

Vorhabenbeschreibung

im Rahmen der Initiative zur „Förderung von Nachwuchsgruppen in der nuklearen Sicherheitsforschung an deutschen Hochschulen (Nanu)“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Nachwuchsgruppe RIMANUS

Innovative strahlungsbasierte Bildgebungsverfahren für die nukleare Sicherheitsforschung

Innovative Radiation-based Imaging Techniques for Nuclear Safety Research

Antragsteller

Dr. Michael Wagner
Technische Universität Dresden (TUD), 01062 Dresden
Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik

Assoziierte Partner:

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies (CEA)
Prof. Dr. Dominique Bestion, Laboratory of Nuclear Energy Systems

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ) und Paul Scherrer Institut Villigen (PSI)
Prof. Dr. Annalisa Manera, Nuclear Safety & Multiphase Flows

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
Dr. Thomas Braunroth

Gesellschaft für Zwischenlagerung (BGZ)
Dr. Maik Stuke, Abteilung Zentrale Fachfragen

Datum der Einreichung: xx. Oktober 2022

Beantragte Laufzeit: 36 Monate

1 Zielsetzung

Innovative Messtechnik ist ein Schlüsselement der Reaktorsicherheitsforschung. Dies gilt gleichermaßen für die Grundlagenforschung, für den experimentellen Nachweis der Sicherheit kerntechnischer Komponenten und Anlagen als auch für fortschrittliche Anlagenzustandsdiagnostik. So ist beispielsweise die zuverlässige Berechnung von Strömung und Wärmetransport in Kühlkreisläufen von Kernkraftwerken ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt für die Sicherheitsbewertung aktuell im Betrieb befindlicher Leichtwasserreaktoren, für Reaktoren der Generation 3+ mit passiven Kühlsystemen, kleine modulare Reaktoren (SMR) und flüssigmetallgekühlte Reaktoren der Generation 4. Vor allem Zweiphasenströmungen bei Leckstörfällen, Siedevorgänge im Reaktorkern und Phasenübergänge in passiven Nachzerfallswärmeabfuhrsystemen sind aufgrund komplexer Impuls- und Wärmetransportmechanismen schwer zu modellieren. Die Validierung dreidimensional auflösender numerischer Rechenverfahren (CFD) verlangt daher experimentelle Daten mit hoher Auflösung unter Anlagenbetriebsbedingungen (Druck, Temperatur, Stoffwerte). Da letztere herausfordernd sind, eignen sich besonders berührungsfreie bildgebende Messverfahren für die experimentelle Analyse. Darüber hinaus sind innovative Messverfahren auch für die Bewertung von Brennelementdesigns, als diagnostische Verfahren für Kraftwerksanlagen, etwa für ein Störfallmonitoring, sowie als Überwachungsmethoden für Zwischen- und Endlager von großem Interesse.

An der Professur für Bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik an der TU Dresden werden seit 2012 moderne Bildgebungsverfahren entwickelt. Einige dieser Messverfahren verfügen über internationale Alleinstellungsmerkmale. Der Antragsteller, Dr. Michael Wagner, arbeitet seit 9 Jahren an der Professur im Bereich der Verfahrensentwicklung für strahlungsbasierte Bildgebung mit dem Schwerpunkt „Mathematische Methoden für inverse Probleme und anwendungsorientierte Datenanalysen“. Dabei kann er auf folgende wichtige Forschungsergebnisse verweisen: 1) Qualifizierung der ultraschnellen Röntgentomographie für die Analyse von Zweiphasenströmungen im Bereich der CFD-Codeentwicklung durch grundlegende Arbeiten zur Bildrekonstruktion und Datenanalyse und 2) Entwicklung statistischer Analysemethoden für die Gammastrahlungstomographie unter anderem mit Anwendungsbezug Brennelementdiagnostik im Rahmen der Promotion (2012-2016) sowie 3) thermographische Überwachung und 4) Myonentomographie von CASTOR-Behältern in Zwischenlagern im Rahmen der Postdoc-Phase (2017-2021).

Die beantragte Nachwuchsgruppe hat das Ziel, modernste Methoden der strahlungsbasierten bildgebenden Messtechnik für ausgewählte Probleme der nuklearen Sicherheitsforschung weiterzuentwickeln und anzuwenden. Dies erfolgt in einem interdisziplinären Forschungsumfeld und mit einem interdisziplinär aufgestellten Forschungsteam. Die weiter unten im Detail beschriebenen technischen Arbeitsziele orientieren sich an forschungsstrategischen Planungen innerhalb der Professur und sollen die Anwendungsschwerpunkte Zweiphasen-Thermohydraulik sowie angewandte Diagnostik für nukleare Anlagen und Systeme stärken. Das Vorhaben verbindet experimentelle und numerische Arbeiten und überspannt ein weites Gebiet hochaktueller Fragestellungen der nuklearen Sicherheitsforschung. Es ist damit vor allem für junge Nachwuchswissenschaftler/innen sehr attraktiv. Die Nachwuchsgruppe eröffnet dem Antragsteller eine hervorragende Perspektive, sein Wissen auf den Gebieten der Strahlungstomographie in voller Breite weiterzuentwickeln, Erfahrungen an junge Forscher/innen weiterzugeben, das Portfolio von Messtechniken auf neue Anwendungsfelder in der nuklearen Sicherheitsforschung auszudehnen sowie mit seinen Arbeiten eine breitere Sichtbarkeit in der Community zu erlangen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Grundlegende Fragestellungen zur Zweiphasen-Thermohydraulik für existierende Kernreaktoren

Zweiphasenströmungen sind für die sichere Kühlbarkeit von **Leichtwasserreaktoren** bestimmend. Für den Normalbetrieb von Reaktoren sind Zweiphasenzustände vor allem in Siedewasserreaktoren relevant und waren dort zum Beispiel ein umfangreicher Forschungsgegenstand im Rahmen der Beherrschung von Zweiphaseninstabilitäten beim Anfahren des Reaktors [1]. Bezgl. der Kühlbarkeit der Brennstäbe im Kern sind Fragestellungen des Dryouts bei Siedewasserreaktoren [2] und der kritischen Heizflächenbelastung (Siedekrise) bei Druckwasserreaktoren [3] von Bedeutung. Zweiphasenströmungen bestimmen aber vor allem das Verhalten von Reaktorkühlsystemen bei Kühlmittelverluststörfällen. Das Absenken des Drucks durch Leck oder Druckentlastung führt automatisch zur Bildung großer Mengen Dampf im Kühlkreislauf, wodurch der für die Nachzerfallswärmeabfuhr relevante Wärmetransport aus dem Kern zur Hauptwärmesenke beeinträchtigt werden kann. Relevante Phänomene, deren modellmäßige Abbildung noch teilweise Schwierigkeiten bereitet, sind Gegenstrombegrenzungen bei Reflux-Condenser-Betrieb [4], Eintrag und Ausbreitung von Inertgasen [5], Druckschläge bei Dampfblasenkollaps [6], der Einfluss von zweiphasigen Strömungen auf Vermischungsprozesse bei Notkühlung [7] oder zweiphasiger kritischer Ausfluss an Lecks [8]. Im Bereich schwerer Störfälle sind beispielsweise die Durchflutung von Schüttbetten bei Notkühlung [9] oder das Dampfblasenverhalten beim Entfernen radioaktiver Aerosole durch Pool Scrubbing [10] von Interesse. In der jüngeren Vergangenheit waren ebenfalls passive Kühlsysteme für Reaktoren der Generation 3+ bzw. SMR von Bedeutung. Bei diesen erfolgt die Nachzerfallswärmeabfuhr in der Regel durch passive zweiphasige Kühlkreisläufe mit Verdampfung, Kondensation und Naturumlauf, deren Stabilität und Betriebsverhalten schwierig vorherzusagen sind [11], [12].

Für die Vorhersage der sicheren Kernkühlbarkeit werden heute Systemcodes, wie RELAP, ATHLET, CATHARE und andere eingesetzt. Sie modellieren die Komponenten des Kühlkreislaufs als verbundene thermohydraulische Objekte mit hinterlegten Funktionen für den eindimensionalen Impuls- und Wärmetransport. Komplexere Komponenten mit ausgeprägten dreidimensionalen Strömungsmustern sind generisch schwer abzubilden und verlangen fortlaufende Adaption und Validierung der Codes [13]. Eine Nutzung dreidimensionaler numerischer Strömungsberechnungsverfahren (CFD) wird als zielführend für die Zukunft angesehen [14]. Allerdings sind auch diesen Berechnungsverfahren Grenzen gesetzt. Ein ausreichend schnelle Simulation von Zweiphasenströmungen in typischen Kraftwerkskomponenten gelingt aufgrund der Komplexität der Phaseninteraktionen in der Regel nur mit sogenannten Euler/Euler-Ansätzen, bei denen Mittelungen über die Dampf- und Flüssigphase angewendet werden, die ihrerseits wieder Schließungsbeziehungen für den Impuls-, Wärme und Stofftransport an den Phasengrenzflächen sowie Modelle für Koaleszenz und Zerfallsprozesse der dispersen Phase verlangen [15]. Für die Berechnung von Siedevorgängen muss das Zweifluidmodell mit einem Wandsiedemodell (meist dem RPI-Modell) kombiniert werden. Es gibt zahlreiche Forschungs- und Übersichtsarbeiten zur Analyse und Bewertung von Phaseninteraktionsmodellen im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit unter verschiedenen Betriebsbedingungen [15]. In Bezug auf das Wandsieden gibt es einige Arbeiten, bei denen, das RPI-Modell modifiziert wurde, um alle wesentlichen physikalische Wirkmechanismen zu berücksichtigen [16]. Eine Alternative zum Zweifluidansatz ist die Interface-Tracking-Methode, die die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche auf der Gitterskala vollständig auflöst [17]. Diese erfordert aber erhebliche Rechenressourcen, was ihre

Anwendung in der Simulation großskaliger Strömungen behindert. Eine wesentliche neuere Entwicklung hierzu ist das GENTOP-Konzept bei dem große Grenzflächenstrukturen durch Interface Tracking (VOF) aufgelöst werden, kleinere disperse Strukturen aber im Zweiflüssigkeitsansatz behandelt werden, wodurch ein guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenkosten erreicht wurde [18].

2.2 Grundlegende Fragestellungen zur Zweiphasen-Thermohydraulik für neue Reaktortypen

Als SMR werden **kleine modulare Reaktoren** mit einer elektrischen Leistung von bis zu 300 MW(e) bezeichnet, die so konzipiert sind, dass sie in Fabriken gebaut und zu Versorgungsunternehmen transportiert werden können. Passive Sicherheitsmerkmale sind eine der wichtigsten Triebfedern bei der Entwicklung solcher Reaktoren, insbesondere bei wassergekühlten Reaktoren [19], [20]. Einige dieser SMR-Konzepte, wie der Integral Modular Reactor (IMR) von Mitsubishi, der Novel Modular Reactor (NMR) der Purdue University und der NuScale Power Reactor, haben das Reaktorsystem vereinfacht und verfügen über ein Kühlsystem mit natürlicher Zirkulation, in dem die primären Kühlmittelpumpen entfernt wurden [21]. Die meisten anderen Reaktoren sind zumindest für den Betrieb und die Bewältigung von Auslegungsschmelzen mit Naturumlaufkühlung im Kern anstelle der herkömmlichen Zwangskühlung ausgelegt [20], [22]. Unter natürlichen Zirkulationsbedingungen kann ein zweiphasiger Kühlmittelfluss instabil werden. Dies kann zu Kontroll- und Sicherheitsproblemen in Kernreaktoren führen. Instabilitäten in Siedesystemen treten aufgrund von Störungen verschiedener Parameter auf, die den Wärmeübergang beeinflussen. Insbesondere bei niedrigem Druck sind Siedesysteme anfällig für statische und dynamische thermohydraulische Instabilitäten, die die Reaktorsicherheit und -regelung beeinträchtigen können [20], [21].

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Modellierungsarbeiten und experimentelle Arbeiten zum Phänomen der Naturzirkulation durchgeführt, allerdings auf der Grundlage der Datenbasis verschiedener spezifischer DWR Thermohydraulik-Testanlagen [20], [23]. Die Geometrie ist einer der kritischen Parameter in der Datenbank und gleichzeitig der Hauptunterschied zwischen SMR und den traditionellen größeren Reaktoren. Um die wichtigsten thermofluidodynamischen Auslegungsparameter von SMR unter Betriebs- oder Störfallbedingungen zu bestimmen, ist es notwendig, eine umfassende experimentelle oder numerische Analyse für die Naturumlaufkühlung der Brennelemente mit verschiedenen SMR-Auslegungen durchzuführen.

