

Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an Open-FOAM für das Containment

Technischer Bericht

Revision 1

Berthold Schramm
Jörn Stewering
Jürgen Sievers
Andreas Wielenberg
Andreas Schaffrath

Dezember 2021
Auftrags-Nr.: 733676

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.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht wurde am 20.07.2021 auf der 1. Sitzung des Lenkungsausschusses für BMWi-finanzierte CFD-Entwicklungen zum Containment vorgestellt, diskutiert und befürwortet. Teilnehmer des Lenkungsausschusses waren:

- Dr. D. Lucas (HZDR)
- P. Fuchs (RUB/PSS) in Vertretung für Prof. M. Koch (RUB/PSS)
- I. Cremer (Framatome)
- Dr. S. Kelm (FZ Jülich)
- Prof. E. Laurien (IKE-Stuttgart)
- Dr. X. Cheng (KIT)
- Prof. T. Sattelmayer (TUM)
- Dr. A. Schaffrath (GRS)
- Dr. M. Weinriefer (GRS)

Die Anmerkungen des Lenkungsausschusses wurden in diesen Bericht eingearbeitet. Er wird mit Zustimmung des Lenkungsausschusses durch die GRS veröffentlicht.

Inhalt

1	Vorbemerkungen zur Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für das Containment	1
2	Anforderungen an den Sicherheitseinschluss.....	3
3	Auswertung der Ereignislisten.....	9
4	Zusammenfassung der Ereignislisten	13
4.1	Belastungen für den Sicherheitsbehälter	13
4.2	Schmelzeeinwirkungen	28
4.3	Passive Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter	32
4.4	Wärmeabfuhr aus Standortzwischenlagern sowie aus Castor-Behältern..	36
4.5	Brand	37
4.6	Transport von Aerosolen und Spaltprodukten.....	39
5	OpenFOAM-Arbeiten zu Containmentfragestellungen im In- und Ausland.....	43
5.1	Arbeiten zur Gasverteilung und zum Aerosoltransport.....	43
5.1.1	Nationale Arbeiten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.1.2	Internationale Arbeiten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2	Arbeiten zur H ₂ /CO Verbrennung, zu DDT und Detonationen.....	44
5.2.1	Nationale Arbeiten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2.2	Internationale Arbeiten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.3	OpenFOAM Arbeiten zu sonstigen containmentrelevanten Themen	45
5.3.1	Nationale Arbeiten.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.3.2	Internationale Arbeiten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6	Themen, Phänomene und ihre Priorisierung	47
7	Literatur	55

1 **Vorbemerkungen zur Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für das Containment**

Seit vielen Jahren beteiligt sich die GRS an der Entwicklung und Validierung von CFD-Methoden für Reaktorsicherheitsanalysen. Im deutschen CFD-Verbund wurde das open source CFD-Programm OpenFOAM als ein geeignetes Werkzeug für die Weiterentwicklung von CFD-Methoden identifiziert. Des Weiteren wird im Projektkomitee *Transienten und Unfallabläufe* (PK-TU) des BMWi diskutiert, ob CFD-Projekte mit Bezug auf OpenFOAM vorrangig zur Förderung empfohlen werden sollen.

Die GRS beteiligt sich aktiv an den nationalen OpenFOAM-Aktivitäten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *Ertüchtigung von CFD-Codes für die Simulation von störfalltypischen Phänomenen im Containment* (RS1562) werden aktuell fachliche und koordinierende Tätigkeiten durchgeführt. Die fachlichen Schwerpunkte sind die Entwicklung, Implementierung und Validierung eines Wand- und Volumenkondensationsmodells sowie eines PAR-Modells.

Mit den nationalen Partnern wurde im PK-TU abgestimmt, dass zukünftig alle BMWi-finanzierten Modellentwicklungen in OpenFOAM für Containmentanwendungen unter Nutzung einer gemeinsamen Plattform erfolgen und die Arbeiten der verschiedenen Partner in einer gemeinsamen Version zusammengeführt werden sollen. Diese Version soll zentral von der GRS 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 der 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. Hierzu soll der vorliegende Technische Bericht dienen.

Eine Zusammenstellung von mittels OpenFOAM zu simulierenden Phänomenen erfordert eine Systematik. In einem ersten Schritt werden anhand der *Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke* (SiAnf) /SIA 15/ für das Containment relevante Schutzziele und sicherheitstechnische Nachweisziele zusammengestellt. Anschließend werden anhand der in den SiAnf enthaltenen Liste die zu berücksichtigenden Phänomene für die derzeit

(in Deutschland) betriebenen LWR identifiziert. Für jedes Ereignis bzw. jede Ereignisgruppe wird dann bewertet, ob die Aussagesicherheit zur Einhaltung der Schutz- bzw. Nachweisziele mittels CFD-Methoden verbessert werden kann bzw. deren Anwendung gegenüber Systemcodes Vorteile besitzt. Anschließend werden für die einzelnen Ereignisse die relevanten Phänomene zusammengestellt und der jeweilige Stand der Modellierung sowie ggf. Validierung beschrieben. Hieraus ergeben sich dann entsprechende Defizite, die gemäß ihrer Priorität bearbeitet werden.

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. Folglich sind die geplanten Arbeiten speziell für die Sicherheitsbewertung von 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. In einem weiteren Schritt wird die GRS die aktuell zu diesem Themenkomplex international diskutierten Nachweisziele zusammenstellen und analog zur Vorgehensweise für die Reaktoren der Generation II auch für die Anlagen der Generation III/III+ und SMR phänomenorientiert den Stand sowie ggf. vorhandene Lücken identifizieren, priorisieren und schließen.

Die identifizierten und priorisierten Themen und erforderlichen Weiterentwicklungen sollen im Rahmen des nationalen Verbundes von den Partnern koordiniert bearbeitet werden. Der vorliegende Bericht wurde Mitte 2021 mit Partnern im deutschen CFD-Verbund diskutiert. Entsprechende Anmerkungen wurden in das Dokument integriert. 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 Stuttgart/IKE. Das vorliegende Dokument soll kontinuierlich fortgeschrieben werden. Es wird ergänzt durch die im technischen Bericht TB-CFD-2021-02 /PAP 21/ beschriebene Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für den Reaktorkühlkreislauf.

2 Anforderungen an den Sicherheitseinschluss

In den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) vom 3. März 2015 /SIA 15/ sind an verschiedenen Stellen Anforderungen an den Sicherheitseinschluss zusammengestellt. Hieraus ergeben sich die im Rahmen dieses Dokumentes zu betrachtenden Anlagenzustände (nachfolgend *kursiv* dargestellt). Anforderungen und Nachweisziele sind hingegen in der nachfolgenden Auflistung im Schrifttyp **bold** dargestellt.

Auszug aus den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, Hervorhebungen durch die Autoren /SIA 15/:

2 (1) Zur Einhaltung der radiologischen Sicherheitsziele sind die im Kernkraftwerk vorhandenen **radioaktiven Stoffe durch technische Barrieren bzw. Rückhaltefunktionen mehrfach einzuschließen** und deren Strahlung ausreichend abzuschirmen. Die Wirksamkeit der Barrieren und Rückhaltefunktionen ist durch die Erfüllung von Schutzzielen abzusichern. Es ist ein gestaffeltes Sicherheitskonzept zu realisieren.

2.1 Konzept der gestaffelten Sicherheitsebenen:

2.1(1) Der Einschluss der im Kernkraftwerk befindlichen radioaktiven Stoffe sowie die Abschirmung der von diesen Stoffen ausgehenden Strahlung ist sicherzustellen. Zur Erreichung dieses Ziels ist ein Sicherheitskonzept umzusetzen, bei dem Maßnahmen und Einrichtungen **gestaffelten Sicherheitsebenen** zugeordnet sind. Die Sicherheitsebenen 1 bis 4a sind durch die folgenden Anlagenzustände charakterisiert:

- Sicherheitsebene 1: *Normalbetrieb*
- Sicherheitsebene 2: *anomaler Betrieb*
- Sicherheitsebene 3: *Störfälle*
- Sicherheitsebene 4a: *sehr seltene Ereignisse*

Darüber hinaus sind in angemessenem Umfang für Anlagenzustände, die wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit den o. g. Sicherheitsebenen nicht zugeordnet werden, vorsorglich weitere Maßnahmen und Einrichtungen zur Feststellung und Begrenzung der Folgen solcher Zustände vorzusehen. Deshalb sind im gestaffelten Sicherheitskonzept ergänzend auf den Sicherheitsebenen 4b und 4c Maßnahmen und Einrichtungen des anlageninternen

Notfallschutzes vorzuhalten und zu planen. Diese Sicherheitsebenen sind durch die folgenden Anlagenzustände charakterisiert:

- Sicherheitsebene 4b: *Ereignisse mit Mehrfachversagen von Sicherheits-einrichtungen*
- Sicherheitsebene 4c: *Unfälle mit schweren Brennelementschäden.*

2.1 (3b) Auf der Sicherheitsebene 4c sind mitigative Maßnahmen des *anla-geninternen Notfallschutzes* vorzusehen, mit denen, unter Einschluss aller verfügbaren Maßnahmen und Einrichtungen, bei Unfällen mit schweren Brennelementschäden die **Integrität des Sicherheitsbehälters so lange wie möglich erhalten wird, Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung** unter Beachtung von Nummer 2.5 (1) **ausgeschlossen oder begrenzt werden** und ein langfristig kontrollierbarer Anlagenzustand erreicht werden kann. Im Falle der *Lagerung bestrahlter Brennelemente* im Brennelementlagerbecken außerhalb des Sicherheitsbehälters sind mitigative Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes vorzusehen, mit denen, unter Einschluss aller verfügbaren Maßnahmen und Einrichtungen, die **Integrität der umgebenden baulichen Hülle so lange wie möglich erhalten und Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung** unter Beachtung von Nummer 2.5 (1) **ausgeschlossen oder begrenzt** werden.

3.6 (1) Das Kernkraftwerk muss einen **Sicherheitseinschluss** besitzen, bestehend aus dem Sicherheitsbehälter und umgebendem Gebäude sowie den Hilfssystemen zur Rückhaltung und Filterung etwaiger Leckagen aus dem Sicherheitsbehälter. Der Sicherheitseinschluss muss seine **Rückhaltefunktion** so erfüllen, dass der **Austrag radioaktiver Stoffe in die Umgebung so gering wie möglich gehalten wird und für die Sicherheitsebenen 1 bis 3 vorgegebene Werte nicht überschritten werden.**

3.6 (3) Ein **zuverlässiger, ausreichend schneller und hinreichend langzeitiger Abschluss der Durchdringungen** durch den Sicherheitsbehälter ist zu gewährleisten.

3.6 (5) ... Ebenso muss bei allen Ereignissen der *Sicherheitsebene 3* und *bei Einwirkungen von innen und außen* einschließlich der **Wirkung aus**

Druckdifferenzen die Standsicherheit oder Integrität von Einbauten und Räumen, soweit erforderlich, erhalten bleiben.

3.6 (7) Ein **langfristiger Temperatur- oder Druckanstieg im Sicherheitsbehälter** ist bei *Kühlmittelverluststörfällen* während des *Sumpfbetriebes* zu verhindern.

3.6 (8) Bei *Unfällen mit schweren Brennelementschäden* (Sicherheitsebene 4c) gilt zusätzlich zu den Anforderungen in Nummer 2.1 (3b):

- Durch Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes ist sicherzustellen, dass ein **Überdruckversagen des Sicherheitsbehälters** durch einen stetigen Druckanstieg nicht eintritt. Ist eine **Druckentlastung des Sicherheitsbehälters als Notfallmaßnahme vorgeplant**, so muss diese unter den zu erwartenden Unfallbedingungen wirksam sein und über **effiziente Filter zur Aerosol- und Jodrückhaltung** verfügen. Ein **Unterdruckversagen** des Sicherheitsbehälters infolge der Druckentlastung ist zu verhindern.
- Durch Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes soll erreicht werden, dass bei **Unfällen mit schweren Brennelementschäden** **Verbrennungsvorgänge von Gasen (H₂, CO) innerhalb des Sicherheitsbehälters, die die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährden, nicht eintreten.**
- Durch Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes soll erreicht werden, dass bei **Unfällen mit schweren Brennelementschäden im Brennelementlagerbecken** **Verbrennungsvorgänge von Gasen (H₂)**, die die Integrität des Sicherheitsbehälters oder der umgebenden baulichen Hülle des Brennelementlagerbeckens gefährden, nicht eintreten.

3.10 Anforderungen an die Handhabung und *Lagerung der Brennelemente*:

3.10 (3) Die Kühlung der Brennelemente ist auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a, bei Einwirkungen von innen und außen sowie bei Notstandsfällen in allen Betriebsphasen sicherzustellen.

5 (1) Der Genehmigungsinhaber muss über Nachweise zur Sicherheit der Anlage verfügen.

5 (4) Bei der rechnerischen Analyse von Ereignisabläufen oder Zuständen müssen

- a. für den jeweiligen Anwendungsbereich validierte Berechnungsverfahren verwendet sowie
- b. mit der Berechnung verbundene Unsicherheiten quantifiziert oder durch geeignete Verfahren abgedeckt werden.

Darüber hinaus fördern die Not- und Nachkühlsysteme von DWR während des Sumpfbetriebs Wasser aus dem Containmentsumpf zurück in den Kühlkreislauf. Bei SWR gilt dies analog für den Sicherheitsbehältersumpf. In den NUREG Berichten *Containment Emergency Sump Performance* /NUR 85/, sowie *Water Sources for Long-Term Recirculation Cooling Following a Loss-of-Coolant Accident* /NUR 84/ wird ausführlich auf dieses Thema eingegangen. Die Problematik wird aus deutscher Sicht ausführlich in GRS-A-3643 /POI 12/ diskutiert. In NEA/CSNI/R(2013)12 /NEA 13/ werden relevante Phänomene für die langfristige Nachwärmeabfuhr bei Rückspeisung aus dem Containmentsumpf vertieft diskutiert. 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 werden. Nach derzeitigem Stand gibt es mindestens 8 Strömungsphänomene, die zu einer Einschränkung des hydraulischen Verhaltens einer Pumpe führen können. Diese sind in /PAP 21/ im Detail beschrieben.

An dieser Stelle soll daher nur auf das Thema Partikelfreiheit näher eingegangen werden, da hier relevante, zu simulierende Phänomene im Gasraum der Containments (DWR) bzw. Sicherheitsbehälter (SWR) stattfinden. Zur Bewertung der Sicherstellung der Sumpfansaugung nach einem Kühlmittelverluststörfall mit Berücksichtigung der Ablösung von Isoliermaterial gibt es von der RSK zwei relevante Stellungnahmen (374. Sitzung /RSK 04/ sowie 406. Sitzung /RSK 08/). In der ersten führte die RSK aus, dass die vorliegenden Erkenntnisse sich auf Experimente (u. a. zur Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen, Transport im Sicherheitsbehälter, Transport im Sumpfwasser, Druckverlust an den Sumpfsieben, Schlupf durch die Sumpfsiebe etc.) stütze und eine durchgehend analytische Behandlung der Thematik nicht möglich sei. Da diverse der o. g. Transportfaktoren das Containment betreffen, wird dieses Thema dem Containment zugeordnet. Bei der von der RSK empfohlenen Vorgehensweise sollen vorliegende Erkenntnisunsicherheiten in einzelnen Aspekten in Bezug auf ein abdeckendes Gesamtergebnis berücksichtigt werden. Mittels der nun verfügbaren CFD-Methoden können nun die Freisetzung sowie die einzelnen Transportschritte verstärkt analytisch betrachtet werden und deren Konservativität sowie die Konservativität des Gesamtergebnisses quantifiziert werden. In der Stellungnahme der RSK aus der 406. Sitzung wird dann u. a. der Einfluss von latent vorhandenen Korrosionsprodukten auf die Druckverluste an den Sieben und im Kern betrachtet. Auch diese Phänomene lassen sich perspektivisch mit CFD Codes simulieren.

Die Anhänge der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke 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.

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 ≤ 0,1F: Brennstabschadensumfang ≤ 1%	-				-
Druckführende Umschließung:	Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1
Äußere Systeme¹²	Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1					Siehe Anlage 1
Nachweiskriterien	Druckanstieg im SHB < Ansprechriterien Reaktorschutz		-			$P_{SHB} \leq P_{SHB-A}$ ¹³		-			$P_{SHB} \leq P_{SHB-A}$
Sicherheitsbehälter (SHB):	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

¹¹ Vermeidung mechanischer Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hüllrohr (Pellet Clad Interaction: PCI), die die uneingeschränkte Weiterverwendbarkeit der Brennstäbe beeinträchtigen.

¹² Die Äußeren Systeme stellen keine der im Barrierenkonzept genannten drei Barrieren dar. Die sicherheitstechnische Bedeutung des Erhalts der Integrität der Äußeren Systeme liegt vorrangig in der Aufrechterhaltung der Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern. Da hier jedoch, wie bei der Druckführenden Umschließung, auf die Beanspruchungsstufen der Anlage 1 Bezug genommen wird, sind die Äußeren Systeme mit in Tabelle 3.1c aufgeführt.

¹³ Zur Bestimmung der Differenzdrücke im Sicherheitsbehälter siehe Anhang 5 der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ („Anforderungen an die Nachweisführung und Dokumentation“), Anlage 2.

