

Priorisierung von Ent- wicklungs- und Validie- rungsarbeiten an Open- FOAM für den Reaktorkühlkreislauf

Technischer Bericht,

Revision 1

Angel Papukchiev
Joachim Herb
Andreas Wielenberg
Andreas Schaffrath

August 2021
Auftrags-Nr.: 733676

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Kennzeichen RS1562 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMWi übereinstimmen.



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht wurde am 04.05.2021 auf dem OpenFOAM-Koordinationstreffens „Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an Open FOAM für den Reaktorkühlkreislauf“ vorgestellt und von den Teilnehmern als Grundlage für ein abgestimmtes Positionspapier angenommen. Die Teilnehmer dieser Sitzung waren:

- Prof. T. Sattelmayer (TUM)
- Prof. R. Macian (TUM)
- Dr. D. Lucas (HZDR)
- Dr. F. Schlegel (HZDR)
- R. Lehnigk (HZDR)
- Prof. X. Cheng (KIT)
- Prof. E. Laurien (IKE)
- I. Cremer (Framatome)
- Dr. C. Brattfisch (RUB)
- P. Fuchs (RUB)
- Prof. M. Klein (UniBw M)
- Dr. A. Wielenberg (GRS)
- Dr. A. Papukchiev (GRS)
- Dr. B. Schramm (GRS)
- Dr. A. Schaffrath (GRS)
- J. Herb (GRS)

Nach einer Kommentierungsphase (bis 01.06.2021) und Einarbeitung der eingegangenen Kommentare wird der Bericht mit Zustimmung des CFD-Verbunds durch die GRS veröffentlicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für den Reaktorkühlkreislauf.....	1
2	Nachweiskriterien für Störfallanalysen.....	3
3	Auswertung der Ereignislisten.....	8
4	Zusammenfassung für die Ereignisliste.....	15
	Abkürzungsverzeichnis	29
	Literaturverzeichnis	31

1 Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für den Reaktorkühlkreislauf

Mit den nationalen Partnern wurde im Projektkomitee TU des BMWi abgestimmt, dass zukünftig alle BMWi-finanzierten Modellentwicklungen in OpenFOAM für den Reaktorkühlkreislauf (RKL) unter Nutzung einer gemeinsamen Plattform erfolgen und die Arbeiten der verschiedenen Partner in einer gemeinsamen Version zusammengeführt werden sollen. Diese Version soll zentral von HZDR gepflegt und den Partnern verfügbar gemacht werden. So soll sichergestellt werden, dass alle Entwicklungen der Partner langfristig und nachhaltig verfügbar sind, bei neuen Releases in das jeweils aktuelle OpenFOAM übernommen und getestet werden und somit von einem weiten nationalen Anwenderspektrum genutzt werden können. Der hierbei entstehende Code soll die Anforderungen an Codes für den Einsatz in kerntechnischen Verfahren erfüllen. Neben rein technischen Aspekten ist auch eine inhaltliche Abstimmung der OpenFOAM-Aktivitäten erforderlich. Hierzu ist vorgesehen mit den nationalen Partnern im CFD-Verbund thematische Entwicklungen abzustimmen, Themen und Phänomene zu priorisieren und effizient zu bearbeiten. Dazu soll der vorliegende Technische Bericht dienen.

In dem vorliegenden Dokument werden notwendige Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für den RKL zusammengestellt und priorisiert. Hierbei werden sukzessive die Sicherheitsebenen 1 bis 3 (Sicherheitsebene (SE) 1: Betrieb, SE 2: anomaler Betrieb, SE 3: Störfälle) betrachtet. Entsprechende Prioritäten für das Containment sind separat im technischen Bericht TB-CFD-2021-01 Rev. 0 abgeleitet /SCH 21a/.

Grundsätzlich sind Computational Fluid Dynamics (CFD)-Analysen für den RKL auch für Unfallabläufe (SE 4) denkbar. Viele der für Unfallabläufe relevanten Phänomene finden im Containment statt. Diese werden in dem separat erstellten Konzept für die inhaltliche Ausrichtung der OpenFOAM-Aktivitäten für das Containment behandelt /SCH 21a/. Darüber hinaus werden dedizierte Phänomene von Unfallabläufen im Kühlkreislauf (z.B. Fuel-Coolant Interaction, Kühlbarkeit von Schüttbetten) mittels Spezialcodes simuliert.

Eine Zusammenstellung von mittels OpenFOAM zu simulierenden Phänomenen erfordert eine Systematik. Für die Reaktoren der Generation II bieten sich hierzu die Ereignislisten in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnF) /SIA 15/ an. Anhand der einzelnen Ereignisabläufe wurden Phänomene identifiziert, für die eine Simulation mittels hochauflösenden CFD-Methoden sinnvoll bzw. gegenüber einer Simulation mit 1D-Methoden vorteilhaft ist.

Die SiAnf beschreiben nationale Anforderungen an Leichtwasserreaktoren der Generation II. Diese werden in Deutschland spätestens im Jahr 2022 abgeschaltet. Baugleiche oder ähnliche Reaktoren werden aber in unserer unmittelbaren Nachbarschaft weiterbetrieben. Für viele dieser Anlagen wird eine Laufzeitverlängerung diskutiert. Insofern sind die darauf abgeleiteten Prioritäten insbesondere für die Sicherheitsbewertung bestehender Reaktoren in unserer Nachbarschaft von Interesse.

Derzeit befinden sich fortschrittliche Reaktoren (Generation III/III+) im Betrieb, innovative Reaktorkonzepte (Generation IV) sowie (sehr) kleine modulare Reaktoren ((v)SMR) teilweise bereits im Betrieb, im Bau bzw. in der Entwicklung. Die Sicherheitssysteme dieser Reaktoren basieren u. a. auf passiven Sicherheitsmerkmalen. Daher ergänzt dieser Bericht Überlegungen zu fortschrittlichen Reaktoren (Generation III/III+), zu innovativen Reaktorkonzepten (Generation IV) und (sehr) kleinen modularen Reaktoren ((v)SMR).

Auf dieser Basis erfolgt anschließend eine Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten für OpenFOAM. Das vorliegende Dokument wurde Mitte 2021 mit den Partnern des deutschen CFD-Verbundes diskutiert, entsprechende Anmerkungen und Empfehlungen wurden übernommen. Wir bedanken uns für die konstruktive Mitarbeit beim Forschungszentrum Jülich, Framatome GmbH, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Karlsruher Institut für Technologie, Ruhr-Universität Bochum/PSS, Technische Universität München, Universität der Bundeswehr München, Universität Stuttgart/IKE. Dieses Dokument soll in Zukunft kontinuierlich fortgeschrieben werden.

2 Nachweiskriterien für Störfallanalysen

In den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnF) /SIA 15/ sind in Kapitel 3.3 *Anforderungen an die Einrichtungen zur Kühlung der Brennelemente im Reaktorkern* zusammengestellt. Hier-aus ergeben sich die Rahmen dieses Dokumentes zu betrachtenden Anlagenzustände (nachfolgend *kursiv* dargestellt). Anforderungen und Nachweisziele sind hingegen in der nachfolgenden Auflistung im Schrifttyp **fett** dargestellt.

Auszug aus den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke:

3.3 Anforderungen an die Einrichtungen zur Kühlung der Brennelemente im Reaktorkern

3.3 (1) Die **Kühlung der Brennelemente** (Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern) ist auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a sowie bei *Einwirkungen von innen und außen* sowie bei *Notstandsfällen in allen Betriebsphasen* **sicherzustellen**.

Dazu muss die im Brennelement erzeugte Wärme derart abgeführt werden, dass die auf den Sicherheitsebenen geltenden **sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien für die Brennelemente** und die **übrigen sicherheitstechnisch wichtigen Einrichtungen** während ihrer gesamten Einsatzzeit **eingehalten** werden.

3.3 (2) Es müssen Einrichtungen vorhanden sein, mittels derer im bestimmungsgemäßen Betrieb

- a) der Reaktor zuverlässig und anforderungsgerecht *ab- und angefahren* und
- b) die **Nachwärme zuverlässig und anforderungsgerecht abgeführt** werden kann.