Ein weiteres wichtiges Problem der Naturumlaufströmung ist die Verringerung der Kühleffizienz aufgrund des Ungleichgewichts der internen Strömung [24]. Um diese dynamische interne Strömung und die damit zusammenhängenden Mehrphasenprobleme zu erfassen und zu analysieren, sind fortschrittliche 3D-Bildgebungstechnologien mit hoher zeitlicher Auflösung oder ein gut entwickelter 3D-Computational Multiphase Fluid Dynamics Code erforderlich. Derzeit sind solche 3D-CMFD-Codes jedoch noch durch die Fallabhängigkeit begrenzt nutzbar. Um die Zuverlässigkeit des 3D-CMFD-Ansatzes zu verbessern, sind präzise experimentelle Referenzdaten erforderlich, die wiederum eine fortschrittliche Messtechnik erfordern.

Flüssigmetallgekühlte schnelle Reaktoren (Liquid Metal Cooled Fast Reactors, LMFR) wurden als Kernreaktortyp der nächsten Generation (GEN IV) entwickelt. Als Kühlmittel kommen prinzipiell Natrium (Na) und Blei (Pb oder Pb-Bi) in Frage. In der Planungsphase wurde den Reaktorschutzsystemen, die nach passiven Prinzipien funktionieren, große Aufmerksamkeit gewidmet [25]. Die natürliche Zirkulationsfähigkeit im Reaktorkern ist

entscheidend für die Abfuhr der Nachzerfallswärme [26]. Als ein innovatives Konzept wurde eine Gas-Lift-Pumpe im LMFR konzipiert, mit der die natürliche Zirkulation und damit die Reaktorsicherheit erheblich verbessert werden können [27]. Darüber hinaus bilden sich bei Unfällen mit Kernschäden in LMFR komplexe Mehrphasenströmungen aus [28]. Da das Verhalten mehrphasiger Strömungen in veränderten Reaktorkernen den Brennstoffverlagerungsprozess stark beeinflusst, ist eine angemessene Abschätzung erforderlich. Diese beiden Fragen der nuklearen Sicherheit sind der Grund für die detaillierte Untersuchung von Mehrphasenströmungen mit Flüssigmetall. Ähnlich wie bei den SMR-Studien können die Untersuchungen sowohl experimentell als auch numerisch durchgeführt werden. Aufgrund des großen Unterschieds zwischen Flüssigmetall und Wasser, insbesondere der viel niedrigeren Prandtl-Zahl ($Pr \ll 1$) [29], sind kommerzielle CFD-Codes mit dem klassischen Reynolds-Analogie-Ansatz nicht für die Simulation turbulenter Flüssigmetallströmungen mit Wärmeübertragung geeignet.

2.3 Einsatz von strahlungsbasierten Mess- und Bildgebungsverfahren in der nuklearen Thermohydraulik-Forschung

Ein zentraler Forschungsschwerpunkt der Reaktorthermohydraulik ist das Verständnis und die sichere Vorhersage von Strömung und Wärmetransport in Kühlkreisläufen. Für Leichtwasserreaktoren ist dies an die Berechnung von Zweiphasenströmungen gekoppelt. Die in der Strömungsmechanik ohnehin schon schwierige und selbst numerisch nur näherungsweise mögliche Beschreibung des turbulenten Transports von Impuls und Energie wird durch die Präsenz verformbarer Phasengrenzen und Phasenübergänge erheblich erschwert. Eine skalenübergreifende dreidimensionale Simulation mit CFD-Codes erfordert Experimentaldaten hoher Güte, die neben den thermodynamischen Größen auch das Strömungsfeld in höchster Auflösung wiedergeben. Ein beachtlicher Fortschritt bei der Erfassung turbulenter Strömungsgrößen ist durch die Nutzung schneller optischer Bildgebungsverfahren seit den 90er Jahren zu verzeichnen. Hier sind PIV und Hochgeschwindigkeits-Videotechnik zu erwähnen. Beispiele sind grundlegende Untersuchungen zu Strömungsfeldern in Brennelementen [30] oder thermischer Vermischung, etwa bei Fragen zur Thermoschock-Problematik [31]. Da insbesondere disperse Mehrphasenströmungen völlig intransparent sind, wurden viele neue Messverfahren entwickelt. So sind etwa elektrische Mess- und Bildgebungsverfahren wesentlich robuster gegenüber hohen Gasgehalten in Strömungen aber auch gegenüber rauen Einsatzbedingungen. Neben der elektrischen Prozessstomographie [32] ist hier die Entwicklungen und Einsatz von Gittersensoren herauszustellen. Gittersensoren wurden umfassend zur Klärung generischer Fragestellungen, etwa der Strömungsentwicklung in Rohren [33], Fluidvermischung in T-Stücken [34] und Kühlmittelleitungen bei Thermoschock unter Druck [35], Kühlmittelvermischung im Reaktorbehälter [36], Pool Scrubbing [37], oder Druckstößen in Rohrleitungen [38] eingesetzt. Weiterhin bekannt für die Messung von Phasengehaltsfeldern sind Tomographieverfahren auf der Basis von Röntgen-, Gamma- und Neutronenstrahlung. Diese sind vollständig nichtinvasiv aber auch kostenintensiv. Grundsätzlich können sehr gute räumliche Auflösungen erreicht werden. Anwendungsbeispiele sind Untersuchungen zur Strömung in Brennelementen [39]-[41]. Die zeitliche Auflösung ist in der Regel gering und erlaubt nur gemittelte Messungen. Jüngere Entwicklungen in der beim Antragsteller entwickelten ultraschnellen Röntgentomographie [42] heben diese Einschränkungen auf. Zur Visualisierung von Mehrphasenströmungen in Flüssigmetallen, wurden ebenfalls bereits einfache Röntgenmessverfahren eingesetzt [43]. Auch die Nutzung einer Heißfilm-Anemometrietechnik [44] und der Neutronenradiographie [45]

ist bekannt. Mit diesen ist jedoch nur eine punktuelle Messung oder eine 2D-Durchleuchtungsvisualisierung möglich. Aufgrund der hohen Dynamik im Flüssigmetall-Brennstoffkern ist eine fortschrittliche 3D-Röntgen-Computertomographie-Technologie wünschenswert. Von den beiden Arten von Flüssigmetallen, die in den LMFRs verwendet werden, wird Natrium aufgrund seines niedrigen Schmelz- und Siedepunkts in den Experimenten am häufigsten verwendet. Eine kürzlich durchgeführte Untersuchung zur Thermofluidynamik von Na- und Pb-Kühlmittel während eines Kühlmittelverlustes [46] zeigt, dass die Forschungsergebnisse mit Natrium direkt auf den Fall mit Blei übertragen werden können. Aufgrund der hohen Röntgenabsorption von Blei ist die direkte Anwendung der Röntgen-CT-Technologie für das Flüssigmetall Blei schwieriger.

2.4 Einsatz von strahlungsbasierten Mess- und Bildgebungsverfahren in der Diagnostik für kerntechnische Anlagen und Zwischenlager

Neben der Nutzung von Neutronendetektoren zur Leistungsüberwachung in Kernreaktoren existieren eine Reihe von Beispielen zur erweiterten Nutzung strahlungsbasierter Messverfahren zur Zustandsdiagnostik für laufende Reaktoren, zur Reaktorüberwachung bei Störfällen sowie der Zustandsdiagnose nach schweren Reaktorstörfällen. Für Siedewasserreaktoren wurden in der Vergangenheit verschiedene diversitäre Füllstandsmessverfahren entwickelt. Im US Patent 4639349 wird ein Verfahren beschrieben, welches aus den Daten von Neutronenspaltkammern außerhalb des Reaktordruckbehälters auf den Füllstand zurückrechnet. Im Kernkraftwerk Brunsbüttel wurde ein diversitäres Füllstandsmessverfahren erprobt, welches außerhalb des RDB das axiale Gammastrahlungsprofil erfasst. Dieses wird durch die Strahlschwächung im Ringspalt sowie die Strahlung des im Betrieb entstehenden Radionuklids N-16 im Kühlmittel bestimmt [47]. Im Vorhaben NIZUK (BMBF 02NUK018) wurde mittels Monte-Carlo-Simulationen die Möglichkeit untersucht, Kernschäden bei schweren Störfällen, das heißt, eine Verlagerung geschmolzenen Coriums mit Hilfe von axialen Gamma- und Neutronenfeldmessungen zu verfolgen und damit eine Störfalldiagnostik zu ermöglichen [48].

Eine weiteres innovatives strahlungsbasiertes Bildgebungsverfahren, das in letzten Jahren besonderes Interesse in der Kerntechnik fand, ist die Bildgebung mit kosmischen Myonen. Myonen können zur Durchleuchtung sehr großer Objekte genutzt werden. Durch Messung der Absorption und Streuung kann auf die Objektzusammensetzung zurückgeschlossen werden. Bekanntestes Beispiel ist hierfür die Untersuchung der Chevreton-Pyramide in Gizeh [50]. Nach den Kernschädigungen beim Fukushima Daiichi Unfall kam die Myonenbildgebung zum Einsatz, um den Verbleib der Reaktorkerne aus sicherer Distanz aufklären zu können [49]. In verschiedenen simulationsbasierten Studien wurde die Eignung von Myonen für die Bildgebung an Transport- und Lagerbehältern untersucht [54], [55], [56]. Ziel der Untersuchungen war vor allem die Erkennung fehlender Brennelemente. In [58] wurde erstmals experimentell an einem Westinghouse MC-10-Behälter nachgewiesen, dass mittels Myonenstreuungsradiographie die Identifikation fehlender Brennelemente möglich ist. Kürzlich wurde gezeigt, dass bei ausreichend langer Messzeit von mehr als einem Jahr, eine Identifikation von einzelnen fehlenden Brennstäben möglich ist [57]. Die Myonenbildgebung wurde in den Anfängen zunächst ausschließlich radiographisch durchgeführt. Anfang des Jahrtausends wurde der erste Rekonstruktionsalgorithmus veröffentlicht [51], der es erlaubte aus den Myonenpfaden vor und hinter einem Objekt, ein Volumen zu rekonstruieren. In der Folge wurden stochastische Rekonstruktionsverfahren [52] mit fortgeschrittenen Regularisierungsmethoden entwickelt [53]. Sowohl die Absorption als auch die Streuung können als Eingangsdaten für die Rekonstruktion genutzt werden [54].

3 Bisherige Arbeiten

3.1 Ultraschnelle Röntgentomographie

Das Bildgebungsverfahren der ultraschnellen Röntgentomographie ist eine proprietäre Entwicklung der Professur des Antragstellers mit internationalem Alleinstellungsmerkmal. Wie in Abbildung 1 dargestellt, basiert das Bildgebungsprinzip auf einer Röntgenprojektionsgewinnung mittels eines schnell zirkulierende Elektronenstrahls, der einen beweglichen Röntgenbrennfleck auf einem Metalltarget erzeugt. Mit dem aktuellen ROFEX-Scanner können so bis zu 8.000 Dichteschnittbilder pro Sekunde von Zweiphasenströmungen bei 1 mm räumlicher Auflösung gewonnen werden. Die maximale Scanzeit beträgt derzeit 30 s, wird aber durch neuere Entwicklungen in der Datenübertragungstechnik auf bis zu 30 Minuten ausgedehnt. Scanbar sind Objekte bis 20 cm Durchmesser. Die Abbildung erfolgt quasi-simultan in zwei Ebenen, was eine Ermittlung von Gasphasengeschwindigkeiten über Kreuzkorrelationstechniken ermöglicht. In den vergangenen Jahren wurde die ultraschnelle Röntgentomographie methodisch weiterentwickelt. Die im folgenden beschriebenen Entwicklungen wurden bis zum Labormuster getestet und sollen im geplanten Vorhaben in die Praxis umgesetzt, das heißt, an den vorhandenen Scannern implementiert und für experimentelle Studien genutzt werden.

Für Zweiphasenströmungen in komplexeren Geometrien mit ausgeprägten dreidimensionalen Effekten wäre eine echte dynamische 3D-Bildgebung wichtig. Beispiele sind Strömungen in Stabbündeln mit Abstandshaltern, in T-Stücken, Düsen oder porösen Schüttungen. Verschiedene Konzepte zur 3D-Tomographie wurden bereits patentiert (DE102009002114, DE102018131497) und veröffentlicht [59], [60]. Bei diesen Konzepten wird der Elektronenstrahl des Tomographen sukzessive in verschiedenen axialen Positionen auf dem Röntgentarget zirkuliert (Abbildung 1c). Ein hinter dem Röntgentarget angeordneter Detektorring erfasst die Röntgenstrahlung. Im Rahmen eines Proof-of-Principles wurden bereits drei Detektormodule mit je acht Einzeldetektoren und einem axialen Messbereich von 50 mm aufgebaut und erprobt. Da es das 3D-Prinzip erfordert, dass die Detektoren hinter dem Target angeordnet sind, musste ein durchstrahlbares Röntgentarget technologisch entwickelt werden (Patent DE102008005718). Dieses wurde bereits erfolgreich hergestellt und charakterisiert [59]. Es besteht aus einem Grundkörper aus Graphit mit einer dünnen Wandlerschicht aus aufgedampftem Wolfram (Abbildung 1d).