Abb. 2.1 Auszug aus den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ mit Nachweiszielen und Nachweiskriterien, die für das Containment relevant sind /SIA 15/

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 das Containment zunächst von DWR und im nächsten Schritt für SWR der Generation II relevante Schutzziele und sicherheitstechnische Nachweisziele zusammengestellt. Anschließend werden anhand der generischen Liste zu berücksichtigender Ereignisse aus Anhang 5 der SiAnf /SIA 15/ relevante Phänomene identifiziert und in der folgenden Tabelle vorgestellt. Zu jedem Ereignis bzw. jeder Ereignisgruppe werden die relevanten Strömungsphänomene identifiziert, deren Berechnung mittels CFD-Methoden verbessert werden kann bzw. deren Anwendung gegenüber Systemcodes Vorteile bietet. Anschließend werden dann für die einzelnen Ereignisse die relevanten Phänomene zusammengestellt und eine Einschätzung zum Einsatz von CFD-Codes abgegeben.

Tab. 3.1 Ereignisgruppen für DWR mit Containment-relevanten Effekten

Ereignisliste Containmentphänomene (DWR)				
Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase*	Phänomene	Einschätzung CFD Codes
Leck/Bruch Frischdampfsystem	R, K, B, S	A-B	Freistrahler, asymmetrische Strömung, Vermischungs-/Schichtungsphänomene	CFD sinnvoll für Berechnung von Strahlkräften und Druckaufbau
Kleines/mittleres/großes Leck innerhalb Sicherheitsbehälter	R, K, B, S	A-B	Sicherheitsebene 3: Freistrahler, Ausbreitung von Wasser, Dampf im Containment. Sicherheitsebene 4: zusätzlich Ausbreitung H ₂ , Spaltprodukte, Schmelze	CFD Simulation sinnvoll für detaillierte Berechnungen (Schichtung, PAR Positionierung), sowie H ₂ -Verbrennungen und Schmelzeausbreitung
Leck im Abgassystem	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten
Leck eines Behälters mit aktivem Medium	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten
Aktivitätsfreisetzung infolge Brände/Explosionen	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten
Leck im BE Lagerbecken	K, B	A-F	Lokale Strömungsphänomene	CFD sinnvoll für die Berechnung der Strömungen, Wärmeverteilung im BE Lagerbecken, Kühlbarkeit der BE bei Freilegung
Einwirkung von innen und außen				
Einwirkung von innen	R, K, B, S	A-F	Anlageninterne Überflutung, Brände, Explosionen, Druckaufbau/-differenzen, Trümmerstücke, Strahlkräfte	CFD sinnvoll für die Berechnung von Bränden, Explosionen, Druckaufbau, Temperaturverteilung, Strahlkräften
Einwirkung von außen	R, K, B, S	A-F	Erdbeben, Überflutung, extreme meteorologische Bedingungen, Flugzeugabsturz, anlagenexterne Explosionen, Brand	CFD sinnvoll für die Berechnung von Explosionen und Bränden, evtl. auch Berechnung des Spaltprodukttransports im Nahfeld der Anlage
Schutzziel R = Kontrolle der Reaktivität, K = Kühlung der Brennelemente, B = Einschluss radioaktiver Stoffe, S = Einhaltung radiologischer Sicherheitsziele *Betriebsphasen (Ausgangszustand): A = Nuklearer Leistungs- und Anfahrbetrieb, B = heiß, unterkritisch, C = kalt, unterkritisch, PKL druckdicht, D = kalt, unterkritisch, PKL nicht druckdicht, E_ Brennelementwechsel, F = Brennelemententlagerung				

Tab. 3.2 Ereignisgruppen für SWR mit Containment-relevanten Effekten

Ereignisliste Containmentphänomene (SWR)				
Thema	Betroffene Schutzziele	Betriebsphase*	Phänomene	Einschätzung CFD Codes
Leck/Bruch Frischdampfsystem / Speisewassersystem (innerhalb des Sicherheitsbehälters)	R, K, B, S	A-B	Freistrahler, asymmetrische Strömung in der Druckkammer, Vermischungs-/Schichtungsphänomene, Strömung durch Lochrohrdüsen und Überstromrohre und Kondensation in der Kondensationskammer, Wellen und Aufschäumen in der Kondensationskammer sowie Ausbildung von Temperaturschichtungen, direct contact condensation, steam chugging, Strömung durch Überstromrohre (Leck innerhalb des SHB)	CFD sinnvoll für Berechnung von Strahlkräften CFD sinnvoll für Bestimmung dynamischer lokaler Lasten an Strukturen aufgrund Kondensation (insb. bei direct contact condensation) sowie dynamische Lasten durch Wasserbewegungen in der Kondensationskammer
Kleines/mittleres/großes Leck innerhalb Sicherheitsbehälter	R, K, B, S	A-B	Freistrahler, asymmetrische Strömung in der Druckkammer, Vermischungs-/Schichtungsphänomene, Strömung durch Lochrohrdüsen und Überstromrohre und Kondensation in der Kondensationskammer, Wellen und Aufschäumen in der Kondensationskammer sowie Ausbildung von Temperaturschichtungen, direct contact condensation, steam chugging, Strömung durch Überstromrohre (Leck innerhalb des SHB)	CFD Simulation sinnvoll für Verteilung von nicht-kondensierbaren Gasen zwischen Druckkammer und Kondensationskammer, detaillierte Berechnungen (Schichtung, PAR Positionierung) sowie H ₂ -Verbrennungen. CFD ggf. sinnvoll für dynamische Belastungen von Kondensationskammer bei Druckabbau CFD möglich für Partikelausbreitung bei RDB-Versagen und Schmelzeausbreitung im Steuerstabsantriebsraum
Transienten mit Auslösung Durchdringungsabschluss inkl. Fehlüffnen von S&E-Ventilen	R, K, B, S	A-B	Strömung in Abblaserohren, Strömung durch Lochrohrdüsen und Kondensation in der Kondensationskammer, Wellen und Aufschäumen in der Kondensationskammer sowie Ausbildung von Temperaturschichtungen	CFD sinnvoll für Bestimmung dynamischer lokaler Lasten an Strukturen aufgrund Kondensation (insb. direct contact condensation) sowie dynamische Lasten durch Wasserbewegungen in der Kondensationskammer
Leck im Abgassystem	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten

Leck eines Behälters mit aktivem Medium	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten
Aktivitätsfreisetzung infolge Brände/Explosionen	S	A-F	Ausbreitung von radioaktiven Aerosolen und Gasen	CFD Simulationen sinnvoll für Berechnung der Verteilung von luftgetragenen Spaltprodukten
Leck im BE Lagerbecken	K, B	A-F	Lokale Strömungsphänomene	CFD sinnvoll für die Berechnung der Strömungen, Wärmeverteilung im BE Lagerbecken, Kühlbarkeit der BE bei Freilegung
Einwirkung von innen und außen				
Einwirkung von innen	R, K, B, S	A-F	Anlageninterne Überflutung, Brände, Explosionen, Druckaufbau/-differenzen, Trümmerstücke, Strahlkräfte	CFD sinnvoll für die Berechnung von Bränden, Explosionen, Druckaufbau, Temperaturverteilung, Strahlkräften
Einwirkung von außen	R, K, B, S	A-F	Erdbeben, Überflutung, extreme meteorologische Bedingungen, Flugzeugabsturz, anlagenexterne Explosionen, Brand	CFD sinnvoll für die Berechnung Explosionen und Bränden, evtl. auch Berechnung des Spaltprodukttransport im Nahfeld der Anlage
Schutzziel R = Kontrolle der Reaktivität, K = Kühlung der Brennelemente, B = Einschluss radioaktiver Stoffe, S = Einhaltung radiologischer Sicherheitsziele *Betriebsphasen (Ausgangszustand): A = Nuklearer Leistungs- und Anfahrbetrieb, B = heiß, unterkritisch, C = kalt, unterkritisch, PKL druckdicht, D = kalt, unterkritisch, PKL nicht druckdicht, E_ Brennelementwechsel, F = Brennelemententlagerung				

4 Zusammenfassung der Ereignislisten

Die Auswertung der Ereignislisten für bestehende Anlagen führt zu den folgenden Erkenntnissen:

4.1 Belastungen für den Sicherheitsbehälter

Nachfolgend werden Möglichkeiten zum Einsatz von CFD Codes für das Thema Bestimmung von Belastungen des Sicherheitsbehälters diskutiert. Grundsätzlich ist auf der Sicherheitsebene 3 zur Erfüllung der radiologischen Sicherheitsziele die Barriere Sicherheitsbehälter wirksam zu halten.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben kurz die Vorgehensweise für die Bestimmung von Belastungen für die Auslegung eines Sicherheitsbehälter (SHB) für DWR gemäß der KTA 3413 /KTA 17/. Anschließend wird auch noch auf SWR typische Phänomene eingegangen.

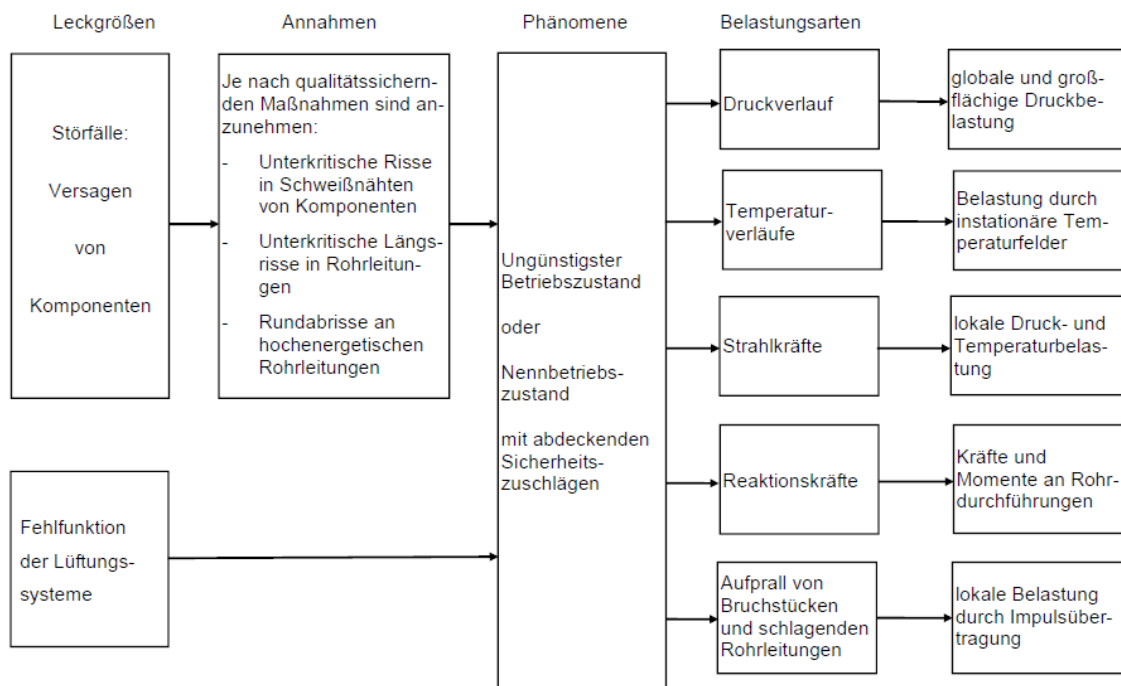


Abb. 4.1 KTA 3413, Bild G-1 – Zusammenhang zwischen Störfällen und daraus folgenden Belastungen des Sicherheitsbehälters /KTA 17/

In Bild G-1 der KTA 3413 ist der Zusammenhang zwischen Störfällen und daraus folgenden Belastungen dargestellt. Je nach Fragestellung werden die wesentlichen physikalischen Vorgänge postulierter Ereignisse durch analytische Modelle simuliert, wobei zu den jeweiligen Modellen im Regelwerk detaillierte Festlegungen vermieden werden, um insbesondere der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik Rechnung tragen zu können. Generell sollen die maximalen Belastungen für das Containment als Folge von Kühlmittelverluststörfällen mit Querschnitten bis zu 2F bestimmt werden. Als Belastungsarten werden hierbei Druck- und Temperaturverläufe, Strahl- und Reaktionskräfte sowie der Aufprall von Bruchstücken und schlagenden Rohrleitungen betrachtet. Diese Belastungen wirken entweder global (auf alle Bereiche des SHB), großflächig (auf unterschiedliche Bereiche der Wand ungleichmäßig) oder lokal (auf örtlich eng begrenzte Bereiche).

Globaler Überdruck

Die KTA 3413 fordert bei der Berechnung des Druck- und Temperatureaufbaus im SHB bei KMV eine einfache Nodalisierung und begründet dies mit dem Hinweis, dass einfache Nodalisierungen zu konservativen Ergebnissen führen würden. Eine Wärmeabgabe an Bauteile, Wände, Komponenten etc. dürfe nur berücksichtigt werden, wenn die im Anhang der KTA 3413 vorgegebenen Wärmeübergangskorrelationen oder hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit abgesicherte Werte verwendet würden. Des Weiteren gibt es Vorgaben bzgl. der Unterteilung der Strukturen, der Wirkung von Anstrichen sowie der Erfassung des thermischen Nichtgleichgewichtes zwischen Sumpfwasser und der Luft-Dampf-atmosphäre¹.

Gemäß den Vorgaben der KTA ergibt sich, dass CFD Analysen für die Bestimmung globaler Belastungen des SHB nicht zwingend benötigt werden. Mittels CFD Analysen kann jedoch exemplarisch die Konservativität des KTA Ansatzes spezifiziert werden. Des Weiteren kann die Übertragbarkeit der in den Analysen verwendeten Wärmeübergangskorrelationen abgesichert werden. Auf die Auswirkungen passiver Systeme zur SHB-Kühlung wird weiter unten eingegangen.

¹ Unter den spezifischen Anforderungen der KTA 3413 ist die Aussage richtig, dass grobe Nodalisierungen zu konservativen Ergebnissen führen.

Unterdruck oder äußerer Überdruck

Die KTA 3413 benennt folgende Vorgänge, die zu einem Unterdruck im SHB führen können: Ausfall der Lüftung, Leckagen, Weiterbetrieb der Unterdruckhaltung. Sie fordert u. a. möglichst große (sprich 4-fache) oder hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit abgesicherte Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten an Strukturen sowie geeignete Durchmischungsmodelle von Leckdampf und Luft zu berücksichtigen. Ohne weitere Nachweise darf postuliert werden, dass reine Luft den SHB verlässt.

Bei der Berechnung des äußeren Überdrucks im Ringraum gibt es Forderungen, wann und mit welchen Förderhöhen die Ringraumlüftung berücksichtigt werden muss bzw. abgewichen werden darf.

CFD Analysen werden nicht für die Berechnung von Unterdrücken bzw. äußeren Überdrücken benötigt. Sie eignen sich prinzipiell aber zur Bestimmung der Konservativität des KTA spezifizierten Ansatzes. Des Weiteren kann die Übertragbarkeit der in den Analysen verwendeten Wärmeübergangskorrelationen bzw. können die Modelle zur Berechnung der Durchmischung des im Leckstrahl gebildeten Wasserdampfes mit der Luft im SHB abgesichert werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass in deutschen Reaktoren keine SHB-Sprühsysteme (außerhalb der KOKA in SWR) realisiert sind. Für die Bestimmung der Auswirkungen eines fehlerhaften Betriebs von Sprühsystemen in späten Störfallphasen (insbesondere nach einem Venting) werden vereinfachte Verfahren oder Systemcodes in der Regel ausreichen, eine Überprüfung mit CFD-Verfahren kann jedoch in Einzelfällen sinnvoll sein.

Großflächige Belastungen

Zur Bestimmung der abdeckenden großflächigen Belastungen ist es erforderlich, relevante Lecks nach Komponente und Lage zu identifizieren, die zu einer abdeckenden unsymmetrischen Druck- und Temperaturbelastung des SHB führen. Hierzu ist eine Nodalisierung zu wählen, die im Hinblick auf den Druckaufbau im Wandbereich, die Überströmvorgänge zwischen einzelnen Räumen inner- oder außerhalb des SHB, die Wassertransport- und Wasserabscheidevorgänge sowie die Wärmeabgabe an Bauteile, Wände etc. geeignet ist. Wie bei den globalen Belastungen dürfen nur wieder vorgegebene Wärmeübergangskorrelationen oder hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit abgesicherte Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden.

In der SiAnf Anlage 2 *Detailanforderungen an die Ermittlung von Differenzdrücken innerhalb des SHB* werden o. g. Anforderungen weiter spezifiziert. Die SiAnf fordert beim

Einsatz von Lumped-Parametermodellen eine ausreichend feine Nodalisation (mindestens 1 Zone pro Raum), sowie im Sinne der Nachweisführung konservative Modelle für die Wärmeabgabe an die Strukturen, eine konservative Modellierung der Strömungswiderstände im Bruchraum und eine realistische Modellierung der auftretenden Strömungswiderstände zwischen den übrigen Räumen. Des Weiteren sollen bei der Berechnung der Wassertransport- und -abscheidevorgänge empirischen Rechenmodelle verwendet werden, die so aufgestellt sind, dass diese konservativ für das Differenzdruckverhalten sind. Die Ergebnisse sind mit geeigneten Sicherheitszuschlägen zu versehen (15 % der maximal berechneten Differenzdrücke) mindestens aber 10^4 Pa.

CFD Analysen werden nicht für die Berechnung von Unterdrücken bzw. äußeren Überdrücken benötigt. Sie eignen sich prinzipiell aber zur Bestimmung der Konservativität des in der KTA spezifizierten Ansatzes. Des Weiteren kann die Übertragbarkeit der in den Analysen verwendeten Wärmeübergangskorrelationen bzw. der Modelle zur Berechnung der Durchmischung des im Leckstrahl gebildeten Wasserdampfes mit der Luft im SHB abgesichert werden.