3.3 (3) Es muss ein zuverlässiges und redundant aufgebautes System für die Notkühlung (Notkühlsystem) des Reaktorkerns bei Kühlmittelverluststörfällen vorhanden sein, welches gewährleistet, dass für die in Betracht kommenden *Bruchgrößen, Bruchlagen, Betriebszustände* und *störfallbedingten Transienten* im Reaktorkühlsystem

- a) die sicherheitstechnischen Aufgaben auch unter Beachtung der Kriterien von Nummer 3.1 (7) erfüllt werden,

b) die jeweils geltenden sicherheitstechnischen Nachweisziele und **Nachweiskriterien für die Brennelemente, die Kerneinbauten und für den Sicherheitsbehälter** eingehalten werden.

3.3 (4) Es muss ein zuverlässiges, redundant aufgebautes System zum *Abfahren des Reaktors* und zur *Nachwärmeabfuhr bei Störfällen ohne Kühlmittelverlust* und nach *Einwirkungen von innen und außen* vorhanden sein, welches gewährleistet, dass auch nach Unterbrechung oder Störung der Wärmeabfuhr vom Reaktor zur Hauptwärmesenke die sicherheitstechnischen Nachweisziele und Nachweiskriterien auch unter Beachtung der Anforderungen der Nummer 3.1 (7) erfüllt werden.

3.3 (5) Die Nachwärmeabfuhr aus der Anlage muss in *allen Betriebszuständen* auch bei *Ausfall der primären Wärmesenke* aufgrund von *Ausfallursachen im Bereich der Kühlwasserentnahmen und Kühlwasserrückführungen* durch eine **diversitäre Wärmesenke sichergestellt** werden (gegebenenfalls auch durch verschiedene Wärmesenken in Kombination). Die hierfür benötigten Einrichtungen müssen mindestens den **Anforderungen an Notfallmaßnahmen** genügen; deren Wirksamkeit ist nachzuweisen.

Die **Verfügbarkeit** dieser **diversitären Wärmesenke** muss auch bei den *Einwirkungen von außen* gewährleistet sein.

Aufgrund seiner Bedeutung für die Störfallbeherrschung erfolgt nachfolgend ein kurzer Einschub zu dem Thema „Zuverlässige und anforderungsgerechte Abfuhr der Nachwärme“ (Si-AnF, Absatz 3.3 (2), s.o.). Im NUREG-Bericht *Containment Emergency Sump Performance /NRC 85/* sowie im NRC Regulatory Guide *Water Sources for Long-Term recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident /NRC 12/* wird ausführlich auf dieses Thema eingegangen.

Die grundsätzliche Anforderung an sämtliche Systeme, die einen Beitrag zur Not- und Nachkühlung leisten, lautet sinngemäß: Für den Zeitbereich der Anforderung müssen Systeme, die einen Beitrag zur Not- und Nachkühlung leisten, die hierfür erforderliche Menge Wasser mit einer ausreichenden Qualität (z.B. ausreichend hohem Eintrittsdruck, Partikel- und Luftfreiheit) zur Verfügung stellen und so betrieben werden, dass die Funktion des Systems

- weder durch Einschränkungen des hydraulischen Verhaltens (z.B. infolge von Kavitation oder Luftmitriss) noch durch
- mechanische Probleme (u.a. Erosion infolge Partikel, Kavitation, unzulässigen Belastungen der Welle oder Lägern infolge ungleichmäßiger Belastungen bzw. die Belegung von Laufrad und Wellen mit Partikeln) der Pumpe

unzulässig beeinflusst wird. Die Zuverlässigkeit aktiver Systeme wird im Allgemeinen durch die Verfügbarkeit der aktiven Komponenten und dabei insbesondere der in diesen Systemen vorhandenen Pumpen über die Missionszeit dominiert. Nach derzeitigem Stand gibt es mindestens 8 Strömungsphänomene, die zu einer Einschränkung des hydraulischen Verhaltens einer Pumpe führen können. Dies sind

- untergetauschte, wandanhaftende Wirbel,
- luftziehende (Hohl-) Wirbel,
- Luftmitriss,
- Kavitation,
- Luftmitriss in Verbindung mit Kavitation,
- Drallwinkel,
- Strömungsbedingungen im Sumpf und
- der Pumpenbetrieb bei kleinen Volumenströmen.

Für die zuvor genannten Phänomene gibt es zumindest Faustformeln bzw. Auslegungsempfehlungen, wie sich Beeinflussungen vermeiden lassen. CFD Simulationen erlauben hier detaillierte und genauere Betrachtungen. Allerdings sind die Anforderungen an derartige Analysen extrem hoch und erfordern die Entwicklung neuer Verfahren (z.B. die Überprüfung des Auftretens luftziehender Wirbel sowie die Bestimmung der Wirbellänge). Eine ergänzende Betrachtung bezüglich der Phänomene an der Wasseroberfläche in Pools im Containment befindet sich in /SCH 21a/.

Nachfolgend sind in Abbildung 1 die in Anhang 2 der SiAnF gezeigten Tabellen zu sicherheitstechnischen Nachweiszielen und Nachweiskriterien der Sicherheitsebenen 2 bis 4a aufgeführt, die für das CFD-Fachgebiet *Reaktorkühlkreislauf* relevant sind. Die Nachweisführung muss sich vom Eintritt eines Ereignisses bis zum Erreichen eines kontrollierten Anlagenzustandes erstrecken. Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass die Kontrolle der Reaktivität (R), die Kühlung

der Brennelemente (K) und Erhalt der Barrierenintegrität (B) die wesentlichen Schutzziele sind. Der Nachweis der Einhaltung dieser Schutzziele für die in den generischen Ereignislisten für DWR und SWR, kann perspektivisch auch mit CFD-Codes erfolgen.

Die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke mit Anhängen enthalten weitere, z.T. spezifische Vorgaben für Nachweisführung, Randbedingungen und Annahmen (siehe z.B. Anlagen 2 bis 5 von /SIA 15/. Weitere Vorgaben zur Nachweisführung sind im sonstigen untergesetzlichen Regelwerk inklusive der KTA-Regeln und sonstiger technischer Standards enthalten sowie in den Empfehlungen der RSK zu einschlägigen Fragestellungen formuliert.

Tab. 3.1b: Sicherheitstechnische Nachweisziele und Nachweiskriterien der Sicherheitsebenen 2 bis 4a für die Reaktoranlage und das Schutzziel „Kühlung der Brennelemente“

Sicherheitsebene:	2					3					4a
Betriebsphase:	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A
Schutzziel:	Kühlung der Brennelemente (K)										
Nachweisziele:	Uneingeschränkte Weiterverwendbarkeit der Brennelemente ⁴					Abschalt- und Kühlbarkeit des Reaktorkerns					
Nachweiskriterien:	<ul style="list-style-type: none"> - $T_{\text{Brennstoff}} < T_{\text{Schmelz}}^5$ - Kein kritischer Siedezustand am Hüllrohr oder - Einhaltung eines geeigneten Temperatur-Zeit-Kriteriums für das Hüllrohr 				Kein Sieden am Hüllrohr	Transiente: - Brennstabintegrität ⁶ Reaktivitätsstörfall: - Brennstoff verbleibt innerhalb des Hüllrohrs ⁷ Leckstörfall: - Hüllrohrtemperatur < 1200°C ⁸ - Hüllrohroxidationstiefe < 17 % ⁸ - Begrenzung der Hüllrohrdehnung ⁹		Brennstabintegrität (Aufrechterhaltung der Brennelementbedeckung) ¹⁰		Transiente mit unterstelltem RESA Ausfall: (Betriebsphase A) dauerhafte Abschaltbarkeit und Kühlbarkeit	

Tab. 3.1c: Sicherheitstechnische Nachweisziele und Nachweiskriterien der Sicherheitsebenen 2 bis 4a für die Reaktoranlage und das Schutzziel „Einschluss der radioaktiven Stoffe“