Für eine schnelle und flexible Schnittbildrekonstruktion und Datenanalyse wurde das Softwaremodul RISA (ROFEX In-Situ Analysis) entwickelt [61]. Es umfasst eine generische und flexibel aufbaubare Datenpipeline-Architektur für CPU/GPU, einen dynamischen Datenspeicherpool für CPU/GPU und eine Funktionsbibliothek für die Datenverarbeitung. Die Software läuft hocheffizient auf GPU-Streamingprozessoren, was den Grad der Parallelisierung um ein Vielfaches erhöht und somit die Verarbeitungszeit für Daten im Gigabyte-Umfang stark reduziert. Im letzten Jahr wurde u.a. durch die Aktivität des Antragstellers die Funktionalität des RISA deutlich erweitert. So können aktuell mehrere GPUs eingesetzt und CT-Daten direkt in einen vorgesehenen DDR-RAM Speicherbereich abgelegt und/oder voll parallel auf Festplattenverbundsysteme gestreamt werden. Die Datenpipeline verarbeitet die Daten nun in Echtzeit und wird über ein Konfigurationsfile definiert, welches sogar zur Programm-Ausführungszeit modifiziert werden kann. Jedoch beschränkt sich der Funktionsumfang auf Schnittbilder. Für die Nutzung von RISA muss die Funktionsbibliothek um Schnittbildstack-Funktionen für 3D-Bildgebung erweitert werden.

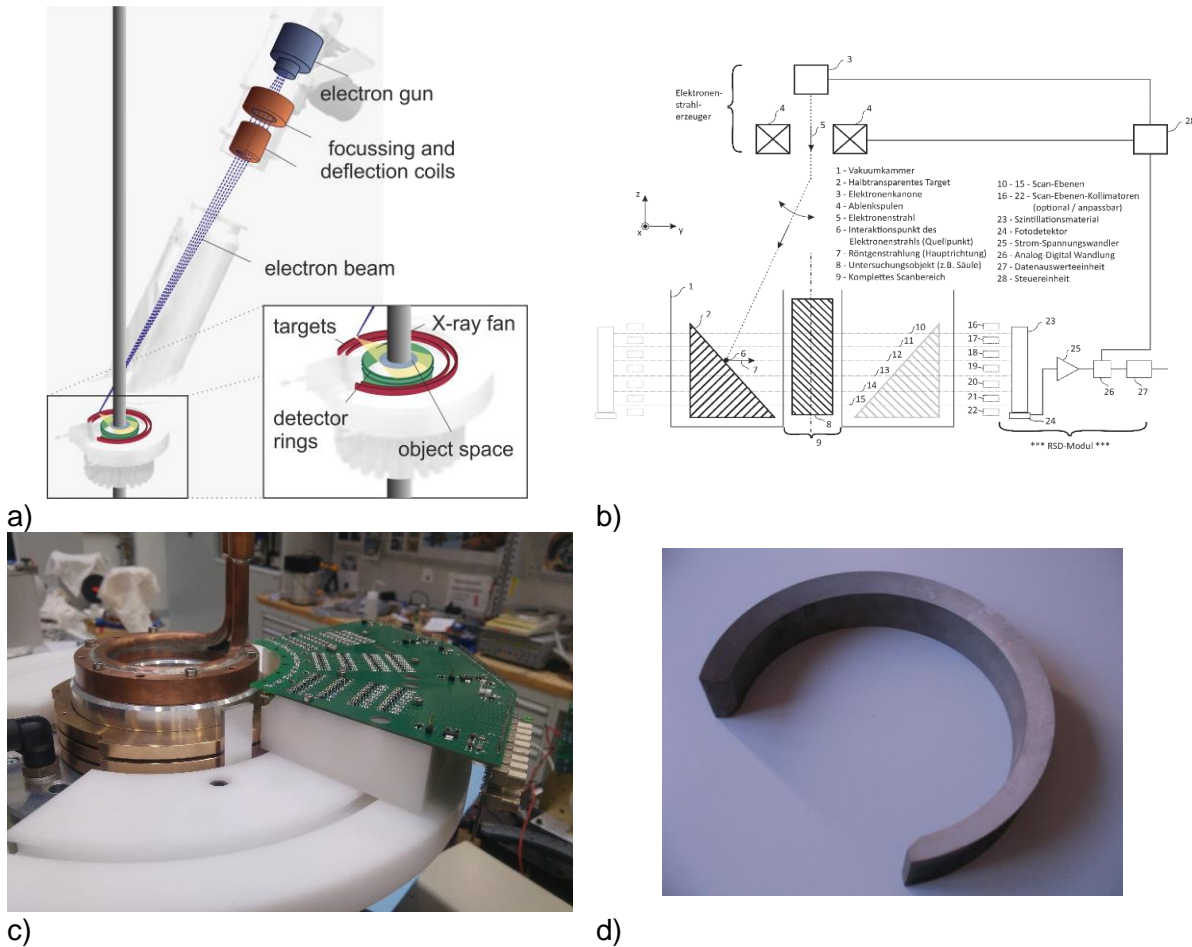


Abbildung 1: a) Prinzip der ultraschnellen Röntgentomographie. b) Anordnung zur 3D-Tomographie (Patent DE102018131497). c) Elektronikkomponenten für die 3D-Tomographie. d) Durchstrahlbares Target (Graphit mit W-Beschichtung).

3.2 Der 1 MeV-Hochleistungsscanner HECTOR

Beim Antragsteller wurde in den letzten Jahren der Hochenergie-Elektronenstrahlscanner „HECToR“ entwickelt [62]. Sein Funktionsprinzip ähnelt dem der ROFEX-Scanner, wobei jedoch hier ein 1-MeV-Linearbeschleuniger genutzt wird (Abbildung 2). Mit einer ca. 7-fach höheren Röntgenenergie und 10-fach höheren Strahlleistung ermöglicht dieser Bildgebung an Objekten mit Durchmessern bis 0,5 m bei Schnittbildraten im Kilohertzbereich. Ferner überwindet die bei HECToR erheblich gesteigerte Penetrationsfähigkeit der Strahlung den bisherigen Zwang der ultraschnellen Röntgentomographie, auf Experimentalaufbauten mit leichten Materialien auszuweichen. Insbesondere ermöglicht der Scanner Untersuchungen an Brennelementen in Originalgröße, an metallischen Schüttungen und an Flüssigmetallströmungen. Letzteres ist für die internationale Mitarbeit in Forschungsprogrammen zur Entwicklung und Bewertung flüssigmetallgekühlter Reaktoren ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal. Bezgl. Natrium sind dem Objektdurchmesser keine Grenzen gesetzt, bezgl. Blei-Bismut-Flüssigmetallströmungen rechnet der Antragsteller mit der Möglichkeit von Bildgebung in Strömungskämen bis 3,5 cm Durchmesser. Als Ersatz für Blei kann auch Gallinstan (InGaSn) verwendet werden, was Objektdurchmesser bis ca. 10 cm erlaubt. Im beantragten Vorhaben soll die Hochleistungsrontgentomographie für diese Anwendungsfälle qualifiziert werden.

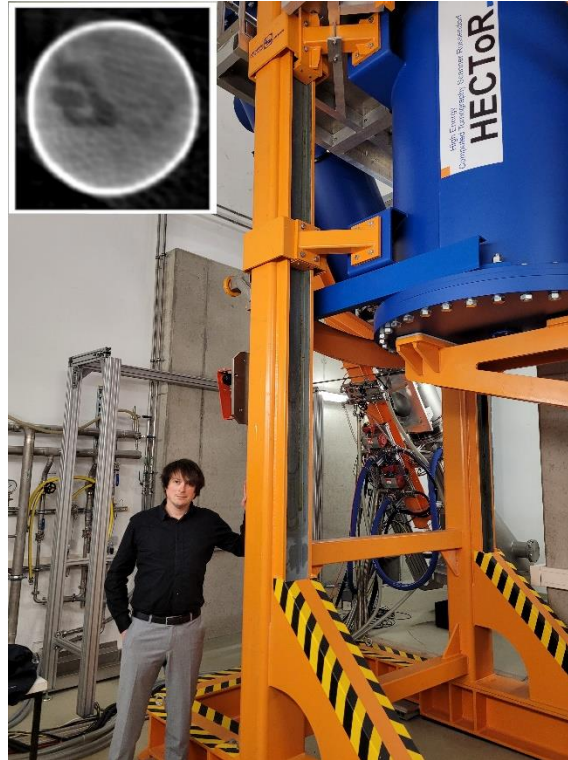


Abbildung 2: 1 MeV-Röntgenscanner HECTOR. Das rekonstruierte Schnittbild in der linken oberen Bildecke zeigt Gasstrukturen in Wasser in einem Edelstahl Druckgefäß mit Durchmesser 220 mm und einer Wandstärke von 4 mm, aufgenommen mit 2500 Hz Bildrate.

3.3 Analyse und Modellierung von adiabaten Zweiphasenströmungen

Die Analyse, Modellierung und Simulation von dispersen Zweiphasenströmungen sind ein zentraler Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe des Antragstellers. An der TOPFLOW-Anlage des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf wurden im Rahmen des BMWi-Vorhabens TOPFLOW-I (FKZ 1501265) Untersuchungen zur Strömungsentwicklung in senkrechten Rohrleitungen unter Einsatz von Gittersensoren durchgeführt [63], [64]. Dabei entstanden wertvolle Validierungsdaten für die CFD-Codeentwicklung [65]. Im Rahmen des Fortsetzungsvorhabens TOPFLOW II (FKZ 1501329) kam erstmalig die neu entwickelte ultraschnelle Röntgentomographie zum Einsatz. Mit dieser konnten auch Strömungsszenarien untersucht werden, für die der Gittersensor als Bildgebungsinstrument wegen seiner Invasivität weniger geeignet ist. Dazu zählen insbesondere abwärtige Zweiphasenströmungen und Gegenströmungen [66]. Im Rahmen des BMWi KEK-Vorhabens „Untersuchung disperser Zweiphasenströmungen in komplexen Geometrien“ (FKZ 1501481) wurde der Untersuchungsgegenstand auf Zweiphasenströmungen um ein Hindernis ausgedehnt. Untersucht wurde eine disperse Blasenströmung um ein halbkreisförmiges und ein ringblendenförmiges Hindernis (Abbildung 3) [67]. In begleitenden Arbeiten zur CFD-Codeentwicklung gelangen auf Basis der experimentellen Daten entscheidende Verbesserungen in der Modellierung der Widerstandskraft der Dampfblasen bei hohen Scherraten sowie des Blasenzerfalls und der Blasenkoaleszenz [68], [69].