Der Einsatz von CFD Analysen für die o. g. Fragestellungen ist häufig aufwendig. In Prinzip kann man bereits heute derartige Analysen durchführen. Es stellt sich allerdings die Frage nach dem Value for Money. Daher sollten aus unserer Sicht diesbezügliche Analysen auch weiterhin mit Lumped-Parameter-Codes und einem Sicherheitszuschlag auf die berechneten Differenzdrücke durchgeführt werden.

CFD Analysen eignen sich wie bei den vorher beschriebenen Fragestellungen eher zur Überprüfung der Konservativität und Übertragbarkeit der in dem Lumped-Parameter-codes verwendeten Modelle (u. a. Wärmeübergänge, Wassertransport- und -abscheidung) sowie der Strömungswiderstände von Verbindungen zwischen Räumen (wie z. B. Türen, Berstscheiben, Berstmembranen, Betonriegel etc.). Das Öffnungsverhalten der Verbindungen ist von den lokalen Druckverhältnissen abhängig. Eine weitere wichtige für die Simulation benötigte Größe für jede Verbindung sind die zum jeweiligen Öffnungsquerschnitt gehörenden Widerstandbeiwerte, die sich ebenfalls mit Hilfe von CFD Simulationen bestimmen lassen.

Neben der Bestimmung der Lasten für den Sicherheitsbehälter eignen sich die zuvor beschriebenen Analysen auch für die Bestimmung der Lasten auf Wände, Einbauten etc. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Lasten der Sumpfsiebe in der Blow-Down-Phase (sprich die ersten Sekunden nach Bruchöffnung). Dabei werden für führende Bruchlagen die maximalen Druckdifferenzen anhand der thermodynamischen Zustandsgrößen in den einzelnen Räumen berechnet. Dies erfordert genaue Kenntnisse

der Überströmöffnungen sowie ihrer Formverlustbeiwerte. Sofern für die jeweilige Überströmöffnung kein geeigneter Wert aus der Literatur entnommen werden kann, können diese auch mittels CFD Simulationen bestimmt werden.

Lokale Belastungen

Bei den lokalen Belastungen sind Strahlkräfte, Reaktionskräfte sowie Bruchstücke aus schlagenden Rohrleitungen zu berücksichtigen.

Strahlkräfte

Strahlkräfte sind Kräfte, die von aus Bruchöffnungen austretenden Freistrahlen eines Fluids (Flüssigkeit, Dampf oder Zweiphasengemisch) auf vom Freistrahlgetroffene Komponenten, Systeme sowie bauliche Anlagenteile übertragen wird. Hierbei legt der jeweilige Anwender fest, welche Komponenten versagen sollen. Für diese Fälle wird dann die Druckverteilung und die Temperatur über der Auftrefffläche bestimmt. Hierbei sind gemäß KTA 3413 Ausström- und Rechenmodelle auszuwählen, die zu konservativen Ergebnissen führen. Des Weiteren dürfen bei der Ermittlung der Auftreffflächen sowie der Druckverteilung nur experimentell belegte Modelle verwendet werden. Bei der Ermittlung der Temperatur des Strahls im Bereich der Auftrefffläche sind die thermodynamischen Zustände zu berücksichtigen. Des Weiteren fordert die SiAnf bei der Freistrahlausbreitung im Wege liegende Strukturen zu erfassen sowie einen Sicherheitszuschlag von 15 % vorzusehen.

Aufgrund der hohen örtlichen Auflösung bieten sich CFD Codes für die Berechnung der Einwirkungen auf Rohrleitungen und Komponenten im Strahlbereich an. Ein Ziel ist dabei u. a., mögliche Folgefehler zu identifizieren.

Ein konkretes Anwendungsbeispiel von Strahlkräften ist die Bestimmung der Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen und dessen Verteilung im Containment. Gemäß RSK Stellungnahme vom 22.07.2004 (374. Sitzung) /RSK 04/ soll dies mit dem anhand von Versuchen belegten NRC-Kegel /NUR 85/ in Abhängigkeit von der Leckgröße, dem Abstand vom Leckort und der Isoliermaterialart erfolgen. Der Öffnungswinkel des Leckstrahls ist in dem NRC-Kegelmodell mit 90 Grad angegeben. Als *andere Stoffe* werden in der RSK Stellungnahme vom Leckstrahl getroffene bzw. anschließend vom ausströmenden Medium in den Sumpf transportierte Materialien (wie z. B. Anstriche, Bontenteilchen, Staub, Brandschutzmaterialien etc.) bezeichnet, deren Freisetzungsmenge anlagenspezifisch abzuschätzen ist. In diesem Zusammenhang könnten CFD Analysen

dazu genutzt werden, Auftreffflächen von Leckstrahlen und freigesetzte Mengen an Isoliermaterial zu identifizieren. Des Weiteren könnte mittels CFD Analysen der Transport und die Ablagerung des durch den Leckstrahl freigesetzten Isoliermaterials im Containment sowie dessen Remobilisierung z. B. durch Abfließen des an den Containmentstrukturen kondensierenden Wassers bestimmt werden. Mit derartigen Analysen würden die Konservativitäten bzw. Unsicherheiten bzgl. der zuvor beschriebenen Transportschritte weiter verringert werden. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die Penetration von Fasern durch Siebe sehr sensibel ist und vom Aufbau des Filterkuchens abhängt.

Reaktionskräfte

Reaktionskräfte sind Kräfte, die beim Ausströmen eines Fluids aus dem Leck einer druckführenden Komponente oder eines Systems auf die Komponente oder das System selbst verursacht und von dieser weitergeleitet werden. Die Reaktionskräfte sind unter Anwendung der Erhaltungssätze für Massen, Energie und Impuls sowie der thermodynamischen Zustandsgleichungen zu berechnen. Des Weiteren sind bei Lecks mit einer geringen Rückwirkung auf den Systemdruck als Druckdifferenz die Differenz zwischen dem Ausgangsdruck des Fluides in der jeweiligen Komponente bzw. dem System und dem Druck in der Umgebung anzusetzen. Bei Lecks, die hingegen zu großen Rückwirkungen auf den Systemdruck führen, kann die zeitliche Änderung des Ausgangsdrucks im betrachteten System berücksichtigt werden, wobei dann allerdings die dynamischen Effekte im Medium (wie z. B. die Ausbreitung von Druckwellen) berücksichtigt werden müssen. Die SiAnf weist explizit darauf hin, dass zur Berechnung von Reaktionskräften entsprechende Rechenmodelle oder experimentell abgesicherte Beziehungen anzusetzen sind.

Die Berechnung von Reaktionskräften speziell für Lecks mit starker zeitlicher Änderung des Ausgangsdrucks könnten zukünftig ein interessantes Einsatzgebiet für CFD Codes sein. CFD Codes erlauben z. B. die Berücksichtigung dynamischer Effekte im Medium (wie z. B. die Ausbreitung von Druckwellen). Darüber hinaus können bei Kopplung von CFD- mit CSM-Codes durch den multiphysikalischen Ansatz die Wechselwirkung zwischen Fluiden und Strukturen berücksichtigt werden, ebenso wie eine Abnahme der Lecköffnungsquerschnitte mit abnehmender Druckdifferenz. Das Potential zeigt exemplarisch eine GRS Simulation für ein 16 cm² Leck in der Volumenausgleichsleitung bei Normalbetrieb. Nach dem Druck- und Temperaturabfall infolge Leckausströmung reduziert sich die Leckfläche nach 1h um ca. 25 % und die Leckrate um ca. 23 % /SIE 13/ und /SIE 14/.

Bruchstücke und schlagende Leitungen

Da gemäß KTA 3413 das Auftreffen von Bruchstücken und schlagenden Rohrleitungen auf die Wand eines Sicherheitsbehälters nicht ausgeschlossen werden können, müssen deren Masse, Abmessungen, Geschwindigkeit und Auftreffwinkel berechnet werden. Hierzu macht die KTA 3413 jedoch keine Vorgaben, sondern verweist darauf, dass für diese Fälle die Berechnungsmethoden im Einzelfall festgelegt werden sollen. In den meisten Fällen erfolgt dies mit Hilfe spezieller ingenieurtechnischer Modelle, die auf Abschätzungen und empirischen Formeln beruhen.

CFD Codes erlauben z. B. die Berücksichtigung dynamischer Effekte im Medium (wie z. B. die Berechnung von Reaktionskräften). Darüber hinaus können bei Kopplung von CFD- mit CSM- (z. B. ANSYS Mechanical) oder sog. Hydro-Codes (z. B. AUTODYN oder LS-DYNA) durch den multiphysikalischen Ansatz die Wechselwirkung zwischen Fluid- und Strukturen, sowie Strukturen untereinander berücksichtigt werden.

Druckentlastung und Kondensation in großen Wasserbehältern

Dieser Sachverhalt ist wie viele zuvor sowohl auf DWR als auch auf SWR übertragbar. Jedoch wird hier zunächst auf die Bedeutung für SWR eingegangen.

Aufgrund der Größe des Reaktordruckbehälter (RDB) wurden für die SWR der Generation II keine Volldruckcontainments gebaut. Die SWR der Generation II besitzen daher ein sog. Druckabbausystem bestehend aus einer Druckkammer, einer Kondensationskammer (KOKA) sowie beide Kammern miteinander verbindenden Überströmrohre. Die KOKA ist ca. zur Hälfte mit Wasser gefüllt; in diese Wasservorlage tauchen die Überströmrohre ein Stück weit ein. In diese Wasservorlage blasen u. a. die S/E-Ventile des Druckentlastungssystems Dampf aus dem RDB ab und kondensieren diesen. Des Weiteren münden hierin auch die Kondensationsrohre, die in die Wasservorlage eintauchen und z. B. bei einem KMV den in die Druckkammer freigesetzten Dampf überspülen.

Gemäß SiAnf /SIA 15/ sowie deren Interpretationen /BMUB 15/ muss die Funktion der Kondensationskammer bezüglich Druckabbau und Entlastung ohne Berücksichtigung des Kondensationskammer-Sprühsystems gewährleistet sein. Des Weiteren dürfen Kondensations- und Freiblasevorgänge in der Kondensationskammer keine unzulässigen Einwirkungen verursachen.

Die erste Anforderung wird dadurch eingehalten, dass die KOKA gegen den Druck, der sich beim Überspülen der gesamten in der Druckkammer befindlichen nichtkondensierbaren Gase (bei inertisierten SWR SHBs also des hierin befindlichen Stickstoffs) ergibt, ausgelegt wird. Derartige Abschätzungen können mit Hilfe einfacher Bilanzen durchgeführt werden.

Zur Vermeidung unzulässiger Einwirkungen bei Kondensations- und Freiblasevorgängen wird anhand von Strömungskarten versucht Betriebsregime einzustellen, bei denen die o. g. Vorgänge möglichst sanft verlaufen. Des Weiteren wurden nach negativen Erfahrungen in der Vergangenheit konstruktive Maßnahmen (Anpassung der Abblasemasenströme, Anbringen von sog. Vakuum-Breakern, Gestaltung der Enden der Überströmrohre, Anbringen von Düsenstöcken an den Abblaserohren) zur Minimierung der Lasten vorgesehen.

Generell können bei einer ungünstigen Auslegung oder Betriebsweise des Druckentlastungs- bzw. -abbausystems bei der Kondensation von Dampf in kalten Wasservorlagen (sog. direct contact condensation) zum Teil heftige Kondensationsschläge auftreten, die zu erheblichen Belastungen an den Strukturen führen können. Hierzu zählen z. B. Chugging bzw. eine unvollständige Kondensation (beide Phänomene sind in der Vergangenheit in Anlagen bereits aufgetreten), die tunlichst zu vermeiden sind. Chugging tritt bei (zu) kleinen Dampfmassenströmen auf. Der Dampf gelangt zunächst über das betreffende Rohr in den Wasserpool und kondensiert sowohl im Pool als auch in Teilen des Rohres. Hierdurch bildet sich ein Unterdruck im Rohr und es strömt Wasser wieder in das Abblaserohr zurück. Anschließend drückt der nachströmende Dampf das Wasser erneut aus dem Rohr. Der Vorgang wiederholt sich periodisch. Dieses oszillative Verhalten führt zu erheblichen strukturellen Belastungen der Rohre und deren Halterungen. Chugging wurde bereits mehrfach versucht mit CFD Codes zu modellieren (z. B. in /TAV 15/ mit NEPTUNE-CFD). Allerdings zeigte hier der Vergleich mit Experimenten, dass das Chugging deutlich unterschätzt wurde.

Eine unvollständige Kondensation tritt bei warmen Wasserpools auf, bei denen das Kondensationspotential reduziert ist. In der Vergangenheit gab es in einem deutschen SWR einen Störfall durch unbeabsichtigtes Offenbleiben eines S/E Ventils bei dem sich die KOKA erwärmte und sich gleichzeitig hier eine Temperaturschichtung einstellte. Die Dampfblasen wurden mit der Strömung Richtung Kondensationskammer transportiert und kondensierten in der Nähe des Bodens. Hierbei traten heftige Kondensationsschläge auf, die den Boden beschädigten. Es wurden seinerzeit zwei Konsequenzen aus

dem Ereignis gezogen: erstens die Abschaltung des Reaktors bei zu hohen Kondensationskammer-Temperaturen und zweitens das Einbringen von Lochrohrdüsen.

Es gibt CFD Analysen, die sich mit dem Betriebsverhalten von sog. Multi-Loch Spargern beschäftigen. Erste Studien z. B. von /LEX 15/ zeigen hier vielversprechende Ergebnisse und sollen weiter ausgedehnt werden. Diese Arbeiten sind speziell für fortschrittliche Leichtwasserreaktoren wie den AP1000 von Interesse. Hier wird Dampf bzw. Zweiphasengemisch über die am Druckhalter angeschlossenen S/E-Ventile mittels eines Multilochspargers in das IRWST abgeblasen.

Berechnung der zeitabhängigen Wasserhöhe im Reaktorsumpf

Die Berechnung der zeitabhängigen Wasserhöhe im Reaktorgebäudesumpf ist z. B. für den Nachweis der Wirksamkeit der Not- und Nachkühlung bei Sumpfansaugung erforderlich. Grundsätzliche Anforderung an Systeme, die einen Beitrag zur Not- und Nachkühlung leisten, wurden bereits in Kapitel 2 diskutiert. Einschränkungen des hydraulischen Verhaltens infolge Luftmitriss lassen sich z. B. durch eine ausreichend hohe Wasserüberdeckung vermeiden. Dies erfordert die Bestimmung des Dampfgehaltes in der Containmentatmosphäre, der Benetzung der Containment-Oberfläche sowie Strukturen, des Wassertransportes sowie von Spritzwasser und Ansammlungen, welches verzögert in den Reaktorsumpf gelangt.

Auf das Thema Simulation von Wasserabscheidung und -transport im Containment wurde bereits ausführlich im Abschnitt großflächige Belastungen eingegangen. An dieser Stelle wird daher nur auf das Thema Modellierung luftziehender Wirbel mit CFD Codes eingegangen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens *Generische numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Mindestüberdeckung von Pumpenzuläufen zur Vermeidung von Luftmitriss* /PAP 13/ wurde ein Modell entwickelt, mit dem das Auftreten von luftziehenden Wirbeln sowie die Länge ihrer Luftschläuche berechnet werden kann. Hierzu werden Ergebnisse von CFD-Analysen außerhalb des Wirbelkerns kombiniert mit dem analytischen Modell von Burgers & Rott, mit dessen Hilfe die Tangentialgeschwindigkeit, Oberflächendeformation (sprich Trichterbildung) bestimmt werden kann. Eine vollumfängliche Behandlung dieser Thematik allein mit CFD Methoden ist derzeit (aufgrund der steilen Gradienten der Tangentialgeschwindigkeit im Wirbelkern) nicht möglich.

Wasserstoffkonzentrationen im Sicherheitsbehälter während des Betriebs und nach Kühlmittelverluststörfällen sowie bei Unfällen

Betrieb und KMV

Die SiAnf fordern den Nachweis, dass Wasserstoffkonzentrationen im Sicherheitsbehälter zu keinem Zeitpunkt des Betriebes sowie nach Kühlmittelverluststörfällen sowohl integral als auch lokal die Zündgrenzen von 4 % überschreitet. Hierbei sind folgende Wasserstoffquellen zu berücksichtigen: Radiolyse im Kern, im Sumpf und im Brennelementlagerbecken, sowie sämtliche Metall-Wasser-Reaktionen. Die SiAnf spezifiziert weitere für diesen Nachweis zu berücksichtigende Anfangs- und Randbedingungen. Allerdings führt die RSK zu dieser Thematik in ihrer 419. Sitzung /RSK 09/ aus, dass bei Störfällen nur geringe Mengen Wasserstoff freigesetzt werden und geht auf dieses Thema nicht weiter ein.

Unfälle

Das Nachweisziel bzgl. der Wasserstoffkonzentrationen im Sicherheitsbehälter ist, die Häufigkeit für das Containmentversagen durch Wasserstoffverbrennungsprozesse infolge von Kernschmelzunfällen deutlich zu verringern. Dieses Ziel ist nach Ansicht der RSK erreicht, sofern großräumige detonationsfähige Gasgemische sowie großräumige brennbare Gasgemische mit höheren Wasserstoffkonzentrationen, die infolge schneller Deflagration mit Flammbeschleunigung die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährden können /RSK 09/ vermieden werden. Dies soll u. a. dadurch sichergestellt werden, dass der sog. Adiabatic Isochoric Complete Combustion (AICC) Druck, der sich in einem abgeschlossenen Volumen durch vollständige Verbrennung bei einem adiabaten thermischen Prozess entstehen kann, unterhalb des Drucks bleiben soll, der zu einem Versagen des SHB führt. In der zuvor genannten Stellungnahme finden sich weitere Aussagen zu zahlreichen Aspekten dieser Thematik, u. a.

