

**Weiterführende
Forschungsarbeiten zum
HD-Kernschmelzablauf
in einem DWR durch
Kopplung eines
CFD-Schleifenmodells
mit ATHLET-CD**

**Weiterführende
Forschungsarbeiten zum
HD-Kernschmelzablauf
in einem DWR durch
Kopplung eines
CFD-Schleifenmodells
mit ATHLET-CD**

Abschlussbericht

Joachim Herb
Hristo Hristov
Thomas Steinrötter

März 2023

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4719R01376 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 BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

AC², ATHLET-CD, CFD, COCOSYS, Hochdruck-Kernschmelze, Kopplung, OpenFOAM, SBO, Station Blackout, Unfallanalyse

Kurzfassung

Für Druckwasserreaktoren (DWR) mit stehenden U-Rohr-Dampferzeugern kann bei Hochdruck (HD)-Kernschmelzabläufen und durch Wasser isolierten Pumpenbögen eine freie Konvektionsströmung innerhalb der Dampferzeuger-Heizrohre mit einer gleichzeitigen geschichteten Gasgegenströmung in den heißen Strängen auftreten, die in ihrer Gesamtheit zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Heizrohre führt. Im BMUV-Vorläufervorhaben 3614R01307 wurde dieses Phänomen mit einem eigenständigen Modell des CFD-Programmes „Ansys CFX“ untersucht. Dort konnte das Phänomen für eine generische DWR-Referenzanlage anhand eines postulierten hypothetischen HD-Kernschmelzablaufes ausgehend vom einleitenden Ereignis Station-Blackout mit Ausfall der primärseitigen Druckentlastung, was für die DWR-Referenzanlage einen sehr unwahrscheinlichen Ereignisablauf darstellt, nachgewiesen werden. Ferner wurde die höhere thermische Belastung einiger Heizrohre quantifiziert.

Da das im Vorläufervorhaben entwickelte „Stand-alone“-Modell einige vereinfachende Annahmen sowohl bei der Modellierung als auch bei der Simulation aufwies, wird im Rahmen der hier dokumentierten Forschungsarbeiten, die im Rahmen des BMUV-Vorhabens 4719R01376 durchgeführt worden sind, das CFD-Modell erweitert und direkt mit dem „ATHLET-CD“-Teil des Anlagenmodells der DWR-Referenzanlage gekoppelt.

Das CFX-Modell des Vorläufervorhabens, das den interessierenden Teil des DH-Kühlmittelstranges (Oberes Plenum RDB, heißer Strang, Anschluss Volumenausgleichsleitung, Ein- und Austrittskammer Dampferzeuger, Heizrohre sowie ein Teil des kalten Stranges) darstellt, wurde in ein Modell für das CFD-Programm OpenFOAM überführt. Die wesentlichen Modellierungsmerkmale wurden dabei erhalten. Zusätzlich wurden Verbesserungen durchgeführt, die die Gitterqualität, die Darstellung des oberen Plenums, Modellierung der Trennwand zwischen Ein- und Austrittskammer sowie die Berücksichtigung der nicht-isobaren Rechnung betrafen.

Im zweiten Schritt wurde das eigenständige OpenFOAM-Modell mit ATHLET-CD erfolgreich gekoppelt. Dafür wurde für den interessierenden Zeitbereich des Unfallablaufes die „ATHLET-CD“-Modellierung des relevanten Bereiches des DH-Kühlmittelstranges durch das OpenFOAM-Rechengebiet ersetzt und anschließend der Unfallablauf transient mit der gekoppelten Version weitergerechnet (mehrere Ventilzyklen des DH-Abblaseventils).

Die gekoppelten Rechnungen zeigen qualitativ gleiche Ergebnisse zur freien Gasgegenströmung in den heißen Strängen und der freien Zirkulationsströmung in den Heizrohren. Des Weiteren konnten die thermische Mehrbelastung einzelner Heizrohre aus den Ergebnissen der gekoppelten Rechnungen dargestellt und quantifiziert werden. Diesbezüglich zeigen die Ergebnisse der gekoppelten Rechnungen im Vergleich zum Vorgängervorhaben etwas höhere maximale Gastemperaturen am Rohrbodeneintritt, die auch zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Heizrohrbereiche führen. Aus strukturel-mechanischer Sicht bedeuten diese Abweichungen aber keine größere Gefährdung als die bereits im Vorläufervorhaben abgeschätzte.

Die CFD-Untersuchungen zum Verhalten des DH-Kühlmittelstranges erlaubten auch eine Änderung der ATHLET-CD-Modellierung der heißen Stränge. Diese wurden in der geänderten Version jeweils durch drei parallele Thermofluid-Objekte modelliert (als geschichtete Modellierung bezeichnet). Mit dieser geänderten Modellierung der heißen Stränge konnte auch mit einem Systemcode die geschichtete Gasgegenströmung in den heißen Strängen und die Zirkulationsströmung in den Heizrohren dargestellt werden. Diese Darstellung war insbesondere durch die vorab durchgeführten CFD-Untersuchungen möglich. Damit konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Strömungsphänomene nicht nur auf den DH-Kühlmittelstrang begrenzt sind, sondern sich auch in den drei anderen Strängen einstellen. Allerdings sind dort die entstehenden Temperaturen der Gasströmung geringer.

Abstract

For pressurized water reactors (PWR) with vertical U-tube steam generators, a free convection flow can occur within the steam generator (SG) tubes with a simultaneous stratified gas counterflow in the hot legs during high-pressure (HP) core meltdown scenarios with water-insulated pump seals. These phenomena lead to a higher thermal load on individual SG tubes. In the previous BMUV project 3614R01307, these phenomena were examined with an independent model of the CFD program "Ansys CFX". There, the phenomena could be demonstrated for a generic PWR reference plant based for a postulated and hypothetical HP core degradation scenario starting from the initiating event station blackout (SBO) with the failure of primary side depressurization. That sequence depicts a very unlikely severe accident scenario for the PWR reference plant. Furthermore, the higher thermal load of some SG tubes was quantified also.

Since the "stand-alone" model developed in the previous project had some simplifying assumptions both in the modelling and in the simulation respectively, an optimization and extension of that CFD model was done in the frame of the BMUV research project 4719R01376 documented here. The modified CFD model will be also coupled directly with the "ATHLET-CD" part of the plant model of the PWR reference plant.

The CFX model of the previous project, which represents the relevant part of a pressurizer coolant loop of the PWR (upper plenum RPV, hot leg, surge line connection, steam generator inlet and outlet chamber, SG tubes and part of the cold leg), was converted into a model for the CFD program OpenFOAM. The essential modelling features were retained. In addition, improvements were made to the grid quality, the representation of the upper plenum, modelling of the partition wall between the inlet and outlet chambers and the consideration of the non-isobar calculation.

In the second step, the independent OpenFOAM model was successfully coupled with the ATHLET-CD part. For this purpose, the "ATHLET-CD" modelling of the relevant area of the pressurizer coolant loop was replaced by the OpenFOAM calculation area for the relevant point in time of the accident sequence and in the following the transient accident sequence was further calculated with the coupled version (several cycles of the pressurizer relief valve could be calculated with the coupled version).

The coupled calculations show qualitatively the same results for the free gas counterflow in the hot legs and the free circulation flow within the SG tubes. Furthermore, the additional thermal load of individual SG tubes could be shown and quantified from the results of the coupled calculations. In this regard, the results of the coupled calculations show slightly higher maximum gas temperatures at the SG tube inlet plate compared to the previous project, which also lead to a higher thermal load on individual SG tube areas. From a structural-mechanical point of view, however, these deviations do not mean a greater hazard than that already estimated in the previous project.

The CFD investigations on the behaviour of the pressurizer coolant loop also allowed a change in the ATHLET-CD modelling of the hot legs. In the modified version, these were each modelled by three parallel thermal fluid objects (referred to as layered modelling). With this modified modelling of the hot legs, the stratified gas counterflow in the hot legs as well as the circulation flow in the SG tubes could also be simulated with a “lumped parameter” system code. This representation was made possible by the CFD investigations carried out in advance. Thus, it could be shown that the flow phenomena investigated in that project are not only limited to the pressurizer coolant loop, but also occur in the three other loops. However, the resulting temperatures of the gas flow are lower there.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract.....	III
1	Einleitung	1
2	Aktualisierung des Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)	3
3	Vorbereitung des ATHLET-CD-Eingabedatensatzes für die Kopplung mit dem CFD-Rechengebiet (AP 2)	5
3.1	Entwicklung eines „Stand-alone“ ATHLET-Eingabedatensatzes für den heißen Strang und den Dampferzeuger	6
3.2	Entwicklung eines AC ² -Eingabedatensatzes für die ersten gekoppelten Simulationen mit AC ² -OpenFOAM	8
3.3	Vereinfachung des AC ² -Eingabedatensatzes der DWR- Referenzanlage durch Anwendung des CONDRU-Moduls für den Reaktorsicherheitsbehälter	10
3.4	Erweiterung von AC ² -Eingabedatensatzes für die Kopplung: Modellierung von Bypässen im RDB-Bereich	13
3.5	ATHLET-CD-Eingabedatensatz mit geschichteter Nodalisierung der heißen Stränge.....	15
3.5.1	Entwicklung des quasi-dreidimensionalen ATHLET-CD- Eingabedatensatzes.....	15
3.5.2	Numerische Vorhersage des thermohydraulischen Verhaltens des Primärkreislaufs bei Unfallbedingungen mit dem quasi- dreidimensionalen ATHLET-CD-Eingabedatensatz	18
4	Vorbereitung des CFD-Modells des DH-Kühlmittelstranges der Referenzanlage für die Kopplung mit ATHLET-CD	31
4.1	„Stand-alone“-Modell für OpenFOAM	31
4.1.1	Beschreibung des OpenFOAM-Modells.....	31
4.1.2	Vergleichsrechnungen zur Validierung	52
4.2	Erweiterungen im OpenFOAM-Modell	56

4.3	CFD-seitigen Vorbereitungen für die Kopplung	57
4.3.1	Vorbereitung des OpenFOAM Datensatzes für die Kopplung.....	57
4.3.2	Vorbereitung des OpenFOAM-Solvers für die Kopplung	59
5	Umsetzung der Kopplung von ATHLET-CD mit dem OpenFOAM- Modell und Durchführung der gekoppelten Analysen.....	65
5.1	Vorbereitung der gekoppelten Rechnungen	65
5.1.1	„Stand-alone“-Simulation von AC ²	65
5.1.2	„Stand-alone“-Simulation von OpenFOAM	67
5.1.3	Start der gekoppelten „OpenFOAM-AC ² “-Simulation	68
5.2	Analysen der Ergebnisse der gekoppelten Simulationen.....	70
5.2.1	OpenFOAM mit ATHLET-CD-CONDRU	70
5.2.2	OpenFOAM mit AC ² mit einfacher Modellierung der heißen Stränge	85
5.2.3	Zusammenfassende Bewertung der gekoppelten Analysen	88
6	Bewertung der Analyseergebnisse	95
7	Zusammenfassung	97
	Literaturverzeichnis	101
	Abkürzungen	103
	Abbildungsverzeichnis.....	105
	Tabellenverzeichnis	111

1 **Einleitung**

Für Druckwasserreaktoren mit stehenden U-Rohr-Dampferzeugern kann bei Hochdruck(HD)-Kernschmelzabläufen und durch Wasser isolierten Pumpenbögen eine freie Konvektionsströmung innerhalb der Dampferzeuger-Heizrohre mit einer gleichzeitigen geschichteten Gasgegenströmung im heißen Strang auftreten, die in ihrer Gesamtheit zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Heizrohre führen kann. Im BMU-Vorläufervorhaben 3614R01307 (im Folgenden vereinfachend Vorläufervorhaben genannt) wurde dieses Phänomen mit einem eigenständigen (Stand-alone) CFD-Modell für Teile des Druckhalter-Kühlmittelstranges untersucht, das für das Programm „Ansys CFX“ umgesetzt wurde. Dort konnte das Phänomen für eine generische DWR-Referenzanlage anhand eines postulierten, hypothetischen HD-Kernschmelzablaufes ausgehend vom einleitenden Ereignis „Station-Blackout (SBO)“ mit Ausfall der primärseitigen Druckentlastung nachgewiesen werden. Dieses Unfallszenario stellt zwar für die DWR-Referenzanlage einen sehr unwahrscheinlichen Unfallablauf dar, wobei aber die Fragestellung eines möglichen, thermisch induzierten DE-Heizrohrversagens für die PSA der Stufe 2 eine sehr relevante Fragestellung darstellt. Ferner konnte die höhere thermische Belastung einiger Heizrohre quantifiziert werden /BAN 17/.

Da im Vorläufervorhaben für das mit „Ansys CFX“ entwickelte „Stand-alone“-Modell einige Ergebnisunsicherheiten durch vereinfachende Annahmen sowohl bei der Modellierung als auch bei der Simulation identifiziert wurden, wird im Rahmen der hier dokumentierten Forschungsarbeiten, die im Rahmen des BMUV-Vorhabens 4719R01376 durchgeführt worden sind, das CFD-Modell erweitert und direkt mit dem „ATHLET-CD“-Teil des Anlagenmodells der DWR-Referenzanlage gekoppelt. Dadurch sollen eine noch realistischere Simulation sowie die im Vorläufervorhaben identifizierten Ergebnisunsicherheiten vermieden werden, die in der Übertragung der Daten für die Anfangs- und Randbedingungen aus dem Systemcode AC² in das alleinstehende CFX-Modell, der vereinfachten Modellierung des oberen Plenums des Reaktordruckbehälters, der Nichtberücksichtigung der restlichen drei Kühlmittelstränge sowie der isobaren Behandlung des Problems zu sehen sind.