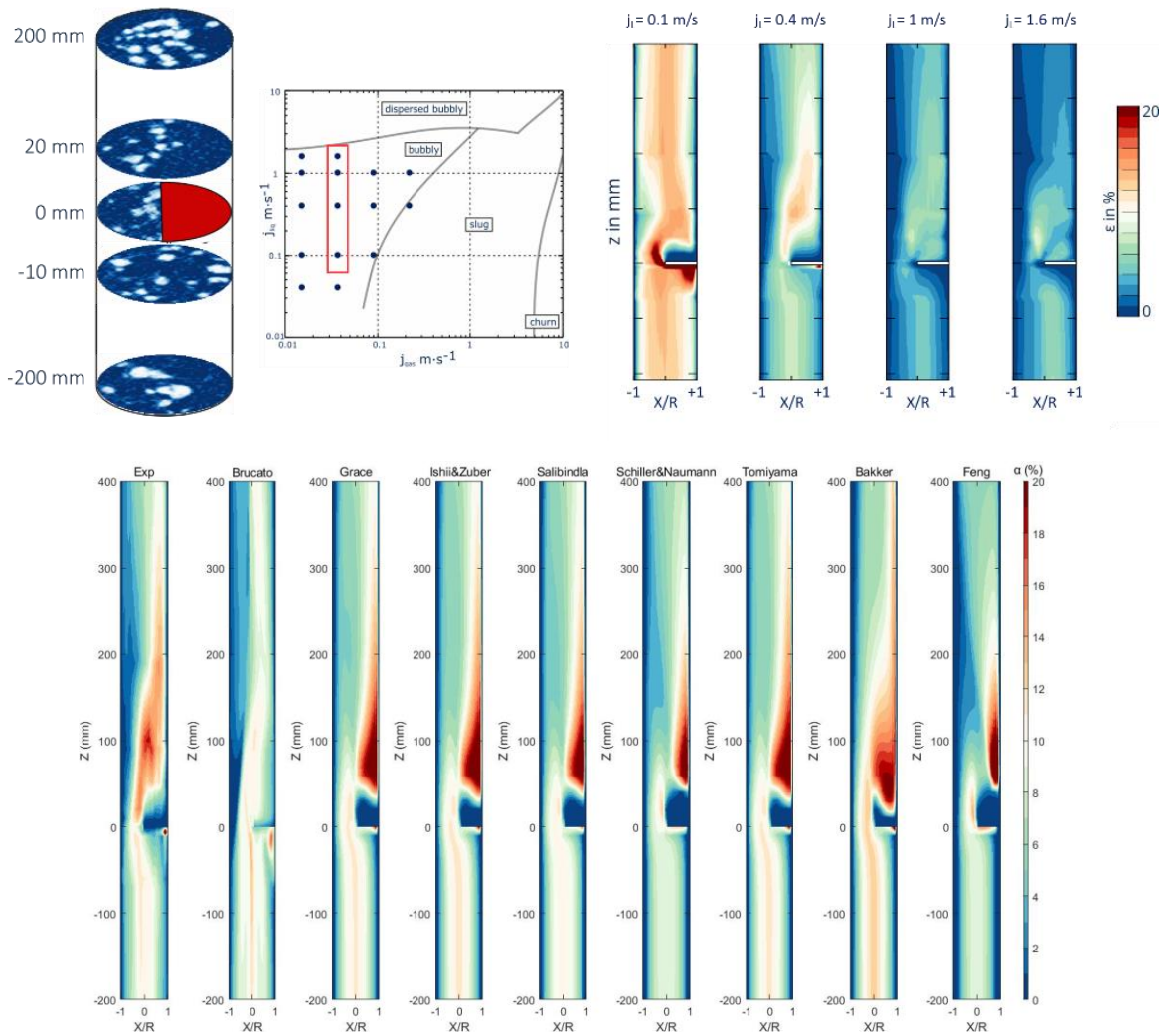


Abbildung 3: Arbeiten zur CFD-Modellierung adiabater Zweiphasenströmungen. Im Rahmen eines KEK-Vorhabens des BMWi wurde die dreidimensionale disperse Zweiphasenströmung in einem Rohr mit einer asymmetrischen Blende untersucht. Neben der Röntgentomographie (das Bild oben zeigt die Gasblasenverteilung und die Pseudo-3D-Ansicht der Gasgehaltsverteilung) kam Heißfilmanemometrie zur Bestimmung von Flüssigphasengeschwindigkeiten zum Einsatz [67]. Im Rahmen von CFD-Analysen (Bild unten) wurden gängige Blasenkraftmodelle untersucht. Dabei wurden eine stärker als bisher angenommene Kopplung der Widerstandskraft mit der blaseninduzierten Turbulenz festgestellt und ein angepasstes Widerstandskraftmodell vorgeschlagen [68].

3.4 Analyse und Modellierung von Siedeprozessen und Strömungen in Brennelementen

In Brennelementen ist neben der Strömung auch die Wärmeübertragung zu modellieren. Die Gruppe des Antragstellers ist auf diesem Gebiet insbesondere zu Fragestellungen des unterkühlten Blasensiedens sowie der Modellierung des kritischen Wärmestroms aktiv. Im BMBF-Vorhaben „Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren“ (FKZ 02NUK010) wurden umfangreiche experimentelle und numerische Arbeiten zum Blasensieden durchgeführt [70], [71]. Hierbei kam es zu einer Zusammenarbeit des Antragstellers mit der Arbeitsgruppe von Dr. Yassin Hassan an der Texas A&M University. Im BMWi-Vorhaben „CFD-Methoden zur Berechnung der kritischen Wärmestromdichte“ (FKZ 1501473) wurden die Analysen auf Probleme der kritischen Wärmestromdichte ausgedehnt und es wurden insbesondere neue Modellierungsansätze für die Wärmestromaufteilung und die Zweiphasenströmung in Wandnähe entwickelt [72]-[74]. Im

Rahmen des Vorhabens wurden experimentelle Arbeiten zur zweiphasigen Durchströmung von Stabbündeln mit Abstandshaltern durchgeführt. Hierbei kam die hochauflösende Mikrofokus-Röntgentomographie zum Einsatz, mit welcher unter anderem erstmalig hohe Gasansammlungen im Nachlauf von Drallfahnen an Abstandshaltern nachgewiesen wurden [42]. Da es sich hierbei aber um ein zeitlich mittelndes Bildgebungsverfahren handelt, mangelt es bisher an Informationen zur kleinskaligen Gasphasenstruktur. Die Arbeiten wurden von dedizierter CFD-Codeentwicklung begleitet [75]. Insbesondere gelang es auf Basis der erhobenen Messdaten Fortschritte in der Modellierung der blaseninduzierten Turbulenz zu erreichen. Schlussendlich konnte der Antragsteller die Analyse von Zweiphasenströmungen in Brennelementen auch unter industriellen Bedingungen vorantreiben. In einem bilateralen Vorhaben mit der Framatome GmbH wurde die Gammatomographie am Brennelementeversuchsstand KATHY in Karlstein eingesetzt, um Void-Verteilungen in Siedewasserreaktor-Brennelementen bei originalen Betriebsbedingungen (70 bar, Heizleistung bis 20 MW) zu ermitteln [76].

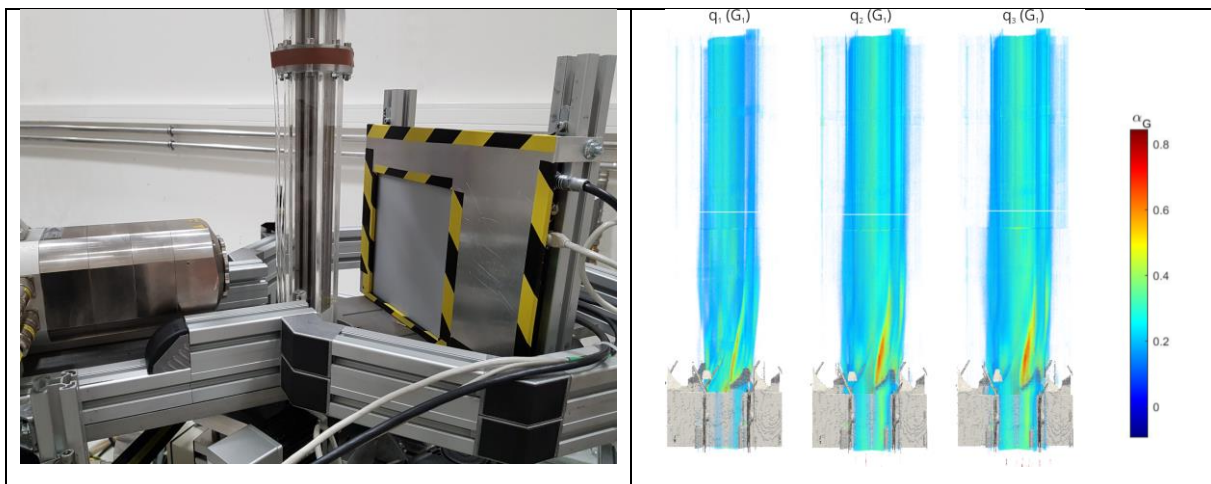


Abbildung 4: Experimente zur Zweiphasenströmung an Abstandshaltern in Brennstabbündeln. Links: Beheizbares 3×3 Bündel mit Abstandshaltern an einem mit Kältemittel RC134a betriebenen Versuchsstand. Zu sehen ist die hochauflösende Mikrofokus-Röntgenanordnung. Sie erlaubt zeitgemittelte 3D-Bildgebung mit ca. 80 μm räumlicher Auflösung. Rechts: Rekonstruierte 3D-Gasphasenverteilung um den zentralen Stab hinter dem Abstandshalter für Drallfahnen mit verschiedenen Anstellwinkeln. Gut zu erkennen sind extrem hohe Gasakkumulationen (bis 80% Gasgehalt!) im Zentrum der sich stromabwärtig ausbildenden Wirbel.

3.5 Analyse und Modellierung der Hochdruckdampfkondensation

Im BMBF-Vorhaben PANAS (FKZ 02NUK041) wurde die Wärmeübertragung durch Hochdruckdampfkondensation in einem liegenden zwangsgekühlten Rohr untersucht. Die Arbeiten dienten der verbesserten Modellierung von Strömung und Wärmeübertragung im Notkondensator des passiven KERENATM-Notkühlsystems [77]. Bei den experimentellen Untersuchungen kam insbesondere die Röntgentomographie zum Einsatz, um die Strömungsform während der Dampfkondensation berührungsfrei zu ermitteln [78]. Auch hier handelt es sich um zeitmittelnde Bildgebung (keine schnelle Röntgentomographie), da der Schwerpunkt hier auf höhere räumliche Auflösung (ca. 0,5 mm) gelegt wurde. Wie Abbildung 5 zeigt, konnten zeitgemittelte Querschnitte des Flüssigphasenanteils quantifiziert und mittels einfacher Radiographie die Dynamik von Wellen im Kondensationsrohr visualisiert werden [79]. Was nicht gelang, war eine Auflösung des Kondensationsfilms sowie eine dynamische Querschnittsdarstellung der Wellen- und Pfropfenströmung. Hier sind weitere Fortschritte durch die in diesem Vorhaben geplante Einführung der dynamischen 3D-Tomographie zu erwarten.

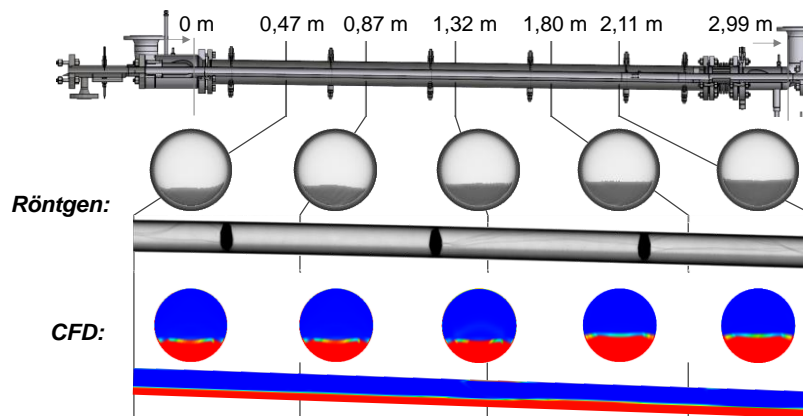


Abbildung 5: Links: Kondensationsversuchsstand COSMEA mit konventioneller Röntgentomographie. Auf dem Bild sind das liegende Kondensationsrohr sowie der rotierende Quell-Detektor-Verbund zu sehen. Rechts: Röntgendaten der Zweiphasenströmung für Dampfkondensation bei 65 bar Druck (seitliche Durchleuchtungsansicht und zeitgemittelte Querschnittsbilder) sowie Ergebnisse von CFD-Rechnungen.

3.6 Reaktorzustandsdiagnostik bei schweren Störfällen

Im Rahmen des BMBF-Vorhabens „Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandsänderungen und der Deformation des Kerns“ (FKZ 02NUK018) wurde durch die Professur des Antragstellers gemeinsam mit der Hochschule Zittau/Görlitz eine Methodik zur Erkennung von Füllstandsabfall und Kerndeformation anhand von Gamma- und Neutronenflussdaten bei schweren Störfällen entwickelt. Postuliert wurde die Möglichkeit der Differenzierung verschiedener Füllstandsniveaus und Kernschädigungszustände anhand des Gamma- und Neutronenstrahlungsfeldes seitlich des Reaktors. Die hierbei durchgeführten Analysen beruhen auf detaillierten Monte-Carlo-Simulationen mittels des Rechenprogramms MCNP [48]. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine sichere Erkennung des Füllstandsabfalls durch geringere Schirmwirkung des reduzierten Kühlmittelinventars als auch eine Verlagerung von Kernmaterial in das untere Plenum des Reaktors möglich ist.

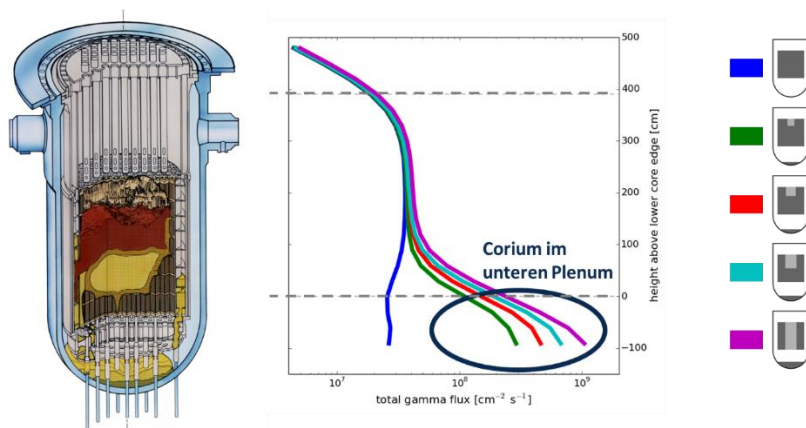


Abbildung 6: Ergebnisse einer Monte-Carlo-Studie zur Diagnostik von Füllstandsabfall und Kernmaterialverlagerung bei schweren Störfällen. Abgebildet ist der Gammastrahlungsfluss seitlich des RDB am biologischen Schild für verschiedene Kernschmelzezustände mit Kernmaterialverlagerung in die Bodenkalotte [48].