Sicherheitsebene:	2					3					4a
Betriebsphase:	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A
Schutzziel:	Einschluss der radioaktiven Stoffe (B)										
Nachweisziel:	Erhalt der Barrierenintegrität										
	Siehe unter „Kühlung der Brennelemente“										
Brennstabhüllrohr:	PCI ¹¹		-			Leckstörfall $\leq 0,1F$: Brennstabschadensumfang $\leq 1\%$ Leckstörfall $> 0,1F$: Brennstabschadensumfang $\leq 10\%$		-		-	
Druckführende Umschließung:	Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1
Äußere Systeme ¹²	Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1
Nachweiskriterien	Druckanstieg im SHB < Ansprechkriterien Reaktorschutz		-			$P_{\text{SHB}} \leq P_{\text{SHB-A}}^{13}$		-		$P_{\text{SHB}} \leq P_{\text{SHB-A}}$	
	SWR: Einhaltung spezifizierter Temperaturen in der Kondensationskammer		-			SWR: Einhaltung spezifizierter Temperaturen in der Kondensationskammer Begrenzung der - Zirkon-Wasser- Reaktion auf < 1 % des gesamten im Reaktorkern enthaltenen Zirkoniums - max. lokalen H ₂ -Konzentration im SHB auf Werte unterhalb der Zündgrenze		-		SWR: Einhaltung spezifizierter Temperaturen in der Kondensationskammer	
	Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1

Tab. 3.1a: Sicherheitstechnische Nachweisziele und Nachweiskriterien der Sicherheitsebenen 2 bis 4a für die Reaktoranlage und das Schutzziel „Kontrolle der Reaktivität“

Sicherheitsebene:	2					3					4a
Betriebsphase:	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A
Schutzziel:	Kontrolle der Reaktivität (R)										
Nachweisziele:	Leistungsanpassung oder Reaktorabschaltung ²					Reaktorabschaltung ²					
Nachweiskriterien:	Siehe unter „Kühlung der Brennelemente“ sowie „Einschluss der radioaktiven Stoffe“										
Nachweisziel:	Sicherstellung der Unterkritikalität										
Nachweiskriterium ³ „Betrag der Abschaltreaktivität“:	≥ 1 %					≥ 1 %					≥ 1 %

Abbildung 1: Auszug aus dem „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ mit Nachweiszielen und Nachweiskriterien, die für CFD-Analysen im Reaktor-kühlkreislauf relevant sind.

Die Sicherheitsanforderungen von Kernkraftwerken beschreiben Anforderungen an Leichtwasserreaktoren der Generation II. Derzeit befinden sich fortschrittliche Reaktoren der (Generation III/III+), innovative Reaktorkonzepte (Generation IV) sowie (sehr) kleinen modularen Reaktoren ((v)SMR) im Betrieb, im Bau bzw. in der Entwicklung, deren Sicherheitssystem u.a. auf passiven Sicherheitsmerkmalen beruht. Die oben vorgestellten Nachweisziele sind zwar grundsätzlich auch auf diese Reaktoren anwendbar, jedoch können sich zum Teil deutliche Abweichungen in der Nachweisführung und den dafür genutzten Methoden ergeben. Dieser Aspekt muss in einem weiteren Schritt für die zuvor genannten phänomenorientiert aufgearbeitet werden. Dies beinhaltet das Identifizieren neuer Phänomene und Aspekte, sowie, ihre Priorisierung zum Schließen der ggf. vorhandenen (methodischen) Lücken.

3 Auswertung der Ereignislisten

Für die Planung zukünftiger Arbeiten sind im Folgenden Aspekte zur inhaltlichen Ausrichtung zusammengefasst. In einem ersten Schritt werden anhand der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke SiAnf /SIA 15/ für den Kühlkreislauf von DWR und SWR der Generation II relevante Schutzziele und sicherheitstechnische Nachweisziele zusammengestellt. Anschließend werden anhand der generischen Liste zu berücksichtigender Ereignisse aus Anhang 5 der SiAnf relevante Szenarien identifiziert und in Tabelle 1 vorgestellt. Zu jedem Ereignis bzw. Ereignisgruppe werden die relevanten Strömungsphänomene identifiziert, deren Berechnung mittels CFD-Methoden verbessert werden kann bzw. deren Anwendung gegenüber System Codes Vorteile bietet. Anschließend werden dann für die einzelnen Ereignisse die relevanten Phänomene zusammengestellt und eine Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes abgegeben.

Tabelle 1 Auswertung der Ereignislisten in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke für CFD

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
DWR Sicherheitsebene 2					
Veränderung der sekundärseitigen Wärmeabfuhr					
Fehlfunktion im Frischdampf-System oder in der Speisewasserversorgung, die zu einer ungeplanten Temperatur- / Druckabsenkung im Dampferzeuger führt.	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- betrieb	Reglerstörungen, Ausfall Hochdruck-Vorwärmer, Fehlanregung einer Frischdampf-Umleitstation, Fehlöffnen Stützbedampfung.	Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Untersuchung der Kühlmittelvermischung und der Reaktivitätskontrolle mit CFD-3D NK
Fehlfunktion im Frischdampf-System oder in der Speisewasserversorgung, die zu einer ungeplanten Temperatur- / Druckerhöhung im Dampferzeuger führt.	Kühlung BE	Leistungs- und Nicht- leistungs- betrieb	Störungen an der Turbinenregelung, teilweises Fehlfahren von Frischdampf-Absperrarmaturen	Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Untersuchung der Kühlmittelvermischung und der Reaktivitätskontrolle mit CFD-3D NK
Durchsatzänderung im Primärkreislauf					
Ausfall einer Hauptkühlmittelpumpe	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- betrieb		Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	CFD-Simulation der Strömung im Primärkreislauf (große CFD-Domäne)
Änderung der Reaktivität und der Leistungsverteilung					
Fehlerhaftes Ausfahren des wirksamsten Steuerelements oder der wirksamsten Steuerelementgruppe ohne Ausfall der Begrenzungseinrichtungen	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nicht- leistungs- betrieb		Lokale Strömungsphänomene, die die NK beeinflussen	Untersuchung der Reaktivitätskontrolle unter Berücksichtigung lokaler Effekte im Reaktorkern mit CFD-3D NK
Fehlerhafte Einspeisung aus einem System, das Deionat oder minderboriertes Kühlmittel führt (Externe Deborierung; homogen und heterogen)	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- und Nicht- leistungs- betrieb		Lokale Strömungsphänomene, die die NK beeinflussen	Untersuchung der Kühlmittelvermischung im RKL und der Reaktivitätskontrolle mit CFD-3D NK

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
Kaltwassereinspeisung in das Reaktorkühlsystem aus einem anschließenden System (z. B. Umgehung des Rekuperativ-Wärmetauschers des Volumenregelsystems)	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Untersuchung der Kühlmittelvermischung und der Reaktivitätskontrolle mit CFD-3D NK. Fragen, wie z.B. Materialermüdung, können mit CFD-CSM analysiert.
DWR Sicherheitsebene 3					
Veränderung der sekundärseitigen Wärmeabfuhr					
Größere Fehlfunktion im Frischdampf-System oder in der Speisewasserversorgung, die zu einer ungeplanten Temperatur- oder Druckabsenkung im Dampferzeuger führt.	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Asymmetrische Strömungsbedingungen, die ggf. CFD-3D NK erfordern. CFD-Simulation anspruchsvoll bzw. benötigt Randbedingungen aus System Codes
Sekundärseitige Wärmeabfuhr – Leckstörfälle					
Frischdampfleitungsbruch	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Asymmetrische Strömungsbedingungen, die ggf. CFD-3D NK erfordern. CFD-Simulation anspruchsvoll bzw. benötigt Randbedingungen aus System Codes
Änderung der Reaktivität und der Leistungsverteilung					
Fehlerhaftes Ausfahren des wirksamsten Steuerelements oder der wirksamsten Steuerelementgruppe mit Ausfall der Begrenzungseinrichtungen	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Lokale Effekte, CFD-3D NK ggf. Subchannel Code erforderlich,
Auswurf des wirksamsten Steuerelements	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Lokale Effekte, CFD-3D NK ggf. Subchannel Code erforderlich,