Zur Durchführung der Forschungsarbeiten wird zuerst das CFD-Modell des Vorgängervorhabens mit dem CFD-Programm OpenFOAM realisiert und weiter optimiert. Der Wechsel von „Ansys CFX“ nach OpenFOAM wird durchgeführt, da die Kopplung von ATHLET-CD mit OpenFOAM einfacher zu realisieren ist. Anschließend erfolgt die Vor-

bereitung des AC²-Eingabedatensatzes für die Kopplung mit dem OpenFOAM-Rechengebiet. Des Weiteren sind Arbeiten am OpenFOAM-Modell notwendig, um dieses mit ATHLET-CD koppeln zu können und damit den im CFD-Modell dargestellten Bereich des Druckhalter-Kühlmittelstranges in der ATHLET-CD-Modellierung zu ersetzen.

Die gekoppelten Rechnungen sollen die im Vorläufervorhaben erkannten und oben genannten Unsicherheiten vermeiden. Mit dieser verbesserten Modellierung soll eine realistischere, dreidimensionale Analyse der o. g. HD-Kernschmelzsequenz unter Berücksichtigung des Phänomens der freien Zirkulationsströmung in den DE-Heizrohren erreicht werden. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des Vorläufervorhabens vergleichend bewertet und die Quantifizierung der maximalen thermischen Belastung der Heizrohre unter Berücksichtigung der Rückwirkungen durch die Kopplung durchgeführt.

Kapitel 0 gibt eine Zusammenfassung des Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) zu diesem Themenbereich. Dieser wurde während der Projektzeit weiterverfolgt. Anschließend werden die am „ATHLET-CD“-Datensatz durchgeführten Arbeiten, die zur Vorbereitung der gekoppelten Rechnungen notwendig sind, in Kapitel 0 diskutiert. In Kapitel 4 wird zum einen das isolierte OpenFOAM-Modell des DH-Kühlmittelstranges diskutiert (Kapitel 4.1). Die Ergebnisse der „Stand-alone“-Version werden aufgezeigt und mit den Ergebnissen der CFX-Version des Vorläufervorhabens verglichen. Zum anderen werden in Kapitel 4.2 notwendige Erweiterungen des OpenFOAM-Modells diskutiert und die CFD-seitigen Vorbereitungen für die Kopplung in Kapitel 4.3 beschrieben. Die Umsetzung der Kopplung sowie die Ergebnisse der gekoppelten Rechnungen werden in Kapitel 5 gezeigt. Die zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse aus den gekoppelten Rechnungen erfolgt in Kapitel 6.

2 Aktualisierung des Standes von Wissenschaft und Technik (AP 1)

Das Phänomen der Zirkulationsströmung in den Heizrohren wurde im Wesentlichen durch Arbeiten der U. S. NRC für Druckwasserreaktoren amerikanischer Bauart untersucht. Ziel dieser Studien war die Risikoabschätzung eines Sicherheitsbehälterversagens aufgrund eines Bypasses, der durch hohen Primärkreisdruck bzw. thermisch induziertes Heizrohrversagen hervorgerufen wird. Eine aktualisierte Zusammenfassung der amerikanischen Arbeiten und Neubewertung der Problematik des thermisch induzierten Heizrohrversagens durch eine freie Zirkulationsströmung ist in /SAL 16/ zu finden. Dort wird auf Ergebnisse von Thermohydraulik-Analysen mit SCDAP/RELAP5, MELCOR und CFD eingegangen, die für die Baureihen Westinghouse und Combustion Engineering durchgeführt wurden. Wesentlich abweichende Ergebnisse von den älteren Untersuchungen sind nicht zu finden.

Basierend auf den genannten amerikanischen Untersuchungen wurden im Vorläufervorhaben 3614R01307 die Problematiken Zirkulationsströmung innerhalb des Dampferzeugers und daraus ggf. folgendes thermisch induziertes Heizrohrversagen für einen generischen deutschen Druckwasserreaktor untersucht. Das Ziel war es zu zeigen, ob eine derartige Zirkulationsströmung auch für die DWR-Referenzanlage berechnet wird und wie hoch dabei die maximale thermische Heizrohrbelastung ist.

Allen bisherigen Untersuchungen gemeinsam ist, dass das Verhalten des DH-Kühlmitelstranges mit einem „Stand-alone“-Model eines CFD-Programms analysiert wurde. Die Randbedingungen für die CFD-Analysen wurden dabei im Vorfeld in der Regel mit Hilfe von „Lumped-Parameter“-Programmen zur Berechnung von Stör- und Unfallabläufen bereitgestellt. Arbeiten zur Untersuchung der Problematik der freien Zirkulationsströmung im Dampferzeuger während eines HD-Kernschmelzablaufes unter Verwendung einer Kopplung von CFD-Modellen mit „Lumped Parameter“-Systemprogrammen waren zu Beginn des Vorhabens nicht bekannt.

Im Laufe des Vorhabens wurde die Entwicklung des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) verfolgt. Weder neuere analytische und/oder experimentelle Untersuchungen konnten gefunden werden.

Spezielle Arbeiten zu einer Kopplung von drei-dimensionalen Ansätzen mit so genannten „Lumped-Parameter“-Codes, wie sie in Rahmen des Vorhabens erarbeitet werden

soll, konnten während der Projektlaufzeit sowohl in der nationalen und internationalen Fachwelt ebenfalls nicht gefunden werden. Damit stellt der in diesem Vorhaben verfolgte Ansatz eine neue Methodik zur Untersuchung des oben genannten Anlagenverhaltens eines DWR während eines HD-Kernschmelzunfalles bzw. der oben genannten Strömungsphänomene dar.

3 Vorbereitung des ATHLET-CD-Eingabedatensatzes für die Kopplung mit dem CFD-Rechengebiet (AP 2)

Das AC²-Anlagenmodell für die DWR-Referenzanlage wurde im Rahmen des Arbeitspakets AP 2 für die Kopplung mit dem CFD-Rechengebiet, das einen Teil des Druckhalter (DH)-Kühlmittelstranges der Referenzanlage (oberes Plenum RDB, heißer Strang, Stutzen Volumenausgleichsleitung (VAL), Ein- und Austrittskammer Dampferzeuger (DE), DE-Heizrohre sowie Teil des kalten Stranges am Austritt des Dampferzeugers) abbildet, vorbereitet.

Ausgangspunkt der Datensatzweiterentwicklung für die Kopplung war der zum Projektstart vorhandene AC²-Datensatz der Referenzanlage. Dieser Datensatz wurde schrittweise für die Kopplung mit OpenFOAM weiterentwickelt. Zudem waren Rechnungen mit dem Datensatz ohne Verwendung der Kopplung notwendig, z. B. für die Bestimmung der Randbedingungen zum Startzeitpunkt der gekoppelten Rechnungen oder der Ermittlung von Parametern des CFD-Modells. Deshalb wurden in diesem Projekt Simulationen ausschließlich mit AC² bzw. ATHLET-CD und dem Modul CONDRU durchgeführt. Diese Rechnungen ohne eine Kopplung zu OpenFOAM werden im Folgenden als „Stand-alone“-Simulationen bezeichnet.

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführten Arbeiten wurden stark von den Ergebnissen der eigenständigen CFD-Simulationen und der gekoppelten Rechnungen beeinflusst, die in den beiden folgenden Kapiteln diskutiert werden.

In der Anfangsphase des Projekts konnten gekoppelte Simulationen aufgrund von noch zu implementierenden Anpassungen bei der AC²-internen Kopplung zwischen den Modulen ATHLET-CD und COCOSYS nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus hatten die Zwischenergebnisse der gekoppelten Berechnungen, vor allem in Bezug auf die numerische Stabilität, auch Einfluss auf die durchgeführten Entwicklungen und Verbesserungen der AC²-Eingabedatensätze.

Für das Projektziel, eine AC²-OpenFOAM-Simulation des HD-Kernschmelzunfallszenarios durchzuführen, waren verschiedene Anpassungen des AC²-Datensatzes notwendig, die iterativ durch die folgenden Schritte, die in der angegebenen chronologischen Reihenfolge angegeben sind, durchgeführt wurden:

- Entwicklung eines „Stand-alone“ ATHLET-Eingabedatensatzes für den heißen Strang und den Dampferzeuger des Primärkreises zur Kalibrierung von Parametern des CFD-Modells der U-Rohre.
- Entwicklung eines AC²-Eingabedatensatzes für die ersten gekoppelten Simulationen mit AC²-OpenFOAM.
- Vereinfachung des AC²-Eingabedatensatzes der DWR-Referenzanlage durch Anwendung des CONDRU-Moduls für den Reaktorsicherheitsbehälter (Ersatz des detaillierten COCOSYS-Sicherheitsbehältermodells durch ein sehr einfaches CONDRU-Sicherheitsbehältermodell).
- Erweiterung von AC²-Eingabedatensatzes für die Kopplung: Modellierung von Bypassen im RDB-Bereich.
- ATHLET-CD-Eingabedatensatz mit geschichteter Nodalisierung der heißen Stränge.

Die oben genannten Schritte zur Erreichung des ursprünglich gesetzten Projektziels werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.1 Entwicklung eines „Stand-alone“ ATHLET-Eingabedatensatzes für den heißen Strang und den Dampferzeuger

Ein vereinfachter „Stand-alone“ ATHLET- Eingabedatensatz wurde für die Kalibrierung des Modells des porösen Mediums entwickelt, das für die CFD-Region der U-Rohre des Dampferzeugers angewendet wird. Innerhalb dieser CFD-Region wird, wie später erläutert, das Darcy-Forchheimer-Modell zur Modellierung der Druckverluste des Dampferzeugers verwendet. Die Ergebnisse der ATHLET-Simulationen mit diesem vereinfachten „Stand-alone“-Modell wurden zur Kalibrierung dieses Darcy-Forchheimer-Modellparameters verwendet.

Der ATHLET-Eingabedatensatz beinhaltet die relevanten Teile des DH-Kühlmittelstrangs und besteht aus dem heißen Strang, dem Dampferzeuger und einem Abschnitt des kalten Stranges am Ausgang des Dampferzeugers, der den gesamten CFD-Bereich widerspiegelt (Abb. 3.1 und Abb. 4.1 im nächsten Kapitel). Zusätzlich wurde ein sogenanntes FILL-Objekt (Einspeisung) am Anfang des heißen Strangs angebracht, um die Strömungsbedingungen für die Simulationen festzulegen. Am Ende des kalten Stranges

wurde ein TDV (Time Dependent Volume) verwendet, um die Druckrandbedingung festzulegen. Die TFOs (Thermo Fluid Object) des Eingabedatensatzes der „Stand-alone“-Version wurden aus dem ursprünglichen Eingabedatensatz der DWR-Referenzanlage übernommen. Abb. 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des „Stand-alone“-Eingabedatensatzes.

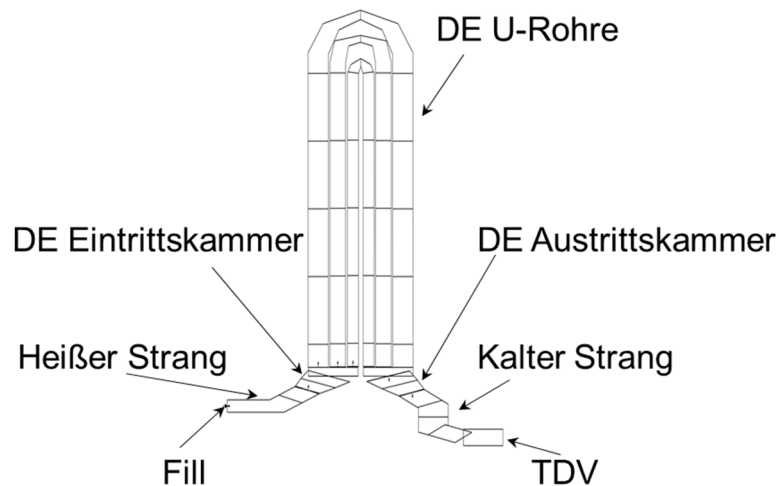


Abb. 3.1 Nodalisierung des ATHLET-Eingabedatensatzes in der „Stand-alone“-Version mit ATHLET

Die Randbedingungen für die Simulationen mit dem vereinfachten „Stand-alone“-Eingabedatensatz wurden aus der mit dem ursprünglichen Eingabedatensatz durchgeführten Simulation extrahiert. Für die Kalibrierung der Region des porösen Mediums wurden zwei Strömungsbedingungen berücksichtigt:

- im Normalbetrieb, bei dem in dem DH-Kühlmittelstrang Wasser das strömende Fluid bei annähernd nominalen Reaktorbetriebsbedingungen des Leistungsbetriebes ist, sowie
- bei Störfallbedingungen, bei denen in dem DH-Kühlmittelstrang Wasserdampf das strömende Medium ist. Diese entsprechen dem Testfall 1 des vorherigen Projekts /BAN 17/.

Die Wärmeübertragung zwischen der Eintritts- und Austrittskammer des Dampferzeugers durch die Trennwand wurde zusätzlich in der vereinfachten „Stand-alone“-Version des ATHLET-Eingabedatensatzes berücksichtigt und später in alle weiter verwendeten Eingabedatensätze übertragen. Dieser Wärmeübergang wurde in den GRS-Simulatoren

der Kernkraftwerke bisher nicht modelliert, da aufgrund der ein-dimensionalen Simulation der Kühlmittelstränge kein Effekt auf das Strömungsverhalten zu erwarten war. Bei einer (quasi)-dreidimensionalen Simulation kann die Wärmeübertragung an der Trennwand insbesondere unter Naturumlaufbedingungen einen Einfluss auf die Strömung im Primärkreislauf haben. Wie die später beschriebenen CFD-Berechnungen, bei denen die Kammer-Trennwand explizit modelliert wird, zeigen, verstärkt die Wärmesenke in der Eintrittskammer an der Trennwand die Rückströmung und damit die Zirkulation im heißen Strang.