3.7 Myonenbildgebung für Transport- und Lagerbehälter mit abgebrannten Brennelementen

Im Rahmen des BMWi-Projektes DCS-Monitor (FKZ 1501518) wurde die grundlegende Eignung kosmischer Myonen für die Identifikation der Inventarzustände von Transport- und Lagerbehältern untersucht. Hierfür wurde im Monte-Carlo-Code MCNP ein detailliertes Modell des CASTOR V/19-Behälters erstellt. Der anschließend simulierte Myonenfluss zeigte, dass die Messung der Myonenabsorption über Detektoren über und unter dem Behälter nach wenigen Tagen Messzeit eine Projektion der Längsstruktur des Behälters liefert, in der sich die Brennelemente scharf abbilden. Hierfür mussten die Myonen derart durch die virtuellen Detektoren gefiltert werden, dass nur nahezu senkrecht einfallende verwendet wurden. Weiterhin wurden Relokationsszenarien für das Behälterinventar untersucht. Eine hypothetische vertikale Verlagerung des Brennstoffs in allen Brennstäben eines Elements zeichnete sich mit dieser radiographischen Bildgebungsart ebenfalls ab, allerdings nur unter Verwendung von Referenzbildern.

Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt im Projekt DCS-Monitor II (FKZ 1501606) eine vertiefte Untersuchung der Myonenradiographie und Myonentomographie. Hierfür wurden das Simulationsmodell auf den auf Geant4-basierenden Code G4beamline erweitert und zwei Rekonstruktionsalgorithmen implementiert. Diese wurden zunächst an Testobjekten erprobt. So gelang es, ein einzelnes Stabbündel ohne umgebende Abschirmung in der Vertikalprojektion nach einigen Stunden Messzeit aufzulösen. In der Vollbehältersimulation für 12 Stunden Messzeit gelang über die MLEM-basierte Rekonstruktion (MLSD) in Verbindung mit einer Region-Clustering-Regularisierung die Auflösung der Brennelemente (Abbildung 7) deutlich besser als mit dem klassischen PoCA-Algorithmus. Eine wie oben beschriebene Verlagerung des Brennstoffs zeichnete sich im Längsprofil des Brennelements bei Nutzung bei Vergleich mit einem Referenzbild ab. Da eine weitere Erhöhung der Messzeit und eine feinere Diskretisierung den Rechenaufwand sehr stark ansteigen lassen würde, werden aktuell für die klassische CT entwickelte Rekonstruktionsmethoden für die Myonentomographie adaptiert. Ziel ist die Auflösung des Behälterinventars, die über die Identifikation fehlender Brennelemente hinausgeht und vertikale wie auch horizontale Verlagerungen auflösen kann.

Neben der Weiterentwicklung der Bildgebung wird ein Myonendetektor entwickelt und aufgebaut. Hierfür werden derzeit selbst entwickelte Driftkammern aufgebaut und die Drifteigenschaften evaluiert. Ziel ist hierbei der Aufbau eines robusten, modularen Prototyps, der ein Myonenttracking mit einem Winkelfehler $< 1^\circ$ erlaubt.

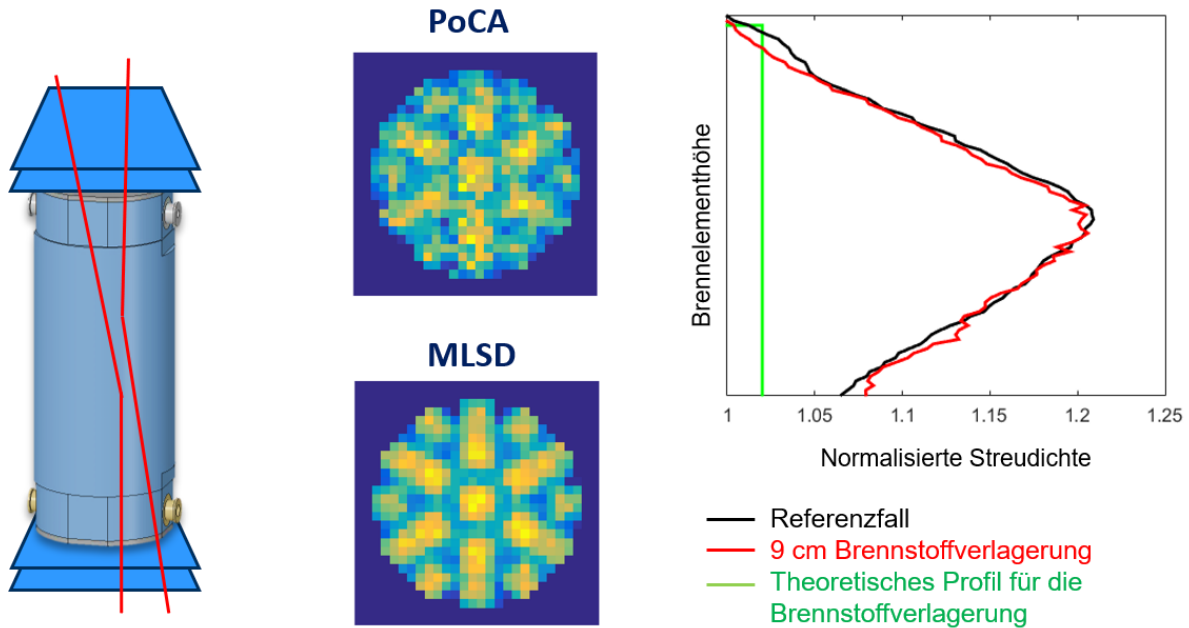


Abbildung 7: Myonenbildgebung an einer CASTOR-Behälter (Strahlungstransportsimulation): Virtuelle Detektoren (blau) wurden ober- und unterhalb des Behälters positioniert. Das Myonentracking ermöglicht eine Rekonstruktion der Streudichte durch den PoCA- oder MLEM-Algorithmus. Dabei bilden sich nach wenigen Stunden virtueller Messzeit die Brennelemente deutlich ab. Rechts: Normalisierte (auf den kleinsten auftretenden Wert) rekonstruierte Streudichte für das mittlere Brennelement. Zwischen dem Normalzustand (Referenz) und einer Brennstoffverlagerung im mittleren Brennelement ist im oberen Bereich eine kleine Differenz zwischen den Profilen zu erkennen.

3.8 Beiträge des Antragstellers, Dr. Wagner

Im Rahmen seiner Dissertation befasste sich der Antragsteller mit der radiometrischen Analyse von Zweiphasenströmungen. Ein wesentlicher Aspekt war hierbei die Korrektur der systematischen Verzerrung der errechneten Schwächungswerte für die Gammadensitometrie und -tomographie mit geringen Zählraten (Dynamic Bias Error [81]). Über umfangreiche numerische Untersuchungen konnte ein Lösungsschema für das inverse Problem entwickelt werden, das den Fehler für einen weiten Parameterbereich komplett korrigiert. Es wurde erfolgreich an densitometrischen und tomographischen Messdaten erprobt [81], [82]. Als Ableger dieses Verfahrens wurde ein Klassifizierungsalgorithmus für die densitometrische Bestimmung von Strömungsregimen entwickelt. Für die ultraschnelle Röntgentomographie untersuchte der Antragsteller die Auswirkungen von Streustrahlung und Strahlaufhärtung auf die Bestimmung der Phasengehalte [83] und entwickelte Korrekturmethode speziell für die CT von Zweiphasenströmungen. Weiterhin wurde ebenfalls für die ultraschnelle Röntgentomographie ein Strahlbahnkorrekturalgorithmus entwickelt, der auf Basis der rekonstruierten Bilder die durch äußere Einflüsse leicht gestörte Ablenkung des Elektronenstrahls schätzt und dadurch erzeugte Verzerrungen iterativ korrigiert. Neben dieser Methodenentwicklung war er an der Implementierung der Datenverarbeitung und Bildrekonstruktion für GPU beteiligt. Durch die massive Parallelisierung der Datenströme können nun bis zu 8000 Schnittbilder pro Sekunde rekonstruiert werden, was eine Online-Bildgebung mit der ultraschnellen Röntgen-CT erlaubt [84]. Die Gruppe gewann hierfür den Technologiepreis des HZDR.

In der Postdoc-Phase untersuchte der Antragsteller im Rahmen des Vorhabens DCS-Monitor (FKZ 1501518) die Eignung der Thermographie für die nichtinvasive Überwachung von

CASTOR V/19-Behältern bei verlängerter Zwischenlagerung. Hierfür wurden analytische Rechnungen für das inverse Wärmeleitungsproblem und umfangreiche CFD-Simulationen der inneren Konvektion durchgeführt. Damit konnten die Grenzen der Sensitivität dieses Ansatzes bestimmt werden [85]. Im Folgevorhaben DCS-Monitor II (FKZ 1501606) widmet er sich der Myonenbildgebung für CASTOR-Behälter. Dafür werden Monte-Carlo-Simulationen für verschiedene Inventarzustände durchgeführt. Die Simulationsdaten werden genutzt um Rekonstruktionsalgorithmen zu testen, die erlauben, eventuelle Inventarveränderungen zu registrieren. Weiterhin wird eine geeignete Datenverarbeitung für den sich im Aufbau befindlichen Myonendetektorprototyp entwickelt.

4 Beteiligte Forschungseinrichtungen

Die geplante Nachwuchsgruppe ist an der **Technischen Universität Dresden**, an der Professur für bildgebende Messverfahren für die Energie- und Verfahrenstechnik angesiedelt. Die Professur unter Leitung von Prof. Hampel arbeitet seit 2012 intensiv an der Entwicklung und Anwendung bildgebender Messverfahren und wirkt mit dem Methodenschwerpunkten der elektrischen und strahlungsbasierten tomographischen Bildgebung an der Beantwortung aktueller Fragestellungen in verschiedenen Themenbereichen der nuklearen Sicherheitsforschung mit. Aktuelle Beispiele sind Projekte zur Brennelement-Thermohydraulik (BMW i Siedemodellierung FKZ 1501473, BMW i MODAS FKZ 1501481, BMBF SINABEL FKZ 02NUK027), zum Zinkborat-Verhalten im Reaktorkern (BMW i AZORA FKZ 1501496), zu passiven Kühlsystemen (BMBF PANAS FKZ 02NUK041, BMW i EASY FKZ 1501492), zum Kernkraftwerksrückbau (BMBF KOBKA FKZ 15S9434) und zur verlängerten Zwischenlagerung (BMW i DCS MONITOR FKZ).

Die Forschungsinfrastruktur der Professur ist am **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf** angesiedelt. Zu den im Vorhaben genutzten Versuchsanlagen gehören die Mehrzweck-Thermohydraulikversuchsanlage TOFLOW, kleinere Strömungsversuchsstände sowie die im Vorhaben weiterzuentwickelnden Röntgenscanner. Insbesondere erfolgt die Bearbeitung des Vorhabens in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftler/innen der Magnetohydrodynamik (Dr. Sven Eckert, Dr. Thomas Wondrak) zur Analyse und Modellierung von Flüssigmetallströmungen sowie Computational Fluid Dynamics (Dr. Dirk Lucas, Dr. Yixiang Liao, Dr. Ding Wei) im Bereich Zweiphasen-CFD.

Eine vertiefte internationale Zusammenarbeit ist im Rahmen assoziierter Partnerschaften mit folgenden Einrichtungen geplant:

CEA Frankreich, Prof. Dominique Bestion ist ein international führender CFD- und Systemcode-Experte und koordiniert insbesondere internationale Benchmark-Aktivitäten im Rahmen der OECD/NEA, sowie des SILENCE und FONESYS-Verbundes. Sein besonderes Interesse besteht an hochauflösenden Experimentaldaten für ausgewählte CFD-Benchmarks, wie zweiphasige Durchströmung von Brennelementen unter Naturumlaufbedingungen sowie zweiphasiges kritisches Ausströmen an Lecks. Die Zusammenarbeit erfolgt über einen Austausch von Doktorand/inn/en sowie Datenbereitstellungen und gemeinsame Publikationen.

ETH Zürich und Paul Scherrer Institut Villigen, Schweiz: Frau Prof. Manera leitet den Züricher Lehrstuhl für Nuclear Safety & Multiphase Flows seit einem Jahr. Sie ist eine ausgewiesene Expertin im Bereich Zweiphasen-Thermohydraulik. Gemeinsam mit dem PSI wurde eine Zusammenarbeit im Bereich Modellierung von dispersen Zweiphasenströmungen in engen Kanälen sowie für die Problematik des Pool-Scrubbings vereinbart. Auch hier erfolgt die Zusammenarbeit über einen Austausch von Doktorand/inn/en.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (**GRS**), Dr. Braunroth und Gesellschaft für Zwischenlagerung (**BGZ**), Dr. Maik Stuke: Im Rahmen der Myonenbildgebung für das Monitoring des Inventars von Kernbrennstoffbehältern in Zwischenlagern besteht bereits eine förmliche Zusammenarbeitsvereinbarung mit den beiden Einrichtungen. Die inhaltliche Zusammenarbeit besteht in der Entwicklung von Bildrekonstruktionsverfahren für die Myonentomographie (GRS) sowie einer Anwendung der Technik im Zwischenlager (BGZ).

