurde eine Gas-Flüssigkeitsströmung in ein horizontales Rohr gewählt. Diese bietet sich an aufgrund der horizontalen Ausrichtung und ausreichender Literaturdaten. Diese wurde allerdings nach

Vorversuchen als ungeeignet für unsere Ziele eingestuft. Stattdessen wurde eine Strömung über eine rückwärtsgewandte Stufe mit Gaseinblasung gewählt als Basisstudie. Den Mangel an Literaturdaten wurde mit einer zusätzlichen Schattengrafie Messkampagne kompensiert. Die neue Basisstudie wurde auch direkt als geeigneter akademischer Benchmark-Test verwendet.

Die Entwicklung des industriellen Benchmark-tests lief allerdings genau nach Plan und konnte sogar erweitert werden, mit Temperaturmessungen aus einem OFFERR Projekt, wo eine Temperaturmessung in einem identischen Set-up durchgeführt wurde.

1.1 Pilotstudie: Luftbeladene Rohrströmung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurden experimentelle Untersuchungen an Gas-Flüssigkeitsströmungen in horizontalen Rohren durchgeführt. Das System wurde so ausgelegt, dass die Dimensionen mit den bestehenden Pumpensystemen des MRI-Flow Lab kompatibel sind. Für die Vorversuche wurde der Aufbau im offenen Gerinne der Strömungshalle installiert. Der Aufbau wird in Abbildung 2 dargestellt. Ziel war es, die in der Literatur beschriebenen Strömungsmuster zu erzeugen und mit existierenden Modellen abzugleichen. Die Strömungsbedingungen für die Experimente wurden anhand der Strömungsformkarten von Taitel und Dukler (1976), Manera et al. (2009) und Weisman et al. (1979) hergeleitet. In späteren MRV-Messungen sollten die Luftanteile mit Literaturdaten sowie empirischen Modellen wie denen von Ghajar und Tang (2009) verglichen werden.

Der experimentelle Aufbau bestand aus einer 6 m langen, horizontalen Messstrecke aus transparentem PVC, die eine visuelle Analyse der Strömungsmuster ermöglichte. Zur Untersuchung geometrischer Einflüsse wurden zwei Rohrdurchmesser (34 mm und 44 mm) verwendet. Für die Mischung von Gas und Flüssigkeit kamen drei unterschiedliche Mischdüsen zum Einsatz, um den Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Strömungsmuster zu analysieren. Magnetisch-induktive Sensoren für Flüssigkeiten und kalorimetrische Sensoren für Gase ermöglichten präzise Messungen der Durchflüsse. Als Gasphase wurde trockene Druckluft aus der zentralen Druckluftversorgung der Strömungshalle verwendet, während Leitungswasser die Flüssigphase bildete.

Der Aufbau ermöglichte die Erzeugung und Beobachtung verschiedener Strömungsmuster wie Schichtenströmung, Wellenströmung, Schwallströmung und Ringströmung. Allerdings reichte die Leistung des Pumpensystems nicht aus, um die Geschwindigkeiten von über 6 m/s zu erreichen, die für eine Blasenströmung erforderlich gewesen wären. Zudem traten deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen Strömungsmustern und den Vorhersagen der Strömungsformkarten auf. Diese Abweichungen sind vermutlich auf die kurze Vorlaufänge des Systems zurückzuführen, die keine vollständige Ausbildung der Strömung zuließ. Dies ist auch ersichtlich aus dem signifikanten Einfluss der unterschiedlichen Mischdüsen auf die Strömungsform. Die

notwendige Vorlaufänge wäre nur mit erheblichem Aufwand realisierbar gewesen und hätte den finanziellen Rahmen des Projekts gesprengt.

Die Studie zeigte mehrere Einschränkungen, die ihre Eignung als Basisstudie für die Entwicklung der Messtechnik mit MRV infrage stellten. Erstens erwies sich die Energie der Pulsationen und Vibrationen in der Schwallströmung als schwer kontrollierbar, was umfangreiche zusätzliche Maßnahmen zur Fixierung des Systems im MRT erfordern würde. Zweitens ist das bestehende MRT-System nicht für Turbulenzmessungen in Strömungen mit sehr hohen Geschwindigkeiten von über 6 m/s, wie sie bei Blasenströmungen auftreten, ausgelegt. Drittens zeigte sich, dass bei Schichten- oder Wellenströmungen mit klarer Phasentrennung keine zusätzlichen Erkenntnisse durch eine mehrdimensionale MRT-Messung gewonnen werden können. Zudem fehlen in der Literatur ausreichend hochwertige Daten zur lokalen Phasenverteilung in Rohrströmungen, was die Validierung der Ergebnisse erschwert.

Angesichts dieser Einschränkungen wurde beschlossen, von der ursprünglichen Idee abzuweichen und stattdessen eine Strömung über eine rückwärtsgewandte Stufe mit Lufteinblasung hinter der Stufe zu untersuchen. Diese Entscheidung wurde inspiriert von den Arbeiten von Yuan et al. (2020, 2021), die siedende Strömungen hinter einer solchen Stufe mithilfe von Schattengrafie analysierten. Dieses Szenario verspricht relevantere Erkenntnisse und ist besser an die technischen Möglichkeiten des MRT-Systems angepasst.



Abbildung 2: Versuchsaufbau der Rohrströmung innerhalb der Schlepprinne in der Strömungshalle am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock.

1.2 Entwicklung des akademischen Benchmarks

Die Entwicklung der „Backward-Facing Step“ (BFS) Benchmark-Tests erfolgte schrittweise und umfasste mehrere Etappen. Zunächst wurde ein provisorischer Aufbau genutzt, um Erfahrungswerte zu unterschiedlichen Strömungsparametern zu sammeln. Abbildung 3 zeigt eine Iteration dieses Aufbaus. Ziel war es, eine

Konfiguration zu ermitteln, bei der die Rezirkulationszone optimal im Messfenster des MRT-Geräts positioniert ist und gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeiten optimal an den Messbereich des Scanners angepasst sind. In Abstimmung mit Framatome wurde die Position der Lufterblasung festgelegt, sodass sie möglichst mittig in der Rezirkulationszone liegt. Dies sollte den Wandeffluss minimieren und die Wechselwirkung zwischen der Fluid- und der Gasphase maximieren.