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
Fehlerhafte Einspeisung aus einem System, das Deionat oder minderboriertes Kühlmittel führt, mit Ausfall der Begrenzungen oder vorgelagerter Maßnahmen (Externe Deborierung; homogen und heterogen).	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- und Nichtleistungs-betrieb	Es ist nachzuweisen, dass Änderungen der Reaktivität infolge von Deionateintrag in den Reaktor-kühlkreislauf begrenzt bleiben,	Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Dichtegetriebene Strömungen mit 3D Phänomenen erfordern gekoppelte CFD-System Code-Anwendung. 3D NK zur Berechnung des Kernverhaltens ggf. auch notwendig.
Bildung unterborierter Bereiche im Primärkreislauf (Interne Deborierung)	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungs-betrieb	Reflux-Condenser-Betrieb nach einem kleinen Leckstörfall	Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Dichtegetriebene Strömungen mit 3D Phänomenen erfordern gekoppelte CFD-System Code-Anwendung. 3D NK zur Berechnung des Kernverhaltens ggf. auch notwendig.
Unterkühlungstransienten durch Frischdampf-/ Speisewasserleck/ -bruch	Kontrolle der Reaktivität	Leistungs- und Nichtleistungs-betrieb	Rekritikalität ist nur bei Lecks in der FDL mit hoher und schneller Abkühlung zulässig, sofern die Kriterien für die Kühlung der BE eingehalten werden.	Asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	Asymmetrische Strömungen mit Vermischungseffekten erfordern häufig gekoppelte CFD-System Code-Anwendung. 3D NK zur Berechnung des Kernverhaltens ggf. auch notwendig.
Kühlmittelverlust innerhalb des Sicherheitsbehälters					
Kleines Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungs-betrieb	Reflux-Condenser-Betrieb, PTS, interne Deborierung	Asymmetrische Strömung, Vermischungs- und Schichtungsphänomene, kritisches Ausströmen, Verdampfungs- und Kondensationsphänomene, Strukturverhalten	CFD hier vor allem (ggf. in Verbindung mit CSM) für PTS-Untersuchungen und Untersuchung von Schichtungen bei Einspeisung vom kalten Wasser. PTS etablierte CFD Anwendung. Strahlkräfte insbesondere für Strukturelle Integrität Sonstige Simulationen können aufwändig werden, da zweiphasig. Für die adäquate Simulation von auftretenden CCFL-Phänomenen kann der Einsatz von CFD-Codes erforderlich sein.

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
Mittleres Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb o	PTS	Asymmetrische Strömung, Vermischungs- und Schichtungsphänomene, kritisches Ausströmen, Verdampfungs- und Kondensationsphänomene, Strukturverhalten	CFD hier vor allem (ggf. in Verbindung mit CSM) für PTS-Untersuchungen und Untersuchung von Schichtungen bei Einspeisung vom kalten Wasser. PTS etablierte CFD Anwendung. Strahlkräfte insbesondere für strukturelle Integrität Sonstige Simulationen können aufwändig werden, da zweiphasig.
SWR Sicherheitsebene 2					
Durchsatzänderung im Reaktorkühlsystem					
Ausfall einzelner/mehrerer/aller Zwangsumwälzpumpen	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungsbetrieb	Auswirkung auf neutronenphysikalisch-thermohydraulische Stabilität des Kerns ist zu berücksichtigen	Asymmetrische Strömung, Vermischungs- und Schichtungsphänomene im Reaktorkern	Genauere Vorhersage der Strömungen am BE-Eintritt erfordert ggf. CFD. Insbesondere aber 3D NK und ggf. Subchannel erforderlich. Anspruchsvolles Szenario für CFD.
Änderung der Reaktivität und der Leistungsverteilung					
Ausfahren des wirksamsten Steuerelements oder der wirksamsten Steuerelementgruppe	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Theoretisch für CFD interessant (aber wegen Zwei-Phasigkeit herausfordernd). Eigentlich aber für 3D NK und Subchannel.
Maximale Reduzierung der Reaktoreintrittstemperatur verursacht durch einen Fehler in einer aktiven Komponente der Speisewasserversorgung oder durch fehlerhaftes Einspeisen von betrieblichen Systemen oder Sicherheitssystemen (Unterkühlungstransiente)	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb		Asymmetrische Strömung im Reaktorkern mit Unterkühlungstransiente	Unterkühlungstransienten sind für die Reaktivität sehr wichtig. Daher ist eine korrekte Bestimmung der Kühlmitteltemperatur am Kerneinlass von großer Bedeutung. Hierfür kann CFD-3D NK eingesetzt werden. Zur Bewertung von Thermospannungen im Bereich der RDB-Stützen (Thermosleeve) ggf. sinnvoll in Kombination mit Strukturmechanik (CSM)

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
SWR Sicherheitsebene 3					
Änderung der Reaktivität und der Leistungsverteilung					
Unbeabsichtigte Reaktivitätszufuhr durch Ausfall der Hochdruck-Vorwärmer und Nichtverfügbarkeit von Begrenzungen	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs-betrieb		Asymmetrische Strömung im Reaktorkern	Unterkühlungstransienten sind für die Reaktivität sehr wichtig. Daher ist eine korrekte Bestimmung der Kühlmitteltemperatur am Kerneinlass von großer Bedeutung. Eigentlich für CFD-3D NK
Ausfahren des wirksamsten Steuerelements oder der wirksamsten Steuerelementgruppe mit Ausfall der Begrenzungseinrichtungen	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs- und Nichtleistungs-betrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Simulation von lokalen Reaktivitätstransienten sollten mit CFD-3D NK Codes durchgeführt werden.
Auswurf des wirksamsten Steuerelements	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs-betrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Simulation von lokalen Reaktivitätstransienten sollten mit CFD-3D NK Codes durchgeführt werden.
Herausfallen des wirksamsten Steuerelements	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs-betrieb		Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Simulation von lokalen Reaktivitätstransienten sollten mit CFD-3D NK Codes durchgeführt werden.
Nuklear-thermohydraulische Instabilität	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE	Leistungs-betrieb	Die Wirksamkeit von Reaktorschutzmaßnahmen zur rechtzeitigen Erkennung von Neutronenflussschwingungen und Reaktorabschaltung ist nachzuweisen	Lokale 3D Strömungsphänomene mit Dichteänderung, die die NK beeinflussen	Für CFD ggf. interessant aber herausfordern, da zweiphasige Simulation mit 3D NK-Kopplung vom ganzen Kern erforderlich.

Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase	Erläuterung	Phänomene	Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes
Kühlmittelverlust innerhalb des Sicherheitsbehälters, nicht absperrbar					
Leck/Bruch innerhalb des Sicherheitsbehälters (Leckquerschnitt $\leq 0,1F$ der jeweils betrachteten Leitung)	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE, Einschluß der Radioaktivität	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb	PTS	Asymmetrische Strömung, Vermischungs- und Schichtungsphänomene, Strukturverhalten	CFD für die Analysen von Thermospannungen bei Kalteinspeisung aus Not- und Nachkühlssystem in den Anschlussstutzen der Systeme am RDB (und weiter im Downcomer), insbesondere wg. PTS. Hierfür etabliert, auch in Kombination mit CSM siehe DWR.
Leck/Bruch innerhalb des Sicherheitsbehälters (Leckquerschnitt $> 0,1F$ der jeweils betrachteten Leitung)	Kontrolle der Reaktivität, Kühlung BE, Einschluß der Radioaktivität	Leistungs- und Nichtleistungsbetrieb	PTS	Asymmetrische Strömung, Vermischungs- und Schichtungsphänomene, Strukturverhalten	CFD für die Analysen von Thermospannungen bei Kalteinspeisung aus Not- und Nachkühlssystem in den Anschlussstutzen der Systeme am RDB (und weiter im Downcomer), insbesondere wg. PTS. Hierfür etabliert, auch in Kombination mit CSM siehe DWR.