3.2 Entwicklung eines AC²-Eingabedatensatzes für die ersten gekoppelten Simulationen mit AC²-OpenFOAM

Der ursprüngliche AC²-Eingabedatensatz der DWR-Referenzanlage wurde für die Zwecke der gekoppelten AC²-OpenFOAM-Simulationen modifiziert. Im Rahmen dieses ersten Ansatzes wurden sechs Kopplungsschnittstellen in den ATHLET-CD-Eingabedatensatz eingefügt. Fünf Kopplungsschnittstellen, für welche die Geschwindigkeit von ATHLET an den CFD-Solver *chtMultiRegionFoamCoupled* geliefert wird, und umkehrt der CFD-Solver die Drücke berechnet. An einer weiteren Kopplungsschnittstelle berechnet ATHLET den Druck und der CFD-Solver die Geschwindigkeit. Die fünf erstgenannten Kopplungsschnittstellen umfassen den Kernaustritt bzw. den Eintritt in das obere Plenum, die heißen Stränge der Stränge 2, 3 und 4 kurz nach den RDB-Stützen (0,243 m innerhalb der heißen Stränge) und im kalten Strang von Strang 1 am Austritt des Dampferzeugers am Anfang des Pumpenbogens (3,12 m Entfernung vom Dampferzeugerstützen) (Abb. 3.2). Die zweitgenannte Kopplungsschnittstelle befindet sich in der Volumenausgleichsleitung (4,115 m von deren Anschluss an den heißen Strang 1) (Abb. 3.2). Im oberen Teil des ATHLET-CD-Modells für den RDB wurden Vereinfachungen vorgenommen. Dies beinhalteten den Einbau von Ventilen in die Bypässe zwischen dem RDB-Ringraum (Downcomer) und dem RDB-Deckel und Downcomer und dem heißen Strang 1. Während der gekoppelten Rechnungen werden die Ventile geschlossen. In Abb. 3.2 sind die Kopplungsschnittstellen rot eingekreist, und das CFD-Rechengebiet ist in blau dargestellt. Zwei der vier Kühlkreisläufe sind in Abb. 3.2 der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Diese wurden äquivalent zu dem auf der linken Seite abgebildeten Strang modelliert.

Die Bereiche des ATHLET-Rechengebiets, die vom CFD-Solver berechnet werden, werden in den gekoppelten Simulationen durch Verwendung von „REDEFINE“ im ATHLET-

Modell quasi eingefroren. Ohne diese Maßnahme würde ATHLET diese Bereiche auch in der gekoppelten Simulation berechnen, obwohl die so ermittelten Werte an den Kopp-
lungsschnittstellen überschrieben werden und die ATHLET-Ergebnisse in diesem Be-
reich keine Auswirkung auf das restliche ATHLET-Rechengebiet haben. Allerdings kann
dieser Bereich trotzdem Auswirkungen auf die Numerik von ATHLET haben, (z. B. auf
den gewählten Zeitschritt) und somit die gesamte Simulation ungünstig beeinflussen.

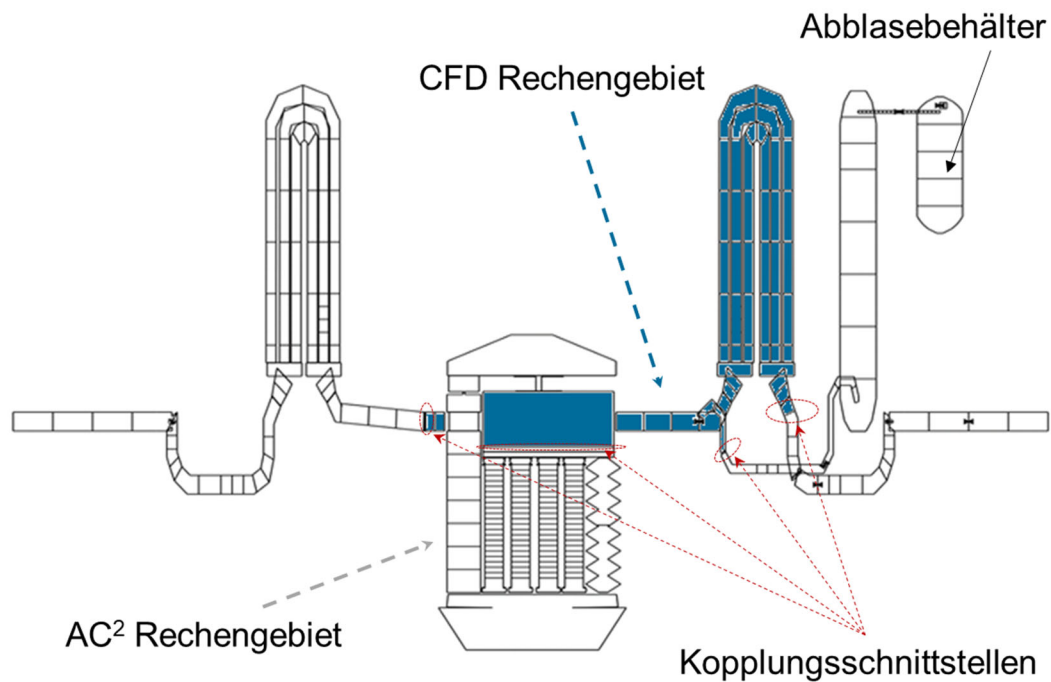


Abb. 3.2 AC² thermohydraulisches Modell der DWR-Referenzanlage

Erste gekoppelte Simulationen mit dieser Konfiguration in AC² (ATHLET-CD + COCO-
SYS) waren nicht erfolgreich. Notwendige Anpassungen am Kopplungsverfahren zwi-
schen AC² und OpenFOAM in Bezug auf COCOSYS, zusammen mit numerischen Sta-
bilitätsproblemen wurden als Grund für die zunächst erfolglosen gekoppelten
Simulationen in diesem Stadium identifiziert. Daher wurde ein vereinfachter Modellie-
rungsansatz in Betracht gezogen, bei dem die detaillierte COCOSYS-Modellierung des
Sicherheitsbehälters erst einmal durch CONDRU ersetzt wurde. Dieses ist ein Plugin
von ATHLET und erlaubt eine sehr einfache Darstellung des Sicherheitsbehälters.

3.3 Vereinfachung des AC²-Eingabedatensatzes der DWR-Referenzanlage durch Anwendung des CONDRU-Moduls für den Reaktorsicherheitsbehälter

Als eine alternative Modellierung, die Komplikationen bei den ersten Kopplungsversuchen vermeiden und die numerische Stabilität der Simulationen gewährleisten soll, wurde die Modellierung des Sicherheitsbehälters mit Hilfe des CONDRU-Moduls durchgeführt. Der COCOSYS GCSM-Block (General Control Simulation Module) des „ATHLET-CD“-Eingabedatensatzes wurde durch einen CONDRU-Block ersetzt. Es wurden zusätzliche Prozesssignale für den Druck, die Temperatur, die Borkonzentration usw. im Sicherheitsbehälter eingeführt. Die Namen der Temperatursignale der Wärmestrukturen des Primärkreislaufs, die für die thermische Kopplung zwischen ATHLET-CD und dem verwendeten COCOSYS-Modell verwendet werden, sind in der Modellierung mit dem CONDRU Modul die gleichen. Dadurch war eine einfache Übertragung zwischen den Eingabedecks mit CONDRU und COCOSYS möglich, ohne die Wärmestrukturen aufwendig manipulieren oder korrigieren zu müssen. Da die Modellierung des Sicherheitsbehälters mit COCOSYS im Vergleich zu CONDRU sehr detailliert ist, werden für den Datenaustausch zwischen ATHLET-CD und COCOSYS wesentlich mehr Temperatursignale benötigt als bei der Modellierung mit ATHLET-CD-CONDURU (im Folgenden auch ACD-C genannt), da für jede COCOSYS Zone ein eigenes Signal benötigt wird. In CONDRU werden lediglich zwei Zonen simuliert, während der Sicherheitsbehälter in COCOSYS deutlich detaillierter mit einer größeren Anzahl an Zonen simuliert wird. Die Signale, die mit den Temperaturwerten aus den COCOSYS Zonen gekoppelt waren, wurden mit den entsprechenden Temperaturen der CONDRU Zonen gekoppelt, wobei dann mehrere Signale denselben Temperaturwert übermitteln. Dieses Vorgehen gestaltete sich einfacher, als sämtliche COCOSYS-Temperatursignale zu ersetzen.

Zusätzliche Änderungen waren für die Modellierung des DH-Abblasebehälters erforderlich, der im Falle von AC² in COCOSYS modelliert und berechnet wird, im Falle von ACD-C dagegen in ATHLET-CD. Die Nodalisierung des Primärkreises (siehe Abb. 3.2, die zwei nicht abgebildeten Stränge wurden wie die links dargestellten nodalisiert) ist für beide Modelle gleich, mit dem Unterschied, dass im Falle von AC² der DH-Abblasebehälter nur ein TDV zur Datenübergabe an COCOSYS darstellt, während er im Falle von ATHLET-CD mit CONDRU ein TFO ist.

Ein Vergleich des Drucks im Primärkreis der beiden „Stand-alone“-Rechnungen (mit AC² bzw. ACD-C) ist in Abb. 3.3 dargestellt. In den ersten 5.000 s wurde eine Einschwingrechnung (stationäre Phase) durchgeführt. Zum Zeitpunkt 5.000 s wurde die Transiente gestartet. Qualitativ ist der Druckverlauf in den beiden Simulationen sehr ähnlich. Im Zeitintervall zwischen 5.000 s und ca. 9.000 s (0 s bis 4.000 s transiente Zeit) kann für die Simulation mit ACD-C ein leicht niedriger Druck beobachtet werden. Der Grund dafür liegt in der vereinfachten Simulation des Sicherheitsbehälters. In der ACD-C Simulation besteht dieser im Wesentlichen aus zwei Zonen, in denen die über die Rohre und Wände des Primärkreises abgestrahlte Energie verteilt werden kann, während in der AC² Simulation diese Energie nur auf die jeweils eine Rohrwand umschließende Zone übertragen werden kann. Diese Zonen werden dann stärker aufgeheizt, so dass die Temperaturdifferenz zwischen Primärkreis und Sicherheitsbehälterzone kleiner ist und somit weniger Energie in die Umgebung abgegeben werden kann. Entsprechend wird der Primärkreis weniger gekühlt, was zu dem leicht höheren Druck führt.

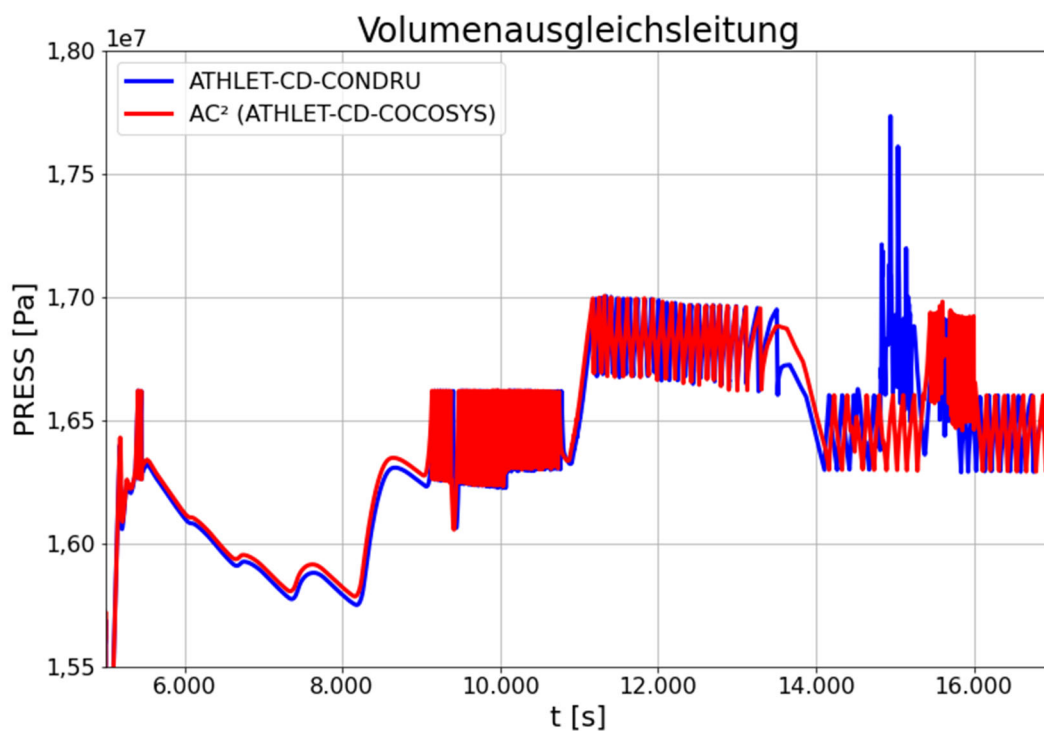


Abb. 3.3 Primärkreisdruck in den „Stand-alone“-Simulationen mit AC² und ACD-C

In der Zeit zwischen ca. 9.000 s und 11.000 s (4.000 s bis 6.000 s transiente Zeit) kommt es zu einem wiederkehrenden Öffnen und Schließen des Druckhalterabblaseventils, danach zwischen ca. 11.000 s und 13.500 s zu einem zusätzlichen wiederkehrenden Öffnen und Schließen der DH-Sicherheitsventile. Ab ca. 14.000 s reicht zunächst wieder

das Abblaseventil aus, um den Druck des Primärkreises im vorgegebenen Bereich zu halten. Dieses Verhalten wird von beiden „Stand-alone“-Simulationen nahezu gleich berechnet.

Ab ca. 14.500 s ist in Abb. 3.3 für ca. 500 s ein unterschiedliches Verhalten zu beobachten. In der ACD-C-Simulation kommt es zu einem deutlichen Druckanstieg, der im Gegensatz zur AC²-Simulation durch eine stärkere Oxidation der Brennstabhüllrohre ausgelöst wurde. Eine Untersuchung der Ursachen ergab, dass sich durch die unterschiedliche Modellierung der Außentemperatur der druckführenden Umschließung des Primärkreises das Wasser unterschiedlich im Primärkreis verteilt, da es zu unterschiedlichen lokalen Zirkulationen kommt. In der ACD-C Simulation wird zu einem früheren Zeitpunkt ein größerer Teil des Reaktorkerns freigelegt, so dass ein größerer Teil der Brennstabhüllrohre exotherm oxidieren kann. Entsprechend kommt es zu einem stärkeren Druckaufbau. Dies führt zum beobachteten Ansprechen der Sicherheitsventile in der Zeit zwischen ca. 14.500 s und 15.000 s.