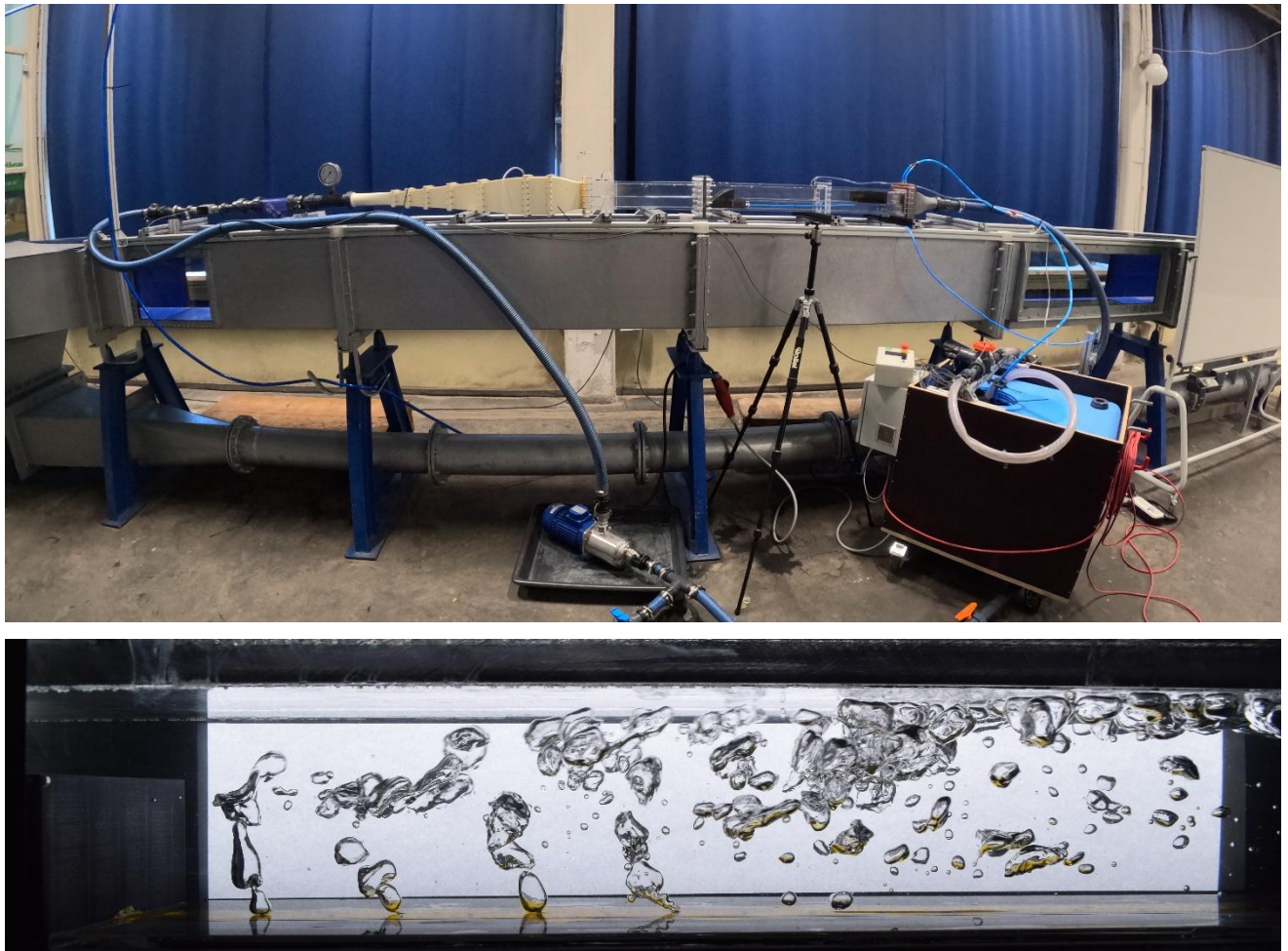


Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Vorversuche an der rückwärtsgewandten Stufe oberhalb der Schlepprinne in der Strömungshalle. Darunter ist ein beispielhaftes Schattengrafiebild von einer der Vorversuche dargestellt.

Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wurde im nächsten Schritt ein MRT-kompatibler Benchmark entwickelt. Die Kanalbreite wurde auf 150 mm begrenzt, um die Kompatibilität mit den Spulen für die MRT-Messung zu gewährleisten. Die mittlere Einstromgeschwindigkeit wurde auf 1 m/s festgelegt, um innerhalb des optimalen Empfindlichkeitsbereichs des Scanners zu bleiben. Analog zu den Arbeiten von Yuan et al. (2020, 2021) wurde eine Expansionsrate von 3 gewählt, um eine relativ große Rezirkulationszone zu erzeugen und die Verweilzeit der Luftblasen in diesem Bereich zu maximieren. Die Stufenhöhe wurde auf 30 mm begrenzt, damit die gesamte Rezirkulationszone im Messfenster von etwa 240 mm erfasst werden kann. Die Auslegung orientierte sich an der

Annahme, dass der Anlegepunkt der Strömung etwa 6 bis 8 Stufenhöhen stromabwärts der Stufe liegt (Eaton and Johnston, 1981; Chen et al., 2018).

Um die Strömungsbedingungen weiter zu optimieren, wurde eine Beruhigungsstrecke nach einem Design aus einer früheren Studie von Bruschewski et al. (2016) implementiert. Diese umfasst einen Diffusor, eine Beruhigungskammer und einen Gleichrichter. Der Übergang von der Beruhigungskammer zum Kanal erfolgt über eine nach Bell und Mehta (1988) ausgelegte Düse. Ein Tripring am Kanaleinlass, ähnlich wie in der Arbeit von Benson et al. (2023), garantiert die Wiederholbarkeit der turbulenten Transition.

Die Einlassbedingungen der Gasphase wurden durch den Messbereich des verwendeten Coriolis-Massenstromsensors Mini-Coriflow M14 (Bronkhorst High-Tech B.V., Ruurlo, Niederlande) nach unten begrenzt, während die obere Grenze durch das angestrebte Strömungsbild definiert wurde. Ein zu hohes Impulsverhältnis hätte dazu geführt, dass die Gasphase vertikal durch die Rezirkulationszone dringt, ohne eine messbare Wechselwirkung zwischen den Phasen in der Rezirkulationszone zu erzeugen. Nach Diskussionen mit Kollegen der Framatome GmbH wurde ein Gasmassenstrom von 0,131 kg/h festgelegt, der eine Klassifikation der Gaseinblasung als „atomising jet“ gemäß Balzán et al. (2017) ermöglicht.

Der BFS-Kanal wurde aus PMMA gefertigt und mit einem modularen Einsatz am Boden hinter der Stufe ausgestattet. Mittig 30 mm hinter der Stufe befindet sich eine Bohrung zur Druckmessung, ergänzt durch drei Reihen mit je fünf Bohrungen, die in Abständen von 30 mm stromabwärts positioniert sind. Mit dem fertigen Kanal wurden weitere Experimente durchgeführt, um die ideale Position der Gaseinblasung zu bestimmen. Nach zusätzlichen Versuchen wurde eine Einblasung in der Symmetrieebene 90 mm stromabwärts der Stufe gewählt, da an diesem Punkt die maximale Umlenkung der Gasphase beobachtet wurde.

1.3 Durchführung von MRV- und optischen Messungen am akademischen Benchmark

Bereits bevor die Durchführung der finalen Messkampagne wurde eine verbesserte Version der vorhandenen Schmidt et al. (2021) Sequenz entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen. Diese Entwicklungen fanden parallel zur Auslegung des BFS-Kanals statt anhand einer bereits vorhandenen periodic Hill Geometrie (ZITAT?). Daher wurde die finale MRV Messkampagne mit dieser optimierten Sequenz durchgeführt und später anhand optischen Messungen validiert.

Insgesamt wurden drei Messkampagnen in zwei unterschiedlichen Laboren am BFS-Kanal durchgeführt. Eine schematische Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 4 dargestellt. Die einzige Variable, die zwischen den Laboren geändert wurde, war ein Austausch der Pumpe und Reservoir, welche als nicht kritische Variablen eingeordnet wurden. Statt reines Wasser mit Kupfersulfat wurde für die optischen Messungen Leitungswasser verwendet, wo bei der LDA Messung auch Seeding Partikel hinzugefügt wurden, allerdings ist auch hier der Einfluss auf die Messergebnisse vernachlässigbar. Es wurden zwei unterschiedliche Strömungsbedingungen vermessen: mit und

ohne Lufteinblasung. Abbildung 5 zeigt Bilder von den jeweiligen Messkampagnen, und Tabelle 1 bietet eine Übersicht von den einzelnen Messungen.