4 Zusammenfassung für die Ereignisliste

Die Betrachtung der Ereignisliste für bestehende Anlagen führt zu den folgenden Schlüssen:

- Pressurized Thermal Shock (PTS)-Analysen und Untersuchungen zu Thermospannungen bei Kalteinspeisung (u.ä.) zur Bewertung der strukturellen Integrität für Auslegungsfälle, ggf. gekoppelt mit Computational Structure Mechanics (CSM), sind schon seit einiger Zeit Anwendungsfelder von CFD und bleiben daher ein wichtiges Einsatzgebiet von CFD-Codes. Wesentliche Phänomene sind zunächst geschichtete Strömungen, aufprallende Wasserstrahle, sowie (turbulente) Vermischungs- und Auftriebsphänomene z.B. im Ringraum. In zweiphasigen Szenarien ist Gegenstand in der Regel die Ausbreitung von Kaltwasser-Strömungen z.B. im teilweise mit Dampf gefüllten kalten Strang und im Ringraum. Dabei sollten zusätzlich komplexe Strömungsphänomene mit Massen- und Wärmeübergang, wie z. B. Kondensation, berücksichtigt werden.
- Darüber hinaus sind auch interne und externe Deborierungstransienten mit Kühlmittelvermischungsphänomenen in Rückkopplung mit Neutronenkinetik relevant für CFD-Anwendungen zu Störfallrechnungen. Die für die CFD relevante Fragestellung hier ist die Vermischung von unterboriertem oder gar borfreiem Wasser mit dem restlichen Kühlmittelinventar im Primärkreis eines DWRs. Für die Reaktorsicherheit ist bei den Deborierungstransienten die minimale Borsäurekonzentration am Kerneintritt und das Kernverhalten wichtig. Die Kopplung mit 3D Neutronenkinetik kann hinsichtlich einer realistischeren Berechnung der Leistungserzeugung und -verteilung im Kern Vorteile bringen.
- Strömungsinduzierte Schwingungen können im Dampferzeuger, im Reaktorkern oder an Einbauten im Druckbehälter, z. B. bei einem Rohrleitungsbruch auftreten. Laut dem amerikanischen Electric Power Research Institute sind etwa 70% aller Brennstabschäden in den US DWR-Anlagen dem Grid-to-Rod-Fretting-Phänomen und letztendlich den strömungsinduzierten Schwingungen (SIS) zurückzuführen. Diese sind auch für fortschrittliche Reaktorkonzepte (wie z. B. kleine modulare Reaktoren mit kompakten hocheffizienten Wärmetauschern) relevant. Sie können die Barrieren für den Einschluss radioaktiver Inventare gefährden. Aus diesem Grund ist das Verständnis der Schwingungsphänomene sowohl für die derzeit betriebenen Reaktoren als auch für neue Reaktorkonzepte wichtig. Die SIS werden mit gekoppelten CFD-CSM – Tools simuliert. Der gekoppelte multiphysikalische Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) - Ansatz

ermöglicht eine realitätsnahe Analyse durch die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Fluiden und Strukturen bei Transienten und Störfällen in der Reaktoranlage.

- Weitere Anwendungen bei asymmetrischen Strömungszuständen und lokalen Effekten (z.B. Stabauswurf), auch in Kopplung zur Neutronenkinetik im Kernbereich, wären ggf. sinnvoll, stellen aber sehr hohe Ansprüche an die Modellerstellung. Hier wäre zunächst darzustellen, warum mit einer Kombination einer detaillierten Neutronik mit einem Unterkanal-Code keine ausreichend genauen Ergebnisse erzielt werden können.
- Strahlkräfte bei Leckstörfällen können ein weiterer Anwendungsfall sein. Ziel ist dabei zunächst, Einwirkungen auf Rohrleitungen und Komponenten im Strahlbereich zu bewerten und mögliche Folgefehler zu identifizieren. Ein weiteres potenzielles Anwendungsgebiet liegt in einer genaueren Berechnung der Beschleunigungskräfte mittels CFD für eine gebrochene bzw. schlagende Leitung, um deren Auftreffen auf weitere Leitungen oder die Effektivität von Ausschlagsicherungen bewerten zu können. Derzeit werden solche Analysen mit Hilfe spezieller ingenieurtechnischer Modelle durchgeführt, die auf Abschätzungen und empirischen Formeln beruhen.
- CFD Tools eignen sich zur Quantifizierung der Konservativitäten von Auslegungsempfehlungen und Faustformeln zur Vermeidung von Einschränkungen des hydraulischen Verhaltens von Komponenten und Systemen bzw. ihrer Ablösen. In vielen der aufgelisteten Transienten und Störfälle in der Ereignisliste kommen zum Einsatz die Not- und Nachkühlsysteme. Zum Beispiel für deren Analyse erlauben die CFD Programme die Simulation von Strömungsphänomenen wie untergetauschte, wandhaftende Wirbel, luftziehende (Hohl-) Wirbel, Luftmitriss, Kavitation, Luftmitriss in Verbindung mit Kavitation, Drallwinkel, Strömungsbedingungen in komplexen Geometrien (wie z.B. dem Reaktorsumpf), des Pumpenbetriebes bei kleinen Volumenströmen sowie des Partikeltransports (z.B. dem Transport von Isoliermaterial-Fasern) und deren Ablagerung.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche Fragestellungen für fortschrittliche bzw. innovative Reaktoren sowie (v)SMR /SCH 18/, /SCH 21b/. Dies betrifft insbesondere:

- Die Bewertung der Effektivität und des detaillierten Verhaltens von Sicherheitssystemen, insbesondere passiven Sicherheitssystemen. Aufgrund der häufig geringen treibenden Kräfte durch Dichte-Differenzen können hochaufgelöste Simulationen notwendig werden. Relevante Phänomene sind neben der Berechnung des einphasigen Naturumlaufs mit den entsprechenden Druckverlusten und Wärmeübergängen insbesondere auch unterkühltes Sieden und Strömungssieden und deren Effekte auf das

Systemverhalten (z.B. Intensität des Naturumlaufs). Bei zweiphasigem Naturumlauf können bekannte Strömungsinstabilitäten auftreten (z.B. Ledinegg-Instabilität), die mit CFD untersucht werden können.

- Insbesondere passive Systeme mit geringen treibenden Kräften können durch die Präsenz nicht-kondensierbarer Gase in ihrem Betriebsverhalten stark beeinträchtigt werden. CFD-Methoden können dafür verwendet werden, diese Effekte genauer und lokal hoch aufgelöst zu untersuchen. Relevante Phänomene sind wiederum Vermischung und Diffusion bei turbulenten und laminaren ein- und zweiphasigen Strömungen sowie der Einfluss von nicht-kondensierbaren Gasen auf den lokalen Wärmeübergang.
- Nach den Ereignissen in Fukushima in 2011 suchten die SMR-Hersteller Möglichkeiten, die Langzeitkühlung ihrer Anlagen passiv an eine ultimative Wärmesenke sicherzustellen /CAR 20/. Dies sind z.B. bei SMRs auf dem Land große Wasserpools bzw. die Umgebungsluft oder im Fall von offshore SMRs das Seewasser /SCH 16/, /BUC 15/. Die Vorhersage des Wasserpoolverhaltens ist Aufgrund der inhomogenen Aufheizung in Kombination mit komplexen Strömungs- und Wärmeübergangsphänomenen mit 3D Temperatur-, Geschwindigkeits- und ggf. Konzentrationsfelder nicht trivial. Bei den Wasserpools muss auch die Verdunstung (Dampfmenge und Zeitpunkt der Dampffreisetzung) berücksichtigt werden, die zu einem Füllstandabfall im Zentimeterbereich pro Tag führen kann. Weiterhin sollen die transienten Konvektionsströmungen untersucht werden, um ihren Einfluss auf die Vermischung des Wassers im Behälter und eine mögliche Rückkopplung auf die Wärmeübertragung zu bestimmen. Die Länge des Behälters hat dabei einen Einfluss auf die Ausbildung der Konvektionsschleifen. Eine belastbare Simulation des Wasserpoolverhaltens unter Berücksichtigung realistischer thermohydraulischer Zustände und Wärmeübergangsphänomene erfordert entsprechende Erweiterungen und Validierungen der System Codes. Dies kann entweder mit Hilfe von aufwendigen Versuchen oder mit detaillierten CFD-Analysen erfolgen.
- Die Modellierung bestimmter Phänomene, wie z.B. Dryout bzw. CHF in Kühlkanälen oder Reflooding eines aufgeheizten Kühlkanals, mit System Codes oder Subchannel-Codes unterliegt immer noch erheblichen phänomenologischen und modelltechnischen Unsicherheiten. CFD-Anwendungen können dazu eingesetzt werden, bei diesen komplexen Strömungssituationen (mit zweiphasigem Wärmeübergang) verbesserte Modelle aufzustellen und zu validieren. Diese Modelle können dann ggf. in System oder Subchannel-Codes für Störfallrechnungen eingesetzt werden.