5 Beschreibung des Arbeitsplans

5.1 Detailliertes Arbeitsprogramm

Das Vorhaben umfasst drei im Wesentlichen von den Doktorand/inn/en zu bearbeitende Teilprojekte. Diese Arbeiten werden vom Antragsteller als Gruppenleiter koordiniert, wobei der Gruppenleiter selbst wissenschaftlich in den Themenbereichen Bildrekonstruktionsverfahren und Datenanalysetechniken für Röntgentomographie sowie inverse Probleme für strahlungs-basiertes Monitoring aktiv ist. Das Vorhaben wird anfänglich von einem Wissenschaftler für Detektorbau und anschließend von einem Ingenieur begleitet. Dieser ist für den Aufbau der Versuchsstände zuständig und begleitet die Experimente. Die Gesamtlaufzeit des Vorhabens beträgt zunächst 3 Jahre. Es ist geplant eine Verlängerung um 2 weitere Jahre zu beantragen. Die Teilprojekte starten für Doktorand/inn/en nach 6 Monaten. Sie sind 30 Monate (42 bei Projektverlängerung) tätig. Die Anfangsphase wird für die Rekrutierung geeigneter Kandidat/inn/en benötigt. Die Gruppe ist damit nach einem Jahr personell vollständig besetzt. Im Folgenden sind die Teilprojekte mit ihren Arbeitspaketen inhaltlich beschrieben.

Der grundsätzliche zeitliche Ablauf des Vorhabens ist wie folgt:

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5
Rekrutierung, Vorbereitung der Technik	■	■	■	■	■
Doktorandenprojekt TP 1	■	■	■	■	■
Doktorandenprojekt TP 2	■	■	■	■	■
Doktorandenprojekt TP 3	■	■	■	■	■
Zusammenfassung der Ergebnisse, Projektabschluss	■	■	■	■	■

5.2 Teilprojekte

TP1: Experimentelle und numerische Untersuchungen zu dispersen Zweiphasenströmungen in Brennelementgeometrien mittels ultraschneller 3D-Röntgentomographie	
Bearbeiter	Doktorand/in #1, Gruppenleiter, Wiss. Mitarbeiter für Detektorbau, Ingenieur
Zeitraum	M1-M48
<p>Hintergrund: Bisherige experimentelle Studien zu Zweiphasenströmungen in komplexen Geometrien erfolgten mittels Schnittbildgebung in ein oder zwei Ebenen. Die im Arbeitspaket aufzubauende schnelle 3D-Röntgentomographie (AP1) erlaubt es erstmalig, das Strömungsgeschehen zeitlich hoch aufgelöst dreidimensional abzubilden. Das ergibt eine erhebliche Verbesserung der Datenlage zu Koaleszenz und Zerfall von Gasblasen, der Blasendeformation, der Akkumulation und der Struktur der Gasphase in Rezirkulationsgebieten und im Wirbelgebiet hinter Drallfahnen.</p>	
<p>Zielstellungen: Nach Implementierung der Technik werden zwei Experimentalserien realisiert: Serie 1 dient der Erprobung der 3D-Tomographie und analysiert die Zweiphasenströmung an einer Ringblende und einer Halbkreisblende als generischer Fall. Die Untersuchung ist komplementär zu den bereits im Projekt „Untersuchung disperser Zweiphasenströmungen in komplexen Geometrien“ (FKZ 1501481) durchgeführten Arbeiten mit zweidimensionalem Scan. Der Versuchstand ist verfügbar. Die zweite Experimentalstudie widmet sich der adiabaten Strömung in einem Stabbündel als Nachbildung eines SMR-Brennelementes. Die sicherheitstechnische Fragestellung ist hier die nach der</p>	

Zweiphasenströmung bei Naturumlauf, also verhältnismäßig geringem Flüssigphasenimpuls. Dieser Fall tritt bei heutigen Leichtwasserreaktoren bei Naturumlaufkühlung des Reaktorkerns im Störfall auf und ist ebenso eine Besonderheit bei einer Reihe wassergekühlter SMRs. Naturumlauf kann zu Gasakkumulationen und damit zu Beeinträchtigungen der Brennstabkühlung führen und stellt ein relevantes Problem der Sicherheit dieses Reaktortyps dar. Demzufolge ist es Ziel des Vorhabens, die Strömungsstruktur unter solchen Bedingungen in Stabbündeln mit und ohne Abstandshalter aufzuklären und die Fähigkeit heutiger Euler/Euler-CFD-Codes zur Berechnung dieser Strömungszustände in derartigen Geometrien zu überprüfen und ggf. zu verbessern. In beiden Experimentalserien kommen die 3D-Röntgentomographie und die Heißfilmanemometrie zur Flüssigphasengeschwindigkeits- und Turbulenzmessung zum Einsatz. In einem finalen Schritt erfolgt der Einsatz der Zweifluid-CFD nach Stand der Technik, also dem HZDR-Baseline-Modell (Code ANSYS-CFX). Untersucht wird, inwiefern die aktuelle Modellkonfiguration die Berechnung der Zweiphasenströmung in einer repräsentativen Bündelgeometrie nachbilden kann. Bei Bedarf werden Blasenkraftmodelle angepasst. Hierbei stehen die Widerstandskraft und die Wandkraft im Vordergrund der Betrachtungen.

Geplante Arbeiten:

	PM GL	PM DET	PM ING	PM PhD
AP1.1: Implementierung der 3D-Tomographie				
1) Implementierung der 3D-Detektoranordnung im ROFEX-Scanner	2	9	-	-
2) Implementierung angepasster 3D-Datenanalyse-Codes im RISA	6	-	-	-
AP1.2: Studie zur Zweiphasenströmung an Blenden				
1) Einarbeitung in das Thema, Literaturrecherchen	-	-	-	4
2) Modifikation des Versuchsstandes	-	-	-	2
3) Experimente an einer Ringblende	1	-	1	3
4) Experimente an einer Halbkreisblende	1	-	1	3
5) Datenanalysen und Ergebnispublikation	1	-	-	4
AP1.3: Studie zur Zweiphasenströmung in einem Stabbündel				
1) Aufbau der Testsektion an der RC134a-Strömungsschleife	1	-	6	1
2) Adiabate Experimente	-	-	1	3
3) Experimente mit beheizten Stäben	-	-	1	4
4) Datenanalysen und Ergebnispublikation	1	-	-	5
AP1.4: CFD-Rechnungen, Bewertung, Modellverbesserung				
1) Erstellung der Modellgeometrie und des Modellsatzes (HZDR-Baseline), Gitterkonvergenzstudien	1	-	-	2
2) Nachrechnung der Experimente für SMR-Stabbündel, Kritische Analyse der Modellierungsgenauigkeit	-	-	-	6
3) Entwicklung verbesserter Modelle für Widerstandskraft und Wandkraft	-	-	-	2
4) Erneute Nachrechnungen, Interpretation der Ergebnisse mit Bezug zur sichern Brennstabkühlung bei Naturumlauf	1	-	-	3

Ablaufplan:

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
AP1.1: Implementierung der 3D-Tomographie					
1)	■	■	■	■	■
2)	■	■	■	■	■
AP1.2: Studie zur Zweiphasenströmung an Blenden					
1)	■	■	■	■	■
2)	■	■	■	■	■
3)	■	■	■	■	■
4)	■	■	■	■	■
5)	■	■	■	■	■
AP1.3: Studie zur Zweiphasenströmung in einem Stabbündel					
1)	■	■	■	■	■
2)	■	■	■	■	■
3)	■	■	■	■	■
4)	■	■	■	■	■
AP1.4: CFD-Rechnungen, Bewertung, Modellverbesserung					
1)	■	■	■	■	■
2)	■	■	■	■	■
3)	■	■	■	■	■
4)	■	■	■	■	■

Meilensteine in den ersten 3 Jahren:

M1.1	3D-Technik im ROFEX-Scanner implementiert	12
M1.2	Experimente an Blenden abgeschlossen	18
M1.3	Experimente an SMR-Stabgeometrie abgeschlossen	30

Meilensteine bei Projektverlängerung:

M1.4	CFD-Rechnungen und Bewertung abgeschlossen	48
------	--	----

TP2: Experimentelle und numerische Untersuchungen zu Zweiphasenströmungen in Flüssigmetallen

Bearbeiter	Doktorand/in #2, Gruppenleiter, Wiss. Mitarbeiter für Detektorbau, Ingenieur
-------------------	--

Zeitraum	M1-M48
-----------------	--------

Hintergrund: Mit der Verfügbarkeit des Hochleistungstomographen HECTOR wird es erstmalig möglich, Flüssigmetall-Zweiphasenströmungen zu untersuchen. Dabei stehen wissenschaftliche Fragestellungen der Zweiphasenströmung in Natrium sowie das Gasblasenverhalten bei Gas-Lift in bleigekühlten Reaktoren im Mittelpunkt.

In schnellen Reaktoren siedet Natrium bei niedrigen Drücken. Die entstehenden Zweiphasen-Strömungsmuster sind infolge des großen Dichteunterschieds der Dampf- und Flüssigphase sowie der um eine Größenordnung höheren Oberflächenspannung gegenüber Leichtwasserreaktoren sehr verschieden. Dadurch bilden sich Zweiphasenströmung mit sehr hohem Dampfvolumen aus, die ihre eigene Strömungsmorphologie entwickeln. Besonders innerhalb von Brennelementen ist daher mit stark inhomogenen Strömungen mit sehr hohem Void-Anteil zu rechnen. Während solche Szenarien bereits ansatzweise mit CFD-Berechnungsmethoden angegangen wurde, fehlt es derzeit an geeigneten Validierungsdaten.

Für bleigekühlten Reaktoren sind Siedeprozesse von geringerer Bedeutung. Disperse Zweiphasenströmungen sind aber auch hier von Interesse. Dies trifft einerseits auf Inertgaseintrag bei Leckstörfällen zu, andererseits gibt es Konzepte zur Intensivierung der Durchmischung im Reaktorgefäß mittels sogenannter Gas-Lift-Techniken. Dabei wird ein Inertgas in den Flüssigmetallpool eingedüst und treibt durch den Gasblasenaufstieg die Flüssigkeitszirkulation an. Auch hier fehlt es an elementaren Daten zur Strömungsform, die aufgrund hoher Oberflächenspannungen und sehr hoher Aufstiegsgeschwindigkeiten gegenüber einem Luft-Wasser-Systeme erheblich verschieden ist.

Zielstellungen: Es werden experimentelle Studien mit flüssigem Natrium durchgeführt. Dazu wird ein beheizbares Gefäß mit 31 L Natrium ($D = 200\text{mm}$, $H = 1000\text{mm}$) genutzt. Das Natrium wird durch Erhitzen auf $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ verflüssigt. Über den Boden des Gefäßes kann Argon-Gas eingepert werden. Untersucht wird die Strömung im freien Gefäß ohne Einbauten, mit generischen Einbauten (Blenden) sowie einer Brennelementnachbildung. Es wird ausschließlich Naturkonvektion (freier Blasenanstieg) untersucht. Durch weiteres Erwärmen können Viskosität und Oberflächenspannung gezielt beeinflusst werden. Es erfolgen komplementäre Messungen mit Ultraschall (UDV) zur Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils um Einzelblasen. Die Röntgentomographie dient der Erfassung der Strömungsform. Die Experimentaldaten werden für CFD-Validierungen aufbereitet und im öffentlich zugänglichen Datenrepositorium RODARE veröffentlicht. In einer zweiten Kampagne wird die Möglichkeit untersucht, den Blasenanstieg in flüssigem Schwermetall innerhalb einer beheizbaren vertikalen Testsektion zu visualisieren. Aufgrund der hohen Dichte von Blei ($11,34\text{ g/cm}^3$) ist der Durchmesser der Testsektion auf $3,5\text{ cm}$ begrenzt. Deshalb wird zunächst mit dem Ersatzfluid Gallinstan (GaInSn : $6,44\text{ g/cm}^3$) und einer Testsektion mit 10 cm Durchmesser gearbeitet. Für Blei selbst wird ein Proof-of-Concept durchgeführt. Untersucht werden Blasendeformation und Aufstiegsverhalten für Einzelblasen sowie Blasengruppen. Auch diese Daten werden öffentlich zugänglich gemacht.