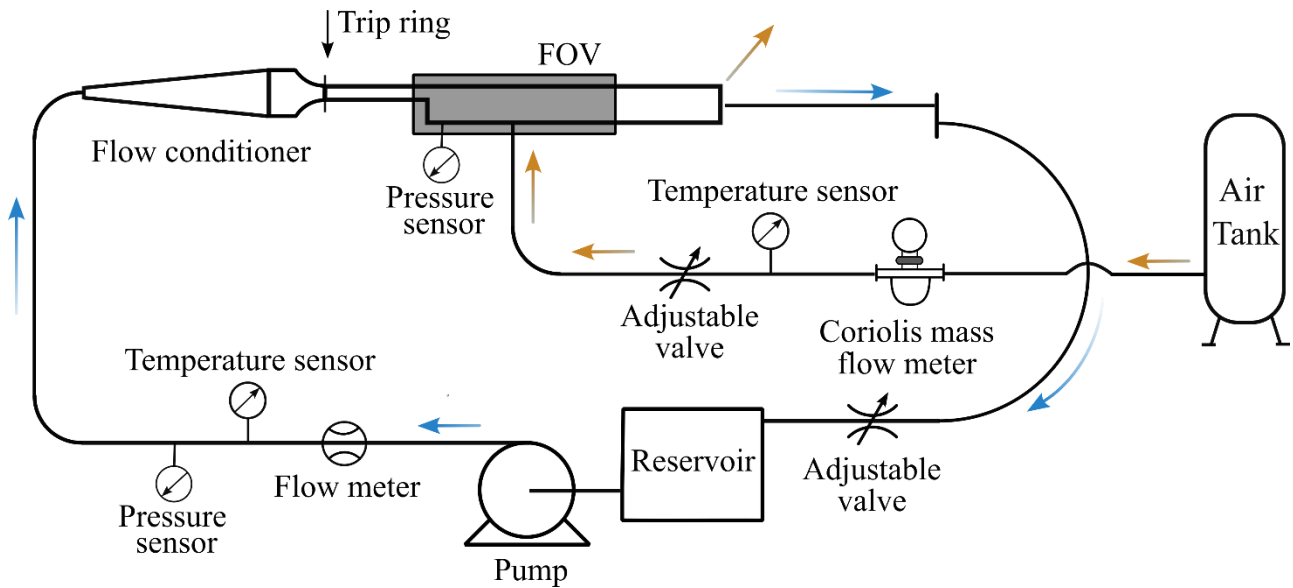


Abbildung 4: Schematische Skizze des Aufbaus für die Messkampagnen am akademischen Benchmark

Tabelle 1: Übersicht der Messungen die am akademische Benchmark durchgeführt wurden

Strömung	Methode	Messgröße	Messbereich	Auflösung [mm]
Wasser + Lufteinblasung	MRV	Luftanteil	3D	1,5x1,5x1,5
Wasser + Lufteinblasung	MRV	Geschwindigkeit	3D3C	1,5x1,5x1,5
Wasser + Lufteinblasung	MRV	RST	3D6C	3x3x3
Wasser + Lufteinblasung	Schattengrafie	Luftanteil	2D	0,056x0,056
Wasser + Lufteinblasung	LDA	Geschwindigkeit+RST	1D1C	1,5
Wasser	MRV	Geschwindigkeit	3D3C	1,5x1,5x1,5
Wasser	MRV	RST	3D6C	3x3x3
Wasser	MRV	Geschwindigkeit	2D3C	1,5x1,5x1,5
Wasser	MRV	RST	2D6C	3x3x3
Wasser	LDA	Geschwindigkeit+RST	1D1C	1,5



Abbildung 5: Abbildungen der drei Messkampagnen am akademischen Benchmark. Von oben nach unten ist zu sehen: Prüfstand im MRT, Schattengrafie Messungen, LDA Messungen.

MRV-Messkampagne: Es wurden insgesamt 7 einzelne MRV Messungen durchgeführt, wobei fünf Messungen das Volumen stromabwärts der Stufe abgedeckt und zwei Messungen eine 2D-Schicht stromaufwärts der Stufe vermessen haben, welche als Randbedingungen für CFD-Simulationen dienen können. Der lokale Geschwindigkeitsvektor und Luftanteil wurden in 1,5 mm Auflösung vermessen, während die RST Messungen aus Zeitgründen in 3 mm Auflösung vermessen wurden.

Schattengrafie-Messkampagne: Die Schattengrafie-Messungen wurden mit einem modifizierten PIV-Setup durchgeführt, bei dem der Laserschnitt durch eine diffuse volumetrische Beleuchtung ersetzt wurde. Zur kontinuierlichen Beleuchtung und Visualisierung kam eine LED-Matrix mit einer Leistung von 60 Watt und einem Lichtdiffusor zum Einsatz. Um Reflexionen und Interferenzen zu reduzieren, wurde der Kanal mit schwarzem Klebeband ausgekleidet.

Die Blasencharakteristiken wurden mit einer HI Sense MkII-Kamera (Dantec Dynamics, Tonsbakken, Dänemark) im Einzelbildmodus erfasst. Die Kamera arbeitete mit einer Bildrate von acht Bildern pro Sekunde und einer Verschlusszeit von 600 μ s. Die Aufnahmen erfolgten in einer Auflösung von 1024 $\times$ 678 Pixeln, wobei jedes Pixel eine Größe von 0,056 $\times$ 0,056 mm abdeckte. Eine Kalibrierungsplatte mit Punktemuster gewährleistete die präzise Ausrichtung der Bilder. Insgesamt wurden bis zum Abschluss des Experiments 1000 Bilder aufgenommen.

LDA-Messkampagne: Die Messungen erfolgten in der gleichen Konfiguration wie die Schattengrafie-Experimente, wobei ein FlowLite 1D High Power System (Dantec Dynamics, Skovlunde, Dänemark) zum Einsatz kam. Dieses System verwendet einen Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm, einem nominalen gaußförmigen Strahldurchmesser von 2,2 mm und einer Ausgangsleistung zwischen 10 und 200 mW. Die Laserstrahlen wurden durch eine Linse mit einer Brennweite von 250 mm fokussiert.

Für die Datenerfassung innerhalb der Symmetrieebene des Kanals wurde eine Traverse verwendet. Die Messpunkte wurden mit einem Schrittmaß von 1,5 mm, entsprechend der MRV-Auflösung der Reynolds-Spannungsmessungen, abgetastet. Die Messungen erfolgten an drei Positionen, jeweils 60 mm, 120 mm und 180 mm stromabwärts der Stufe. An jedem Messpunkt wurden insgesamt 11.000 Messungen aufgezeichnet. Um die Abtastrate zu erhöhen, wurden 5 μ m große Polyamid-Partikel als Seeding hinzugefügt.