- zum Quellterm- und Freisetzungverhalten. H₂ entsteht
 - in-vessel bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen, wobei die transiente Überlagerung von Dampf- und H₂-Ausströmung wichtig ist,
 - ex-vessel nach Austritt der Schmelze in die Reaktorkaverne durch die Schmelze-Beton-Wechselwirkung, wo die Betonzusammensetzung die Anteile der freigesetzten, brennbaren Gase H₂ und CO wesentlich bestimmt.
- zu Zündgrenzen und Zündenergien,

- der Wirksamkeit von autokatalytischen Rekombinatoren sowie der Wirksamkeit von Katalysatorgiften (wie z. B. Spaltprodukte, Aerosole, gasförmige Verunreinigungen etc.)
- der experimentellen Absicherung des Zünd-, Verbrennungs- und Deflagrations- sowie des Rekombinatorverhaltens bei H₂-Reaktionen,
- zu Sprengstücken infolge der H₂-Verbrennung im SHB,
- dem Integritätsverhalten des SHB unter Einwirkungen von H₂-Verbrennungen/Detonationen sowie zur Grenztragfähigkeit.

Die RSK führt in ihrer Stellungnahme Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Rekombinatoren (419. Sitzung am 03.09.2009 /RSK 09/) aus, dass die Bewertung der Wirksamkeit der Rekombinatoren anhand von ausgewählten charakteristischen und rechnerisch analysierten Ereignisablaufsequenzen erfolgen sollte. Dieses Vorgehen sei erforderlich, da für eine Bewertung der Wirksamkeit der Rekombinatoren der transiente Verlauf der lokalen Containmentzustände (wie z. B. Dampfgehalt, Druck, Temperaturen) bekannt sein müsse. Bereits in ihrer 374. Sitzung hatte die RSK festgestellt, dass die für eine Festlegung von Anzahl und Position der Rekombinatoren benötigte Verteilung des Wasserstoffs durch numerische Berechnungen mit Lumped Parameter Codes (wie z. B. COCOSYS) hinreichend genau ermittelt werden könne und die Lumped-Parameter-Berechnungen durch Vergleich mit Rechnungen eines CFD-Codes abgesichert seien /RSK 04/. Die Auswahl der repräsentativen Ereignisablaufsequenzen sollte anhand der

- der Häufigkeit des angenommenen Ereignisablaufpfades,
- des Orts und des zeitlichen Verlaufs der H₂-Freisetzung,
- der Konvektionsbedingungen im Containment und
- der Containmentzustände (Kondensationspotential, Höhe des Dampfgehaltes)

erfolgen.

Die Auslegung des Rekombinatorsystems in deutschen DWR Anlagen basiert auf einer detaillierten Analyse der Rekombinatorwirksamkeit der Anlage GKN-2 für vier repräsentative Szenarien mit den Programmen RALOC/COCOSYS und GASFLOW, allerdings ohne die Simulation einer Verbrennung. Darüber hinaus hat die RSK das aus der Verbrennung der analytisch bestimmten Gasgemische resultierende Gefährdungspotential bewertet und kommt hierbei zu dem Schluss, dass lokale Verbrennungen mit H₂-Konzentrationen > 10 Vol. %, die gemäß Nachauswertung der Verteilungsrechnungen eines

großen Lecks auf lokale Bereiche innerhalb des Trümmerschutzzylinders (TSZ) sowie auf Teilvolumina oberhalb der Dampferzeugerdecken beschränkt bleiben, gemäß ingenieurtechnischer Abschätzungen auf Basis von Versuchsergebnissen bei Zündung zu keinen Druck-Zeitverläufen mit Lastniveaus führen, die die SHB-Integrität gefährden könnten.

Im Rahmen der Überprüfung von Severe Accident Management Guidance (SAMG) wurde untersucht, ob alle Aspekte von Wasserstoffreaktionen abdeckend berücksichtigt wurden. In der Schweiz wurde z. B. hierbei folgende Aspekte betrachtet:

- Simulation der Zündung von Wasserstoffgemischen mittels Modellen, bei denen die Wasserstoffgemische bei vordefinierten Konzentrationen zünden. Folglich erfolgt bei den Analysen eine Zündung immer bevor detonationsfähige Gemische erreicht werden können,
- Berücksichtigung des Phänomens der Flammbeschleunigung, wodurch eine Deflagration in eine Detonation übergehen kann,
- Berücksichtigung lokaler Wasserstoffkonzentrationen, deren Werte deutlich oberhalb der Werte liegen können, die sich bei einer globalen Vermischung einstellen können.

Für die jeweiligen Analysen wurde ein MELSIM/MELCOR Modell erstellt und entsprechend erweitert (z. B. um ein Deflagration-Detonationsmodell, siehe /NEA 00/). Mit dem erweiterten Code und einer feinen Nodalisierung des SHB wurden anschließend realistische Szenarien unter Berücksichtigung der relevanten Wechselwirkungen im SHB analysiert. In /ENS 15/ ist hierzu ausgeführt, dass der Vorteil der Berücksichtigung zeitabhängiger Prozesse wie die Containmentaufheizung, Transport von Wasserstoff, Kondensation, Containmentdruckentlastung berücksichtigt werden können und diese Vorteile den Nachteil überwiegen, dass keine detaillierten dreidimensionalen Simulationen von Wasserstofftransport- und -verteilung möglich sind. Anschließend wurden Kriterien wie Zündfähigkeit, Flammbeschleunigung und DDT innerhalb der Kontrollvolumina ausgewertet, ohne aber die Auswirkungen dieser Phänomene selbst zu berechnen.

Untersuchungen im Nachgang von Fukushima sind von der RSK auf ihrer 475. Sitzung diskutiert worden /RSK 15/. Dabei ist ein zusätzlicher Aspekt in den RSK-Empfehlungen zur Wasserstofffreisetzung /RSK 15/, dass lokal zündfähige Gemische auch in Venting-Leitungen und anderen Bereichen der Abluftsysteme entstehen können. Weiterhin sollte

auch die Möglichkeit beachtet werden, dass zündfähige Gemische über Auslegungslücken in sonstigen Räumen des Reaktorgebäudes entstehen können. Die RSK geht dabei davon aus, dass ein Versagen von Containment-Dichtungen aufgrund hoher lokaler Temperaturen nicht unterstellt werden müsse. Eine vertiefte Untersuchung dieser Effekte mit CFD-Methoden ist unseres Erachtens nur im Einzelfall sinnvoll.

Aus unserer Sicht gibt es zukünftig folgende Einsatzmöglichkeiten für CFD Codes in diesem Themenfeld: Gemäß den obigen Ausführungen spielen PARs sowie ihre Positionierungsstrategien in Sicherheitskonzepten zur Verhinderung gefährlicher H₂-Konzentrationen im Containment eine wesentliche Rolle für den Nachweis der Containmentintegrität für Unfallszenarien. Aktuell gibt es Forschungsvorhaben, die das PAR Verhalten bei weiteren Szenarien (u. a. dem Einfluss von Brandaerosolen auf das Startverhalten katalytischer Rekombinatoren) untersuchen. Des Weiteren gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten zu Verbrennungskriterien (Zündgrenzen, Sigma-Kriterium, Detonationskriterien, Auswertung des Adiabatic Isochoric Complete Combustion (AICC)-Drucks) u. a. /BRW 99/, /FRA 11/, /FRA 16/.

Diese Experimente sollen analytisch (z. B. sowohl durch Analysen mit Lumped-Parameter als auch CFD-Codes) begleitet werden. Sofern die Ergebnisse der Forschungsvorhaben bestehende Nachweise sowie deren Konservativität in Frage stellen, sollten die Lumped-Parameter als auch die CFD-Codes entsprechend erweitert und validiert werden und ggf. die der Nachweisführung zu Grunde liegenden Referenzszenarien neu analysiert werden.

Falls die Verbrennungskriterien eine turbulent beschleunigte Verbrennung (oder Detonation) nicht ausschließen können, bei der lokale Druckspitzen deutlich oberhalb des AICC-Drucks auftreten können, ist die Durchführung einer CFD-Verbrennungssimulation sinnvoll, um den lokalen, zeitabhängigen Druckverlauf zu berechnen.

Sofern die Analysen zur Rekombinatorwirksamkeit sowie der lokalen Containmentzustände zeigen, dass z. B. infolge einer schnellen turbulent beschleunigten Verbrennung oder gar Detonation höhere Kräfte bzw. ungünstigere zeitabhängige Druckverläufe auftreten als seinerzeit mittels der ingenieurtechnischen Abschätzung, die z. B. der RSK Bewertung zu Grunde liegt, auftreten, sollte eine Neubewertung der Nachweismethoden zur Containmentintegrität vorgenommen werden. Durch Kopplung von CFD- und CSM-Codes kann hierbei durch den multiphysikalischen Ansatz die Wechselwirkung zwischen

Fluid- und Struktur beschrieben und auf einen ingenieurmäßigen Ansatz verzichtet werden.

Sumpfverstopfung (einschließlich Wasserjets und den Transport von Fasern im Sumpf)

Für die sicherheitstechnische Bewertung der Freisetzung von Isoliermaterial bei einem Kühlmittelverluststörfall ist der übergeordnete Maßstab (gemäß der RSK Stellungnahmen der 374. /RSK 04/ und 406. Sitzung /RSK 08/) die Gewährleistung der Kernkühlung. Dies erfolgt u. a. mittels anlagenspezifischer Nachweise, dass

- die Menge des im Kern abgelagerten Isoliermaterials unterhalb der Menge bleibt, bei der eine Kernkühlung auftritt,
- der Lastabtrag der Sumpfsiebe aufgrund der durch Ablagerung von Isoliermaterial und anderen Stoffen entstehenden Druckdifferenzen sichergestellt ist.

Die Nachweisführung zu diesem Thema basiert im Wesentlichen auf experimentellen Erkenntnissen zur Freisetzung, zum Transport im Sicherheitsbehälter, im Sumpf sowie aus dem Sumpf in den Kern, zur Ablagerung an und Penetration durch die Sumpfsiebe, die Ablagerung im Kern etc. und gestatten derzeit keine durchgehend analytische Behandlung der Thematik. Derzeit vorliegende Erkenntnisunsicherheiten in einzelnen Aspekten sollten in Bezug auf ein abdeckendes Gesamtergebnis berücksichtigt werden. CFD Simulationen bieten hier die Möglichkeit, das Verständnis von relevanten Phänomenen sowie ihrer Einflussgrößen zu verbessern, Unsicherheiten bei den einzelnen Transportschritten abzubauen bzw. Konservativitäten zu bestimmen. Am Forschungszentrum Dresden Rossendorf /KRE 09/ wurden hierzu umfangreiche Arbeiten durchgeführt. Die Autoren weisen aber darauf hin, dass der Aufwand für derartige Simulationen sehr hoch sei und sich realistische Szenarien (wie z. B. der Rezirkulationsbetrieb, der sich über mehrere 1000 Sekunden erstreckt), derzeit nicht nachbilden lassen.

Nachfolgend wird kurz der Stand der Modellierung sowie potenzielle Einsatzmöglichkeiten zu einzelnen Aspekten der Nachweisführung (hier der Ablagerung sowie den Transportfaktoren im Containment) dargestellt. Der Vorteil des Einsatzes von CFD Methoden liegt hier in der adäquaten Berücksichtigung der komplexen Geometrie im Sumpf.

- *Standfestigkeit der Sumpfsiebe beim Blow-Down:* dieses Thema wurde bereits im letzten Absatz des Abschnitts zu den großflächigen Belastungen behandelt.

- *Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen sowie Transport im Containment:* dieses Thema wurde bereits im letzten Absatz des Abschnittes Strahlkräfte behandelt.
- *Transport im Sumpfwasser:* Die Simulation des Fasertransportes im Sumpf erfordert die Kenntnis des Strömungsfeldes im Sumpf. Dieses ergibt sich aus dem in den Sumpf eingetragenen Wassers (im abdeckenden Fall gelangt der Leckmassenstrom als sog. Jet in den Sumpf), sowie der Ansaugung durch die Not- und Nachkühlpumpen.
- In den Analysen wurde der Leckstrahl mit Modellen aus der Literatur berechnet und in den CFD Analysen als Randbedingung vorgegeben. Die Anwendbarkeit der Modelle für den Leckstrahl wurde anhand von Experimenten überprüft.

Der Fasertransport in der Wasservorlage wird mittels eines Euler/Euler-Ansatzes mit Wasser als kontinuierlicher und Fasern als disperser Phase beschrieben. Hierbei wurde der Strömungswiderstand der Faser im Wasser anhand von Experimenten justiert, wobei allerdings nur ein Größenspektrum der Partikel angenommen wurde. Mit diesem Ansatz konnte die Sedimentation quantitativ genau bestimmt werden. Des Weiteren wird das Agglomerations- und Resuspensionsverhalten der Mineralwollfasern über die Viskosität modelliert sowie der Ansatz validiert.

- *Druckverlust an den Sieben:* es wurde ein Sieb-Modell entwickelt und implementiert, das basierend auf der Darcy-Gleichung die Faser-Kompaktierung berücksichtigt. Die Modellparameter wurden anhand von Experimenten justiert.

Gemäß der Stellungnahme der RSK vom 13.03.2008 (406. Sitzung) wird der Druckverlust an den Sieben durch Korrosionsprodukte, die latent an Oberflächen von verzinkten ferritischen Strukturen vorhanden sind und über den Leckmassenstrom bzw. den Kondensatrücklauf aus dem Sicherheitsbehälter in den Reaktorsumpf gespült werden können, kommen. Die Einlagerung dieser Korrosionsprodukte in abgelagertem Isoliermaterial an den Sumpfsieben kann die Druckverluste an den Sumpfsieben frühzeitig erhöhen. Bei Bedarf ist das Filtermodell diesbezüglich entsprechend erweitert werden.

- *Penetration von Isoliermaterial durch die Siebe:* zieht man von der zu den Sieben transportierten Menge Isoliermaterial die auf den Sumpfsieben abgelagerte Menge ab, so erhält man direkt die penetrierte Menge Fasern.

- *Sedimentation von Isoliermaterial hinter den Sumpfsieben:* Im Rahmen der Nachweisführung wird abdeckend angesetzt, dass der Kerneintrag gleich der durch das Sumpfsieb penetrierten Fasermenge ist. Hierbei wird die Sedimentation hinter den Sumpfsieben konservativ vernachlässigt. Mittels CFD Analysen kann diese Sedimentation quantifiziert werden.

Auch bei SWR-Reaktorkonzepten können Isoliermaterialien Probleme verursachen, z. B., indem sie über die Kondensationsrohre oder Überströmrohre in die Kondensationskammer gelangen und dort die Siebe des Not- und Nachkühlens verstopfen. Insbesondere für SWR ist allerdings der Transport kleinerer Fragmente über die Notkühlkette in den Kern von weiterem Interesse. Die Ablagerung des Isoliermaterials im Kern, der hierdurch entstehende Druckverlust sowie der Einfluss chemischer Effekte (z. B. Zinkborat) verlässt den Betrachtungsbereich dieser Ausführung.

In Reaktion auf diese Probleme sind insbesondere in neueren Reaktorkonzepten Isoliermaterial z. B. für den RDB durch sogenannte Reflective Metal Insulation (RMI) ersetzt worden. Besteht diese aus Aluminium, ist jedoch zu beachten, dass dies in Unfallszenarien zu erhöhten (lokalen) Lasten durch Aluminium-Wasser-Explosionen führen kann.

4.2 Schmelzeinwirkungen

Der Nachweis der SHB-Integrität bei Unfallszenarien umfasst eine Reihe von Aspekten, die betrachtet werden können bzw. müssen. Da alle deutschen Kernkraftwerke genehmigt wurden, bevor das deutsche Regelwerk die Betrachtung der Resilienz gegen Kernschmelze außerhalb des RDB erforderte, sind diese Aspekte für deutsche Kernkraftwerke im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen durchgeführt worden. Entsprechende Leitlinien wurden vom BMU in 1997 erlassen /BMU 97/. Dabei ist die SHB-Integrität bei Unfallszenarien regelmäßig Gegenstand der verpflichtenden Level 2-PSA, entsprechende Anforderungen für deutsche Kernkraftwerke können /FAK 05/, /FAK 16/ entnommen werden. Zusätzliche Aspekte sind in dem Anforderungskatalog der RSK für die anlagenspezifische SÜ nach dem Unfall in Fukushima Daiichi /RSK 11a/ und ihrer Stellungnahme zu den Ergebnissen der RSK-SÜ /RSK 11b/ enthalten. Die Empfehlungen in SSR-2/1 /IAEA 16a/, SSG-4 /IAEA 10/, SSG-53 /IAEA 19/ sowie die WENRA reference levels /WEN 21a/ und Erwartungen an neue Reaktoren /RHWG 13/, /RHWG 19/ geben weitere Hinweise.