In beiden Simulationen ist ab ca. 15.000 s (10.000 s transiente Zeit) ein erneutes zyklisches Öffnen und Schließen der Sicherheitsventile für ca. 1.000 s zu beobachten. Ab ca. 16.000 s öffnet und schließt sich dann wieder nur noch das Abblaseventil.

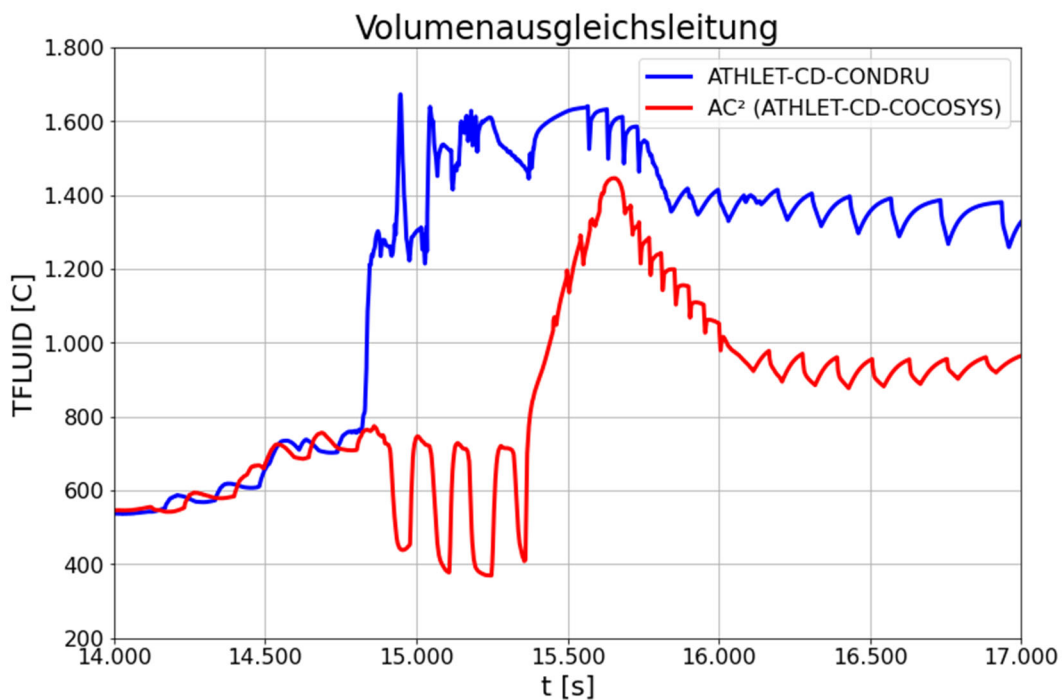


Abb. 3.4 Temperatur in der Volumenausgleichsleitung in den „Stand-alone“-Simulationen ab dem Zeitpunkt der Brennstabhüllrohroxidation

Der Temperaturverlauf in der Volumenausgleichsleitung ist in Abb. 3.4 für den Zeitbereich ab dem Zeitpunkt des Starts der Brennstabhüllrohroxidation dargestellt. Durch die stärkere Oxidation im ACD-C Modell kommt es auch zu einer deutlich stärkeren Aufheizung des Gases (Wasserdampf und Wasserstoff) in der Volumenausgleichsleitung als im AC² Modell. Dieser Unterschied ist bei der späteren Bewertung der Temperaturen im Bereich des Rohrbodens des Dampferzeugers zu berücksichtigen.

Da die Kopplung zwischen ACD-C bzw. AC² und OpenFOAM erst zu einem Zeitpunkt nach 16.000 s (11.000 s transiente Zeit) vorgesehen ist, werden die beiden Modelle für eine Kopplung mit dem CFD-Code als gleich gut geeignet betrachtet, da die Kopplung wesentlich von den Massenströmen und den Druckverhältnissen bestimmt wird. Der oben beschriebene Unterschied in den Gastemperaturen beeinflusst sicher die Temperaturverteilung im CFD-Rechengebiet. Da das ACD-C Modell hauptsächlich dazu dient, die erste Kopplung lauffähig zu machen und deren numerische Stabilität zu testen, werden diese Unterschiede aber zunächst in Kauf genommen.

Der „ACD-C“-Eingabedatensatz wurde erfolgreich mit dem Solver *chtMultiRegionFoam-Coupled* von OpenFOAM gekoppelt. Die Simulationen sind numerisch stabil, aber die Ergebnisse der gekoppelten Rechnung wichen von der „Stand-alone-Simulation des mit ACD-C berechneten Unfallszenarios ab, insbesondere im zeitlichen Verlauf des Drucks. Es wurde festgestellt, dass die in den gekoppelten Simulationen nicht berücksichtigten Bypässe im RDB-Bereich einen Einfluss auf die Strömungen und den Druckverlauf haben. Dieses Verhalten ist analog zu den weiter oben beschriebenen Einflüssen auf die Brennstabhüllrohroxidation. Die notwendige Erweiterung der Modellierung hinsichtlich dieser Bypässe wird im folgenden Kapitel beschrieben.

3.4 Erweiterung von AC²-Eingabedatensatzes für die Kopplung: Modellierung von Bypässen im RDB-Bereich

Zu den Bypässen im RDB-Bereich, die zunächst in den gekoppelten Simulationen nicht berücksichtigt wurden, gehören der Downcomer-Bypass zum RDB-Deckelbereich und zu den heißen Strängen. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird bei den gekoppelten AC²-OpenFOAM- bzw. Simulationen mit ACD-C-OpenFOAM die Strömung durch diese Bypässe mit Ventilen blockiert. Ursprünglich wurde zum einen davon ausgegangen, dass ihre Wirkung bei den niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (spätere Stadien des HD-Kernschmelz-Unfallszenarios) vernachlässigbar wäre. Zum anderen, dass ihre Berück-

sichtigung, die eine zusätzliche Kopplungsschnittstelle beinhaltet, zu numerischen Instabilitäten in den gekoppelten Simulationen führen könnte. Die gekoppelten ACD-C haben jedoch gezeigt, dass die Bypässe erhebliche Auswirkungen auf die numerischen Vorhersagen haben können und im Modell berücksichtigt werden sollten. Wie in Abbildung Abb. 3.5 dargestellt, musste am oberen Teil des oberen Plenums des RDB eine zusätzliche Kopplungsschnittstelle erstellt werden, um den Bypass vom Downcomer zum RDB-Deckelbereich zu modellieren.

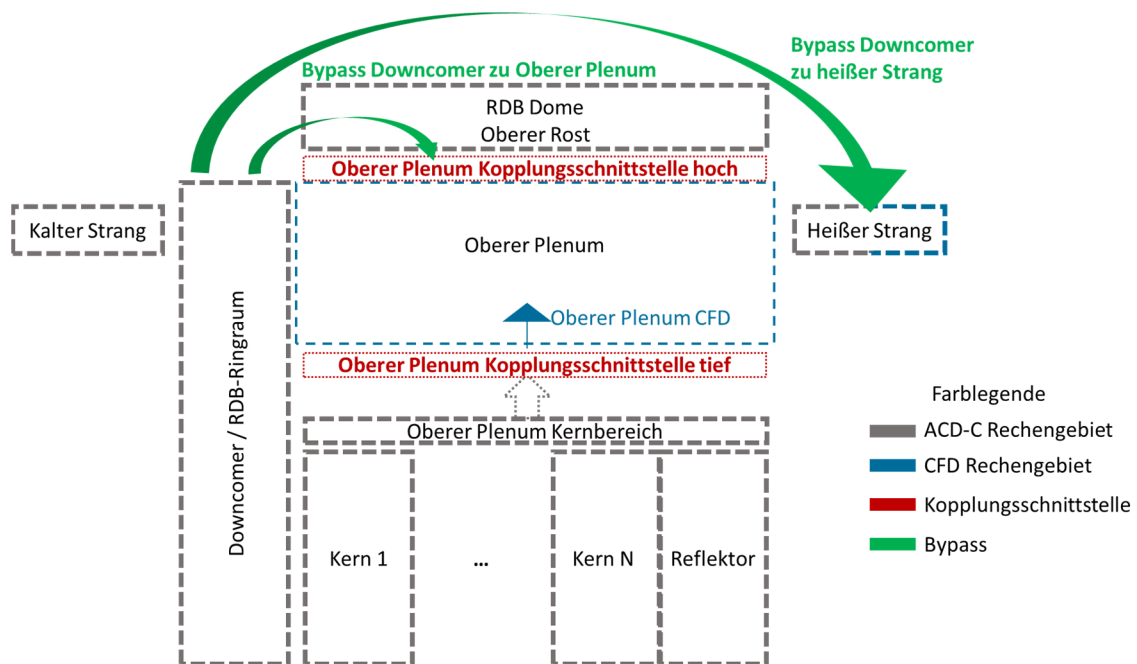


Abb. 3.5 Darstellung der Bypässe im RDB-Bereich

Die Modellierung der Bypässe zu den heißen Strängen wurde derart vereinfacht, dass keine zusätzlichen Kopplungsschnittstellen berücksichtigt werden müssen. Der Bypass zum heißen Strang (1), der sich bei der gekoppelten Simulation im CFD-Rechenggebiet befindet, wird nicht modelliert. Um diesen zu berücksichtigen, hätte eine Kopplungsschnittstelle (im CFD-Gitter) erstellt werden müssen. Für diesen Bypass wird weiterhin das eingebaute Ventil (Kapitel 3.2) während der gekoppelten Simulation geschlossen. Die Downcomer-Bypässe zu den anderen heißen Strängen (2, 3 und 4) werden im ATHLET-CD-Eingabedatensatz hinter den Kopplungsschnittstellen am RDB-Stützen modelliert. Dies geschieht, um numerische Instabilitäten aufgrund von Interferenzen zwischen nahe beieinanderliegenden Kopplungsschnittstellen zu vermeiden, und außerdem aufgrund der technischen Schwierigkeiten, solche Kopplungsschnittstellen in der CFD-Region zu erstellen.

Die Ergebnisse der gekoppelten „ACD-C-OpenFOAM“-Simulationen mit diesem Modellierungsansatz zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Vorhersagen der „Stand-alone“-Version von ACD-C bezüglich des Druckverlaufs. Die Änderungen in Bezug auf die Bypässe wurden auch in den AC²-Eingabedatensatz übertragen.

3.5 ATHLET-CD-Eingabedatensatz mit geschichteter Nodalisierung der heißen Stränge

Das „ATHLET-CD“-Anlagenmodell wurde derart erweitert, dass eine geschichtete Strömung in den heißen Strängen sowie eine Zirkulationsströmung in den DE-Heizrohren in allen vier Kühlmittelsträngen auch mit ATHLET-CD dargestellt werden kann. Das Nodalisierungskonzept zur quasi-dreidimensionalen Modellierung des heißen Strangs, der Dampferzeugereintritts- sowie Dampferzeugeraustrittskammer, das im Rahmen des Projekts 4717R01334 entwickelt wurde /PAL 20/, wird als Basis für die hier beschriebenen Modellierungsarbeiten genutzt.

3.5.1 Entwicklung des quasi-dreidimensionalen ATHLET-CD-Eingabedatensatzes

Die Modellierung der Thermofluidobjekte im Bereich der Ein- und Austrittskammer des Dampferzeugers wurde nicht verändert und entspricht der des Projekts 4717R01334. Eine zusätzliche Wärmestruktur (HCO) wurde, wie bereits oben erwähnt, für den Wärmeübergang zwischen der Eintritts- und Austrittskammer erstellt. Diese wurde im Rahmen des Forschungsprojekts 4717R01334 nicht berücksichtigt. Die Geometrieparameter der TFO des heißen Stranges wurden weiter mit Blick auf die Stabilität der Simulation optimiert. Grundsätzlich wird die quasi-dreidimensionale Modellierung eines horizontalen Rohres durch Aufteilung des Rohres in parallele Teilrohre und deren Querverbindung realisiert. Im angenommenen Konzept wird das ursprüngliche TFO des heißen Stranges in drei neue, in vertikaler Richtung gestaffelte Teilrohre unterteilt (Abb. 3.6 (a)). Um einen gleichen Massenstrom bei nominal-Betriebsbedingungen zu gewährleisten, wurden in der ursprünglichen Modellierung das TFO so geteilt, dass die resultierenden TFOs die gleichen Querschnittsflächen haben (Abb. 3.6 (b)). Allerdings wurden andere Parameter, die insbesondere die Strömung über die Querverbindungen („Cross Connections“) zwischen den TFOs beeinflussen, noch weiter optimiert. Diese Optimierung gegenüber den früheren Arbeiten resultierte aus der genaueren Berechnung des Winkels θ (Abb. 3.6 (b)), der diese Größen bestimmt. Eine analytische Formel, mit der der Winkel

θ berechnet werden kann, gibt es für die gewählte Unterteilung in drei gleiche Teile der Querschnittsfläche nicht. Deshalb wurde der Winkel θ im Rahmen dieses Projekts iterativ berechnet. Die übrigen Parameter, die in Abb. 3.6 (b) angegeben sind, wurden mit Hilfe dieses Winkels berechnet. Die Höhen (d und h) können einen erheblichen Einfluss auf die Strömung haben, insbesondere bei Naturumlaufbedingungen, da die relative Höhe der TFOs zusammen mit Dichteunterschieden den Naturumlauf bestimmen. Dieser Effekt wird zusätzlich durch den Parameter s (Abb. 3.6 (b)) verstärkt, der die Querschnittsfläche der Querverbindungen bestimmt und sich damit auf die Querströmung zwischen den neuen TFOs auswirkt. Die iterativ ermittelten geometrischen Parameter für die Aufteilung des heißen Stranges sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1 Geometrische Parameter für die Aufteilung des heißen Stranges

Querschnitt [m ²]	θ [°]	d [m]	h [m]	s [m]	c [m]
0,147	149,3	0,099	0,276	0,977	0,723

Jede der neuen TFOs des heißen Stranges ist mit einem eigenen TFO in der DE-Eintrittskammer verbunden, die wiederum einer einzelnen U-Rohr-Gruppe zugeordnet ist. Die erweiterte Aufteilung des heißen Stranges erstreckt sich außerdem auf die Modellierung des oberen Plenums des RDB. Das TFO des oberen Plenums des ursprünglichen Ansatzes (Abb. 3.6 (a)) wird in drei neue TFOs unterteilt, deren jeweilige Höhekoordinate der des damit verbundenen TFO des heißen Stranges entspricht. Die TFOs des oberen Plenums sind in vertikaler Richtung durch so genannte Single-Junction-Pipes (SJP) miteinander verbunden.