1.4 Auswertung der Ergebnisse und Identifikation von Messfehlern

Die MRV Daten wurden mit einem am Lehrstuhl entwickelten Tool ausgewertet und verarbeitet. Details dazu sind im Abschlussbericht des GRS-Projektes MRV4NRS (FKZ: 1501602) beschrieben, sowie in der Veröffentlichung von John et al. 2025. Die Spektralanalyse der LDA Daten wurde mit dem Dantec Burst Spectrum Analyzer BSA 57N25 (Dantec Dynamics, Skovlunde, Dänemark) durchgeführt. Für die Datenauswertung kamen die BSA Flow Software (Dantec Dynamics, Skovlunde, Dänemark) sowie Matlab R2022b (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA) zum Einsatz. Zur Auswertung der Ergebnisse der Schattengrafie wurde eine Segmentierungsmethode angewendet, die sich an etablierten Verfahren aus der Literatur orientiert (Kim and Park, 2019; Nunno et al., 2020; Zhang et al., 2023; Zhao et al., 2021). Die einzelnen Schritte der Auswertung sowie die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Datenauswertung der Bilder wurde mit Hilfe der Open-Source-Bildverarbeitungssoftware Fiji (Schindelin et al., 2012) durchgeführt. Der Arbeitsablauf ist in Abbildung 2 dargestellt, beginnend mit einem Rohbild (Abbildung 2a). Im ersten Schritt wurden die Bilder zugeschnitten, um den relevanten Bereich zu isolieren. Zur Entfernung von Hintergrundrauschen wurde ein Referenzbild subtrahiert. Anschließend wurden die Bilder mithilfe des IsoData-

algorithmus von Ridler und Calvard (Ridler und Calvard, 1978) binarisiert, der den Schwellenwert optimal bestimmt (siehe Abbildung 2b).

Für die vollständige Segmentierung der Gas- und Flüssigphasen wurde zunächst eine morphologische Dilatation angewendet, gefolgt von einer Erosion, um kleine Lücken zu schließen und die segmentierten Blasen zu glätten. Nach dem Auffüllen geschlossener Strukturen entstand ein vollständig segmentiertes Bild (Abbildung 2c). Die einzelnen Blasen wurden anschließend mit einem Watershed-Algorithmus und einer Ellipsen-Anpassung nach Fitzgibbon et al. (Fitzgibbon et al., 1999) approximiert, umgesetzt über die Ellipse-Split-Erweiterung von Wagner und Eglinger (Wagner und Eglinger, 2017). Abbildungen 2d und 2e zeigen den Watershed-Prozess, bei dem anhand einer Distanzkarte Trennlinien zwischen den Blasen berechnet wurden.

Um Ausreißer zu minimieren, wurden nur Ellipsen berücksichtigt, deren Achsen größer als 5 Pixel und deren Seitenverhältnis kleiner als 10 war. Übersegmentierung wurde reduziert, indem Ellipsen zusammengeführt wurden, wenn eine Ellipse mehr als zwei Drittel der Fläche einer anderen überdeckte. Dies verringerte die Wahrscheinlichkeit, mehreren Objekten fälschlicherweise einzelne Blasen zuzuordnen. Die extrahierten Blasenformen, dargestellt als Ellipsen, sind in Abbildung 2f zu sehen.

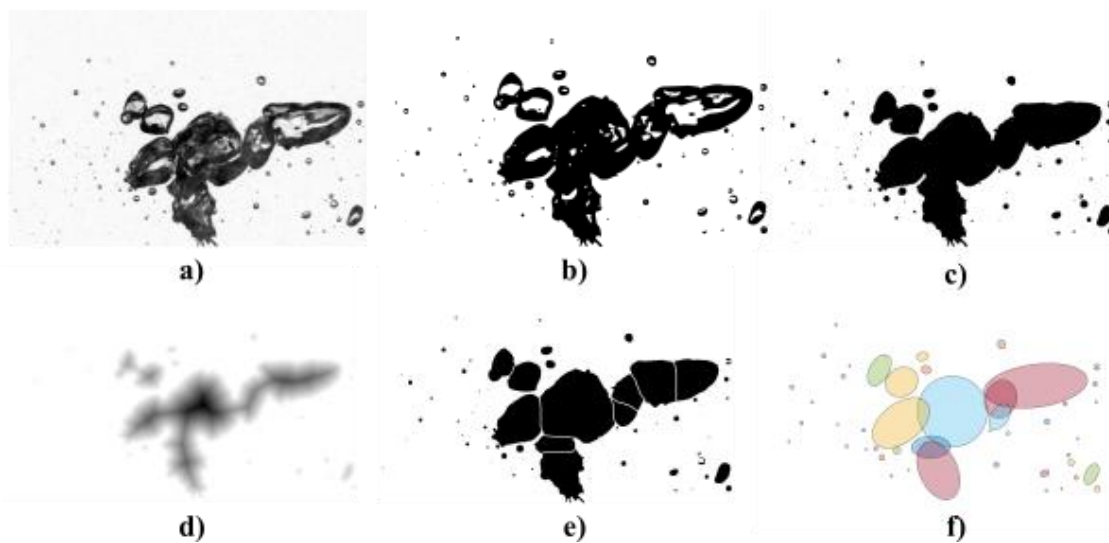


Abbildung 6: Einzelne Schritte der Schattengrafie Auswertung. Vom Rohbild in a) bis zum segmentierten Bild in c) bis zu segmentierten Blasenformen in f).

Die ausgewerteten Schattengrafie-Ergebnisse können nun für zwei Zwecke verwendet werden: Einerseits kann ein qualitativer Vergleich des mittleren Luftanteils mit den MRV-Ergebnissen angestellt werden, andererseits kann die Auswertung der Blasenform und Größenverteilung erfolgen. Der qualitative Vergleich ist in Abbildung 7 dargestellt, wobei auf der einen Seite ein Mittel der binarisierten Bilder mit einem Mittel der MRV-Daten an der anderen Seite verglichen wird. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Mittelung ist ein direkter Vergleich nur

eingeschränkt möglich, da die optischen Messungen lediglich eine qualitative Projektion darstellen, während die MRV-Daten ein quantitatives Mittel repräsentieren. Eine perfekte Übereinstimmung ist daher nicht zu erwarten, jedoch lassen sich allgemeine Trends dennoch erkennen

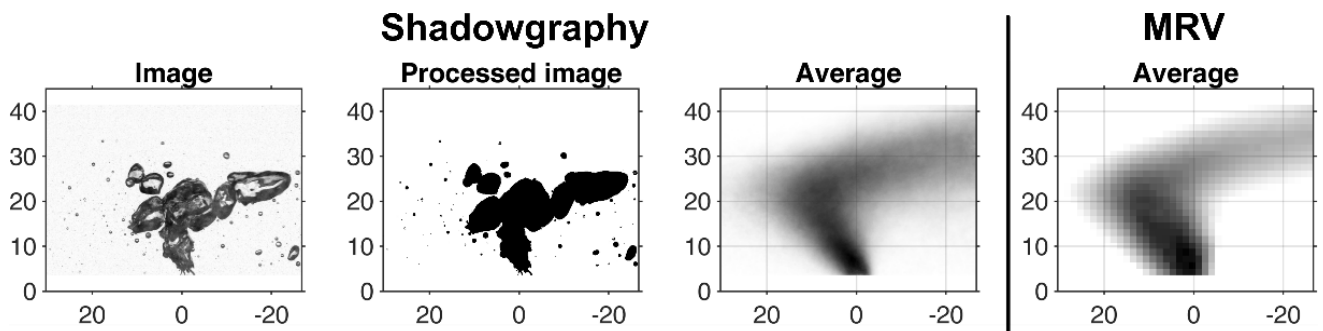


Abbildung 7: Qualitativer Vergleich des Luftanteils zwischen Schattengrafie und MRV Ergebnisse.

Luftblasenstatistik: Die Schattengrafie Bilder zeigten eine polydisperse Verteilung der Blasen mit überwiegend kugelförmigen kleinen Blasen und elliptischen größeren Blasen. In Bereichen hoher Scherung und Turbulenz traten deutliche Deformationen und Zerfallsprozesse auf, die die komplexe Dynamik der Blasenphase belegen. Über 70.000 segmentierte Blasen ermöglichten eine robuste statistische Auswertung, die wertvolle Daten für die Validierung von CFD-Modellen liefert.