Die mit Unfallszenarien einhergehenden Herausforderungen durch Wasserstoff im Containment sowie Venting sind schon oben diskutiert worden. Es werden daher noch die folgenden Themen weiter betrachtet:

1. Schmelzeausbreitung, Schmelzeverhalten und Kühlbarkeit außerhalb des RDB sowie Core Catcher
2. Schmelzeeinwirkung auf Containmentstrukturen, insbesondere im Bereich von Durchdringungen.
3. Standsicherheit von SHB-Strukturen und strukturelles Versagen des SHB
4. Wärmeeintrag bei Hochdruckversagen des RDB (Direct Containment Heating)
5. RDB-Außenkühlung zur Schmelzerückhaltung (ex-vessel cooling in-vessel retention)

Aufgrund der besonderen Anforderungen bei Unfallfallszenarien, insbesondere Szenarien, die sich über Stunden oder Tage entwickeln, sowie Rückwirkungen aus verschiedenen Teilen der Gesamtanlage, ist unsere Einschätzung, dass Sicherheitsnachweise und Planung von Notfallmaßnahmen auch in der Zukunft wesentlich auf ingenieurtechnische Bewertungen und die bekannten Integral- und Systemcodes, wie z. B. AC², abgestützt sein werden. Gleichzeitig sind die Unsicherheiten für viele Unfallphänomene weiterhin groß und der experimentellen Untersuchung nur schwer zugänglich. Hier können CFD- und CSM-Methoden eine wichtige Rolle bei der weiteren Verbesserung und Validierung von Integral- und Systemcodes spielen. Zudem gibt es eine Reihe von Spezialfragen auf dem Gebiet der Unfallanalysen, bei denen Details in der Anlage, der Geometrie oder eine hohe räumliche Auflösung großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. In diesen Fällen können CFD-Analysen hilfreich sein, um Ergebnisse und Annahmen in Systemcodes abzusichern oder diese Frage überhaupt zu untersuchen. Für die Ableitung und Begründung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten für Phänomene oder Strukturversagen in einer PSA der Stufe 2 können CFD- und CSM-Anwendungen ebenfalls wertvolle Beiträge liefern. Bei der folgenden Diskussion der sechs Einzelthemen wird dies jeweils vorausgesetzt und Potenziale für eine CFD- bzw. CSM-Anwendung aufgezeigt.

1. Schmelzeausbreitung, Schmelzeverhalten und Kühlbarkeit sowie Core Catcher
Nach RDB-Versagen gelangen Schmelze bzw. (erstarrte) Schmelzepartikel in dem Raum unterhalb des RDB. Ist dieser trocken (viele SWR, DWR mit core catcher) breitet sich die Schmelze dort aus. Dieser Prozess ist für bestehende CFD-Codes grundsätzlich zugänglich, wobei hier z. T. Modelle zu industriellen

Prozessen (Stahlschmelzen) verwandt werden können. Relevante Fragestellungen können sein, welchen Einfluss geometrische Details und spezifische konstruktive Elemente auf die Schmelzeausbreitung bzw. Erstarrung derselben haben. Für ältere Anlagen kann es relevant sein, ob Schmelze Schwachstellen bzw. Durchdringungen des Containments erreichen kann und dort kurzfristiges SHB-Versagen auslöst. Für neuere Designs ist eine relevante Frage, ob das spezifische Design eines Core-Catchers (z. B. Auslegung des Schmelzstopfens, Geometrie) sicherstellt, dass ein Abfließen der Schmelze in den eigentlichen Core-Catcher und eine hinreichende Ausbreitung darin erreicht wird, so dass Kühlbarkeit gezeigt werden kann. Trifft die Schmelze auf Wasser (IVMR-Konzepte, einige Unfallszenarien) kommt es ggf. zur Fragmentierung eines Schmelzestrahls in viele Partikel (inkl. „Dampfexplosion“). Auch die Kühlbarkeit von Schüttbetten ist ein relevanter Untersuchungspunkt, wie auch die Wärmeabfuhr über eine von oben mit Wasser gekühlte Schmelzekruste.

Allerdings ist zu beachten, dass für diese Phänomene und Prozesse Spezialcodes entwickelt wurden, die auf CFD-Ansätzen beruhen. Zu nennen ist hier insbesondere das von IKE Stuttgart entwickelte COCOMO3D (früher MEWA). Eindrücke von der Leistungsfähigkeit bieten z. B. /YIL 16/ und /HUA 19/. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Implementierung für OpenFOAM nicht vordringlich.

2. Schmelzeeinwirkung auf Containmentstrukturen.

In der ex-vessel-Phase kommt es in der Regel zur Interaktion von Kernschmelze mit Strukturmaterialien. Für die Interaktion und Zerstörung von Beton (MCCI) führt /NEA 17/ aus, dass auf Grund der herausfordernden Multi-Phasen-Phänomene CFD-Programme mindestens mittelfristig keine relevante Option ist. Auch wenn sich Beispiele für erste CFD-Anwendungen finden lassen, und diese zur Absicherung von Einzelphänomenen sinnvoll sind, schließen wir uns der Einschätzung des NEA-Berichts an. Daneben kann sich – analog zum in-vessel-Fall – Schmelze auch in Wechselwirkung mit Stahlstrukturen befinden. Die Ablation und das Aufschmelzen dieser Strukturen in Kontakt mit (partiell) geschmolzenem Corium kann grundsätzlich mit CFD-Ansätzen untersucht werden. Insbesondere zur dafür relevanten Stratifizierung von corium-Pools (inkl. der Ausbildung von Krusten an Phasengrenzen und an Strukturen) werden zum Teil CFD-Anwendungen angewandt /IAEA 16b/. Insofern besteht hier ein Potenzial für CFD; für OpenFOAM-Entwicklungen wäre hierzu jedoch – auch wegen der Zugänglichkeit zu experimentellen Daten – ein internationaler Ansatz erforderlich. Sowohl bei Fraktionierung von Schmelze in Kontakt mit Wasser (oder bei Austritt

aus dem RDB unter hinreichendem Druck) sowie bei der Freisetzung von partikel-getragenen Radionukliden (letztlich auch Verbindungen volatiler Elemente wie CsI) kann ein weiträumiger Partikeltransport im Containment stattfinden. Aufgrund der gespeicherten Energie von Schmelzepartikeln und der transportierten Nachzerfallsleistungen können sich erhebliche lokale Wärmeeinträge in Containmentstrukturen ergeben, wenn sich diese Partikel ab- bzw. anlagern. Von besonderem Interesse sind hierbei Dichtungssysteme an SHB-Durchdringungen und -Öffnungen. Weiterhin können Partikel sich an internen Klappen oder Engstellen ablagern und diese verstopfen, was zum Versagen von Sicherheitsfunktionen im auslegungsüberschreitenden Bereich beitragen kann. Schließlich können lokale Wärmeeinträge auch zu Versagen von internen Strukturen (inkl. Liner) aufgrund thermischer Belastungen bzw. Thermospannungen führen. Zur Bestimmung von Ablagerungsmustern für bestimmte Szenarien sind Partikeltransportmodelle in CFD-Codes erfolgreich angewandt worden. Angesichts des Entwicklungsstands in OpenFOAM und des generischen Charakters dieser Modelle wird dies als potenziell erfolgversprechendes Entwicklungsthema im Unfallbereich gesehen.

3. Standsicherheit von SHB-Strukturen und strukturelles Versagen des SHB.
Schmelzeangriff auf SHB-Strukturen kann zur strukturellen Schwächung dieser Strukturen führen, ggf. bis ihre Grenztragfähigkeit überschritten ist. Dabei sind Schwächungen der Tragfähigkeit durch Erwärmung zu berücksichtigen. Struktureller Kollaps interner Containmentstrukturen (inklusive des RDB und seiner Tragstrukturen) kann zu großflächigen Schäden am SHB, bis hin zu einem großflächigen SHB-Versagen führen. Hier können im Einzelfall CSM-Anwendungen ingenieurtechnische Abschätzungen und Nachweise unterstützen. Eine hohe Priorität für OpenFOAM-Entwicklungen wird unsererseits nicht gesehen.
4. Wärmeeintrag bei Hochdruckversagen des RDB (Direct Containment Heating)
Bei Hochdruckversagen des RDB durch Kernschmelzeeinwirkung kommt es zur Freisetzung stark fragmentierter Schmelzepartikel in das Containment, die durch die starken Strömungen schnell und großflächig im SHB verteilt werden. Die große Oberfläche dieser Partikel bedingt einen starken Wärmeeintrag und ein darauf folgender Druckpuls kann die SHB-Integrität gefährden. Die Druckspitze hängt (je nach Design) von Details der Strömungskanäle, des Versagensortes und der Geometrie der Reaktorgrube ab. Hier können CFD-Methoden helfen, Annahmen in Systemcodes und Nachweisführungen abzusichern. Erste Ansätze sind z. T. 20 Jahre alt /MEY 04/. Aufgrund der Verwandtschaft zum o. g. Thema

Partikeltransport, bei dem im Wesentlichen die gleichen phänomenologischen Modelle benötigt werden, kann dies ein mittelfristiges Ziel für OF-Entwicklungen sein, auch wenn DCH-Fragestellungen derzeit von uns als von maximal mittlerer Priorität eingestuft werden.

5. RDB-Außenkühlung.

Für Fragestellungen der RDB-Außenkühlung zur Schmelzerückhaltung im RDB können CFD-Codes sinnvoll eingesetzt werden /IAEA 16b/. Dabei gibt es erhebliche Überschneidungen mit Fragestellungen bei CFD-Anwendungen im RDB. Typische Fragestellungen sind die Absicherung von Wärmeübergangskoeffizienten bei hohen Wärmeströmen und ein- und zweiphasigem Wärmeübergang in komplexen Geometrien (u. a. Isolation eines RDB). Da die Außenkühlung in der Regel auf freie Konvektion in komplexen Geometrien angewiesen ist, können sich ausbildende Strömungsformen und Druckverluste (sowohl ein- wie zweiphasig) mit Hilfe von CFD analysiert werden. Auch die Vorhersage von CHF (critical heat flux) unter den relevanten Wärmeströmen, Druck und Strömungsrandbedingungen kann mit CFD vertieft untersucht werden. Angesichts sehr ähnlicher Fragestellungen und Prioritäten für den Kühlkreislauf /PAP 21/ und der Relevanz von IVMR für moderne Reaktorkonzepte wird dies als auch kurzfristig wichtiger Anwendungsfall von OpenFOAM im Containment gesehen. Hierbei wird eine enge Abstimmung mit dem HZDR empfohlen, da für diese Fragestellungen der OpenFOAM_RCS-Solver eingesetzt werden sollte. Daher sollte die Entwicklung einer Kopplung zu OpenFOAM-Solvern für das Containment auf der strategischen Agenda des CFD-Verbunds stehen.

Für Fragestellungen im RDB zu Schmelzeverhalten, Ablation von Strukturen und thermischem und strukturellem Versagen gelten die Anmerkungen zu Punkt 2 analog.

4.3 Passive Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter

Speziell bei fortschrittlichen Reaktoren der Generationen III und III+ sowie auf der LWR Technologie basierenden SMRs werden passive Sicherheitssysteme zur Kühlung des Containments eingesetzt. Dies sind zum einen sog. Gebäudekondensatoren bzw. englisch Building Condenser (z. B. im AES2006, CAP1400 oder in den NuScale-SMR) oder Wasserpools, in denen SMR Containments partiell oder vollständig angeordnet sind.

Das Thema Belastungen für den SHB sowie betroffene Schutzziele wurden bereits weiter oben diskutiert. Diese Überlegungen sind sinngemäß auch für die passive Wärmeabfuhr aus dem SHB übertragbar. An dieser Stelle soll hingegen auf den Nachweis der Wirksamkeit der passiven Systeme sowie ihres Anlaufverhaltens eingegangen werden. Passive Systeme arbeiten i.d.R. mit kleinen treibenden Druckdifferenzen. Dies erfordert eine exakte Bestimmung der jeweiligen Randbedingungen, wobei lokale Effekte große Einflüsse besitzen können. Die Akkumulation von nichtkondensierbaren Gasen (z. B. an der Containmentwand oder an den Rohren der Gebäudekondensatoren) kann zu erheblichen Reduktionen der übertragenen Leistung führen.

Gebäudekondensatoren

Die Gebäudekondensatoren bestehen aus unterhalb der Containmentdecke angeordneten Wärmetauschern, die mit einem höher gelegenen Wasserpool über Rohrleitungen verbunden sind. Sofern Wasserdampf an die Außenseite der Gebäudekondensatorrohre gelangt, wird die bei der Kondensation freiwerdende Wärme an das Wasser innerhalb der Rohre übertragen. Das Wasser heizt sich auf, steigt nach oben und es etabliert sich in dem Gebäudekondensatorsystem ein Naturumlauf.

Die Bestimmung des Stör- und Unfallverhaltens der Gebäudekondensatoren erfordert die Kenntnis der Temperatur-, Druck- und Konzentrationsfelder innerhalb des Containments. Diese hängen u. a. von der Wasserdampfquelle (z. B. bei einem Station Black Out der Verdampfung eines Wasserpools innerhalb des SHB bzw. bei einem KMV vom Leckmassenstromes) ab. Der sich im Containment einstellende Druck ergibt sich aus der Bauform des Containments (DWR = Volldruckcontainment, SWR = Containment mit Dry- (Gasraum) und Wetwell (Kondensationskammer), vorhandenen Strömungswegen (inkl. Türen, Berstscheiben, Berstmembranen, Betonriegel, Überströmrohre etc.), dem Kondensationspotential an Strukturen (Containmentwände, baulichen Strukturen, Wärmetauscher des Nachwärmeabfuhrsystems etc.) sowie ggf. eingesprühtem Wasser (Sprühsysteme).

Folgende Phänomene sind u. a. für Störfälle folglich möglichst realistisch zu modellieren: Bei der Simulation der Konzentrationsfelder des Wasserdampfes sowie verschiedener Gase (z. B. Luft beim DWR oder N_2 infolge der Inertisierung von Containments bei SWR) erfolgt der Stofftransport durch freie Konvektion (globale Strömungsfelder). Diese werden überlagert von lokalen Effekten wie z. B. die Diffusion von Wasserdampf in der Nähe der Strukturen, an denen im Containment Kondensation stattfindet. Die zuvor

beschriebenen Effekte erfordern die Modellierung des Einflusses der Kondensatfilme und ob es sich um eine laminare, turbulente oder durch Interaktion von ablaufendem Wasserfilm und den Wärmetauscherrohren komplexe Strömungsform handelt (z. B. mit Hilfe von Wandfunktionen).

Die lokalen Phänomene bestimmen die Effektivität der Wärmeübertragung (hier speziell der Kondensation). Die Modellierung der Wandkondensation ist ebenso von zentraler Bedeutung, wie bei einem Einsatz von Spraysystemen die Volumen Kondensation. Hierzu zählen u. a. die Bildung von Wasserfilmen sowie das Abfließen des Wassers an den Strukturen in den Sumpf.

Bei der Modellierung des Wärmetransportes ist es erforderlich die Wand-Fluid, Film-Fluid sowie Fluid-Fluid Wärmeübertragungsmechanismen zu berücksichtigen. Dies beinhaltet sowohl den Wärmetransport bei Konvektion, Phasenübergang, infolge Strahlung sowie innerhalb von Strukturen. Da die Wechselwirkung mit den lokalen Strukturtemperaturen ggf. relevante Rückwirkung auf den Wärmeübergang hat, kann es notwendig werden gekoppelte Modelle zu Struktursimulation und CFD (Conjugate Heat Transfer) einzusetzen.

Infolge der Kondensation kommt es zu einer Veränderung (sprich Verringerung) des Dampfes an den Kondensationsflächen sowie der Ausbildung von dampfarmen Grenzschichten. Dies führt zu einem Absinken der Effektivität der Kondensation bis hin zu einem völligen Erliegen und bei Unfällen mit Freisetzung von H_2 und CO dann zu einem Anstieg des Containmentdrucks. Bei ausgewählten SWR-Designs sind daher im Bereich der Gebäudekondensatoren sog. H_2 -Überströmrohre vorgesehen, die in die Wasservorlage der Kondensationskammer (KOKA) eintauchen. Ist der Containmentdruck ausreichend groß, werden die nichtkondensierbaren Gase aus dem Bereich der Gebäudekondensatoren in die KOKA übergespült und die Gebäudekondensatoren gehen erneut in Betrieb.

Die Analysen eines Stör- und Unfallszenarios zu diesem Thema basieren im Wesentlichen auf diesbezüglich validierten Containmentcodes. In den letzten Jahren wurden zur Simulation von Stör- und Unfällen in Containments zahlreiche Modellerweiterungen und Validierungen vorgenommen (zu nennen sind hier vor allem die Arbeiten zum sog. ContainmentFOAM am Forschungszentrum Jülich). Prinzipiell kann man bei Verfügbarkeit entsprechender Rechnercluster auch Stör- bzw. Unfallszenarien im Containment

berechnen. Allerdings stellt sich hier die Frage, ob die hierfür notwendigen, nicht unerheblichen Aufwände gerechtfertigt sind.

CFD Simulationen bieten aber die Möglichkeit, das Verständnis von relevanten Phänomenen sowie ihrer Einflussgrößen weiter zu verbessern, entsprechende (größtenteils kleinskalige) Versuche zu begleiten, die Modellentwicklung für die Systemcodes zu unterstützen, Unsicherheiten bei der Modellierung einzelnen Phänomen abzubauen bzw. Konservativitäten zu bestimmen.