An den Außenwänden der neuen TFOs ist jeweils ein Wärmeleitobjekt (HCO) zur Wärmekopplung mit dem Sicherheitsbehälter-Modell verbunden. Der Wärmeübergang zwischen der Sicherheitsbehälter-Atmosphäre und den TFOs, die die Eintritts- und Austrittskammer des DE darstellen, wird analog modelliert.

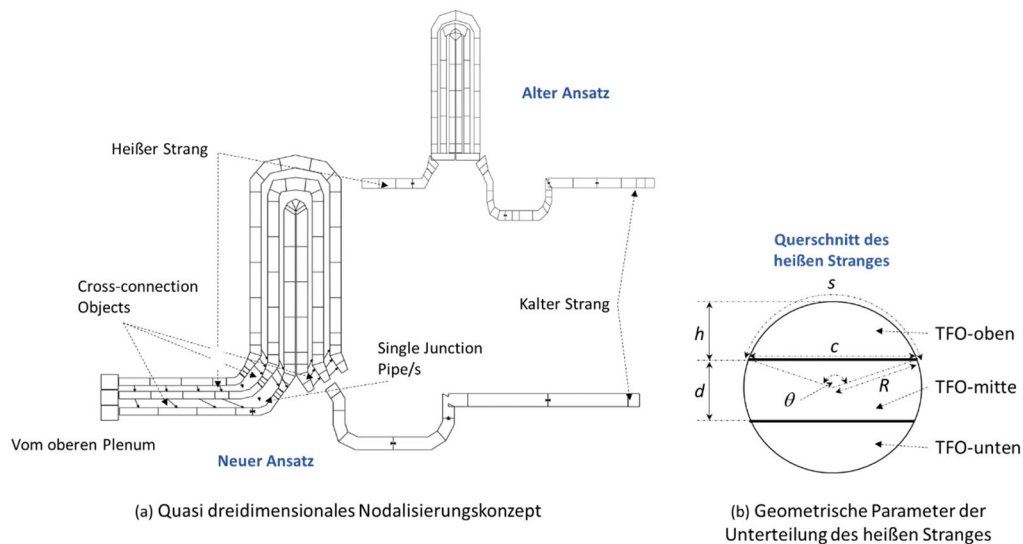


Abb. 3.6 Quasi-dreidimensionales Nodalisierungskonzept

Alle vier heißen Stränge sind in jeweils drei parallele Stränge aufgeteilt und somit durch jeweils drei Thermofluidobjekte modelliert. Des Weiteren sind die vier Eintrittskammern der DE ebenfalls aufgeteilt. Zum Austausch von Fluid sind die neuen TFO durch Querverbindungen vernetzt. Getrennte Wärmestrukturen für alle neuen Objekte in den heißen Strängen und DE werden benutzt. Die Nodalisierung des Primärkreises der DWR-Referenzanlage im geänderten „ATHLET-CD“-Modells ist in Abb. 3.7 gezeigt.

Der Datensatz mit den geschichteten heißen Strängen wurde für die gekoppelte Simulationen vorbereitet, wobei das CONDRU Modul für die Simulation des Sicherheitsbehälters zum Einsatz kam. Die Anzahl der Kopplungsschnittstellen musste aufgrund der erweiterten Modellierung der heißen Stränge auf 9 erhöht werden, d.h. zwei zusätzliche pro heißen Strang, für die drei, die sich im Systemcode Rechengebiet befinden (Abb. 3.7). Im Ergebnis haben die „ACD-C“- und AC² Eingabedatensätze mit geschichteter Nodalisierung der heißen Stränge 12 Kopplungsschnittstellen, für welche die Geschwindigkeit von ATHLET-CD an den CFD-Solver *chtMultiRegionFoamCoupled* übergeben wird und umkehrt der CFD-Solver die Drücke berechnet.

3 x Kopplungsschnittstellen: Unten, Mitte und Oben

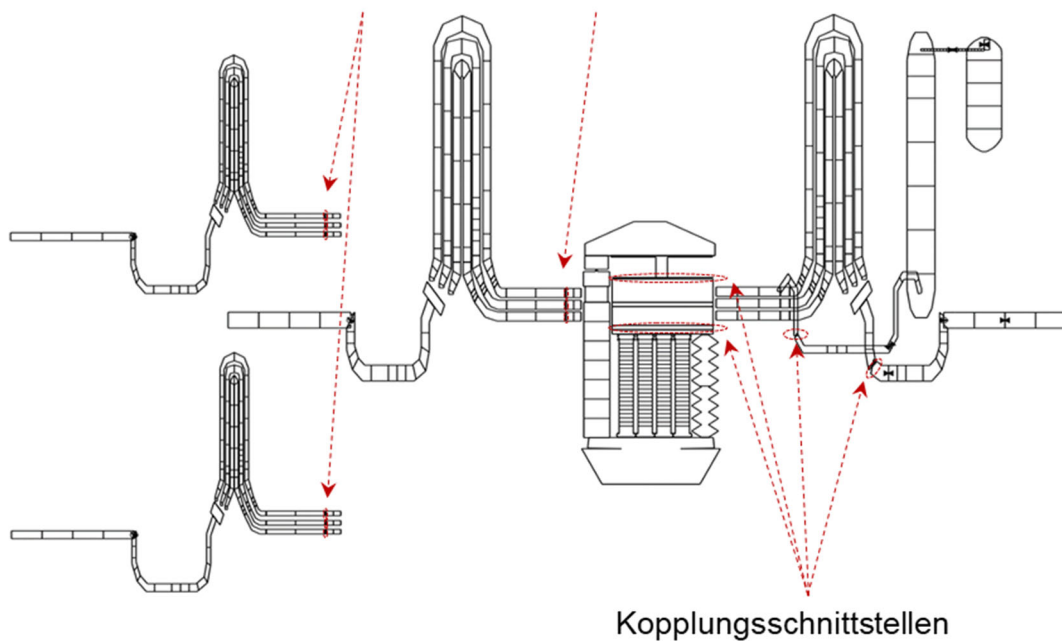


Abb. 3.7 Nodalisierung ATHLET-CD mit geschichteten heißen Strängen

3.5.2 Numerische Vorhersage des thermohydraulischen Verhaltens des Primärkreislaufs bei Unfallbedingungen mit dem quasi-dreidimensionalen ATHLET-CD-Eingabedatensatz

Das Hauptziel dieses Arbeitsschritts ist es, festzustellen, ob der quasi-dreidimensionale Ansatz der geschichteten Modellierung der heißen Stränge auch die in den CFD-Simulationen beobachtete Zirkulationsströmung im heißen Strang reproduzieren kann. Dieser quasi-dreidimensionale Ansatz (Abb. 3.6) wird auf die vier heißen Stränge und Dampferzeuger des Primärkreislaufs angewendet (Abb. 3.7). Die Implementierung erfolgte in den beiden Eingabedatensätzen ACD-C und AC² der DWR-Referenzanlage. Die Bewertung der Strömung wird in diesem Kapitel mit dem Massenstrom und der Temperaturverteilung im Primärkreislauf dargestellt.

Abb. 3.8 zeigt das Strömungsverhalten im Primärkreislauf, der mit den beiden „ACD-C“-Eingabedatensätzen mit geschichteten (links) und nicht geschichteten (der heiße Strang ist nur mit einem TFO modelliert) heißen Strang berechnet wurde. In der Abbildung sind nur der DH-Strang und der Kühlmittelstrang 2 dargestellt. Die Abb. 3.8 zeigt eine Momentaufnahme der Strömungsverhältnisse bei geschlossenem DH-Abblaseventil. Diese Momentaufnahme zeigt ein spätes Stadium des Unfallszenarios, in dem sich das Kühl-

medium bereits in der Gasphase befindet (Gasgemisch aus Wasserdampf und Wasserstoff). Es handelt sich um einen qualitativen Vergleich mit einer Farbkodierung für den Massenstrom von $-2,0 \text{ kg/s}$ bis $+2,0 \text{ kg/s}$ (angewendet für beide Simulationen). Beide Simulationen zeigen eine zirkulierende Strömung im Reaktorkern und generell im RDB, die recht ähnlich aussieht. Das berechnete Strömungsverhalten in den Kühlkreisläufen ist jedoch völlig unterschiedlich. Die „ACD-C“-Simulation mit der einfachen TFO-Modellierung des heißen Stranges berechnet eine einzige Strömungsrichtung für beide heißen Stränge vom RDB zum DE (Abb. 3.8 rechts). Die Strömung in die U-Rohre der beiden DE scheint auch nur in positiver Richtung zu verlaufen (Abb. 3.8 rechts). Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der „ACD-C“-Simulation mit geschichteten heißen Strängen eine zirkulierende Strömung zwischen dem RDB und dem DE (Abb. 3.8 links). Diese Simulation ergibt, dass das Kühlmittel jeweils im obersten TFO des heißen Strangs in DE-Richtung und im untersten in die entgegengesetzte Richtung (RDB-Richtung), strömt. Innerhalb des DE und des heißen Stranges bildet sich ein Naturumlauf aus (Abb. 3.8 links). Beim der DH-Strang ist die Strömung im mittleren TFO des heißen Stranges in positiver Richtung, wobei der Kreislauf in der Eintrittskammer des DE geschlossen ist. Im Kühlkreislauf 2 schließt sich die Zirkulationsschleife in der Mitte des heißen Strangs. In beiden DE wird ein ähnliches Zirkulationsverhalten festgestellt, das bei der „ACD-C“-Simulation mit der einfachen Modellierung der heißen Stränge völlig fehlt (Abb. 3.8 rechts). Aus Abb. 3.8 (links) ist ersichtlich, dass der „ACD-C“-Eingabedatensatz mit geschichtetem heißem Strang den Naturumlauf im HD-Kernschmelzablauf und geschlossenen DH-Armaturen innerhalb der heißen Stränge reproduzieren kann.

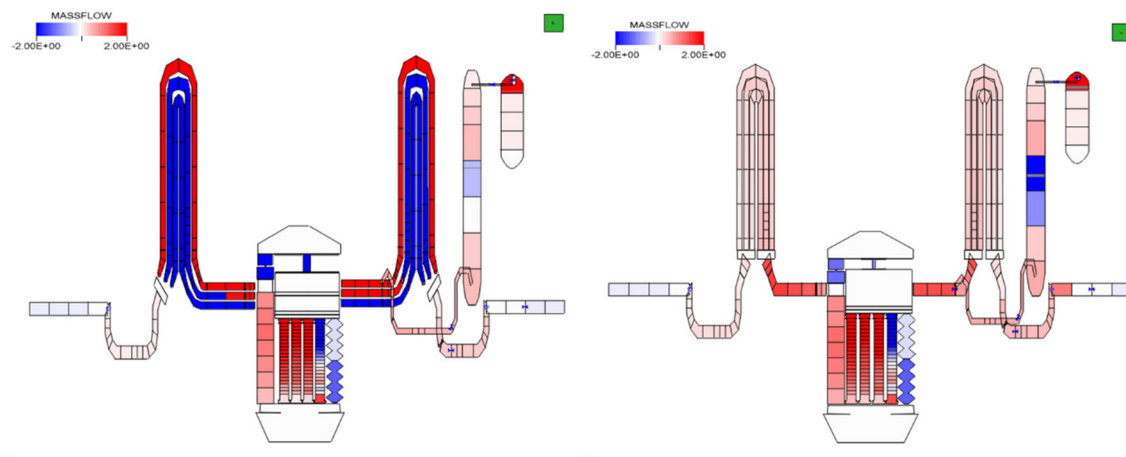


Abb. 3.8 Vergleich der „ACD-C“-Simulationen („Stand-alone“-Versionen) bei geschlossenen DH-Ventilen anhand der Massenströme in den Strängen 1 und 2 (links geschichtete heiße Stränge, rechts einfache Modellierung der heißen Stränge)

In Kapitel 3.3 wurde beschrieben, wie eine Änderung des AC²-Moduls, das für die Simulation des Sicherheitsbehälters verwendet wird (COCOSYS oder CONDRU), zu Unterschieden bei den Simulationsergebnissen für den Primärkreis führen kann (siehe Abb. 3.3 und Abb. 3.4). Ähnliche Unterschiede können auch beim Vergleich zwischen den beiden „Stand-alone“-Simulationen beobachtet werden, die die einfache Modellierung der heißen Stränge und die geschichtete Modellierung der heißen Stränge verwenden, wobei für beide Simulationen der Sicherheitsbehälter mit dem AC²-Modul CONDRU dargestellt wurde.