Ergebnisse der MRV- und LDV-Messungen: Die MRV-Daten lieferten präzise Informationen zu Geschwindigkeit und Turbulenz in der Flüssigphase, während LDV-Messungen die Turbulenzintensität ergänzend quantifizierten. Die Ergebnisse beider Methoden zeigen eine hohe Übereinstimmung und liefern eine zuverlässige Basis für zukünftige Modellierungen.

Die erhobenen Daten bieten eine detaillierte Grundlage zur Validierung von Simulationsmodellen und tragen wesentlich zur Weiterentwicklung von Messtechniken bei. Dies stärkt die wissenschaftliche Verwertbarkeit und schafft eine Basis für innovative technische Anwendungen.

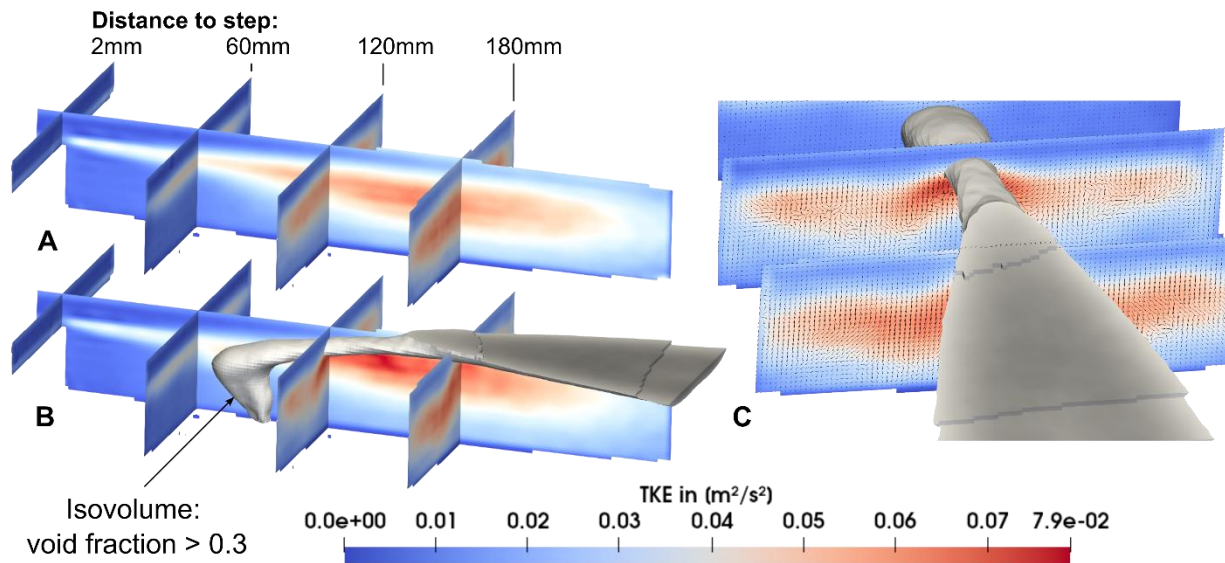


Abbildung 8: Dreidimensionale Ansicht der Messdaten des akademischen Benchmarks.

1.5 Entwicklung des industriellen Benchmarks

Der industrielle Benchmark wurde in enger Zusammenarbeit mit Framatome entwickelt. Das grundlegende Konzept bestand darin, Luft in den zentralen Brennstab des KAERI-Benchmarks einzuspeisen, unmittelbar vor dem Mischgitter. Dieses Design erwies sich als vorteilhaft, da es Synergien mit früheren Kooperationen mit Framatome bot. Insbesondere ermöglichte es die Wiederverwendung des MRI-kompatiblen Versuchsaufbaus, der im Rahmen des MRV4NRS-Projekts (FKZ: 1501602) entwickelt wurde. Zudem zeigte es Parallelen zu einem von OFFERR geförderten Projekt (DIAMRI), in dem ein beheizter zentraler Brennstab im gleichen Versuchsaufbau untersucht wurde.

Die Strömungsbedingungen wurden aus der Studie von Schmidt et al. (2021) übernommen. Um die Blasencharakteristik unter identischen Strömungsbedingungen, aber mit optischem Zugang zu analysieren, wurde ein separater Versuchsaufbau entwickelt. Hierbei wurde ein perforierter Hohlstab in eine Rohrströmung eingebracht. Variationen des Lochdurchmessers, des Lochabstands und des Massenstroms wurden systematisch untersucht, um die endgültigen Abmessungen für den Benchmark-Fall zu definieren.

Im finalen Aufbau wurde der zentrale Stab durch ein Glasfaserrohr mit identischem Außendurchmesser zu den umliegenden Stäben ersetzt. Dieses Glasfaserrohr wurde mit 120 Löchern von jeweils 1 mm Durchmesser perforiert, die gleichmäßig über einen 6 cm langen Abschnitt verteilt waren. Dieser perforierte Abschnitt befand sich zwei Durchmesser vor dem Mischgitter. Abbildung 9 zeigt den Versuchsaufbau.

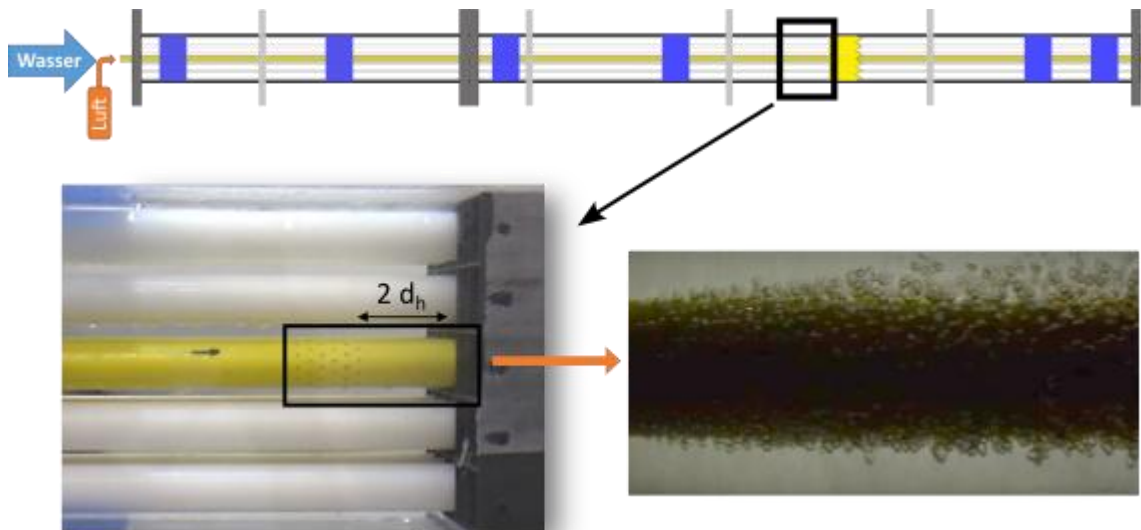


Abbildung 9: Darstellung vom Industrie-Benchmark. Oben ist eine schematische Ansicht vom KAERI-Kanal dargestellt, mit einer Markierung für die Lufteinblasung. Unten sind Bilder von der Position der Lufteinblasung sowie ein Bild von den Blasencharakteristiken aus den Vorversuchen dargestellt.