Ausgeklammert bleibt zunächst die Anwendung auf Phänomene der Kernzerstörung im Reaktor und der Bewertung von mitigativen Notfallmaßnahmen. Es ist jedoch bekannt, dass sowohl zur Analyse von Schmelzepools im Reaktor als auch zur Bewertung von z.B. In-Vessel Melt-Retention erfolgreich CFD-Analysen eingesetzt wurden. Eine Diskussion für Unfallphänomene im Containment findet sich in /SCH 21a/.

Die anlageninternen Notfallmaßnahmen haben die Aufgabe, Unterkritikalität, Kernkühlung und Aktivitätsrückhaltung selbst dann zu gewährleisten, wenn zur Störfallbeherrschung auslegungsgemäß vorgesehenen Systemfunktionen der Sicherheitssysteme nicht verfügbar sind /GRS 90/. Der Bereich der anlageninternen Notfallmaßnahmen umfasst Maßnahmen, die beim Ausfall von Sicherheitssystemen eingesetzt werden können. Dabei wird unterschieden zwischen Maßnahmen zur Verhinderung eines Unfallzustands (präventive Notfallmaßnahmen) sowie Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen (mitigative Notfallmaßnahmen). Für große Leichtwasserreaktoren kann ein Unfallzustand mit dem Auftreten von Kernschmelze gleichgesetzt werden, für andere Reaktorkonzepte, inklusive (leichtwassergekühlter) SMR, muss ein Unfallzustand ggf. anders als durch das Auftreten von geschmolzenem Kernmaterial definiert werden, z.B. durch die Mobilisierung relevanter Mengen von Radionukliden /WIE 16/. Um die Kühlbarkeit eines DWR-Kerns bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen zu gewährleisten, kann u.U. fehlendes Kühlmittel einfach durch Wasser (eingespeist z.B. mit mobilen Pumpen) ersetzt werden. Im Gegensatz zu SWR, findet in einem solchem Fall im Primärkreis ggf. eine Deborierung statt, die dem DWR-Kern eine positive Reaktivität zuführt – wenn nicht boriierte Wasservorräte hilfsweise zur Einspeisung genutzt werden. Die Menge, die Temperatur und die Vermischung des eingespeisten Wassers spielen dabei eine wichtige Rolle. Die auftretende 3D Strömungsphänomene können mit Hilfe von CFD-Rechenprogrammen, ggf. gekoppelt mit NK-Codes aussagekräftige Ergebnisse liefern und dabei helfen, die Wirksamkeit der präventiven Notfallmaßnahmen zu beurteilen /PAP 07/.

Die hohe räumliche Auflösung und die wesentlich kleinere Abhängigkeit der CFD-Codes von Korrelationen und empirischen Modellen im Vergleich zu System-Rechenprogrammen erlauben detaillierte thermohydraulische Analysen von Komponenten und Systemen mit fast beliebigen Geometrieaneordnungen. Heute werden mit CFD-Tools von einzelnen Brennstäben über Volumenausgleichsleitungen bis hin zu kompletten DWR-Primärkreisen samt Dampferzeugern analysiert. EDF bildet ihre Reaktor-/Schichtleiter mit Hilfe von CFD-Programmen aus, während Rosatom kommerzielle Tools wie z.B. STAR CCM+ und ANSYS standardmäßig bei der Auslegung sowie bei der Inbetriebnahme der neuen russischen VVER-Anlagen einsetzt.

Diese Programme verfügen über fortschrittliche Rechenmodelle und -ansätze und unterliegen einer strengen Qualitätssicherung. Um den Entwicklungsstand von OpenFOAM auf vergleichbarem Niveau zu halten und dessen Aussagesicherheit für die Fragestellungen der Reaktorsicherheit zu erhöhen, muss das Open Source CFD-Programm weiterentwickelt und systematisch validiert werden.

Die Anwendung von CFD für Störfallanalysen erfordert häufig die Simulation transienter Vorgänge über einen hinreichend langen Zeitraum, so dass Rückwirkungen des Anlagenverhalten auf die Randbedingungen der CFD-Analyse nicht länger als vernachlässigbar angenommen werden können. Dies bedeutet erstens, dass weitere physikalische Phänomene, wie z.B. die Reaktorkinetik oder das Strukturverhalten bei Wärmeleitung, mit berechnet werden müssen. Häufig existieren hierfür Spezialcodes (z.B. zur 3D-Neutronik) oder eigene OpenFOAM-Solver. In diesen Fällen ist eine Multi-Physik-Kopplung zwischen diesen Codes bzw. Solvern erforderlich. Daraus ergeben sich weitere Anforderungen an die OpenFOAM-Entwicklungsprioritäten.

Es meist unmöglich bzw. nicht ökonomisch, das gesamte Reaktorsystem hochaufgelöst mit CFD zu simulieren. Für die CFD-Anwendung muss daher ein begrenztes Rechengebiet definiert werden, in dem der transiente Ablauf mit vertretbarem Rechenaufwand simuliert werden kann. Um dennoch eine realistische Simulation des Anlagenverhaltens und damit der sich ändernden Randbedingungen des CFD-Gebiets zu erhalten, werden die Bereiche außerhalb des CFD-Gebiets mit Systemthermohydraulik-Codes wie AC²/ATHLET simuliert. Dies erfordert jedoch eine Fluid-Fluid-Kopplung an den Grenzen des Rechengebiets, die für alle relevanten Strömungszustände belastbar einsetzbar ist. Hieraus ergeben sich zusätzliche Kopplungsanforderungen an OpenFOAM-Solver, die für die GRS-Rechenkette und ihren Einsatz in Störfallanalysen von besonderer Bedeutung sind.

Tabelle 2 zeigt eine Priorisierung einphasiger und zweiphasiger Themen und Phänomene, für die aus Perspektive der GRS OpenFOAM im Rahmen der nuklearen Sicherheitsforschung qualifiziert werden soll. Tabelle 3 stellt die notwendigen CFD-Modelle/Methoden zu den relevanten Phänomenen sowie ihre Priorisierung dar.

Die Simulation einiger davon erfordert die Kopplung von OpenFOAM mit weiteren Rechenprogrammen, wie z.B. System-, Neutronenkinetik oder CSM Codes. Tabelle 4 zeigt ihre Einsatzbereiche, sowie eine Priorisierung der Kopplungsarten.

Die identifizierten und priorisierten Arbeiten sollen im Rahmen eines nationalen Verbundes erfolgen. Aus diesem Grund stellt der vorliegende Bericht nur eine Diskussionsgrundlage da, die noch mit den nationalen Partnern abzustimmen ist. Neben den Arbeiten zur CFD-Modellentwicklung und –validierung selbst, ist auch die Bereitstellung der dafür benötigten Datenbasis eine wichtige Aufgabe. Das umfasst sowohl geeignete experimentelle Daten als auch Daten aus Direkten Numerischen Simulationen.

Tabelle 2: Themen und Phänomene, für die im Rahmen der nuklearen Sicherheitsforschung OpenFOAM qualifiziert werden soll, und ihre Priorisierung.