Vergleicht man in Abb. 3.9 den Druckverlauf im Primärkreis zwischen den beiden „ACD-C“-Simulationen (blau: ACD-C mit einfachen heißen Strängen, grün: ACD-C mit geschichteten heißen Strängen), so fällt zunächst auf, dass im Zeitintervall zwischen ca. 5.500 s und ca. 9.000 s der Druck in der Simulation mit den geschichteten heißen Strängen (grün) nicht so stark abfällt, wie in der mit einfachen heißen Strängen (blau). Eine Erklärung hierfür scheint die unterschiedliche Temperatur im Druckhalter (siehe Abb. 3.10) zu sein. In der Simulation mit geschichteten heißen Strängen bleibt die Temperatur dort länger auf einem höheren Niveau als in der Simulation mit den einfach modellierten heißen Strängen. Der Grund dafür ist, dass die Verbindung des Druckhalters an den entsprechenden heißen Strang oben an der Leitung erfolgt. In der Simulation mit den geschichteten heißen Strängen herrscht dort durch die Auftriebseffekte eine höhere Temperatur als im mittleren Bereich des heißen Strangs, die der Temperatur der Strömung entspricht, die in der Simulation mit der einfachen Modellierung in Richtung Druckhalter fließt.

Im Zeitintervall zwischen ca. 9.000 s und 11.000 s (4.000 s bis 6.000 s transiente Zeit) sind die Druckverläufe der in Abb. 3.9 dargestellten Rechnungen qualitativ sehr ähnlich. Der Druckanstieg bis zum Ansprechen der Sicherheitsventile bei ca. 11.000 s (6.000 s transiente Zeit) erfolgt in der Rechnung mit den geschichteten Strängen zu einem etwas späteren Zeitpunkt, und die Dauer der Schließzyklen der Sicherheitsventile ist in dieser Rechnung gegenüber den anderen Rechnungen ohne geschichtete Stränge verlängert.

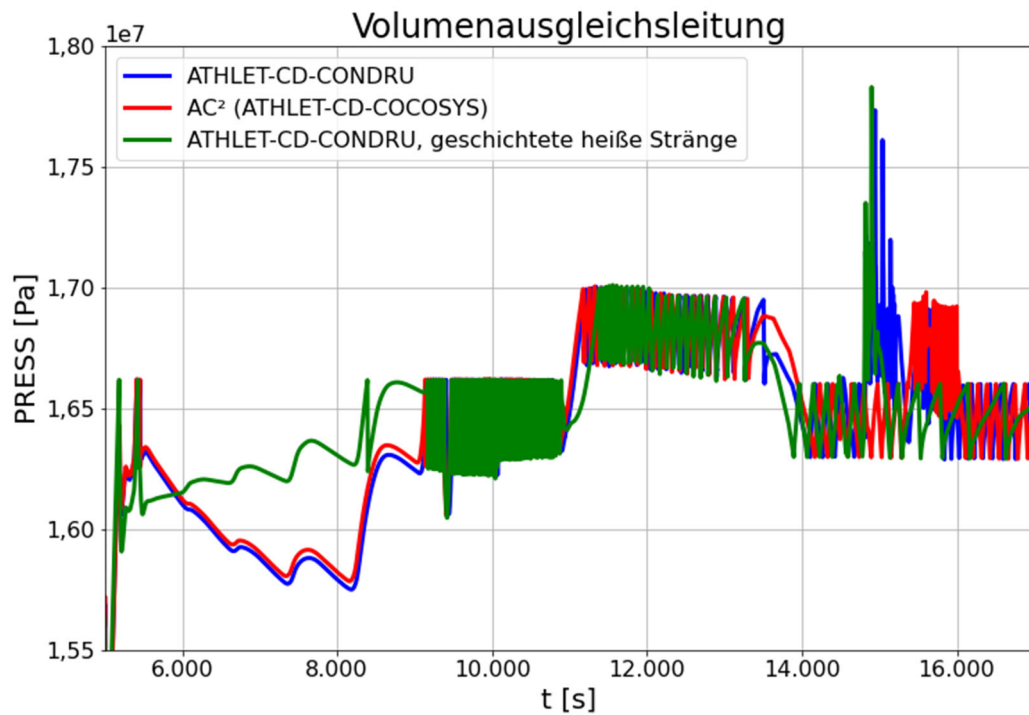


Abb. 3.9 Druckverlauf für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC², ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge

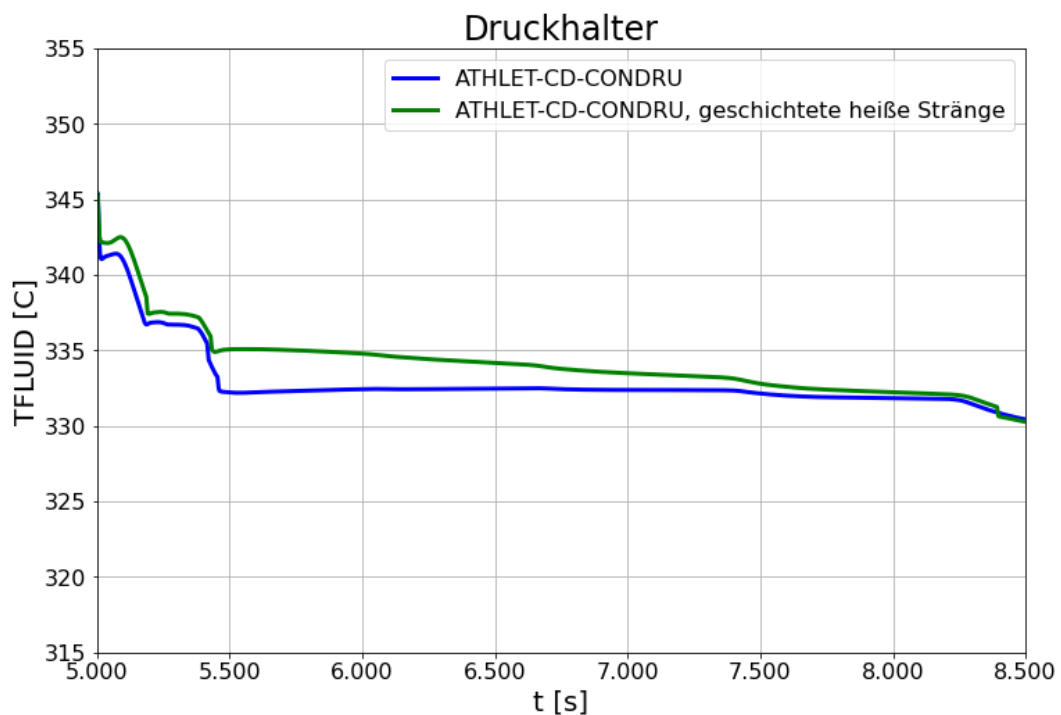


Abb. 3.10 Temperatur im Druckhalter für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC², ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge

Bei ca. 14.800 s (9.800 s transiente Zeit) kommt es in der Rechnung mit den geschichteten heißen Strängen nochmals zu einem kurzen Ansprechen der Sicherheitsventile, da der Massenstrom durch das Abblaseventil nicht ausreicht, um den Druck unterhalb des Ansprechdrucks der Sicherheitsventile zu halten. Nach ca. 200 s wird der Druck dann über das Abblaseventil geregelt, wobei die Abblasezyklen deutlich länger dauern als in den anderen „Stand-alone“-Simulationen.

Der in Abb. 3.11 dargestellte Temperaturverlauf zeigt für die Simulation mit geschichteten Strängen zu diesem Zeitpunkt einen Anstieg, der auf eine Oxidation eines Teils der Brennstabhüllrohre zurückzuführen ist. Davor liegt die Temperatur aber bei ungefähr der Sättigungstemperatur und fällt auch danach schnell wieder auf niedrigere Temperaturen ab als sie in den Simulationen mit einfach modellierten heißen Strängen auftreten.

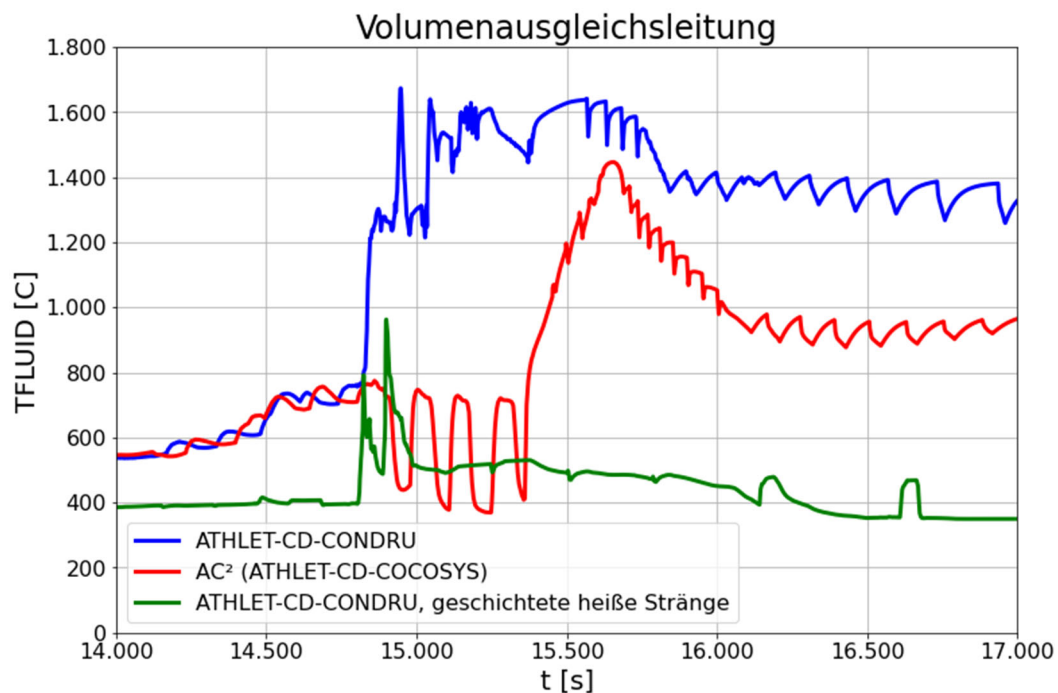


Abb. 3.11 Temperaturverlauf für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC², ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge

Insgesamt kann in der „Stand-alone“- Simulation mit geschichteten Strängen eine deutlich stärkere Kühlung des Primärkreises beobachtet werden als in den anderen „Stand-alone“-Simulationen, bedingt durch den Wärmetransport durch den Naturumlauf vom RDB zu den Dampferzeugern und damit auf die Sekundärseite. Dies erklärt auch die

deutliche Verlängerung der Dauer zwischen Schließen und erneutem Öffnen des DH-Abblaseventils bzw. der DH-Sicherheitsventile.

In Abb. 3.12 ist ein Vergleich des Massenstroms in den heißen Strängen des DH-Kühlmittelstranges dargestellt. Die Strömungsverhältnisse bei geschlossenem (oben) und geöffnetem (unten) Abblaseventil sind sowohl für den geschichteten heißen Strang (links) als auch für den nicht-geschichteten heißen Strang (rechts) dargestellt. Die Abblasezyklen für beide Simulationen scheinen recht ähnlich zu sein, wie aus den Massenstromdiagrammen hervorgeht. Die Strömungsverhältnisse in den heißen und in den kalten Strängen unterscheiden sich deutlich.

Die Simulationen mit dem geschichteten heißen Strang sagen eine zirkulierende Strömung im heißen Strang praktisch unabhängig von der Position des Abblaseventils voraus. Der Massenstrom im kalten Strang ist bei dieser Simulation nahe Null, wie die blassen Farben in Abb. 3.12 zeigen. Die Zirkulation im DE scheint intensiv und vergleichbar mit der Intensität derjenigen im heißen Strang zu sein. Im Gegensatz dazu sagen die Simulationen mit dem einzelnen TFO-Heißstrang ein völlig anderes Verhalten des Primärkreislaufs voraus. Bei geschlossenem Abblaseventil ist die Strömung im Primärkreislauf in Richtung der DE. Diese Strömung kehrt sich im DE und im kalten Strang vollständig um, wenn sich das Abblaseventil öffnet. Die Anschlussstelle der Volumenausgleichsleitung dient bei dieser Simulation als Trennstelle für die Strömung. Obwohl qualitativ recht ähnlich, liegen der Zeitpunkt der ersten Öffnung und der anschließende Abblasezyklus 180 Sekunden auseinander. Das zyklische Öffnen des Abblaseventils im Fall des geschichteten heißen Strangs erfolgt 180 s früher im Vergleich zu den Simulationen mit einfach modellierten heißen Strängen.