TP3: Myonenbasierte Diagnostik für Transport- und Lagerbehälter mit abgebrannten Brennelementen	
Bearbeiter	Doktorand/in #3, Gruppenleiter, Ingenieur
Zeitraum	M6-M48
<p>Hintergrund: Die im Projekt DCS-Monitor (FKZ 1501518) durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen zeigten die Möglichkeit die Inventarstrukturen des aufrechtstehenden CASTOR V/19-Behälters radiographisch mittels Detektoren über und unter dem Behälter bis auf Brennelement-Genauigkeit aufzulösen. Zudem konnte eine geringe Sensitivität für Brennstoffverlagerungen entlang der Längsachse ermittelt werden. Im Folgeprojekt DCS-Monitor II (FKZ 1501606) werden die Untersuchungen für diese Behälter-Detektorkonfiguration fortgeführt. Für die Lösung des inversen Problems der Myonenbildgebung werden Rekonstruktionsalgorithmen implementiert und an Simulationsdaten getestet. Im Fokus steht dabei vor allem die vertikale Auflösung der Brennstoffverteilung. Daneben wird im geringeren Umfang auch die Möglichkeit der Tomographie eines waagrecht gelagerten Behälters untersucht. Weiterhin erfolgt die Entwicklung eines robusten und modularen Myonendetektors, der für den Einsatz im Zwischenlager geeignet ist. Der im Aufbau befindliche Prototyp wird bis zum Projektende anhand von Testmessungen charakterisiert.</p>	
<p>Zielstellungen: Die Entwicklung von Algorithmen zur Lösung des inversen Problems der Myonenbildgebung wird fortgeführt und vertieft. Es werden vor allem fortschrittliche algebraische CT-Algorithmen mit angepassten Regularisierungen untersucht. Hierbei werden Ansätze zur objektabhängigen, irregulären Diskretisierung und zur Behandlung des unbekannten Myonenimpulses entwickelt und an Simulationsdaten getestet. Die Untersuchungen werden auf andere Behältertypen (u.a. CASTOR V/52) ausgeweitet. Als Ergebnis dieser Entwicklungen werden die Auflösungsgrenzen für das Behälterinventar und für die Identifikation des Inventarzustandes in Abhängigkeit von der Messzeit bestimmt. Desweiteren erfolgt eine Qualifizierung des Myonendetektors für dessen Einsatz im Zwischenlager. Aufgrund der verlängerten Entwicklungsdauer des Detektorprototyps und dem komplexen Genehmigungsverfahren für eine Messung im Zwischenlager, ist eine Messung am realen Behälter im Rahmen des Projektes DCS-Monitor II nicht leistbar. Für die Qualifizierung des Detektors wird zunächst der Prototyp modular auf die benötigte Größe für die angestrebten Messungen erweitert. Es wird eine Routine zur kontinuierlichen Kalibrierung entwickelt, die automatisch thermisch oder mechanisch bedingte Kleinstverschiebungen zwischen Detektormodulen und Änderungen der Ionisationsgasatmosphäre korrigiert. Testmessungen mit dem erweiterten Detektor werden an einem großskaligen Phantom durchgeführt. Für die Planung und Genehmigung der mehrtägigen Messungen im Zwischenlager wird im engen Austausch mit der BGZ ein Dokument über die Ziele der Messungen, erwartete Ergebnisse und deren Verwertbarkeit, Beschreibung des Messsystems und der Messmatrix angefertigt. Die Messdaten aus dem Zwischenlager werden mit den entwickelten Algorithmen rekonstruiert und mit den Simulationsvorhersagen verglichen. Darüber hinaus werden unkonventionelle Ansätze der Myonenbildgebung mithilfe von analytischen Abschätzungen und Simulationen untersucht. Dazu zählt die Bildgebung an geneigten oder waagrecht gelagerten Behältern und die Fragestellung, ob es möglich ist, einen Teil der hauptsächlich nahezu senkrecht einfallenden kosmischen Myonen mithilfe starker Magnetfelder derart abzulenken, dass ein erhöhter Myonenfluss für eine horizontale Durchstrahlung erzeugt wird.</p>	

Geplante Arbeiten:

	PM GL	PM ING	PM PhD
AP3.1: Algorithmenentwicklung für die Myonenbildgebung			
1) Einarbeitung in die Myonenbildgebung	-	-	2
2) Monte-Carlo-Simulationen für verschiedene Behältertypen und Inventarzustände	2	-	4
3) Entwicklung von innovativen Bildrekonstruktionsalgorithmen	8	-	2
AP3.2: Experimentelle Studien			
1) Optimierung und modulare Erweiterung des Detektorprototyps	1	1	6
2) Entwicklung einer Routine zur automatischen Detektorkalibrierung	1	-	2
3) Testmessungen an einem großskaligen Phantom	3	4	6
4) Planung der Experimente im Zwischenlager	12	2	6
5) Messungen im Zwischenlager und Datenauswertung	2	6	6
AP3.3: Innovative Ansätze für die Myonenbildgebung an Behältern			
1) Monte-Carlo-Simulationen und Bildrekonstruktion für geneigte und waagrecht gelagerte Behälter	1	-	4
2) Analysen und konzeptionelles Design einer Myonenumlenkung und Energiemessung mit supraleitenden Magneten	1	-	4

Ablaufplan:

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
AP3.1: Algorithmenentwicklung für die Myonenbildgebung					
1)					
2)					
3)					
AP3.2: Experimentelle Studien					
1)					
2)					
3)					
4)					
5)					
AP3.3: Innovative Ansätze für die Myonenbildgebung an Behältern					
1)					
2)					

Meilensteine in den ersten 3 Jahren:

M3.1	Abschluss der Algorithmenentwicklung	22
M3.2	Abschluss der Testmessungen	28

Meilensteine bei Projektverlängerung:

M3.4	Abschluss der Messungen im Zwischenlager	40
------	--	----

6 Zusammenarbeit mit Dritten

Das Vorhaben ist an einer Einrichtung angesiedelt. Die Zusammenarbeit mit assoziierten Partnern läuft auf freiwilliger Basis und wird bei Bedarf durch bilaterale Kooperationsvereinbarungen geregelt werden. Zum Teil existieren diese bereits, etwa mit der Framatome GmbH, der BGZ sowie dem HZDR. Bei Bedarf könnten weitere Partner an das Vorhaben assoziiert werden, wenn dies für das Vorhaben von Vorteil sein sollte.

7 Notwendigkeit der Zuwendung

Die Antragsteller ist auf vollständige Förderung des Vorhabens angewiesen. Das im Vorhaben eingesetzte Personal muss zusätzlich zur Themenbearbeitung eingestellt werden. Eine Finanzierung von Personal, Investitionen bzw. Reisekosten aus Haushaltsmitteln ist nicht möglich. Die TU Dresden und das HZDR unterstützen die Forschungsarbeiten nach Maßgabe sowohl durch Bereitstellung bestehender Forschungsinfrastruktur (Versuchsanlagen, Werkstätten, Bibliothek, Rechentechnik, Betriebsmittel) als auch im Sinne der Doktorandenausbildung unter Einbeziehung der TU Graduiertenakademie und der Durchführung der Promotionsverfahren.

8 Literatur

- [1] J.A. Boure, A.E. Bergles, L.S. Tong, Review of two-phase flow instability. Nucl. Eng. Des. 25, 165-192, 1973.
- [2] K.M. Becker, J. Engström, O. Nylund, B. Schölin, B. Söderquist, Analysis of the dryout incident in the Oskarshamn 2 boiling water reactor. Int. J. Multiph. Flow 16, 959-974, 1990.
- [3] G.P. Celata, M. Cumo, Y. Katto, A. Mariani, Prediction of the critical heat flux in water subcooled flow boiling using a new mechanistic approach. Int. J. Heat Mass Transf. 42, 1457-1466, 1999.
- [4] S. Al Issa, R. Macian, A review of CCFL phenomenon. Ann. Nucl. Energy 38, 1795-1819, 2011.
- [5] B. Schoen, P. Weber, Nitrogen in a steam generator of a PWR under SBLOCA conditions: Experimental investigations in the PKL test facility and comparison with analytical studies. Exp. Therm. Fluid Sci. 15, 238-252, 1997.
- [6] C. Urban, M. Schlüter, Investigations on the stochastic nature of condensation induced water hammer. Int. J. Multiph. Flow 67, 1-9, 2014.
- [7] P. Apanasevich, D. Lucas, M. Beyer, L. Szalinski, CFD based approach for modeling direct contact condensation heat transfer in two-phase turbulent stratified flows. Int. J. Therm. Sci. 95, 123-135, 2015.
- [8] M. Lanfredini, D. Bestion, F. D'Auria, N. Aksan, P. Fillion, P. Gaillard, J. Heo, I. Karppinen, K.D. Kim, J. Kurki, L. Liu, A. Shen, J.-L. Vacher, D. Wang. Critical flow prediction by system codes – Recent analyses made within the FONESYS network, Nucl. Eng. Des. 366, 110731, 2020.
- [9] F. Fichot, F. Duval, N. Trégourès, C. Béchaud, M. Quintard, The impact of thermal non-equilibrium and large-scale 2D/3D effects on debris bed reflooding and coolability. Nucl. Eng. Des. 236, 2144-2163, 2006.
- [10] A. Dehbi, D. Suckow, S. Guentay, Aerosol retention in low-subcooling pools under realistic accident conditions. Nucl. Eng. Des. 203, 229-241, 2001.
- [11] A. Moonesi Shabestary, F. Viereckl, Y. Zhang, R. Manthey, D. Lucas, C. Schuster, S. Leyer, A. Hurtado, U. Hampel, Modelling of Passive Heat Removal Systems: A Review with Reference to the Framatome KERENA BWR Reactor: Part I. Energies, 13, 35, 2020.
- [12] R. Manthey, F. Viereckl, A. Moonesi Shabestary, Y. Zhang, W. Ding, D. Lucas, C. Schuster, S. Leyer, A. Hurtado, U. Hampel, Modelling of Passive Heat Removal Systems: A Review with Reference to the Framatome BWR Reactor KERENA: Part II. Energies 13, 109, 2020.
- [13] S. Buchholz, A. Schaffrath, G. Bonfigli, N. Kaczmarkiewicz, N. Neukam, F. Schäfer, T. Wagner, Evidence of design basis accidents mitigation solely with passive safety systems within the frame of the German Easy project. 17th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2017, 2017.
- [14] D. Lucas, R. Rzehak, E. Krepper, Th. Ziegenhein, Y. Liao, S. Kriebitzsch, P. Apanasevich, A strategy for the qualification of multi-fluid approaches for nuclear reactor safety. Nucl. Eng. Des. 299, 2-11, 2016.
- [15] E. Krepper, R. Rzehak, C. Lifante T. Frank, CFD for subcooled flow boiling: coupling wall boiling and population balance models. Nucl. Eng. Des. 255, 330-346, 2013.