1.6 Durchführung der MRV Messkampagne des industriellen Benchmarks

Es wurde die gleiche MRV Messmethodik angewendet wie im akademischen Benchmark, allerdings ohne Anwendung von optischen Messmethoden für die Blasencharakterisierung. Eine Übersicht von den Messungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der am industriellen Benchmark durchgeführten Messungen

Strömung	Methode	Messgröße	Messbereich	Auflösung [mm]
Wasser + Lufteinblasung	MRV	Luftanteil	3D	1,5x1,5x1,5
Wasser + Lufteinblasung	MRV	Luftanteil	2D	1x1x1
Wasser + Lufteinblasung	MRV	Geschwindigkeit	3D3C	1,5x1,5x1,5
Wasser + Lufteinblasung	MRV	RST	3D6C	1,5x1,5x1,5
Wasser	MRV	Geschwindigkeit	3D3C	1,5x1,5x1,5
Wasser	MRV	Geschwindigkeit	2D3C	1x1x1
Wasser	MRV	RST	3D6C	1,5x1,5x1,5

Hochwertige 3D-Messungen mit einer Auflösung von 1,5 mm wurden durchgeführt, die als „CFD-grade“ Validierungsdaten für Luftanteil, Geschwindigkeit und RST (Reynolds-Spannungstensoren) herangezogen werden können. Zusätzlich wurden hochaufgelöste 2D-Messungen des Luftanteils und der Geschwindigkeit in

einer Schicht vor dem Mischgitter erfasst. Diese Daten sind besonders geeignet, um als Randbedingungen für CFD-Simulationen genutzt zu werden.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die verausgabten Bundesmittel beschränken sich auf Personal, Verbrauch und Reisen und ermöglichen dem Doktoranden eine erfolgreiche Promotion an einem aktuellen Thema der nuklearen Sicherheitsforschung. Alle im Rahmen dieses Vorhabens verausgabten Sachmittel wurden zur Durchführung experimenteller Untersuchungen eingesetzt. Zu den wichtigsten Positionen gehören wie im Projektantrag vorgesehen die Beschaffung der Verbrauchsmaterialien für den Bau eines MRV-kompatiblen Modellbaus für die akademischen und industriellen Benchmarks sowie die verschiedenen Vorversuche. Gemäß Projektantrag wurden keine Investitionen durchgeführt. Wie sich die Ausgaben im Detail auf die Anschaffung von Prüfstandskomponenten und anderen Ausgaben aufteilen, ist dem zahlenmäßigen Nachweis zu entnehmen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde gezielt ein Nachwuchswissenschaftler bei der Anfertigung seiner Dissertation gefördert. Dadurch wurde ein aktiver Beitrag zur Qualifizierung künftiger Fachkräfte im Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung geleistet.

Darüber hinaus trugen die entwickelten experimentellen Methoden wesentlich zum Aufbau und Erhalt wissenschaftlich-technischer Kompetenz bei. Insbesondere ermöglichen sie die präzise Erfassung komplexer Strömungsphänomene in Zweiphasensystemen und liefern damit eine belastbare Grundlage für die Validierung von CFD-Methoden.

Mit diesen Ergebnissen wird auch die sicherheitstechnische Beurteilung neuer, international entwickelter Reaktorkonzepte unterstützt, deren Strömungseigenschaften sich von bestehenden Anlagen unterscheiden. So leistet das Projekt einen gezielten Beitrag zur Stärkung der sicherheitstechnischen Expertise in Deutschland.

Neben der Reaktorsicherheitsforschung eröffnen die entwickelten Methoden auch neue Anwendungsmöglichkeiten in der Prozess- und Energietechnik.

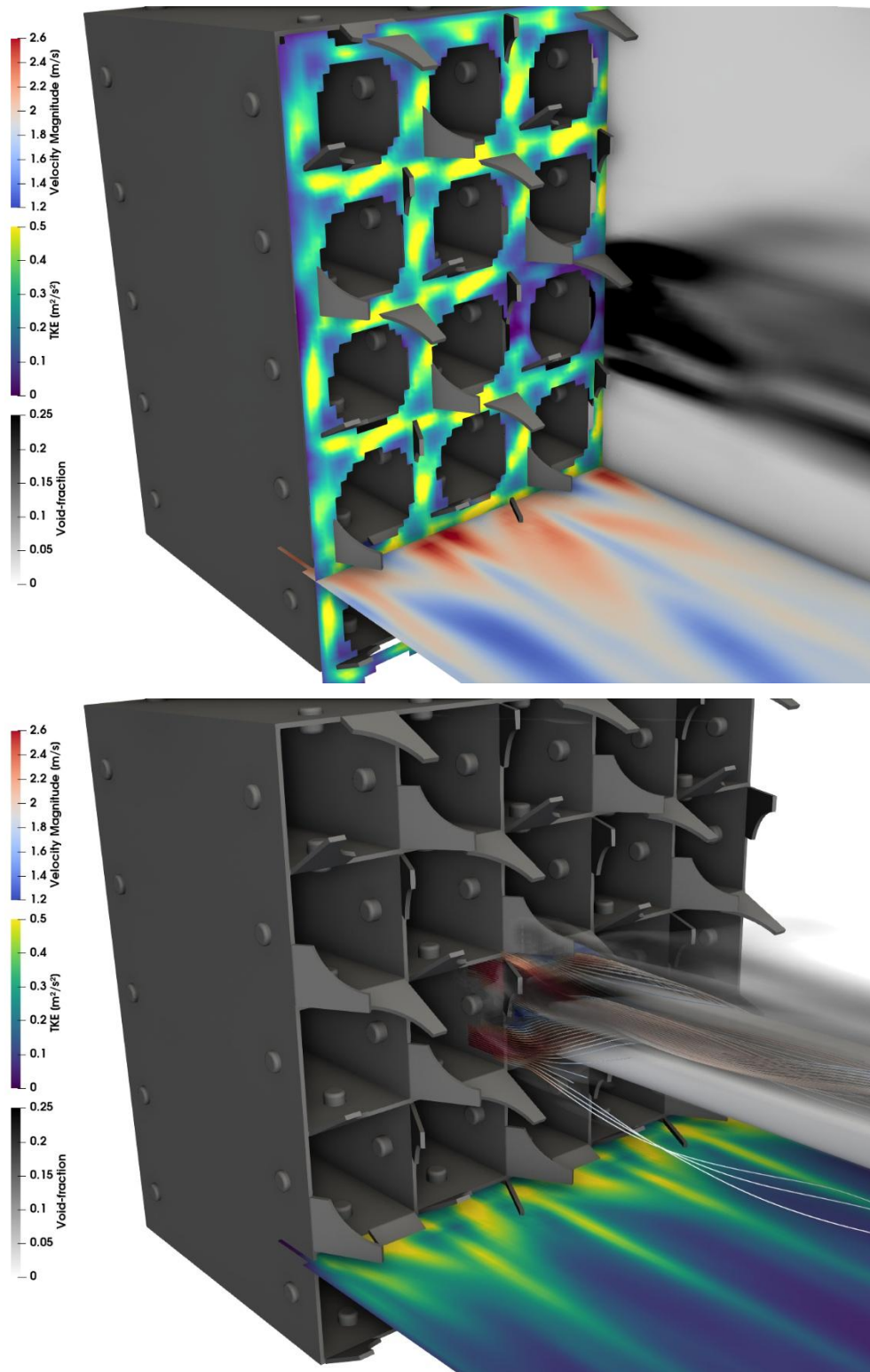


Abbildung 10: Dreidimensionale Darstellung der Messergebnisse vom industriellen Benchmark. Im Oberen Bild sind die 3 Messgrößen in jeweils 3 separaten Ebenen abgebildet. Die Daten wurden mit der Split-type Geometry überlagert (dunkelgrau). Im unteren Bild sind dabei auch Stromlinien und das Isovolumen des Luftanteils abgebildet.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verwertung der Ergebnisse dieses Vorhabens erfolgt vorrangig auf wissenschaftlich-technischer Ebene. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung eines innovativen MRV-Messverfahrens, das die detaillierte experimentelle Erfassung turbulenter Strukturen in Zweiphasenströmungen ermöglicht, ein bisher kaum zugänglicher Bereich. Die gewonnenen Daten liefern eine belastbare Grundlage zur Validierung numerischer CFD-Modelle und wurden bereits auf internationalen Fachkonferenzen vorgestellt. Zwei Publikationen in Fachzeitschriften sind in Vorbereitung, eine weitere wurde bereits eingereicht. Überdies wurden die Ergebnisse in bestehende nationale und internationale Forschungsnetzwerke wie das German CFD Network eingebracht und werden über öffentlich zugängliche Datenbanken anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt.