SMR Containmentkühlung

Bei verschiedenen SMRs bzw. in Planung befindlichen Konzepten ist das Ziel die Kühlung des Containments zeitlich unbefristet an eine unendliche Wärmesenke sicherzustellen. Hierzu gibt es im Prinzip 4 verschiedene Möglichkeiten:

- Das Containment befindet sich auf dem Grund des Ozeans in ca. 50 – 100 m Wassertiefe.
- Das Containment schwimmt im Wasser wie eine Art Bohrinsel.
- Das Containment ist partiell oder vollständig in einem Wasserpool angeordnet. Im Anforderungsfall verdampft der Wasserpool. Dieser ist so dimensioniert, dass nach der Verdampfung des Wassers, das Containment allein durch die Umgebungsluft gekühlt werden kann. Ein Beispiel hierfür ist der NuScale.
- Ähnlich zum vorherigen wird der Wasserpool hierbei über sog. (Loop-) Heatpipes gekühlt, so dass das Wasser nicht verdampft.

Der Wärmeübergang durch eine Containmentwand setzt sich aus drei Teilschritten zusammen. Dies sind der Wärmeübergang an der Containmentinnenseite, der Wärmeleitung in der Containmentwand sowie dem Wärmeübergang von der Containmentwand an die Umgebung (hier Luft oder Wasser). Der Wärmeübergang an der Innenseite der Containmentwand lässt sich mit den im Absatz Gebäudekondensatoren beschriebenen Modellen zur Simulation von Temperatur-, Druck- und Konzentrationsfelder beschreiben. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass bei SMRs deutlich höhere Containmentinnendrucke auftreten können. An der Außenseite wird die Wärme mittels freier Konvektion und ggf. unterkühltem oder gesättigten Sieden abgeführt. Die charakteristischen Längen sind jedoch sehr groß. Folglich liegen die Rayleigh-Zahlen, die sich bei der Wärmeabfuhr einstellen, außerhalb der Gültigkeitsbereiche der in der in Systemcodes verfügbaren entsprechenden Modelle und Korrelationen.

Bei den konvektiven Wärmeübergängen ist eine Erweiterung der Gültigkeitsbereiche der entsprechenden Korrelationen um ca. 4 Zehnerpotenzen erforderlich. Dies erfordert im Idealfall eine experimentelle Absicherung. Da derartige Experimente aufgrund der Dimensionen sehr teuer sind, können z. B. alternativ mittels CFD Analysen die Wärmeübergänge von der Containmentwand auf den Wasserpool zu bestimmt werden. Seitens der Universität Mailand wurden bereits CFD Analysen für unter Wasser liegende SMR Containments durchgeführt. Die Ergebnisse der CFD Analysen können anschließend mit den diesbezüglichen verglichen werden. Die Wärmeübergänge selber hängen wiederum von den lokalen Geschwindigkeiten sowie der Turbulenz in Wandnähe ab, die ebenfalls den CFD Analysen entnommen werden können.

4.4 Wärmeabfuhr aus Standortzwischenlagern sowie aus Castor-Behältern

Nachweisziele der sog. wärmetechnischen Berechnungen von Zwischenlagern (also sowohl dem Empfangs- als auch dem eigentlichen Lagerbereich) und hierin befindlichen Castoren ist die Einhaltung von Auslegungstemperaturen für die Hallenwände, die Decke sowie den Boden. Des Weiteren ist die Einhaltung zulässiger Temperaturen für den Behälterinhalt und die Behälterkomponenten aufzuzeigen.

Die Berechnung der Kühllufterwärmung erfordert eine dreidimensionale Betrachtung der Wärmezu- und abfuhr durch Konvektionsströmungen an der Bauteiloberfläche, des Strahlungsaustausches zwischen den Oberflächen der Behälter untereinander sowie den Oberflächen des Lagers sowie äußeren Bedingungen (z. B. Sonneneinstrahlung). Aufgrund der Komplexität der Strömung eignen sich hierfür u. a. CFD Programme. Hierbei sind für den Standort abdeckende äußere Bedingungen (Temperatur der Kühlluft, Einfluss des Windes auf die Abluft) zu berücksichtigen. Bei CFD-Analysen zu dieser Thematik sollten Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden z. B. zu Turbulenzmodellen, zum Wärmeübergang im Rippenbereich der Behälter, den Strömungswiderständen der Wetterschutzgitter, der Vogelschutzgitter sowie der Betonstützen sowie der Strömungswiderstände der Behälterrippen.

Mittels einer sog. wärmetechnischen Auslegung ist sicherzustellen, dass im Behälter maximal zulässige Temperaturen sowie in seinen Komponenten eingehalten werden. Insbesondere sind dies die Temperaturen der Brennstabhüllrohre, der Deckeldichtung sowie des Moderatormaterials.

CFD Analysen wurden bereits für derartige Fragestellungen eingesetzt /SSJ 14/. Angesichts der Aussagefähigkeit von CFD für einphasige Gasströmungen und der guten Voraussetzungen für ein schnell zu erstellendes und schnell rechnendes CFD-Modell sind sie auch in Zukunft gute Optionen. Es empfiehlt sich die Ergebnisse mittels Sensitivitätsanalysen abzusichern. In der Vergangenheit wurden oftmals die Behälterrippen nicht simuliert. In verschiedenen CFD Codes wurden zwischenzeitlich Erweiterungen zur Simulation der Behälterrippen implementiert.

Freisetzung von Brennstoff aus Transport- und Lagerbehältern bei SEWD

Bei der Beförderung von Kernbrennstoffen auf der Straße und der Schiene sind gemäß dem Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz Maßnahmen zum Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) zu treffen. Ein mögliches Szenario (der Hohlladungsbeschuss von Transport- und Lagerbehältern mit panzerbrechenden Waffen) wird in /OPJ 13/ und /BEO 20/ beschrieben. Bei dem Beschuss könne die metallische Behälterwand durchschlagen und der Brennstoff im Inneren zerstäubt werden. Der Beschuss bewirke weiterhin einen Druckaufbau im Inneren des Behälters. Dadurch könne eine beträchtliche Menge an radioaktivem Material in die Atmosphäre freigesetzt werden. Ziel der Analysen ist die Bestimmung der ausgetragenen Menge von radioaktivem Material sowie die Verteilung mit dem Leckstrahl als Basis für eine radiologische Bewertung.

Die Simulation des o. g. Szenarios erfordert Modelle zur Simulation von Freistrahlen, des Transportes von Partikeln verschiedener Größenklassen, wobei noch zu klären ist, inwieweit Wechselwirkungen zwischen dem ausströmenden Gas einerseits sowie Partikel untereinander andererseits zu berücksichtigen sind. Für derartige Fragestellungen wurden bereits zusammen mit einem kommerziellen Codeentwickler ein Simulations-Setup aufgesetzt. Eine Validierung steht allerdings noch aus. Die Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit geeigneter experimenteller Daten.

4.5 Brand

Innerhalb des Containments gibt es verschiedene brennbare Stoffe (z. B. Kabel, Flüssigkeiten, Gase etc.). Brände bewirken u. a. eine Temperaturentwicklung innerhalb und außerhalb des Brandraumes, Entwicklung und Ausbreitung von Rauchgasen, einen Druckaufbau, eine Freisetzung und Mobilisierung von Radioaktivität.

Bei Bränden wird zwischen Einwirkungen von Innen (EVI) oder von Außen (EVA) unterschieden. Gemäß SiAnf sind bauliche, anlagentechnische, betriebliche und abwehrende Brandschutzmaßnahmen gegen die Entstehung und Ausbreitung vorzusehen. Des Weiteren müssen sicherheitsrelevante Funktionen bautechnischer Anlagenteile gewährleistet sein und potentielle Aktivitätsfreisetzungen infolge anlageninterner Brände vermieden werden. Beispiele hierfür sind z. B. eine durch einen Brand verursachte Freisetzung von Radioaktivität der Ionenaustauscherharze der Kühlmittelreinigungsanlage, zugehöriger Harzabfallbehälter etc.

In Verbindung mit Flugzeugabstürzen sind Treibstoffbrände auf dem Anlagengelände, Brand oder Explosion von Treibstoff, der durch permanent vorhandene oder durch einen Absturz verursachte Öffnungen in Gebäude eingedrungen ist, ebenso zu vermeiden wie das Eindringen von Verbrennungsprodukten in Lüftungssysteme.

Das Thema Beeinflussung des Startverhaltens der PAR durch Brandaerosole hatten wir bereits im Abschnitt zu den Unfällen thematisiert.

Die Simulation von Brandszenarien in komplexen Gebäudestrukturen von Kernkraftwerken mittels CFD Methoden ist ein aktuelles Forschungsthema (z. B. in Deutschland bei der TU Magdeburg). Im Rahmen des *Vorhabens Modellierung von Brandszenarien in komplexen Gebäudestrukturen* (BMW RS1530) mittels fortgeschrittener strömungsdynamischer Methoden werden u. a. die Modellierung der Energie- und Impulsquellen (Brand), von Strömungen durch eine komplexe Geometrie, von Strömungen brandtypischer Heißgase, der Wärmeübertragung an die umschließenden Wände bearbeitet. Ausgehend von einfachen Geometrien, bei denen die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulationen noch gut nachvollziehbar und prüfbar sind, werden immer umfangreichere Simulationen (mehr Parameter, komplexere Geometrien) aufgesetzt. Besonders bei der Strömungsmodellierung sollen hierbei verschiedene Genauigkeitsstufen hinsichtlich des Gitters und der Turbulenzauflösung (RANS, LES) betrachtet werden. Es soll eine Möglichkeit geschaffen werden, den Transport aktivierter Materialien in der Rauchgasströmung zu simulieren. Der Rauch vermengt sich in der Atmosphäre immer mehr mit der Umgebungsluft (verdünnt) und kühlt ab. Hierdurch wandelt sich die aktive, temperaturgetriebene Ausbreitung zu einem passiven Transport, insbesondere der (aktivierten) Partikel, mit der Strömung in der atmosphärischen Grenzschicht.

Flugzeugabstürze auf Containments, eine hierbei möglicherweise auftretende Penetration des Containments sowie hierbei eindringendes Kerosin kann z. B. mit der

Smoothed-Particle-Hydrodynamics (SPH) Methodik bestimmt werden. Diese Methodik ist in verschiedenen HYDRO-Codes wie z. B. LS-DYNA, AUTODYN etc. enthalten. Sie wurde bei GRS exemplarisch im Rahmen der Begleitung der finnischen Aufprallversuche für die Bestimmung von Verformungen infolge flüssigkeitsgefüllter Projektilen sowie der Bestimmung des Flüssigkeitseintrages bei Perforation einer Stahlbetonplatte genutzt /HEC 20/. Die Defizite der SPH-Methodik sind, dass Phänomene wie Spraybildung oder Größenspektrum von Tröpfchen nicht erfasst werden.

Infolge des Flüssigkeitseintrages können sich innerhalb des Containments Kerosinlachen bilden und entzünden. Es gibt zahlreiche Publikationen zur Entwicklung, Validierung und Anwendung von CFD Modellen zu Lachen- bzw. Poolbränden in der konventionellen Technik. Diese können auch für die kerntechnischen Fragestellungen nutzen. Exemplarisch sei hier auf die diesbezüglichen Arbeiten der Universität Duisburg-Essen verwiesen (u. a. /CHH 07/, /KUC 08/, /SCA 10/).

Simulationen von Feuerbällen (z. B. beim Flugzeugabsturz) können mit dem CFD Programm FDS (Fire Dynamics Code) durchgeführt werden, der von der Homepage des National Institute of Standards and Technology (NIST) zusammen mit der Visualisierungssoftware Smokeview frei heruntergeladen werden kann. FDS prognostiziert Rauch und/oder Luftströmungen, die durch Feuer, Wind, Lüftungsanlagen usw. verursacht werden und wurde für zahlreiche konventionelle Fragestellungen wie z. B. der Aktivierung von Sprinkleranlagen bei Lagerhausbränden, Tunnelbränden, Wohnungsbränden sowie der Rauchausbreitung bei Bränden im Freien eingesetzt. Im Mai 2007 wurde ein Verifikations- und Validierungsbericht von FDS für Anwendungen in Kernkraftwerken veröffentlicht /NUR 07/. Eine exemplarische Anwendung seitens GRS für die Berechnung eines Feuerballs bei einem hypothetischen Flugzeugabsturz auf ein generisches KKW wurde in /LUW 09/ publiziert, Ergebnisse zu weiteren Szenarien finden sich z. B. in /FOR 18/.

4.6 Transport von Aerosolen und Spaltprodukten

Bei Unfallabläufen mit schweren Kernschäden in KKW werden neben großen Mengen an H_2 auch radioaktive Spaltprodukte und Strukturmaterialien freigesetzt, die als Aerosole in den Sicherheitsbehälter transportiert werden. Die Eigenschaften und das Verhalten dieser luftgetragenen Spaltprodukte können sowohl den Verlauf als auch die Schwere der Auswirkungen eines Reaktorunfalls signifikant beeinflussen.

Die Auslegung der SHB-Ventingsysteme geht auf die RSK-Empfehlungen der 218. Sitzung vom 17.12.1986 für DWR und der 222. Sitzung vom 24.06.1987 für SWR zurück /RSK 86/. Die Anforderungen an die Filterwirksamkeit wurden in der 253. RSK Sitzung am 30.05.1990 geregelt /RSK 90/ und die allgemeinen Anforderungen an die Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes dann in der RSK-Empfehlung der 273. RSK-Sitzung am 09.12.1992 verabschiedet /RSK 92/. Die RSK-Anforderungen verlangen, dass der Abscheidegrad der Filtersysteme für DWR und SWR mindestens 99,9 % für Aerosole und 90 % für molekulares Iod (I_2) beträgt. Für organisches Iod (CH_3I etc.) wurde kein Grenzwert festgelegt. Um die radiologischen Auswirkungen der Druckentlastung durch Venting abschätzen zu können ist eine Kenntnis der Aerosol- und Edelgasverteilung notwendig, um die ins Ventingsystem gelangten radioaktiven Stoffe berechnen zu können.

Die Modellierung von aerosolphysikalischen Vorgängen ist ein komplexes Themengebiet, bei dem sehr viele verschiedene Einzeleffekte für eine umfassende Simulation zu berücksichtigen sind.

Wichtige Phänomene sind:

- Spaltprodukte geben Wärme ab, welche die Thermohydraulik beeinflusst. Sie erhöhen die Gastemperatur, was wiederum einen Einfluss auf die Gasströmung und damit auf die lokale Gaszusammensetzung haben kann.
- Aerosolablagerung auf Strukturen durch unterschiedliche Mechanismen (Gravitation, Brownsche Diffusion, Thermo- und Diffusiophorese). Dies führt zu einer Erhöhung der Strukturtemperaturen. Dies ist bei der Nachweisführung zu Fragestellungen des Temperaturversagens zu berücksichtigen. Oberflächentemperaturen haben auch einen starken Einfluss auf Kondensationsvorgänge an der Wand und damit auch auf die Gaszusammensetzung.
- Kondensation von Wasserdampf an Aerosolpartikeln
- Viele Prozesse (z. B. Sedimentation) sind stark von der Partikelgröße abhängig. Daher ist die Agglomeration von Partikeln zu berücksichtigen, z. B. Brownsche Agglomeration, gravitationsbedingte und turbulente Agglomeration, die teilweise stark durch die lokalen Strömungsbedingungen beeinflusst wird.
- Im Fall von hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten (z. B. bei Verbrennungen) kann es zur Resuspension zuvor sedimentierter Aerosolpartikel kommen.
- Rückhaltung von Aerosolen in Wasservorlagen (Scrubbing beim Abblasen in KOKA)

- Gelangen radioaktive Spaltprodukte in den Sumpf (DWR), in die KOKA (SWR) oder andere Wasservorlagen, so kommt es zur Aufheizung des Wassers. Dies beeinflusst die Kondensation/Verdampfung an der Wasseroberfläche. Die Rückhaltung von zuvor in das Wasser eingetragenen Spaltprodukten wird damit maßgeblich beeinflusst und es kann zur Wiederfreisetzung von Aerosolen und Spaltprodukten in die Containmentatmosphäre kommen.

Neben der Freisetzung von radioaktiven Aerosolen ist auch die Nachzerfallsleistung von radioaktiven Edelgasen zu berücksichtigen.

Die oben genannten Phänomene haben eine sicherheitstechnische Bedeutung im Hinblick auf:

- Berechnung des globalen Drucks
- Entstehung von zündfähigen/detonativen Gemischen die zu einem Druckversagen aufgrund von Druckbelastungen durch Deflagrationen/Detonationen führen können
- Einhaltung der Auslegungsgrenzen für Temperaturen von Strukturen (z. B. Dichtungen, Liner)
- Aktivierung von AM-Maßnahmen, insbesondere die gefilterte Druckentlastung
- Öffnung von Türen oder Klappen (z. B. über den Dampferzeugertürmen), die im weiteren Verlauf des Unfalls unterschiedliche Transportpfade öffnen.

Zur Simulation des Aerosol- und Spaltproduktverhaltens werden bisher überwiegend Lumped Parameter Codes (z. B. COCOSYS) verwendet. Der Einsatz von CFD kann perspektivisch zur Verbesserung der Prognosefähigkeit bei der Berechnung der Aerosolverteilung eingesetzt werden, da bei vielen betrachteten Phänomenen lokale Strömungsbedingungen entscheidend sind. Radioaktive Spaltprodukte und Edelgase können über die Nachzerfallsleistung die Temperatur, Strömung und Gasverteilung beeinflussen. Daher müssen sie auch bei Untersuchungen zu anderen Fragestellungen (z. B. H₂-Verteilung, globaler Druck oder Temperaturversagen) berücksichtigt werden.