- [16] W. Ding, E. Krepper, U. Hampel, Evaluation of the microlayer contribution to bubble growth in horizontal pool boiling with a mechanistic model that considers dynamics contact angle and base expansion. *Int. J. Multiph. Flow* 72, 274-287, 2018.
- [17] M. Li, J. Moortgat, I.A. Bolotnov, Nucleate boiling simulation using interface tracking method. *Nucl. Eng. Des.* 369, 110813, 2020.
- [18] H. Setodeh, A. Moonesi Schabestary, W. Ding, D. Lucas, U. Hampel, CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition. *Appl. Therm. Eng.* 204, 117962, 2020.
- [19] C. Zeliang, Y. Mi, A. Tokuhito, L. Lu, A. Rezvoi, Integral PWR-type small modular reactor developmental status, design characteristics and passive features: A review. *Energies* 13, 2898, 2020.
- [20] S.A. Hosseini, R. Akbari, A.S. Shirani, F. D'Suria, Analysis of the natural circulation flow map uncertainties in an integral small modular reactor. *Nucl. Eng. Des.* 378, 111156, 2021.
- [21] M. Ishii, et al., Investigation of natural circulation instability and transients in passively safe small modular reactors. Project report PU/NE-16-24, 2016.
- [22] M.K. Rowinski, T.J. White, J. Zhao, Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 44, 643-656, 2015.
- [23] IAEA, Natural circulation in water-cooled nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1474, 2015.
- [24] M.S. Kim, Y.H. Jeong, Conceptual design of small modular reactor driven by natural circulation and study of design characteristics using CFD&RELAP5 code. *Nucl. Eng. Technol.* 52, 2743-2759, 2020.
- [25] IAEA, Liquid Metal Cooled Reactors: experience in design and operation. IAEA-TECDOC-1569, 2007.
- [26] H. Niwa, S. Kubo, K. Kurisaka, LMFBF design and its evolution: (3) safety system design of LMFBF. GENES4/ANP2003, 15-19 Sep., Kyoto, Japan, 2003.
- [27] L. Cinotti, G. Gherardi, The Pb-Bi cooled XADS status of development. *J. Nucl. Mater.* 301, 11-15, 2002.
- [28] J. Zuo, W. Tian, R. Chen, S. Qiu, G. Su, Two-dimensional numerical simulation of single bubble rising behavior in liquid metal using moving particle semi-implicit method. *Prog. Nucl. Energy*, 31-40, 2013.
- [29] Onea, A., Hering, W., Lux, M., Stieglitz, R., Numerical optimization of cold trap designs for Karlsruhe Sodium Laboratory. *Int. J. Heat Mass Transf.* 113, 984-999, 2017.
- [30] C.F. Matozinhos, G.C.Q. Tomaz, T. Nguyen, Y. Hassan, Experimental investigation of turbulent flow characteristics in cross-flow planes of a 5x5 rod bundle with a spacer grid. *Int. J. Heat Fluid Flow* 87, 108757, 2021.
- [31] S.M. Hosseini, K. Yuki, H. Hashizume, Experimental Investigation of Flow Field Structure in Mixing Tee. *ASME. J. Fluids Eng.* 131(5): 051103, 2009.
- [32] C. Dang, M. Darnajou, C. Bellis, G. Ricciardi, S. Mylvaganam, S. Bourennane, Improving EIT-Based Visualizations of Two-Phase Flows Using an Eigenvalue Correlation Method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70, 1-9, 2021.
- [33] A. Manera, D. Lucas, H.-M. Prasser, Experimental investigation on bubble turbulent diffusion in a vertical large-diameter pipe by wire-mesh sensors and correlation techniques. *Nucl. Technol.* 158, 275-290, 2007.
- [34] P.K. Selvam, R. Kulenovic, E. Laurien, J. Kickhofel, H.-M. Prasser, Thermal mixing of flows in horizontal T-junctions with low branch velocities. *Nucl. Eng. Des.* 322, 32-54, 2017.
- [35] H.-M. Prasser, U. Hampel, P. Schütz, TOPFLOW Pressure Chamber – versatile techniques to simplify design and instrumentation of thermal fluid dynamic experiments at high pressure. *Nucl. Eng. Des.* 372, 110971, 2021.
- [36] H.-M. Prasser, S. Kliem, Coolant mixing experiments in the upper plenum of the ROCOM test facility. *Nucl. Eng. Des.* 276, 30-42, 2014.
- [37] K. Yoshida, K. Fujiwara, Y. Nakamura, A. Kaneko, Y. Abe, Aerosol decontamination behavior in two phase flow during pool scrubbing. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 3, 2020.
- [38] A. Dudlik and H.-M. Prasser and A. Apostolidis and A. Bergant, Water hammer induced by fast-acting valves: Experimental studies at pilot plant pipework. *Multiph. Sci. Technol.* 20, 239-263, 2008.
- [39] R. Zboray, C. Bolesch, H.-M. Prasser, Development of neutron and X-ray imaging techniques for nuclear fuel bundle optimization. *Nucl. Eng. Des.* 336, 24-33, 2018.
- [40] H.V. Kok et al., Subchannel Void-Fraction Measurements in a 6x6 rod bundle using a simple gamma-transmission. *Int. J. Multiph. Flow* 27, 147-170, 2001.
- [41] A. Inoue, M. Futakuchi, M. Yagi, T. Mitsutake, S.I. Morooka, Void fraction distribution in a boiling water reactor fuel assembly and the evaluation of subchannel analysis code. *Nucl. Technol.* 112, 388-400, 1995.
- [42] U. Hampel, F. Barthel, A. Bieberle, M. Bieberle, S. Boden, R. Franz, M. Neumann-Kipping, S. Tas-Köhler, Tomographic imaging of two-phase flow. *Int. J. Adv. Nucl. React. Des. Technol.* 2, 86-92, 2020.
- [43] T. Vogt, S. Boden, A. Andruskiewicz, K. Eckert, S. Eckert, G. Gerbeth, Detection of gas entrainment into liquid metals. *Nucl. Eng. Des.* 294, 16-23, 2015.
- [44] P. Gherson, P.S. Lykoudis, Local measurements in two-phase liquid-metal magneto-fluid-mechanic flow. *J. Fluid Mech.* 147, 81-104, 1984.

- [45] Y. Saito, K. Mishima, Y. Tobita, T. Suzuki, M. Matsubayashi, Velocity field measurement in gas-liquid metal two-phase flow with use of PIV and neutron radiography techniques. *Appl. Radiat. Isot.* 61, 683-691, 2004.
- [46] A.D. Pérez-Valseca, S. Quezada-García, A.M. Gómez-Torres, A. Vázquez-Rodríguez, G. Espinosa-Paredes, Reactor behavior comparisons for two liquid metal-cooled fast reactors during an event of loss of coolant. *Case Stud. Therm. Eng.* 16, 100556, 2009.
- [47] R. Hampel, F. Dräger, Anwendung neuronaler Netze zur Füllstandsmessung an Kernreaktoren. *Proceedings Workshop Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmungen*, FZ Rossendorf, 1997.
- [48] J. Konheiser, R. Rachamin, C. Brachem, U. Hampel, Feasibility Study for Detection of Reactor State Changes during Severe Accidents via External Gamma Radiation Measurements. *Ann. Nucl. Energy* 114, 175-180, 2018.
- [49] H. Miyadera, K.N. Borozdin, S.J. Greene, Z. Lukić, K. Masuda, E.C. Milner, C.L. Morris, J.O. Perry, Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons. *AIP Adv.* 3, 052133, 2013.
- [50] L. W. Alvarez et al.: Search for Hidden Chambers in the Pyramids: The structure of the Second Pyramid of Giza is determined by cosmic-ray absorption. *Science* 167, 832-839, 1970.
- [51] L. J. Schultz et al., Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 519, 687-694, 2004.
- [52] L. J. Schultz et al., Statistical Reconstruction for Cosmic Ray Muon Tomography. *IEEE Trans. Image Process.* 16.8, 1985-1993, 2007.
- [53] W. Zeng et al., Principle study of image reconstruction algorithms in muon tomography. *J. Instrum.* 15.2, T02005, 2020.
- [54] D. Poulson et al., Cosmic ray muon computed tomography of spent nuclear fuel in dry storage casks. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 842, 48-53, 2017.
- [55] S. Vanini et al., Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms. *Philos. Trans. R. Soc. A* 377.2137, 20180051, 2019.
- [56] Z. Liu et al., Muon tracing and image reconstruction algorithms for cosmic ray muon computed tomography. *IEEE Trans. Image Process.* 28.1, 426-435, 2018.
- [57] T. Braunroth et al.: Muon radiography to visualise individual fuel rods in sealed casks, *arXiv preprint arXiv:2102.08131*, 2021.
- [58] J. M. Durham et al., Verification of spent nuclear fuel in sealed dry storage casks via measurements of cosmic-ray muon scattering. *Phys. Rev. Appl.* 9.4, 044013, 2018.
- [59] T. Stürzel, M. Bieberle, E. Laurien, U. Hampel, F. Barthel, H.-J. Menz, H.-G. Mayer, Experimental facility for two- and three-dimensional ultrafast electron beam x-ray computed tomography. *Rev. Sci. Instrum.* 82, 023702, 2010.
- [60] A. Bieberle, D. Windisch, K. Iskander, M. Bieberle, U. Hampel, A smart multi-plane detector design for ultrafast electron beam X-ray computed tomography, *Sensors* 20, 5174, 2020.
- [61] T. Frust, M. Wagner, J. Stephan, G. Juckeland, A. Bieberle, Rapid Data Processing for Ultrafast X-Ray Computed Tomography Using Scalable and Modular CUDA based Pipelines, *Comput. Phys. Commun.* 219, 353-360, 2017.
- [62] F. Barthel, D. Windisch, U. Hampel, High Energy Fast X-ray Tomography, 9th World Congress on Industrial Process Tomography, 02.-06.09.2018, Bath, UK, 2018.
- [63] H.-M. Prasser, Evolution of interfacial area concentration in a vertical air-water flow measured by wire-mesh sensors. *Nucl. Eng. Des.* 237, 1608-1617, 2007.
- [64] H.-M. Prasser, M. Beyer, S. Al Issa, H. Carl, H. Pietruske, P. Schütz, Gas-liquid flow around an obstacle in a vertical pipe. *Nucl. Eng. Des.* 238(7), 1802-1819, 2008.
- [65] T. Frank, P. Zwart, E. Krepper, H.-M. Prasser, D. Lucas, Validation of CFD models for mono- and polydisperse air-water two-phase flows in pipes. *Nucl. Eng. Des.* 238, 647-659, 2008.
- [66] M. Banowski, U. Hampel, E. Krepper, M. Beyer, D. Lucas, Experimental Investigation of Two-Phase Pipe Flow with Ultrafast X-ray Tomography and comparison with state-of-the-art CFD simulation. *Nucl. Eng. Des.* 336, 90-104, 2018.
- [67] M. Neumann-Kipping, A. Bieberle, U. Hampel, Investigations on bubbly two-phase flow in a constricted vertical pipe. *Int. J. Multiph. Flow* 130, 103340, 2020.
- [68] S. Tas-Köhler, Y. Liao, U. Hampel, A critical analysis of drag force modelling for disperse gas-liquid flow in a pipe with an obstacle. *Chem. Sci.* 246, 117007, 2021.
- [69] S. Tas-Köhler, M. Neumann-Kipping, Y. Liao, E. Krepper, U. Hampel, CFD simulation of bubbly flow around an obstacle in a vertical pipe with a focus on breakup and coalescence modelling. *Int. J. Multiph. Flow* 135, 103528, 2021.
- [70] F. Barthel, R. Franz, U. Hampel, Experimental investigations of single and two-phase flow in a heated rod bundle, *Kerntechnik* 78.1, 110316, 2013.

- [71] C. Lifante, B. Krull, T. Frank, R. Franz, U. Hampel, 3 × 3 rod bundle investigations, CFD single-phase numerical simulations. Nucl. Eng. Des. 279, 60-72, 2014.
- [72] W. Ding, E. Krepper, U. Hampel, Quantitative prediction of critical heat flux initiation in pool and flow boiling. Int. J. Therm. Sci. 125, 121-131, 2018.
- [73] W. Ding, J. Zhang, D. Sarker, U. Hampel, The role of microlayer for bubble sliding in nucleate boiling: A new view point for heat transfer enhancement via surface engineering. Int. J. Heat Mass Transf. 149, 2020.
- [74] H. Setoodeh, W. Ding, D. Lucas, U. Hampel, Modelling and Simulation of Flow Boiling with an Eulerian-Eulerian Approach and Integrated Models for Bubble Dynamics and Temperature-dependent Heat Partitioning. Int. J. Therm. Sci. 161, 106709, 2021
- [75] S. Tas-Köhler, G. Lecrivain, E. Krepper, S. Unger, U. Hampel, Numerical investigation on the effect of transversal fluid field deformation on heat transfer in a rod bundle with mixing vanes. Nucl. Eng. Des. 361, 2020.
- [76] A. Bieberle, D. Hoppe, E. Schleicher, U. Hampel, Void measurement using high-resolution gamma-ray computed tomography. Nucl. Eng. Des. 241.6, 2086-2092, 2011.
- [77] A. Moonesi Shabestary, F. Viereckl, Y. Zhang, R. Manthey, D. Lucas, C. Schuster, S. Leyer, A. Hurtado, U. Hampel, Modelling of passive heat removal systems: A review with reference to the Framatome BWR reactor KERENA :Part I. Energies 13.1, 35, 2020.
- [78] A. Bieberle, A. Moonesi Shabestary, T. Geißler, S. Boden, M. Beyer, U. Hampel, Flow morphology and heat transfer analysis during high-pressure steam condensation in an inclined tube part I: Experimental investigations. Nucl. Eng. Des. 361, 110553, 2020.
- [79] A. Moonesi Shabestary, S. Boden, A. Bieberle, H. Pietruske, U. Hampel, Investigation on flow morphology and heat transfer for high-pressure steam condensation in an inclined tube at low inlet steam qualities. Nucl. Eng. Des., 2021, submitted.
- [80] U. Hampel, M. Wagner, A method for correct averaging in transmission radiometry, Meas. Sci. Technol. 22.11, 115701, 2011.
- [81] M. Wagner, A. Bieberle, M. Bieberle, U. Hampel, Dynamic bias error correction in gamma-ray computed tomography. Flow Meas. Instrument. 53, 141-146, 2017
- [82] M. Wagner, U. Hampel, M. Bieberle, Correct averaging in transmission radiography: analysis of the inverse problem. Comput. Phys. Commun. 202, 196–203, 2016.
- [83] M. Wagner, F. Barthel, J. Zalucky, M. Bieberle, U. Hampel, Scatter analysis and correction for ultrafast X-ray tomography. Philos. Trans. Royal Soc. A 373.2043, 20140396, 2015
- [84] M. Neumann, M. Bieberle, M. Wagner, A. Bieberle, U. Hampel, Improved axial plane distance and velocity determination for ultrafast electron beam X-ray computed tomography. Meas. Sci. Technol. 30(8), p. 084001, 2019.
- [85] M. Wagner, S. Reinicke, A. Kratzsch, U. Hampel, An analysis for detecting potential relocation of the inventory of dry storage containers during prolonged interim storage via changes in the wall temperature fields. Nucl. Eng. Des. 366, 110749, 2020.