Thema und relevante Phänomene	Priorität	Bemerkung
Ein- und Zweiphasenströmung im RDB		
<u>Dichte-getriebene Strömungen – Vermischung (Borvermischung, Zuschalten ausgekühlter Stränge)</u>	H	Entwicklungs- und Validierungsbedarf, hohe Relevanz der Phänomene (Naturumlauf)
<i>Turbulenzmodelle</i>		Implementierung von neuen Modellen (wünschenswert ist das Reynoldsspannungsmodell (RSM), dabei implementierung der Transportgleichungen mit Diskretisierung 2. Ordnung, anspruchsvolle Aufgabe), + Implementierung von „automatischen“ Wandfunktionen), Validierung
<i>Einfluss variabler Stoffwerte (Dichte) auf die Turbulenz</i>		Aktualisierung und Validierung, buoyancy production und dissipation Terme
<u>Ein- und Zweiphasenströmung im Reaktorkern</u>	H	
<i>Komplexe 3D-Strömungen (Abstandshalter, Queraustausch, Einengungen durch Aufquellen von Pellets, Blockierungen, Ablagerungen)</i>		Validierungsbedarf, leider ist bei Wirbelviskositätsmodellen kein Modell (K-eps, K-om, SST, usw.) klar besser als die anderen aber alle nicht zuverlässig genug, daher langfristig: RSM
<i>Blasenströmungen bei hoher Turbulenz und Scherung</i>		Entwicklungs- und Validierungsbedarf
<i>Wandsieden – kritischer Wärmestrom; CHF & CHT</i>		Entwicklungs- und Validierungsbedarf
<i>Dryout – Wandfilm + Tröpfchen Post-Dryout (PDO) Wärmeübertragung und Wiederbenetzung</i>		Entwicklungs- und Validierungsbedarf. PDO Wärmeübergang tritt bei einigen Transienten wie LOCA, auf. Die Beschreibung des Hüllrohr-Temperaturverlaufs während des PDO-Vorgangs ist wichtig für die Beurteilung des Schädigungsgrads des Hüllrohres.

Thema und relevante Phänomene	Priorität	Bemerkung
<i>Kondensation</i> <i>Wärmeübergang unter Kondensation mit nicht-kondensierbaren (NC) Gasen</i>		Hohe Relevanz bei Zweiphasenströmungen, Entwicklung und Validierung. CFD könnte einen großen Parameterbereich abdecken, das Verständnis des Wärmeübergangsprozesses mit Phasenübergang verbessert und numerische Datenbasis für die Weiterentwicklung von Modellen liefert
<i>FSI: BE-Biegung</i>		Eher niedrige Priorität, PreCICE für die Kopplung mit CSM
<i>FSI: Strömungsinduzierte Schwingungen</i>		Gehört zu FSI, Grid-to-Rod-Fretting wichtig für die RS, PreCICE für die Kopplung mit CSM
<u>Ein- und Zweiphasenströmung im unteren und oberen Plenum</u>	H	Strömungsverteilung am Kerneinlass wichtig für die NK
<i>Kühlmittelvermischung</i>		Strömungsverteilung am Kerneinlass wichtig für die NK
<u>Reflooding</u>	M	
<i>Phasenübergang</i>		
<i>Dampffilm an der Wand</i>		
<u>Isoliermaterialmaterialtransport und -ablagerung (im Not- und Nachkühlsystem sowie dem Kern)</u>	N	
<i>Transport von Partikeln (Fasern)</i>		Ablagerung der Fasern im Sumpf, Laplace-Framework in OpenFOAM
Ein- und Zweiphasenströmung im Primärkreis		
<u>Thermoshock-Phänomene bei Notkühlwassereinspeisung</u>	H	Relevanz: Die kalte Einspeisung kann zu Materialspannungen und -beschädigungen führen ist ähnlich wie: Vermischung im T-Stück, dazu umfangreiche Validierungen mit wandaufgelöster, wärmeleitungs-gekoppelter LES bei Uni-Stuttgart mit OF vorhanden (darauf aufbauen!), erfordert Hochleistungsrechner, ist auf niedrige Reynoldszahlen (ca. 50.000) begrenzt

Thema und relevante Phänomene	Priorität	Bemerkung
<i>Schichtung und Vermischung</i>		
<i>Direkte Kontakt-Kondensation</i>		Simulationsversuche zu Druckstößen und DKK mit Open-FOAM vorhanden
<i>Temperaturschichtung</i>		
<u>Gegenstrombegrenzung im heißen Strang</u>	M	Kernkühlung-Beeinträchtigung (durch CCFL) im Störfall
<i>Stratifizierte Strömungen/Strömungen mit Morphologieübergang</i>		CFX-Modell Wintterle vorhanden, Validierung mit COLLIDER-Experiment (TU-München) siehe Studienarbeit Eydner (Uni-Sutt), kann als Ausgangspunkt für Weiterentwicklung verwendet werden (Modellentwicklung nicht komplett neu anfangen!)
<u>Strömungen durch Risse (z.B. Dampferzeugerrohre) und Lecks</u>	M	
<i>Kritische Ausströmung (ein- und zwei-phasig)</i>		Komplexes Thema, wichtig auch für System Codes zweiphasig: sehr schwierig, geringe Erfolgsaussichten mit CFD (zweiphasig, kompressibel, instationär, Keimbildung, dünne Grenzschichten evtl. mit Ablöseblase im Einlaufbereich, hängt von unbekannter Detailgeometrie und von Wandrauigkeit ab, wie validieren ohne detaillierte Messungen innerhalb des Spalts?)
<u>Flashing im Primärkreislauf</u>	M	Entwicklungsbedarf
<u>Dampfeinspeisung in die Kondensationskammer</u>	N	Entwicklungsbedarf
<i>Strömungen mit Morphologieübergang</i>		
<i>Direkte Kontaktkondensation</i>		
<u>Druckhalter</u>	N	Komplexe Prozesse, für uns aber eher uninteressant
<i>Verdampfung/Kondensation</i>		
<i>Blasen/Tropfenströmungen</i>		
<i>Druck/Füllstandänderung</i>		Genaue Vorhersage des DH-Füllstands wichtig, da dieser als Eingangssignal für bestimmte Systeme ist

Thema und relevante Phänomene	Priorität	Bemerkung
<i>Direkte Kontaktkondensation</i>		
Passive Sicherheitssysteme		Zukunftsorientiert (Gen III+, Gen IV, SMR)
<u>Große und innovative Wärmetauscher inkl. Dampferzeuger, Notkondensator primärseitig</u>	H	
<i>Kondensation an der Wand und direkte Kontaktkondensation</i>		
<i>Strömungen mit Morphologieübergang</i>		
<i>Direkte Kontaktkondensation</i>		
<i>Sieden in komplexen Geometrien (z.B. helikale Dampferzeuger)</i>	M-H	
<i>Einfluss der NC-Gase auf den Stofftransport</i>		
<u>Wasserpools als Wärmesenke (z.B. Notkondensator sekundärseitig)</u>	H	
<i>Thermische Stratifizierung im Pool</i>		Turbulenz bei stabiler Schichtung stark nichtisotrop, ähnliches Problem im Containment: Auflösung obenliegender Dichteschichtung, Empfehlung: Turbulent Scalar-Flux (TSF)-Modell
<i>Einphasige und zweiphasige Naturkonvektion</i>		Berechnung der treibenden Kräfte; diese sind oft klein, die Turbulenz spielt eine Rolle, sowohl großräumige Strukturen als auch dünne Grenzschichten vorhanden: eher Forschungsthema, Methode einphasig: Detached-Eddy Simulation (DES), Hochleistungsrechner erforderlich
<i>Direkte Kontaktkondensation</i>		Abbildung von WT-Bündeln, Zweiphasenströmung, erfolgversprechendes Forschungsthema, detaillierte Datenbasis zur Validierung erforderlich

Thema und relevante Phänomene	Priorität	Bemerkung
Brennelement-Lagerbecken	M	Große Geometrien, poröses Medium, nichtisotrop!, coarse mesh CFD, Vorsicht: bei groben Gittern ist die Lösung immer gitterabhängig (für CFD nicht zu empfehlen)
<i>Strömungen mit Morphologieübergang</i>		
<i>Ein- und Zweiphasenströmungen in Brennelementen / Lagergestellen</i>		

Tabelle 3: Phänomene, für die im Rahmen der nuklearen Sicherheitsforschung Open-FOAM qualifiziert werden soll, und ihre Priorisierung

Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene im Reaktorkühlkreislauf	Modelle/Ansätze	Entwicklung/Validierung	Priorität	Bemerkung
<u>Dichte-getriebene Strömungen</u> Einphasige und zweiphasige Naturkonvektion	Turbulenzmodell, Auftriebsmodell	E/V	H	Turbulenzmodellierung, skalenauflösende CFD-Simulationen Reflux-Condensator-Betrieb, Deborierung, PTS, alle Transienten mit Naturumlauf, siehe auch Tabelle 1 Wichtig auch zur Absicherung von System Codes,
Kühlmittelvermischung und -schichtung	Turbulenzmodell, Auftriebsmodell	E/V	H	Deborierung, FD-Leitungsbruch, PTS, Transienten mit Asymmetrie, HKMP-Ausfall, s. Tabelle 1 Für System Codes im Detail nicht zugänglich

Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene im Reaktor-kühlkreislauf	Modelle/Ansätze	Entwicklung/Validierung	Priorität	Bemerkung
Impinging Jets	Turbulenzmodell, Kopplung CFD-CSM	E/V	M	Erfordert fortschrittliche und skalenauflösende Turbulenzmodelle, Baffle Jetting, SGTR, Transienten mit einer Einspeisung Abdeckende Bewertung meist ausreichend, Stand der Technik für Turbulenzmodell: v2-f, Neuentwicklung muss zeigen dass sie besser ist, dazu v2-f-Implementierung notwendig
<u>Zweiphasenströmung</u>				
Kondensation	Modelle zur Beschreibung der Zwischenphasenkräfte, neue Zweiphasenlöser, Simulationsverfahren (VOF, usw.), Zweiphasenturbulenzmodell, Kavitationsmodell, Zwischenphasen-Wärmeübergangmodell, CHF-Modelle und -Kriterien, Mehrphasenströmung mit NC-Gasen	E/V	H	Reflux-Condenser-Betrieb, Deborierung, Mitte-Loop-Betrieb, Lecks, Reflooding, RIA, ATWS, Strömungsinstabilität im SWR, s. Tabelle 1 Strömungsinstabilität beim Sieden in Behältern (Geysir-Effekt) im Ansatz modelliert und validiert (Uni-Stuttgart), Keimbildungsmodell erforderlich, nur qualitativ (Mechanismen), weit von praktischer Anwendung entfernt
Verdampfung			H	
Kavitation			N	
Flashing			N	
DNB und CHF			H	
Dryout			H	
NC-Gase			M-H	
Strömungsinduzierte Schwingungen (ein- und zweiphasig)	Methoden zur Kopplung von CFD- mit CSM-Codes	E/V	H	Baffle jetting, Schwingungen im Reaktorkern und DE, Schwingungen in axialer und Querströmung, Pre-CICE-Schnittstelle,

Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene im Reaktorkühlkreislauf	Modelle/Ansätze	Entwicklung/Validierung	Priorität	Bemerkung
Sloshing in Behältern (Erdbeben)	Methoden zur Kopplung von CFD- mit CSM-Codes	E/V	M	Schwingungen in Behältern, z.B. beim Erdbeben, höhere Relevanz für HLM-Reaktoren aufgrund der höheren Kühlmitteldichte, Pre-CICE-Schnittstelle,

Tabelle 4: Priorisierung verschiedener Kopplungsarten, die im Bereich der Reaktorsicherheit eingesetzt werden

Kopplungsart	Datenaustausch	Einsatzbereich	Kommentare	Priorität
System Code - CFD	1D-3D	Simulation von Anlagentransienten mit ausgeprägten, lokalen 3D Strömungsphänomenen	ATHLET-OpenFOAM – Kopplung bereits für einphasige und mehrphasige Strömungen von der GRS realisiert. Weiterentwicklungsbedarf für Zweiphasenströmungen; Validierung notwendig	H
Neutronenkinetik - CFD	3D-3D	Detaillierte Simulation des Kernverhaltens unter Berücksichtigung von 3D Strömungs- und Neutronenkinetikphänomenen	Wichtig für Transienten mit mehrdimensionalen Strömungen und Rückkopplung von der NK.HZDR hat Interesse an der Entwicklung der Kopplung OpenFOAM - DYN-3D beakundet	H
CFD - CSM	3D-3D	Detaillierte Simulation von Fluid-Struktur-Wechselwirkung	Uni-Stuttgart realisiert den ersten Schritt mit Kopplung nur mit Wärmeleitung in der festen Struktur, auch mit wandauflöser LES. Arbeiten auf EU-Ebene (NRG) bereits durchgeführt, s. auch Pressure Fluctuation Model von NRG zur Berücksichtigung von Fluktuationen in FSI mit URANS simulationen Entwicklungslinie Extend sollte FSI-Möglichkeiten haben, jedoch funktionieren hauptsächlich die Tutorials, RUB führt FSI-Simulationen mit OF- Foundation und Calculix: beide Rechenprogramme mit PreCICE-Schnittstelle gekoppelt, numerische Schwierigkeiten vorhanden.	H

Abkürzungsverzeichnis

ATWS	Anticipated Transient Without Scram
BE	Brennelemente
CCFL	Counter-Current Flow Limitation
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	Critical Heat Flux
CSM	Computational Structural Mechanics
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DNB	Departure from Nuclear Boiling
DWR	Druckwasserreaktor
FDL	Frischdampfleitung
FSI	Fluid-Struktur-Interaction
HKMP	Hauptkühlmittelpumpe
HLM	Heavy Liquid Metal
LES	Large Eddy Simulation
NC	Non condensable (gas)
NK	Neutronenkinetik
PTS	Pressurized Thermal Shock
RDB	Reaktordruckbehälter
RKL	Reaktorkühlkreislauf
RIA	Reactivity Induced Accident
SE	Sicherheitsebene
SGTR	Steam Generator Tube Rupture
SiAnF	Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke
SMR	Small Modular Reactor
SWR	Siedewasserreaktor
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes
VOF	Volume Of Fluid

vSMR	Very Small Modular Reactor
VVER	Vodo-Vodjanoj Énergetičeskij Reaktor
WT	Wärmetauscher

Literaturverzeichnis

- /BUC 15/ Buchholz, S., Krüssenberg, A., Schaffrath, A., Zipper, R.: Studie zur Sicherheit und zu internationalen Entwicklungen von Small Modular Reactors (SMR), Abschlussbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (GRS), GRS-376, DOI 10.2314/GBV:883073838, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Mai 2015.
- /CAR 20/ Carelli, M. D., Ingersoll, D. T. (Hrsg.): Handbook of small modular nuclear reactors. Woodhead Publishing series in energy, ISBN 978-0-12-823916-2, Woodhead Publishing: Oxford, 2020.
- /NRC 85/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Containment Emergency Sump Performance, Technical Findings Related to Unresolved Safety Issue A-43. NUREG, 0897, Rev. 1, Oktober 1985.
- /NRC 12/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident, Revision 4. Regulatory Guide, RG 1.82, Rev. 4, März 2012.
- /SCH 16/ Schaffrath, A., Krüssenberg, A., Buchholz, S.: International Developments, Safety Issues and Modelling Gaps of SMR. In: Korean Nuclear Society (KNS): 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-hydraulics, Operation and Safety, Proceedings. NUTHOS-11, Gyeongju, Korea, 9. - 13. Oktober 2016, 2016.
- /SCH 18/ Schaffrath, A., Krüssenberg, A., Buchholz, S., Wielenberg, A.: Necessary improvements of the GRS simulation chain for the simulation of light-water-cooled SMRs. Kerntechnik, Bd. 83, Nr. 3, S. 169–177, DOI 10.3139/124.110913, 2018.
- /SCH 21a/ Schramm, B. A., Stewering, J., Sievers, J., Wielenberg, A., Schaffrath, A.: Planung CFD-Containment Inhaltliche Ausrichtung der OpenFOAM-Aktivitäten, Technischer Bericht Revision 0. TB-CFD-2021-01 Rev. 0, August 2021.

- /SCH 21b/ Schaffrath, A., Wielenberg, A., Kilger, R., Seubert, A.: SMRs — overview, international developments, safety features and the GRS simulation chain. *Frontiers in Energy*, DOI 10.1007/s11708-021-0751-2, 2021.
- /SIA 15/ Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 (SiAnf) in der Fassung von 3. März 2015 - Neufassung (BAnz AT 30.03.2015 B2).
- /WIE 16/ Wielenberg, A., Hasnaoui, C., Burgazzi, L., Cazzoli, E., Jan, P., Löffler, H., Siklóssy, T., Vitazkova, J., Raimond, E.: Risk Metrics and Measures for an Extended PSA. Technical report ASAMPSA_E / WP30 / D30.7 / 2017-31 volume 3, 31. Dezember 2016.