Neben dem Einfluss von radioaktiven Aerosolen und Edelgasen auf den Unfallablauf sind sie auch bei der Berechnung von radiologischen Auswirkungen, z. B. bei einer Leckage mit einer radioaktiven Freisetzung in die Umgebung, entscheidend.

5 **OpenFOAM-Arbeiten zu Containmentfragestellungen in Deutschland**

5.1 **Arbeiten zur Gasverteilung und zum Aerosoltransport**

- Am Forschungszentrum Jülich wird der OpenFOAM-Solver containmentFOAM entwickelt [KEL 21]. Mit containmentFOAM kann die Gasverteilung, der Druckaufbau und der Aerosoltransport im Containment berechnet werden. Ziel der Codeentwicklung ist es, alle wichtigen Modelle für Phänomene zu implementieren, die zur Simulation von Stör- und Unfällen mit Kühlmittelfreisetzung ins Containment benötigt werden. Dazu wurden/werden unter anderem Modelle zur Diffusion (effective binary diffusion), zur Turbulenz (k-w SST Model mit buoyancy terms, simple and generalized gradient diffusion hypothesis formulation), zur Wand- und Volumencondensation /KEL 20/, zur Nebelbildung, zur Wärmestrahlung (Monte-Carlo Modell mit unterschiedlichen Spektralmodellen und Mie-Streuung) und Aerosoltransport (Lagrangian particle tracking) in containmentFOAM implementiert. Ebenso wurden Modelle für eine Reihe von technischen Systemen entwickelt/implementiert (z. B. für PARs (REKODIREKT), für Türen und Berstscheiben (conditional mesh interfaces)). Ein Modell zur Simulation von Wärmetauschern ist geplant.
- Von der RWTH Aachen (Dr. Rohlfs) werden Experimente an der SETCOM-Versuchsanlage durchgeführt. Neben experimentellen Arbeiten wird die Wandkondensationsmodellierung weiterentwickelt. U. a. wird die Modellierung durch Wandfunktionen verbessert (statt eindimensionalen Wandfunktion, Beschreibung durch Radialbasisfunktionen, die weiteren Abhängigkeiten berücksichtigt). Die von der RWTH Aachen erzielten Ergebnisse fließen in die containmentFOAM Entwicklung ein.
- An der Universität der Bundeswehr München (Prof. Klein) wurde CFD-Modells zur Beschreibung des Ablaufverhaltens von Flüssigkeiten und dem resultierenden Abwaschverhalten von Spaltprodukten auf Oberflächen entwickelt. Abhängig vom Neigungswinkel der Oberfläche und vom Massenstrom der Flüssigkeit bilden sich unterschiedliche Strömungsmuster aus. Ein Modell für den Partikeltransport von unlöslichen Silberpartikeln aufgrund von gravitationsgetriebenem Wasser wurde implementiert anhand von Laborexperimenten von Becker Technologies validiert. Die Arbeiten wurden mit OpenFOAM, Version 2.3.0 und 2.4.0 durchgeführt.

- An der Universität der Bundeswehr München (Prof. Klein) wird zusammen mit dem FZ Jülich an der Methodik zur Quantifizierung der Fortpflanzung von aleatorische und epistemische Unsicherheiten in CFD Berechnungen geforscht. Zentrales Ziel der Methoden(weiter-)entwicklung besteht darin, den Rechenaufwand existierender Verfahren unter Berücksichtigung der Aussagekraft zu optimieren und somit CFD basierte Unsicherheitsanalysen praktisch anwendbar zu machen. Im Rahmen dieser Arbeiten werden LES und URANS-Simulationen der THAI Experiments TH-22 mit OpenFOAM (Solver "buoyantBoussinesqPimpleFoam" von OpenFOAM v1812) verwendet /WEN 21b/.
- An der TU Darmstadt (Apl. Prof. Jakirlic) wurden LES und auch URANS Simulationen des THAI-Experiments TH-26 mit OpenFOAM 2.2x durchgeführt /ROE 16/.
- Im Rahmen des Projekts VASIL der Ruhr Universität Bochum (Prof. Koch) sind CFD-Simulation zu helikalen Wärmeüberträgern geplant. Neben ANSYS CFX Simulationen sind optional auch OpenFOAM Rechnungen vorgesehen.

5.2 Arbeiten zur H₂/CO Verbrennung, zu DDT und Detonationen

- An der TUM (Prof. Sattelmayer) wurden OpenFOAM-Entwicklungen im Rahmen unterschiedlicher Projekte durchgeführt:
- Im Rahmen der Dissertation von F. Ettner /ETT 13/ wurde ein OpenFOAM Solver (ddtFOAM) zur Simulation von DDT (Deflagration-Detonation-Transition). In OpenFOAM wurde ein dichtebasierter Riemann-Solver implementiert. Zur Beschreibung der chemischen Reaktion wurde ein Deflagrationsmodell mit einem Selbstzündmodell gekoppelt. Die Deflagration wird mit dem Modell von Weller /WEL 93/ modelliert. Dabei wird die turbulente Brenngeschwindigkeit als Produkt aus laminarer Brenngeschwindigkeit und einem Flammenfaltungsfaktor aufgefasst. Das Selbstzündmodell basiert auf dem Transport eines fiktiven Radikals, das bei ausreichender Konzentration zur Selbstzündung führt.
- Dieser Solver wurde in einem Nachfolgeprojekt weiterentwickelt so dass auch die Simulation von großskaligen Versuchen (z. B. RUT-Anlage) praktikabel wird. Eine entscheidende Verbesserung in Bezug auf die Vorhersage der Flammenbeschleunigung wurde durch Modifikation des Original-Deflagrationsmodells nach Weller erzielt. Die Flammenfaltungskorrelation nach Dinkelacker /DIN 11/ et al. berücksichtigt dabei den u. U. starken Einfluss von Flammeninstabilitäten. Weiterhin wurde eine adaptive Netzverfeinerung implementiert. Die Technik

ermöglicht es, eine hohe räumliche Auflösung nur in solchen Bereichen zu wählen, in denen kleinskalige Phänomene bedeutend sind, während das Basisnetz vergleichsweise grob gewählt werden kann.

- Gegenwärtig wird ddtHyCoCentralFoam als Analysewerkzeug reaktorsicherheitsrelevanter Verbrennungsphänomene entwickelt. Ziel ist die Anwendbarkeit für alle reaktorsicherheitsrelevanten Verbrennungsregime, d. h. von den laminaren Prozessen direkt nach der Zündung über die langsame und schnelle Flamme bis hin zum Übergang zur Detonation.

Das numerische Verfahren von ddtFOAM soll dazu erweitert werden (Hybrid aus druckbasierter und dichte-basierte Methode), so dass der gesamte Bereich von langsamen Flammen bis zur Detonation mit einem einzigen Löser effizient berechnet werden kann. Weiterhin wird die Modellierung der langsamen Verbrennung verbessert wobei Erkenntnisse aus experimentellen und analytischen Arbeiten von Vorgängerprojekten /KAT 18/ genutzt werden. Weiterhin wird eine Erweiterung der Verbrennungsmodellierung für CO/H₂ Gemische durch Anpassung der Brenngesetze vorgenommen.

- In enger Abstimmung zu der OpenFOAM Entwicklung der TUM wird gegenwärtig an der Universität der Bundeswehr München (Prof. Klein) an der Modellierung von Stoß-Flamme Interaktionsvorgängen geforscht /BAM 20/. Ziel dieses Vorhabens ist die Erstellung eines Subgittermodells der Richtmyer-Meshkov Instabilität (RMI), welche maßgeblich zur Vorhersage der Flammenbeschleunigung und des sicherheitskritischen Deflagrations-Detonations-Übergangs beiträgt. Sie beschreibt die Auffaltung der Flammenoberfläche, welche bei der Interaktion einer Stoßwelle und einer Flamme auftritt.

5.3 OpenFOAM Arbeiten zu sonstigen containmentrelevanten Themen

- An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Dr. Zinke) werden mit OpenFOAM (fireFOAM) Brandsimulationen durchgeführt. Neben der Simulation von Brandszenarien in komplexen Gebäudestrukturen kerntechnischer Anlagen wird auch die möglicherweise anschließende atmosphärische Ausbreitung untersucht. Ziel ist eine Fehlerbetrachtung sowie Einfluss- und Toleranzanalyse für numerische Strömungssimulationen von Brandszenarien. Zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen werden die Strömungssimulationen mit Monte-Carlo-Rechnung. Ziel ist es eine Sensitivitätsanalyse der Eingangsdaten und eine

Wahrscheinlichkeitsmodellierung über Wahrscheinlichkeitsdistributionen durchführen zu können

- An der Ruhr-Universität Bochum (Prof. Koch) wird OpenFOAM (HAMMERFOAM) zur Modellierung von Druckstoßphänomenen eingesetzt. Dabei wird sowohl der einphasige Druckstoß (kein Kavitationseinfluss) modelliert als auch der zweiphasige Druckstoß. Desweiteren wird ein Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) Ansatz zur Analyse der qualitativen und quantitativen Einflüsse einer Strukturinteraktion auf den Druckstoß entwickelt.

6 Themen, Phänomene und ihre Priorisierung

Die folgende Tabelle zeigt eine Priorisierung von Themen und Phänomenen, für die aus Sicht der GRS OpenFOAM im Rahmen der nuklearen Sicherheitsforschung für den Containmentbereich von Leichtwasserreaktoren qualifiziert werden sollte. Für andere Anlagentypen müsste die Priorisierung entsprechend angepasst werden.

Tab. 6.1 Priorisierung von Themen und relevanten Phänomenen

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Turbulenter Wärme- und Stofftransport	Hoch		
Erzwungene Konvektion		Niedrig	Bereits in vielen CFD-Anwendungsgebieten umfangreich erforscht,
Misch- und freie Konvektion		Hoch	Dominante Strömungsform nach Blowdown, eng mit Turbulenzmodellierung verknüpft, Interaktion mit passiven Sicherheitssystemen
Mehrkomponentengasgemische / Stoffdaten		Niedrig	Weitgehend seit OpenFOAM-8 gelöst, Modellverbesserungen von unterschiedlichen Nutzern (FZJ, GRS) implementiert
Turbulenzmodellierung		Hoch	Bislang überwiegend standard-SST, Einschränkung aufgrund isotroper Modellierung, Modellverbesserung insbesondere zur besseren Abbildung freier und Mischkonvektion notwendig
Auftriebsturbulenz		Hoch	Bislang überwiegend auf Basis der Simple Gradient Diffusion Hypothese, Modellverbesserung notwendig
Wandfunktionen		Hoch	Modellverbesserung insbesondere im Hinblick auf Misch- und freie Konvektion notwendig
Bildung und Auflösung von Leichtgasschichten		Hoch	Relevant bzgl. H ₂ -Risiko, Effizienz von passiven Sicherheitssystemen, Rückkopplung mit Turbulenzmodellierung, Mehrkomponentengemische, Wärmestrahlung, Kondensation, kontinuierliche Validierung erforderlich

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Thermische Wärmestrahlung	Hoch	Hoch	In OpenFOAM-8 implementierte Modelle benötigen Modellverbesserungen, umfangreiche Arbeiten hierzu am FZ Jülich (containmentFOAM)
Wärmeaustausch Gas / Strukturen (CHT)	Hoch	Niedrig	multiRegionFramework vorhanden, Validierung hinsichtlich nicht-konformer Interfaces erforderlich, Modellverbesserung erfolgt über Wandfunktionen (siehe oben)
Wärmetransport innerhalb von Strukturen	Hoch	Niedrig	Vernetzungsrichtlinien für Strukturen erforderlich
Wandkondensation	Hoch		
Berechnung Kondensationsrate und des Wiederverdampfen von Kondensat		Hoch	In OpenFOAM-8 kein für Containment-Anwendungen geeignetes Modell vorhanden, Modellentwicklungen hierzu in verschiedenen Instituten (containmentFOAM (FZJ), GRS) die auf Transportansatz beruhen, Weiterentwicklung und Validierung notwendig, diese ist eng mit Weiterentwicklung der Wandfunktionen verknüpft
Bildung eines Wasserfilms, Abfließen des Kondensats		Mittel	containmentFOAM (FZJ): surfaceFilm Framework vorhanden, Test & Validierung, Modellverbesserung in Hinblick auf Rückkopplung mit anderen Modellen UniBW: Modellentwicklung zur Beschreibung des Ablaufverhaltens von Flüssigkeiten und zum Ablaufverhalten von Aerosolen (OpenFOAM 2.x)
Abwaschen von Spaltprodukten		Mittel	containmentFOAM: Kopplung mit Aerosolmodell mit surfaceFilm Framework erforderlich UniBW: Modellentwicklung vorhanden (s. o.)
Volumenkondensation	Mittel / Niedrig		
Berechnung der Kondensationsrate und des Verdampfens von Tröpfchen		Mittel	Modellentwicklung in OpenFOAM am FZJ (containmentFOAM) und GRS Umfangreiche Arbeiten hierzu auch am IKE Stuttgart (Implementation in CFX)

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Transport der Tröpfchen		Hoch	containmentFOAM: einphasiges Drift-Fluss Modell vorhanden Diverse Modellerweiterungen geplant / in Entwicklung Interaktion mit anderen Modellen (Aerosol, PAR, Wärmestrahlung)
Ablagerung der Tröpfchen		Mittel	containmentFOAM: Kopplung mit surfaceFilm Framework, Validierung erforderlich
Aerosole und Spaltprodukte	Mittel		
Transport, Ablagerung, Resuspension		Hoch	Modellierung und Validierung erforderlich Umfangreiche Arbeiten laufen hierzu am FZJ (containmentFOAM)
Modellierung der Nachzerfallswärme		Hoch	Modellierung und Validierung erforderlich
Behandlung von Edelgasen		Niedrig	Flexible Abbildung über Transportgleichung für passive Skalare Validierung erforderlich Modellierung der Nachzerfallsleistung notwendig
Pool Scrubbing (z. B. bei Abblasen in die KOKA)		Hoch	Kein Modell vorhanden
Technische Systeme			
PARs	Hoch	Mittel	Modellverbesserung / -erweiterung abhängig von PAR-Modell REKODIREKT(FZJ): Interaktion Nebel / Aerosoltransport GRS-Modell: zusätzlich Erweiterung auf Rekombination von H ₂ /CO-Gemische notwendig
Öffnen und Schließen von Strömungspfaden (z. B: Türen und Berstscheiben)	Hoch	Niedrig	containmentFOAM: Modell vorhanden, Validierung erforderlich
Berechnung von Widerstandsbeiwerten in Türen und Öffnungen	Mittel	Niedrig	Grundanwendung von CFD, reine Anwendungsaufgabe

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Sprühsysteme	Mittel	Hoch	Kein Modell vorhanden, Modellentwicklung und Validierung erforderlich
Gebäudekondensatoren	Mittel	Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich, Arbeiten hierzu am FZJ und der GRS
Passive Kühlung bei SMR Konzepten	Mittel / Niedrig	Mittel / Niedrig	Siehe Kondensationsmodellierung / Gebäudekondensator, Anwendungsspezifische Validierung erforderlich
Modellierung der Strömung am Leck	Mittel / Niedrig	Hoch	Zweiphasig, Flashverdampfung, Wechselwirkung mit Kühlkreislauf erforderlich
Modellierung von Reaktionskräften	Mittel	Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich, Kopplung CSM notwendig
Modellierung der dynamischen Aspekte bei Bruchstücken und schlagenden Leitungen	Mittel	Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich, Kopplung CSM notwendig
Modellierung der Isoliermaterialfreisetzung	Mittel	Mittel	Modellentwicklung und Vergleich mit vereinfachten Verfahren, Modellübertrag nach OpenFOAM notwendig und Validierung
Partikeltransport im Sumpf (Sump Clogging)	Mittel	Mittel	Modellentwicklung und Validierung (bereits umfangreiche Arbeiten hierzu am FZ Dresden-Rossendorf) Modellübertrag nach OpenFOAM und Validierung notwendig
Wasserpools			
Strömung und Temperaturverteilung in Wasserpools (passive Wärmeabfuhr, Containmentsumpf)	Mittel	Hoch	Simulation der Strömung und Temperaturverteilung in Wasserpools „Stand-Alone“ mit OpenFOAM-RCS möglich Kopplung mit „Referenzsolver Containment“ notwendig zur Simulation von z. B. Containmentsumpf während Gasverteilungssimulation Bei komplexen Geometrien / langen Transienten vermutlich Modellvereinfachungen notwendig, um Rechenzeit praktikabel zu halten

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Berechnung der zeitabhängigen Wasserstandshöhe	Mittel / Niedrig	Hoch	Modellierung und Validierung erforderlich (siehe oben)
Verdampfung, Sieden in Pools und Sumpfen	Mittel	Hoch	Modellierung und Validierung erforderlich (siehe oben)
H₂-Verbrennung			
Langsame und schnelle Flammenausbreitung, DDT, Detonation	Hoch	Hoch	Modellierung und Validierung erforderlich TU München entwickelt hierzu ddtHyCoCentralFoam als Analysewerkzeug für reaktorsicherheitsrelevante Verbrennungsphänomene, Zusammenarbeit mit UniBW
H ₂ /CO-Verbrennung	Mittel	Hoch	Modellerweiterung und Validierung erforderlich, hierzu Arbeiten im Rahmen von ddtHyCoCentralFoam Entwicklung
Kopplung CFD / CSM (Integrität von Strukturen bei schneller Verbrennung / Detonation)	Mittel	Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich Arbeiten hierzu bei der GRS
Brand	Mittel	Mittel	Arbeiten hierzu an der Universität Magdeburg, Validierung und möglicherweise auch Modellentwicklung notwendig, Kabelbrandprodukte relevant zur Bewertung der PAR-Wirksamkeit, Aerosoltransport bzw. Verbrennungslasten
Modellierung Schmelze	Mittel / Niedrig		Kein Modell vorhanden, grundlegende Modellentwicklung und Validierung erforderlich
RDB Außenkühlung		Hoch	Detaillierte Abbildung von Siedevorgängen erforderlich → Wechselwirkung mit OpenFOAM-RCS
Schmelzeeinwirkung auf Containmentstrukturen		Hoch	Kein Modell vorhanden, grundlegende Modellentwicklung und Validierung erforderlich
Modellierung Schmelzeausbreitung		Hoch	Kein Modell vorhanden, grundlegende Modellentwicklung und Validierung erforderlich