Obwohl im ursprünglichen Antrag keine wirtschaftliche Verwertung vorgesehen war, führten die Ergebnisse zu einer engen Zusammenarbeit mit der Framatome GmbH. Diese Kooperation ermöglichte die Beteiligung an mehreren geförderten Anschlussprojekten. Im Projekt „DebrisSafe“ (FKZ: 1501660B) werden die MRV-Daten zur Untersuchung von Partikelablagerungen im Brennelementfuß genutzt und mit CFD-Simulationen kombiniert. Im OFFERR-Projekt „DIAMRI“ kamen MRV-Temperaturmessungen in reaktorähnlichen Strömungen zum Einsatz, wobei enge Synergien mit einem parallelen industriellen Benchmarkprojekt genutzt wurden. Ein weiteres, im Dezember 2024 bewilligtes OFFERR-Projekt „MPMRI“ zielt auf die Weiterentwicklung dieser Methoden im industriellen Kontext und bindet auch die Kompetenzen der Universität Lorraine mit ein sowie die Elektrizitätsgesellschaft Électricité de France SA (EDF).

Ein zentrales Verwertungsziel war zudem der Aufbau wissenschaftlich-technischer Kompetenz im Bereich der Reaktorsicherheitsforschung. Die entwickelten Methoden und Erkenntnisse bilden eine wichtige Basis für zukünftige Forschungsarbeiten. Sie flossen in eine Dissertation sowie in eine studentische Abschlussarbeit ein. Überdies wurden neue Drittmittelprojekte akquiriert, in deren Rahmen weitere Qualifikationsstellen für Promovierende geschaffen wurden. Damit leistet das Vorhaben einen nachhaltigen Beitrag zur Nachwuchsförderung und zum Kompetenzaufbau in einem sicherheitsrelevanten Forschungsfeld.

5. Fortschritt auf dem Gebiet des Auftrags bei anderen Stellen

Die Arbeitsgruppe an der Université de Lorraine untersuchte mithilfe von MRV-Messungen den Einfluss lokaler Blockierungen auf die Strömungsentwicklung in verschiedenen 7×7 -Bündelgeometrien (Oliveira et al., 2021). Im

aktuellen OFFERR-Projekt ist eine enge Kooperation mit dieser Gruppe geplant, einschließlich Wissensaustausch und koordinierter experimenteller Kampagnen.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die im Rahmen dieses Vorhabens erzielten Ergebnisse sollen in zwei Fachzeitschriften veröffentlicht werden. Aktuell befinden sich folgende Publikationen in Vorbereitung:

- Frank et al. (in Vorb., Einreichung geplant: 10.2025): MRV and shadowgraphy measurements of a bubble plume in the wake of a backward-facing step. International Journal of Multiphase Flows
- Frank (in Vorb., Diss., Einreichung geplant: 08.2026): Anwendung von nicht-invasiven Messmethoden zur Untersuchung von disperse Mehrphasenströmungen. Dissertation.
- John et al. (in Vorb., Einreichung geplant: 10.2025): MRV Temperatur and void fraction measurements in a Nuclear Fuel Assembly Model. Nuclear Engineering and Design
- Romig et al. (eingereicht am 25.06.25): The Critical Role of Spatial Resolution in MRV-Based Turbulence Quantification: Guidelines for Voxel Size Selection and Error Correction

Weiterhin wurden die entwickelten Methoden und Ergebnisse auf folgenden Fachkonferenzen präsentiert und in den zugehörigen Tagungsbänden veröffentlicht:

- Frank. et al. 2024: Three-Dimensional Benchmark Datasets for Turbulent Multiphase Flows Obtained with Magnetic Resonance Velocimetry: Bubbly and Particle-Laden Flow, 35th German CFD Network of Competence Meeting.
- Frank et al. 2024. 3D Magnetic Resonance Velocimetry Measurements of Turbulent Gas Liquid Flow. Presented at the The 9th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer. <https://doi.org/10.11159/icmfht24.162>
- Frank et al. 2024. Three-Dimensional Benchmark Datasets for Turbulent Multiphase Flows Obtained With Magnetic Resonance Velocimetry, in: TopFuel 2024 Proceedings - Track 6 - Modelling, Analysis, and Methods. Presented at the TopFuel 2024, Grenoble.
- Frank et al. 2024: CFD Validation with Velocity-Encoded Magnetic Resonance Imaging: Comprehensive 3D Experimental Benchmark Datasets for Turbulent Multiphase Flows, Dechema Jahrestreffen für Fachgruppen: Mehrphasenströmungen, CFD und Aerosoltechnik.

Zudem sollen die Ergebnisse auf der *CFD4NRS-10* Konferenz in Japan im Jahr 2025 vorgestellt werden, ein Abstract wurde bereits eingereicht.

III. Literaturverzeichnis

- Arbabi, A., Mastikhin, I.V., 2012. Magnetic susceptibility based magnetic resonance estimation of micro-bubble size for the vertically upward bubbly flow. *Journal of Magnetic Resonance* 225, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2012.09.012>
- Balzán, M.A., Sanders, R.S., Fleck, B.A., 2017. Bubble formation regimes during gas injection into a liquid cross flow in a conduit. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 95, 372–385. <https://doi.org/10.1002/cjce.22680>
- Bell, J.H., Mehta, R.D., 1988. Contraction design for small low-speed wind tunnels (No. NASA-CR-177488).
- Benson, M.J., Banko, A.J., Elkins, C.J., An, D.-G., Song, S., Bruschewski, M., Grundmann, S., Bandopadhyay, T., Roca, L.V., Sutton, B., Han, K., Hwang, W., Eaton, J.K., 2023. MRV challenge 2: phase locked turbulent measurements in a roughness array. *Exp Fluids* 64, 28. <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03572-4>
- Bruschewski, M., Freudenhammer, D., Schiffer, H.-P., Grundmann, S., 2016. Pressure Field Estimation from 3D MRV Velocity Data 12.
- Bruschewski, M., John, K., Wüstenhagen, C., Rehm, M., Hadžić, H., Pohl, P., Grundmann, S., 2021. Commissioning of an MRI test facility for CFD-grade flow experiments in replicas of nuclear fuel assemblies and other reactor components. *Nuclear Engineering and Design* 375, 111080. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111080>
- Bruschewski, M., Piro, M.H.A., Tropea, C., Grundmann, S., 2020. Fluid flow in a diametrically expanded CANDU fuel channel – Part 1: Experimental study. *Nuclear Engineering and Design* 357, 110371. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110371>
- Chen, L., Asai, K., Nonomura, T., Xi, G., Liu, T., 2018. A review of Backward-Facing Step (BFS) flow mechanisms, heat transfer and control. *Thermal Science and Engineering Progress* 6, 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.004>
- Eaton, J.K., Johnston, J.P., 1981. A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment. *AIAA Journal* 19, 1093–1100. <https://doi.org/10.2514/3.60048>
- Elkins, C.J., Alley, M.T., 2007. Magnetic resonance velocimetry: applications of magnetic resonance imaging in the measurement of fluid motion. *Exp Fluids* 43, 823–858. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0383-2>
- Fitzgibbon, A., Pilu, M., Fisher, R.B., 1999. Direct least square fitting of ellipses. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21, 476–480. <https://doi.org/10.1109/34.765658>
- Heindel, T.J., 2011. A Review of X-Ray Flow Visualization With Applications to Multiphase Flows. *Journal of Fluids Engineering* 133. <https://doi.org/10.1115/1.4004367>