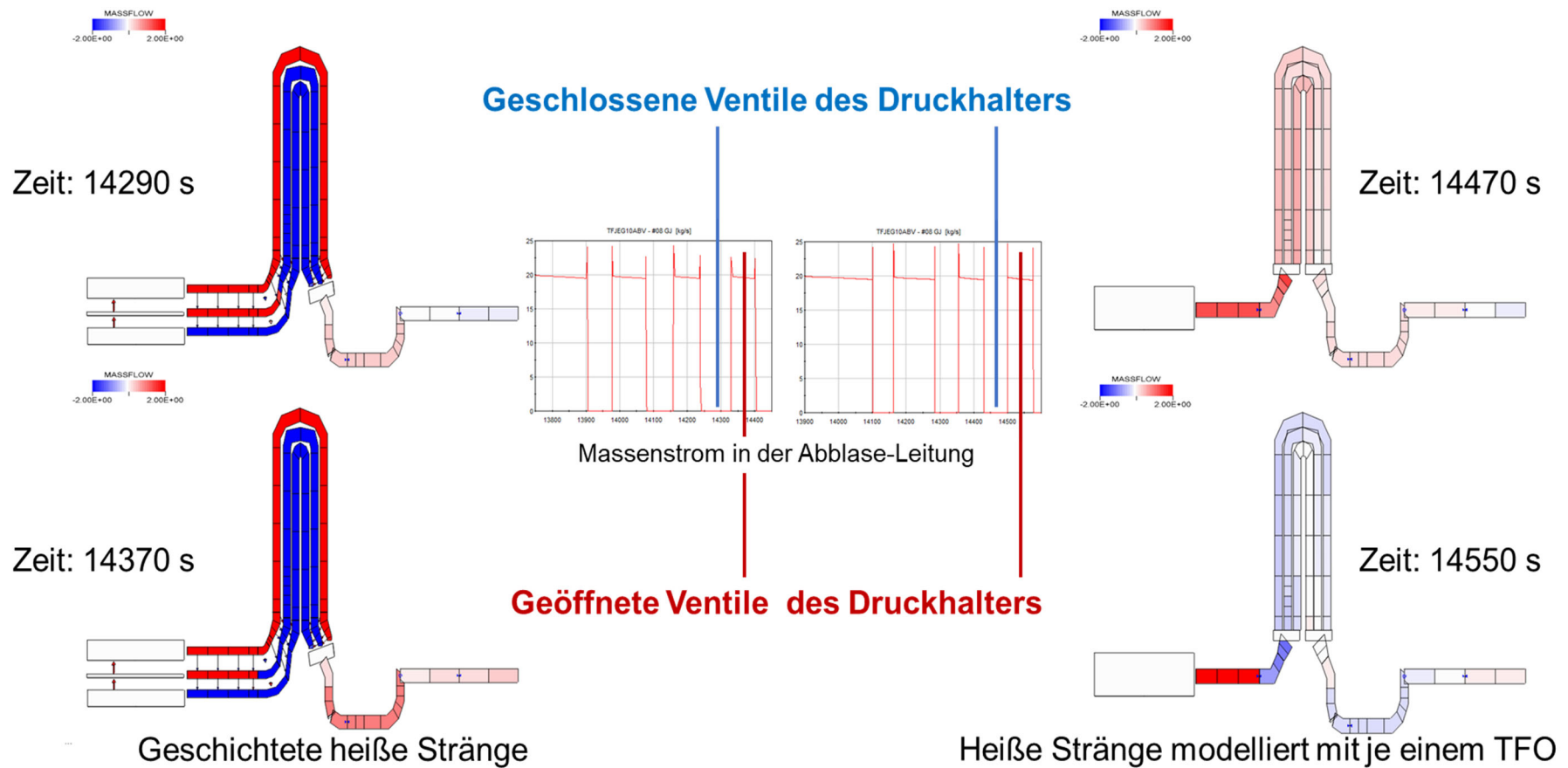


Abb. 3.12 Vergleich des Strömungsverhaltens in den heißen Strängen bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen

Nach den Simulationsergebnissen des geschichteten heißen Strangs des „ACD-C“-Eingabedatensatzes ist eine Zirkulation in jedem heißen Strang des Primärkreises vorhanden (Abb. 3.13 links). Sowohl bei geschlossenem (oben) als auch bei geöffnetem (unten) Abblaseventil bleibt diese Zirkulation vorhanden und erstreckt sich auf alle vier DE. Bei geöffnetem Abblaseventil wird für die kalten Stränge auch keine umgekehrte Strömung berechnet. Die Ergebnisse des einzelnen TFO-Eingabedatensatzes (Abb. 3.13 rechts) zeigen ein anderes Strömungsverhalten im Primärkreislauf. Bei geschlossenem Abblaseventil fließt das Kühlmittel in allen Kreisläufen Richtung DE. Mit der Eröffnung des Abblaseventils kehrt die Strömung im gesamten Primärkreislauf (bis auf den Bereich zwischen Heiße Leitung (1) und Volumenausgleichsleitung) um. Auch im Bereich der U-Rohre des DE wird keine zirkulierende Strömung vorhergesagt (Abb. 3.13 rechts). Beide Simulationen mit geschichteten und nicht geschichteten heißen Strängen sagen ähnliche Strömungsverhältnisse innerhalb des RDB voraus.

Die dargestellten Unterschiede in den Strömungsverhältnissen im Primärkreislauf führen zu Unterschieden in der Temperaturverteilung, wie in Abb. 3.14 dargestellt. Der Reaktorkern scheint im Fall der geschichteten Modellierung der heißen Stränge etwas kühler (Abb. 3.14 links). Das obere Plenum und der RDB-Deckelbereich werden nicht so stark erwärmt wie bei der Simulation mit den nicht geschichteten heißen Strängen. Folglich erscheinen auch der heiße Strang (1) und die Volumenausgleichsleitung kälter (Abb. 3.14 links). Die Unterschiede lassen sich auf den Wärmeübergang im DE zurückführen, der im Falle der geschichteten heißen Stränge aufgrund der höheren Zirkulationsströmung innerhalb der U-Rohre intensiver ist. Die Rezirkulation innerhalb des Heißstrangs zwischen DE und RDB (Abb. 3.13 links) führt zur Kühlung des Primärkreises sowie des oberen Bereiches des RDB.

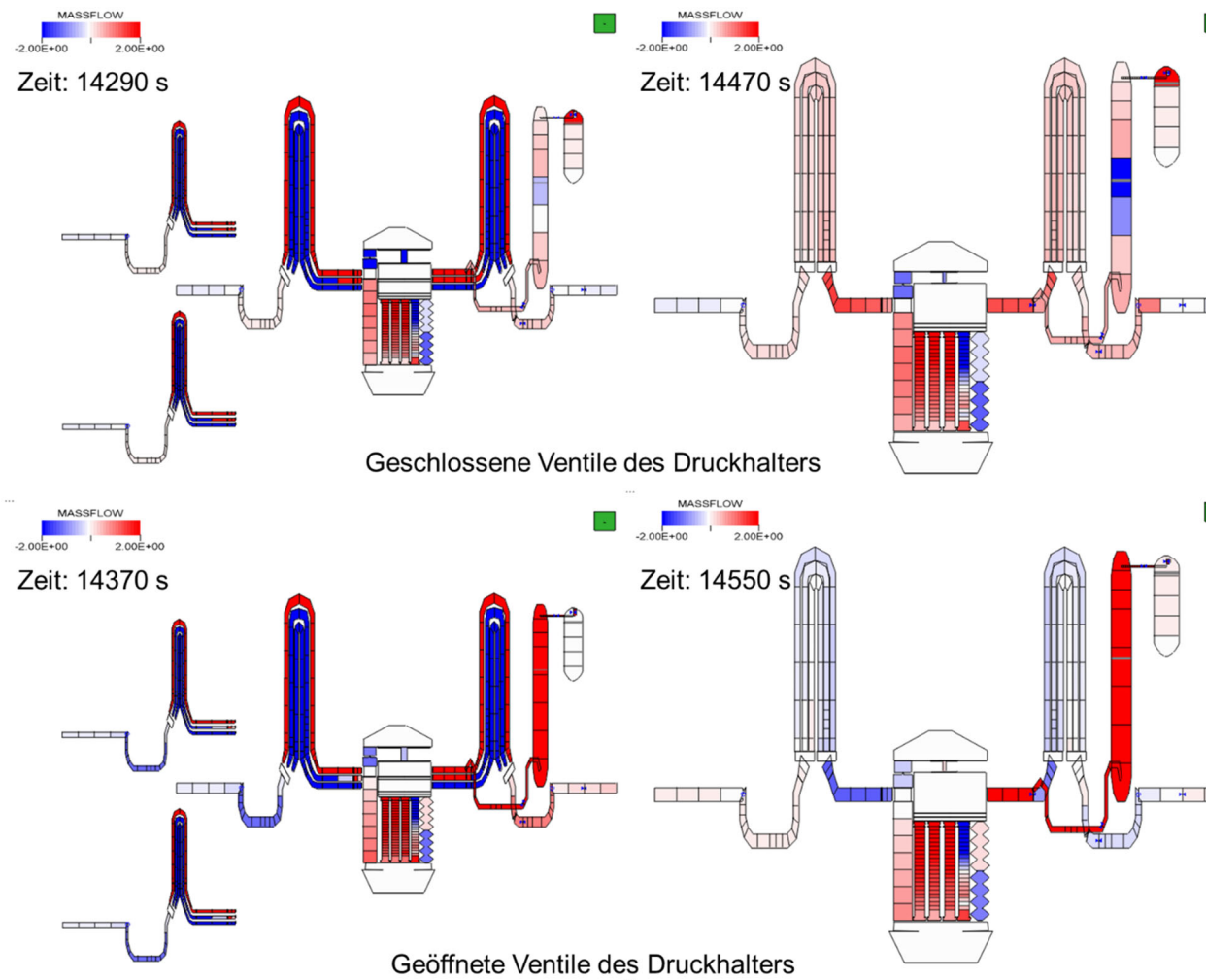


Abb. 3.13 Strömungsbild im Primärkreislauf bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen

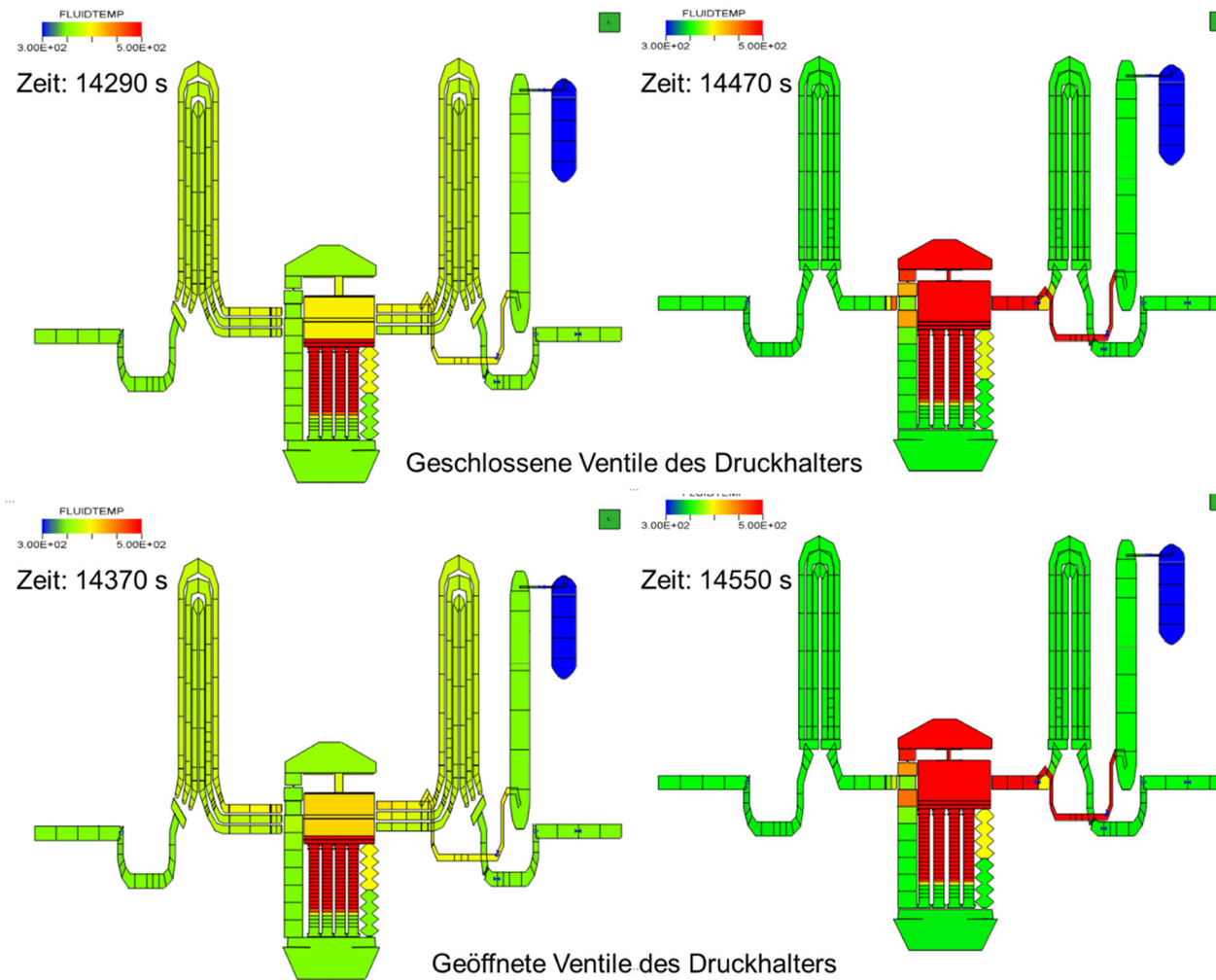


Abb. 3.14 Temperaturverteilung im Primärkreislauf bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen

Die Farbkodierung für die Temperaturverteilung im Primärkreislauf in Abb. 3.15 ist so ausgerichtet, dass die Temperaturgradienten im heißen Strang besser dargestellt werden können. In diesem Stadium des Unfallszenarios (14828 s Gesamtzeit; 9.828 s transiente Zeit) wird das Abblaseventil geöffnet und das Kühlmittel strömt vom Reaktorkern zum Abblasebehälter. Das heißere Gasmisch folgt dem Strömungspfad oberes Plenum - oberes TFO des heißen Stranges - Volumenausgleichsleitung. Innerhalb des heißen Stranges gibt es eine Zirkulationsströmung zwischen dem RDB und dem DE, da kälteres Fluid vom DE zum RDB (Abb. 3.12 links unten) zurückfließt. Dies führt zu einem Temperaturgradienten im heißen Strang des DH-Kühlmittelstranges von etwa 180 K (Node 2, Oben – 604,68 °C, Node 2, Mitte – 524,56 °C, Node 2, Unten – 426,57 °C) zu diesem Zeitpunkt des Unfallszenarios (14.828 s). Der Temperaturgradient ist auch im Kühlkreislauf 2 zu beobachten, jedoch weniger stark ausgeprägt.