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
Dampfexplosion / Fuel-Coolant Interaction		Mittel / Hoch	Umfangreiche Arbeiten hierzu an der Univ. Stuttgart vorhanden, evtl. Anbindung / Übertrag an OpenFOAM (Abstimmung mit IKE empfohlen)
Wärmeabfuhr aus Zwischenlagern und Castor-Behältern	Niedrig	Niedrig	Validierung erforderlich, evtl. Wechselwirkung mit Turbulenzmodellierung / Schichtenbildung
Leck am Transportbehälter	Mittel / Niedrig	Mittel	Validierung notwendig, geeignete Versuche benötigt. Gegebenenfalls Modellanpassung / -erweiterung notwendig
Modellierung Gasphase (siehe Turbulenter Gastransport)			Modellentwicklung analog zu Strömung / Aerosoltransport im SB, anwendungsorientierte Validierung / Erprobung erforderlich
Partikeltransport, Wechselwirkung Gasphase / Partikel			Modellentwicklung analog zu Strömung / Aerosoltransport im SB, anwendungsorientierte Validierung / Erprobung erforderlich Gegebenenfalls ergibt sich aufgrund der hohen Partikelbeladung zusätzlicher Entwicklungsbedarf
Wechselwirkung Partikel / Partikel (Stöße, Änderung der Partikelklasse)			Modellentwicklung analog zu Strömung / Aerosoltransport im SB, anwendungsorientierte Validierung / Erprobung erforderlich Gegebenenfalls ergibt sich aufgrund der hohen Partikelbeladung zusätzlicher Entwicklungsbedarf
Bestimmung geeigneter Start und Randbedingungen (Temperatur, Anzahl und Größe der Partikel, ...)			Validierung notwendig, geeignete Versuche benötigt
Siedewasserreaktoren	Hoch	Hoch	Modellentwicklung analog zu Strömung / Aerosoltransport im SB Anwendungsorientierte Validierung / Erprobung erforderlich Modellierung von für SWR typischen Systemen (KOKA) notwendig
KOKA: Modellierung von Chugging		Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich, evtl. Modellierung mit OpenFOAM-RCS

Themen und relevante Phänomene	Sicherheitstechnische Relevanz	Bedarf für Modellentwicklung und Validierung	Anmerkung
KOKA: Modellierung von direct contact condensation		Hoch	Modellentwicklung und Validierung erforderlich, evtl. Modellierung mit OpenFOAM-RCS
LP-CFD Kopplung	Hoch		
Rückschlüsse Nodalisierung für LP		Hoch	Erste Ansätze aus C2C Projekt (COCOSYS-CFX) bzw. an der TUM vorhanden,
Absicherung empirische Parameter (Skalierbarkeit, Druckverluste, ...)			
Framework			
Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse	Hoch	Hoch	Grundlegende Arbeiten in UQ4CFD Projekt Generalisierung, Integration in Validierungsarbeiten und weitere Entwicklung hinsichtlich Rechenzeiteffizienz erforderlich
Pre-Processing	Mittel	Hoch	Erforderlich zur Vermeidung / Minimierung von Nutzerfehlern bzw. zur effizienten Nutzung des Programms containmentFOAM: Java-basiertes Framework in Entwicklung
Solverüberwachung	Hoch	Hoch	Erforderlich zur frühzeitigen Identifikation von potenziellen Fehlern in der Simulation bzw. Bewertung der Konvergenz der Simulation containmentFOAM: Java-basierter Monitor in Entwicklung
Post-Processing	Hoch	Niedrig	Umfangreiche Möglichkeiten mit paraView gegeben Zusammenstellen von gängigen functionObjects (z. B. Wandwärmebilanz) oder Auswertungsskripten (z. B. Massenbilanz, Zündfähigkeit etc.) sinnvoll

7 Literatur

- /AND 19/ Andreani, M., Gaikwad, A. J., Ganju, S., Gera, B., Grigoryev, S., Herranz, L. E., Huhtanen, R., Kale, V., Kanaev, A., Kapulla, R., Kelm, S., Kim, J., Nishimura, T., Paladino, D. et al.: Synthesis of a CFD benchmark exercise based on a test in the PANDA facility addressing the stratification erosion by a vertical jet in presence of a flow obstruction. Nuclear Engineering and Design, Bd. 354, S. 110177, DOI 10.1016/j.nucengdes.2019.110177, 2019.
- /BAM 20/ Bambauer, M., Hasslberger, J., Chakraborty, N. and Klein, M.: Vortex Dynamics and Fractal Structures in Reactive Richtmyer-Meshkov Instability, 13th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, 2020.
- /BEO 20/ Becker, O.: Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Zwischenlagern für hoch-radioaktive Abfälle, BUND, September 2020.
- /BMU 97/ Leitfäden zur Durchführung von Periodischen Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland as amended on Dezember 1996 (BAnz. 1997, Nr. 232a), last changed 18 August 1997.
- /BMUB 15/ Interpretationen zu den "Sicherheitsanforderungen an KKW vom 22. November 2012", geändert am 3. März 2015 as amended on 3 March 2015 (BAnz AT 30.03.2015 AB3).
- /BRW 99/ Breitung, W. et al.: State of the art report on Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety, 1999.
- /CHH 07/ Chun, H.: Experimentelle Untersuchungen und CFD-Simulationen von DTBP-Poolfeuern, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2007.
- /DIN 10/ Dinkelacker, F.; et al.: Modelling and Simulation of Lean Premixed Turbulent Methane/Hydrogen/Air Flames with an Effective Lewis Number Approach, Combustion and Flame, Volume 158, 2010.

- /ENS 15/ Eidgenössisches Nuklaersicherheitsinspektorat (ENSI), Stellungnahme zur Schlussbericht betreffend Verfügung zur Überprüfung der gefilterten Containmentdurckentlastung und des Schutzes gegen Wasserstoffverbrennungen bei schweren Unfällen, vom 9. Januar, 2015.
- /ETT 13/ Ettner, F. A.: Effiziente numerische Simulation des Deflagrations-Detonations-Übergangs. Dissertation, Technische Universität München (TUM): München, 2013.
- /FAK 05/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK): Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke. Schriften / Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-SCHR-37/05, 2005. ed., 310 p., ISBN 3-86509-414-7, Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss: Bremerhaven, 2005.
- /FAK 16/ Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke (FAK): Methoden und Daten zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke. Schriften / Bundesamt für Strahlenschutz, BfS-SCHR-61/16, 2015. ed., September 2016.
- /FOR 18/ Forell, B., Wenke, R.: Untersuchungen zur deterministischen Bewertung der Einwirkungen aus Gasfreisetzungen und chemischen Explosionen. GRS-, Vol. 490, No. 490, 87 p., ISBN 978-3-946607-75-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, November 2018.
- /FRA 11/ Friedrich, A. et al.: Kriterien für Flammenbeschleunigung und Detonationsübergang in Wasserstoff-Luft-Gemischen mit Konzentrationsgradienten und partiellem Einschluss, Abschlussbericht Pro-Science, 2011.
- /FRA 16/ Friedrich, A. et al.: Entwicklung von Kriterien für Flammenbeschleunigung und Detonationsübergang - Phase II: Untersuchungen für reaktor-nahe Bedingungen mit verschiedenen H₂-Anfangsverteilungen, Hinder-nisgeometrien und Zündorten, Abschlussbericht ProScience, 2016.

- /HEC 20/ Heckötter, C., Arndt, J., Sievers, J.: SimSEB – Methoden zur Simulation stoßbeanspruchter Stahlbetonstrukturen unter Berücksichtigung induzierter Erschütterungen, GRS - 583, September 2020.
- /HUA 19/ Huang, Z.: Numerical Investigations on Debris Bed Coolability and Mitigation Measures in Nordic Boiling Water Reactors. Dissertation, 87 p., KTH Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden, May 2019.
- /IAEA 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Development and application of level 2 probabilistic safety assessment for nuclear power plants. IAEA safety standards series, SSG-4, SSG-4, 86 S, ISBN 978-92-0-102210-3, May 2010.
- /IAEA 16a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements. IAEA safety standards series, SSR-2/1 (Rev. 1), 199 p., ISBN 978-92-0-109315-8, IAEA: Vienna, 2016.
- /IAEA 16b/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Ed.): In-vessel Melt Retention and Ex-vessel Corium Cooling, Summary of a Technical Meeting. Shanghai, 17 - 20 October 2016, IAEA-TECDOC-, Vol. 1906, ISBN 978-92-0-106320-5, IAEA, 2016.
- /IAEA 19/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Design of the Reactor Containment and Associated Systems for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide. IAEA safety standards series, SSG-53, 110 p., November 2019.
- /KAT 18/ Katzy, P., Sattelmayer, T.: Entwicklung und Validierung eines effizienten Modellierungskonzeptes für die Wasserstoffverbrennung mit hohem Luftüberschuss. Abschlussbericht 1501485, TU München, 2018.
- /KEL 20/ Kelm, S., et al.: Status of the tailored CFD solver “containmentFOAM” for the analysis of hydrogen mixing and mitigation. CFD4NRS conference paper, 2020.

- /KRE 09/ Krepper, E., Cartland-Glover, G., Grahn, A.: CFD Modellierung einer partikelbelasteten Kühlmittelströmung im Sumpf und einer Kondensationskammer, Bericht FZD-521, 2009.
- /KTA 17/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Ermittlung der Belastungen für die Auslegung des Volldrucksicherheitsbehälters gegen Störfälle innerhalb der Anlage. KTA 3413:2017-03, 2017.
- /KUC 08/ Kuhr, C.: CFD Simulation des dynamischen eigenschaften großer Kerosin- und Heptan-Poolflammen, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2008.
- /LEX 15/ Li, X., Lie, N., Zhang, M.: Dynamic Characteristics of the Steam Condensation due to a Multi-hole Sparger, International Journal for Nuclear Power 61 (2016), Issue 6.
- /LUW 09/ Luther, W., Müller, W. C.: FDS Simulation of the Fuel Fireball from a Hypothetical Commercial Airliner Crash on a Generic Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design 239 (2009).
- /MEY 04/ Meyer, L., Albrecht, G., Wilhelm, D.: Direct Containment Heating Investigations for European Pressurized Water Reactors. In: Atomic Energy Society of Japan (AESJ) (Ed.): 6. International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operations and Safety. NUTHOS-6, Nara, Japan, 4 - 8 October 2004, pp. N6P007, 2004.
- /NEA 00/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety, State of the Art Report, NEA/CSNI/R(2000)7.
- /NEA 13/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Updated Knowledge Base for Long-term Core Cooling Reliability. NEA/CSNI/R(2013)12, December 2013.
- /NEA 17/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): State-of-the-Art Report on Molten Corium Concrete Interaction and Ex-Vessel Molten Core Coolability. OECD/NEA: Paris, 2017.

- /NET 11/ Neuhaus, T.: Druckstöße – Phänomenologische Beschreibung. 1. Druckstoßseminar des Forschungsverbundes CIWA, Hamburg 24.02.2011.
- /NUR 07/ NUREG: Verification and Validation of selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator, NUREG-1824, May 2007.
- /NUR 84/ NUREG: Water sources for long-term recirculation cooling following a loss-of-coolant accident, Regulatory guide 1.82, 1984.
- /NUR 85/ Serkiz, W.: Containment Emergency Sump Performance, NUREG-0897, 1985.
- /OPJ 13/ openJur: Schleswig-Holsteinisches OVG, Urteil vom 16.06.2013, <https://openjur.de/u/634933.html> , zuletzt aufgerufen am 26.02.2021.
- /PAP 13/ Pandazis, P., Blömeling, F.: Generische numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Mindestüberdeckung von Pumpenzuläufen zur Vermeidung von Luftmitriss. GRS Seminar, 07.11.2013.
- /PAP 21/ Papukchiev, A. et al. Priorisierung von Entwicklungs- und Validierungsarbeiten an OpenFOAM für den Reaktorkühlkreislauf, technische Notiz TN-PAP-20-01, 2021.
- /POI 12/ Pointner, W., Bröcker, A.: Sicherstellung der Kernnotkühlung bei Kühlmittolverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (GRS), GRS-A-, No. 3643, 180 p., January 2012.
- /RHWG 13/ Reactor Harmonization Working Group (RHWG): Safety of new NPP designs, Study by Reactor Harmonization Working Group RHWG. Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), March 2013.
- /RHWG 19/ Reactor Harmonization Working Group (RHWG): Practical Elimination Applied to New NPP designs - Key Elements and Expectations, A RHWG report. 28 p., 17 September 2019.

- /ROE 16/ Röhrig, R., Jakirlic, S., and Tropea, C.: "Large eddy simulation of a light gas stratification break-up by an entraining turbulent fountain." Journal of Turbulence, 2016.
- /RSK 04/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Anforderungen an den Nachweis der Notkühlwirksamkeit bei Kühlmittelverluststörfällen mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen, Stellungnahme, 406. Sitzung, 22.07.2004.
- /RSK 08/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Kühlmittelverluststörfälle mit Freisetzung von Isoliermaterial und anderen Stoffen in Druckwasserreaktoren - Ablösung der Ablagerungen auf den Sumpfsieben, 406. Sitzung, 13.03.2008.
- /RSK 09/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Gefährdung des Sicherheitsbehälters von DWR durch Wasserstoffreaktionen infolge der Zünderwirkung von passiven autokatalytischen Rekombinatoren, 419. Sitzung, 03.09.2009.
- /RSK 11a/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Anforderungskatalog für anlagenbezogene Überprüfungen deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), (434. Sitzung der RSK am 30.3.2011). 2011.
- /RSK 11b/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), Stellungnahme vom 16.5.2011 (437. Sitzung). 2011.
- /RSK 15/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Wasserstofffreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter, RSK-Empfehlung (475. Sitzung der RSK am 15.4.2015). 2015.
- /RSK 86/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Überprüfung der Sicherheit der Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren der Bundesrepublik Deutschland, Ergebnisprotokoll der 218. RSK-Sitzung am 17.12.1986 und der 222. RSK-Sitzung vom 24.06.1987.

- /RSK 90/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Spezifikation für Filtersysteme in den Druckentlastungsstrecken des Sicherheitsbehälters von DWR und SWR, Anlage 1 des Ergebnisprotokolls der 253. RSK-Sitzung am 30.05.1990.
- /RSK 92/ Reaktorsicherheitskommission (RSK): Behandlung auslegungsüberschreitender Ereignisabläufe für die in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren, Positionspapier der RSK zum anlageninternen Notfallschutz im Verhältnis zum anlagenexternen Katastrophenschutz, 273. RSK-Sitzung am 09.12.1992.
- /SCA 10/ Schönbacher, A., Vela, I.: CFD-Simulation großer Poolfeuer, Bericht, Januar 2020
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Max_Buchner/2009+beendet/2761.pdf, zuletzt aufgerufen am 26.02.2021.
- /SIA 15/ Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 (SiAnf) as amended 3. März 2015 - Neufassung (BAnz AT 30.03.2015 B2).
- /SIE 13/ Sievers, J., Grebner, H., Bahr, L., Heckmann, K., Arndt, J., Pallas-Moner, G.:
 Simulation der Phänomene bei rissartigen Lecks und Brüchen in Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Kopplung, GRS-A-3718, November 2013.
- /SIE 14/ Sievers, J., Heckmann, K., Pallas-Moner, G., Lerchl, G.: Structural mechanical and thermal hydraulic aspects on the behaviour of crack like leaks in piping, Progress in Nuclear Energy 84 (2015), pp 18-23.
- /SSJ 14/ Stewering, J. Schwarz, S., Sonnenkalb, M.: Berechnung der Brennstabhüllrohrtemperaturen in einem generischen Transport- und Lagerbehälter, Technischer Bericht, GRS-A-3739, 2014.
- /TAV 15/ Tanskanen, V. et al. CFD Modelling of Chugging Condensation Regime of BWR Suppression Pool Experiments, NURTEH-16, Chicago, 2015.

- /WEL 93/ Weller, H.: The Development of a New Flame Area Combustion Model Using Conditional Averaging. Thermo–Fluids Section Report TF/9307, Imperial College London, 1993.
- /WEN 21a/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA): WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors 2020. 17 February 2021.
- /WEN 21b/ Wenig, P. J., et. al. „Towards Uncertainty Quantification of LES and URANS for the buoyancydriven mixing process between two miscible fluids – Differentially Heated Cavity of Aspect Ratio 4”, Fluids, 2021.
- /YIL 16/ Yilmaz, Ö., Pohlner, G., Buck, M., Starflinger, J.: Design Considerations for a Core-Catcher Concept Based on BottomFlooding through Porous Concrete. In: Korean Nuclear Society (KNS): 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-hydraulics, Operation and Safety, Proceedings. NUTHOS-11, Gyeongju, Korea, 9 - 13 October 2016, pp. N11P0246, 2016.