Hogendoorn, W., Breugem, W.-P., Frank, D., Bruschewski, M., Grundmann, S., Poelma, C., 2023. From nearly homogeneous to core-peaking suspensions: Insight in suspension pipe flows using MRI and DNS. *Phys. Rev. Fluids* 8, 124302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.8.124302>

John, K., Romig, S., Rehm, M., Hadžić, H., Pohl, P., Grundmann, S., Bruschewski, M., 2025. Volumetric Measurements of Mean Velocity Vector and Reynolds Stress Tensor for CFD Validation: Magnetic Resonance Velocimetry in a Nuclear Fuel Assembly Model with Mixing Grids. *Flow Turbulence Combust.* <https://doi.org/10.1007/s10494-025-00636-9>

J. Ghajar, A., C. Tang, C., 2012. Advances in Void Fraction, Flow Pattern Maps and Non-Boiling Heat Transfer Two-Phase Flow in Pipes with Various Inclinations, in: Cheng, L., Mewes, D. (Eds.), *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer (Volume 1)*. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS, pp. 1–52. <https://doi.org/10.2174/978160805080210901010001>

Khan, I., Wang, M., Zhang, Y., Tian, W., Su, G., Qiu, S., 2020. Two-phase bubbly flow simulation using CFD method: A review of models for interfacial forces. *Progress in Nuclear Energy* 125, 103360. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103360>

Kim, Y., Park, H., 2019. Upward bubbly flows in a square pipe with a sudden expansion: Bubble dispersion and reattachment length. *International Journal of Multiphase Flow* 118, 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.06.017>

Lemonnier, H., 2010. Nuclear magnetic resonance: A new tool for the validation of multiphase multidimensional CFD codes. *Nuclear Engineering and Design, Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS)* 240, 2139–2147. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.032>

Lemonnier, H., Jullien, P., 2011. On the use of nuclear magnetic resonance to characterize vertical two-phase bubbly flows. *Nuclear Engineering and Design, The International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT19) Special Section* 241, 978–998. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.11.018>

Leskovec, M., Zade, S., Niazi, M., Costa, P., Lundell, F., Brandt, L., 2024. Turbulent pipe flow with spherical particles: Drag as a function of particle size and volume fraction. *International Journal of Multiphase Flow* 179, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104931>

Manera, A., Ozar, B., Paranjape, S., Ishii, M., Prasser, H.-M., 2009. Comparison between wire-mesh sensors and conductive needle-probes for measurements of two-phase flow parameters. *Nuclear Engineering and Design, 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 15)* 239, 1718–1724. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.06.015>

Mastikhin, I.V., Arbabi, A., Newling, B., Hamza, A., Adair, A., 2012. Magnetic resonance imaging of velocity fields, the void fraction and gas dynamics in a cavitating liquid. *Exp Fluids* 52, 95–104. <https://doi.org/10.1007/s00348-011-1209-9>

Mathai, V., Lohse, D., Sun, C., 2020. Bubbly and Buoyant Particle-Laden Turbulent Flows. *Annual Review of Condensed Matter Physics* 11, 529–559. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050637>

- Nunno, F.D., Pereira, F.A., Granata, F., Marinis, G. de, Felice, F.D., Gargano, R., Miozzi, M., 2020. A shadowgraphy approach for the 3D Lagrangian description of bubbly flows. *Meas. Sci. Technol.* 31, 105301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8fef>
- Oliveira, A.V.S., Stemmelen, D., Leclerc, S., Glantz, T., Labergue, A., Repetto, G., Gradeck, M., 2020. Velocity field and flow redistribution in a ballooned 7×7 fuel bundle measured by magnetic resonance velocimetry. *Nuclear Engineering and Design* 369, 110828. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110828>
- Piro, M.H.A., Christon, M., Tensuda, B., Poschmann, M., Bruschewski, M., Grundmann, S., Tropea, C., 2020. Fluid flow in a diametrically expanded CANDU fuel channel – Part 2: Computational study. *Nuclear Engineering and Design* 357, 110372. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110372>
- Piro, M.H.A., Wassermann, F., Grundmann, S., Tensuda, B., Kim, S.J., Christon, M., Berndt, M., Nishimura, M., Tropea, C., 2017. Fluid flow investigations within a 37 element CANDU fuel bundle supported by magnetic resonance velocimetry and computational fluid dynamics. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 66, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.04.010>
- Poelma, C., 2020. Measurement in opaque flows: a review of measurement techniques for dispersed multiphase flows. *Acta Mech* 231, 2089–2111. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02683-x>
- Poelma, C., 2017. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review. *Exp Fluids* 58. <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2283-9>
- Ridler, T.W., Calvard, S., 1978. Picture Thresholding Using an Iterative Selection Method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 8, 630–632. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4310039>
- Risso, F., 2018. Agitation, Mixing, and Transfers Induced by Bubbles. *Annual Review of Fluid Mechanics* 50, 25–48. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045003>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 9, 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Schmidt, S., John, K., Kim, S.J., Flassbeck, S., Schmitter, S., Bruschewski, M., 2021. Reynolds stress tensor measurements using magnetic resonance velocimetry: expansion of the dynamic measurement range and analysis of systematic measurement errors. *Exp Fluids* 62, 121. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03218-3>
- Taitel, Y., Dukler, A.E., 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal* 22, 47–55. <https://doi.org/10.1002/aic.690220105>
- Wagner, T., Eglinger, J., 2017. thorstenwagner/ij-ellipsesplit: EllipseSplit 0.6.0 SNAPSHOT. <https://doi.org/10.5281/zenodo.834339>

Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., Crawford, T., 1979. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. *International Journal of Multiphase Flow* 5, 437–462. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(79\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(79)90031-4)

Yuan, B., Zhang, Y., Liu, L., Wei, J., 2021. Flow boiling heat transfer and associated bubble behaviors over backward- and forward-facing steps. *Experimental Thermal and Fluid Science* 122, 110300. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110300>

Yuan, B., Zhang, Y., Liu, L., Wei, J., 2020. Heat transfer enhancement on micro-pin-finned surfaces under high-frequency reciprocating flow. *Applied Thermal Engineering* 175, 115378. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115378>

Zhang, H., Yin, Z., Chen, M., Zhang, W., 2023. Experiment on bubble characteristics of turbulent bubbly jets in pipe crossflow. *Ocean Engineering* 271, 113782. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113782>

Zhao, W., Wang, Hang, Bai, R., Wei, W., Wang, Hongtao, 2021. Bubble characteristics and turbulent dissipation rate in horizontal bubbly pipe flow. *AIP Advances* 11, 025125. <https://doi.org/10.1063/5.0035816>