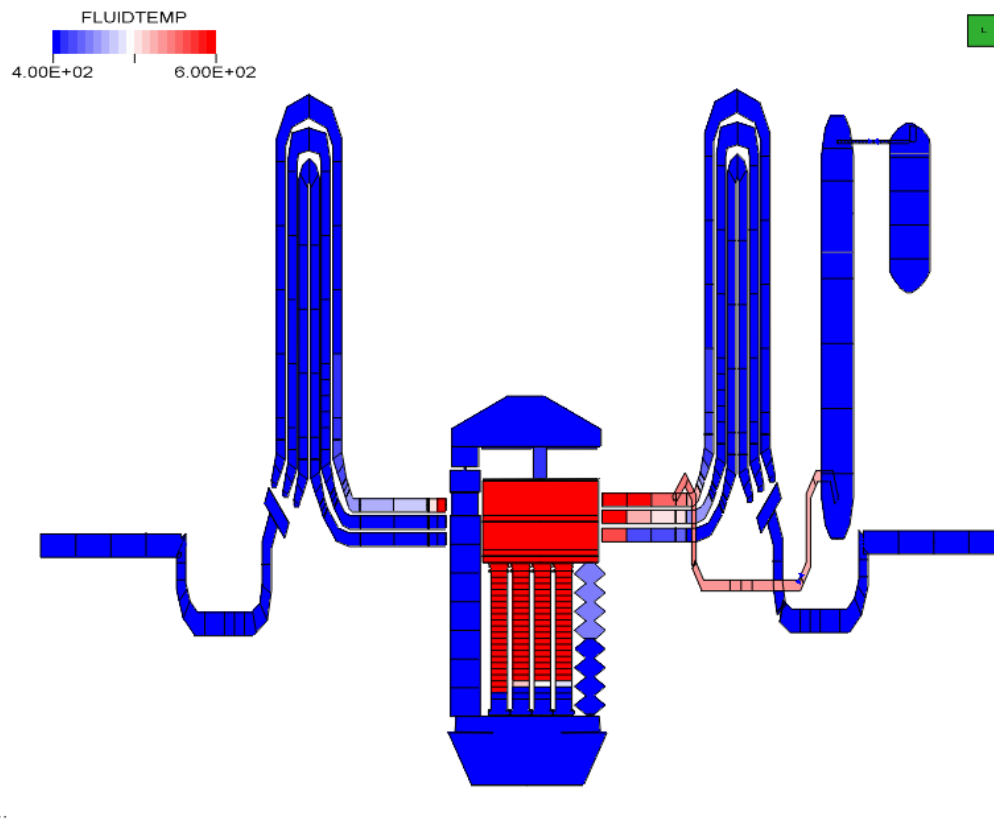


Abb. 3.15 Temperaturverteilung im Primärkreislauf bei geöffnetem DH-Ventil: geschichteten heißen Strang

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich die Fähigkeit des Eingabedatensatzes mit den geschichteten heißen Strängen-, die Zirkulation innerhalb des heißen DH-Strangs zu reproduzieren. Das Vorhandensein solcher Strömungsbedingungen wird auch durch die „Stand-alone“ CFD-Simulationen (Abb. 4.15) bestätigt.

Unabhängig von der Kopplung zwischen AC² und OpenFOAM sollte weiter untersucht werden, inwieweit dieser signifikante Einfluss der geänderten Nodalisierung der heißen Stränge auf den Unfallablauf realistischer ist als die bisher immer verwendete einfache Nodalisierung.

4 Vorbereitung des CFD-Modells des DH-Kühlmittelstranges der Referenzanlage für die Kopplung mit ATHLET-CD

Im Vorläufervorhaben 3614R01307 wurde ein CFD-Modell für den Druckhalterkühlmittelstrang entwickelt. Dieses Modell wurde für Simulationen mit dem CFD-Code Ansys CFX eingesetzt. Die Randbedingungen für diese Simulationen wurden zum Teil aus Simulationen mit AC² abgeleitet. Es wurden aber keine gekoppelten Simulationen durchgeführt, bei denen beide Codes gleichzeitig zum Einsatz kamen. Im Folgenden wird, analog zu der weiter oben eingeführten Nomenklatur von Systemcode-Simulationen, ebenfalls von „Stand-alone“-Simulationen oder „Stand-alone“-Modellen gesprochen, wenn ausschließlich der CFD-Code für eine Simulation zum Einsatz kommt bzw. wenn über ein Modell für eine solche „Stand-alone“-Simulation berichtet wird.

4.1 „Stand-alone“-Modell für OpenFOAM

Das Rechengitter des „Ansys CFX“-Modells des DH-Kühlmittelstranges aus dem Vorgängervorhaben wurde für das CFD-Programm OpenFOAM konvertiert. Die Kopplung von OpenFOAM mit ATHLET-CD ist einfacher durchzuführen, da die entsprechenden Kopplungsroutinen bereits vorhanden und etwaige notwendige Modifizierungen leichter für die OpenFOAM-Kopplungsroutinen bzw. für sonstige Bestandteile des OpenFOAM Solvers und der dabei verwendeten Bibliotheken durchzuführen sind. Des Weiteren wurden für das OpenFOAM-Modell zusätzliche Anpassungen durchgeführt, wie z. B. die Modellierung des Fluids als reales, kompressibles Gas, das aus den beiden Komponenten Wasserdampf und Wasserstoff besteht, oder die Erweiterung des Rechengebietes durch eine detailliertere Darstellung des oberen Plenums des RDB. Durch die Verwendung eines kompressiblen Gases entfiel auch die Notwendigkeit, einen Auslass im Bereich des oberen Plenums des RDB (Massensenke) zu modellieren, wie er im Vorgängerprojekt verwendet wurde.

4.1.1 Beschreibung des OpenFOAM-Modells

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, die Fähigkeiten des Solvers *chtMultiRegionFoam* zur adäquaten und konsistenten Reproduktion der Strömung innerhalb der CFD-Region zu bewerten. Als Referenz für die Validierung der numerischen Vorhersagen wurden die im Rahmen des Forschungsprojekts 3614R01307 gewonnenen CFX-Ergebnisse verwen-

det. Zusätzlich wurden die Ergebnisse von „Stand-alone“-Simulationen mit AC² in Abhängigkeit von der untersuchten Eigenschaft der Modellierung als Kriterium für die Zuverlässigkeit der *chtMultiRegionFoam*-Berechnungen verwendet.

Die folgenden Schritte sind eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten:

- Gitterkonvertierung von Ansys CFX zu OpenFOAM, Test und Verbesserungen des Gitters,
- Kalibrierung des Modells des porösen Mediums der U-Rohr-Region und
- Verbesserungen der physikalischen Modelle der fluiden Medien.

Gitterkonvertierung von Ansys CFX zu OpenFOAM, Test und Verbesserungen des Gitters

Die Konvertierung des „Stand-alone“-Rechengitters des „Ansys CFX“-Modells, welches in Abb. 4.1 dargestellt ist, wurde mit Hilfe von Tools, die standardmäßig im OpenFOAM-Softwarepaket für diesen Zweck enthalten sind, durchgeführt. Die mit dem so erhaltenen Gitter durchgeführten stationären Berechnungen wiesen ein hohes Maß an numerischen Problemen auf. Diese Probleme führten dazu, dass die Simulationen nicht konvergierten und es häufig zu Programmabstürzen kam. Schrittweise wurde die Gitterqualität im Hinblick auf die numerische Stabilität getestet. Im ersten Schritt wurde die Strömung im heißen Strang und dem Eintrittssammler des Dampferzeugers unter stationären Bedingungen, die dem Nennbetriebszustand des DWR entspricht, simuliert. Diese Simulationen zeigten nicht physikalische Geschwindigkeitsprofile an der Verbindungsstelle zwischen dem heißen Strang und dem Eintrittssammler, verursacht durch die lokale Gitterqualität. Aus diesem Grund wurde das Gitter verfeinert, wobei der Schwerpunkt auf einer besseren Qualität der Hexagonal-Elemente lag.

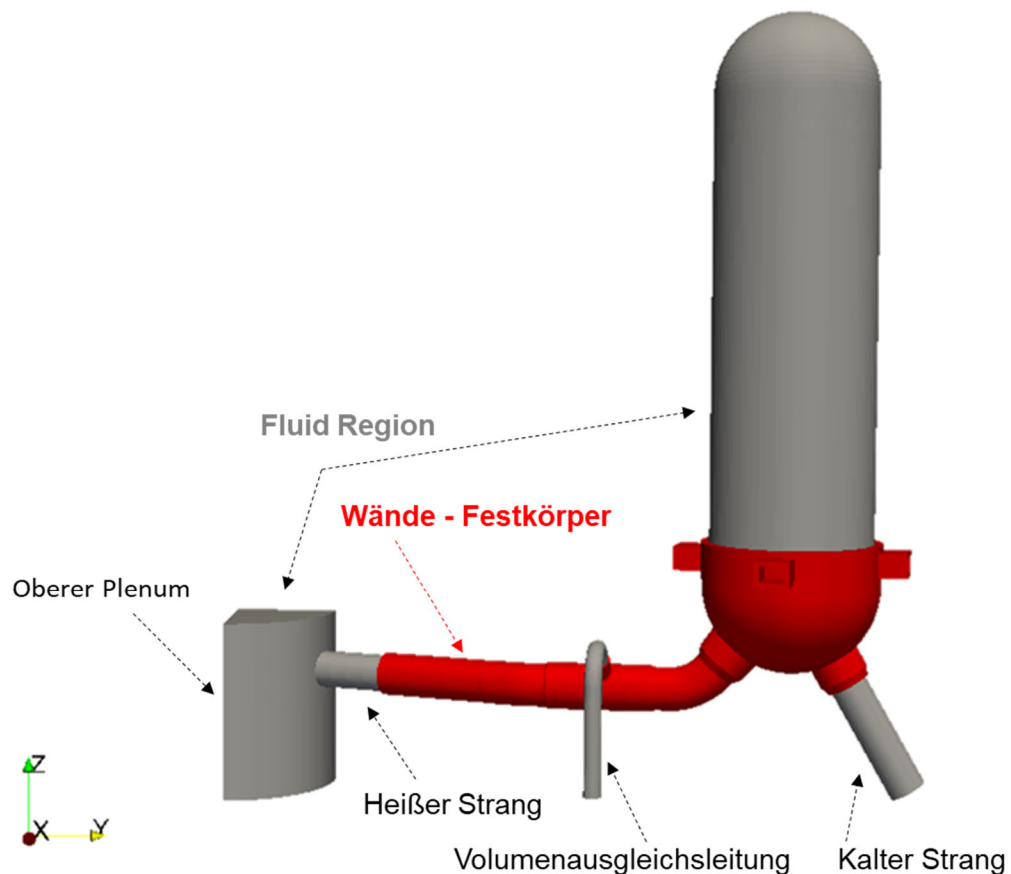


Abb. 4.1 CFD-Rechengebiet

Das Gitter des Austrittssammlers des Dampferzeugers wurde mit demselben Ziel verfeinert. Die mit dem neuen Gitter erzielten Ergebnisse wurden als physikalisch korrekt bewertet. Die Wärmeübertragung zwischen der Eintritts- und der Austrittskammer des DEs durch die Zwischentrennwand wird zudem modelliert. Wie bereits erwähnt, wurde diese in ATHLET-, ATHLET-CD- und AC²- Simulatoren für KKW bisher nicht berücksichtigt. Ein Beispiel für die Temperaturverteilung in der Zwischentrennwand und der Austrittskammer ist in Abb. 4.2 dargestellt. Aus Abb. 4.2 ist ersichtlich, dass die durch das Fluid in der Eintrittskammer erwärmte Fluidwand Wärme an das Fluid in der Austrittskammer (Grenzschicht neben der Zwischentrennwand) und an die Außenwände der Austrittskammer überträgt. Auf der anderen Seite wirkt die durch die Zwischentrennwand übertragene Wärme als Wärmesenke für das Fluid im Eintrittssammler des Dampferzeugers.

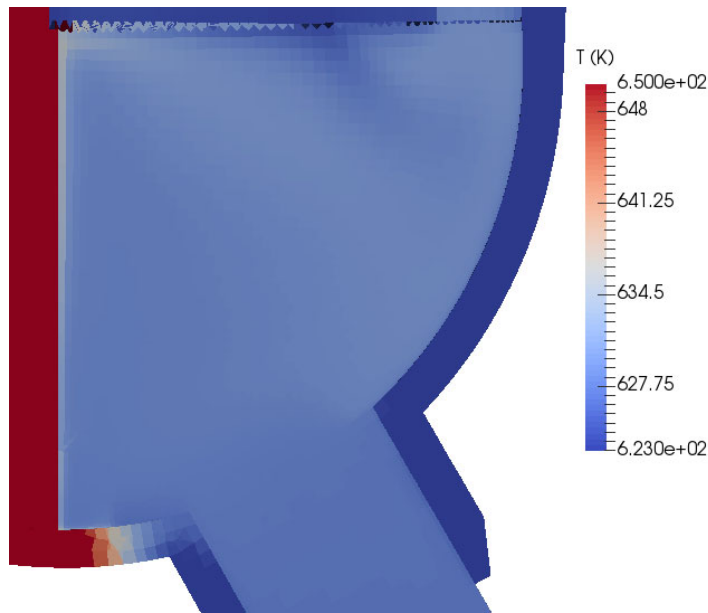


Abb. 4.2 Beispiel der Temperaturverteilung in Austrittskammer und Zwischentrennwand

Das obere Plenum des Reaktordruckbehälters wurde vollständig neu vernetzt, um die zusätzliche Innenwand zur Abtrennung des künstlichen Auslasses, welche in Rahmen des Projekts 3614R01307 für die Berechnungen mit Ansys-CFX nötig war, zu entfernen und das Gitter an den Wänden des RDB zu verfeinern. Alle Gitterteile wurden anschließend zu einem Rechengitter zusammengefasst.

Das resultierende Gitter enthält 1,36 Millionen (1.359.912) Zellen in der Flüssigkeitsregion und 0,74 Millionen (742.266) Zellen in der Wandregion. Die Fluidregion enthält überwiegend hexaedrische Elemente und die Zellelemente in der Wandregion sind tetraedrisch.

Die für die „Stand-alone“-Simulationen verwendeten Randbedingungen sind in Abb. 4.3 zusammen mit der U-Rohr-Region dargestellt, für die das Modell eines porösen Mediums verwendet wird.

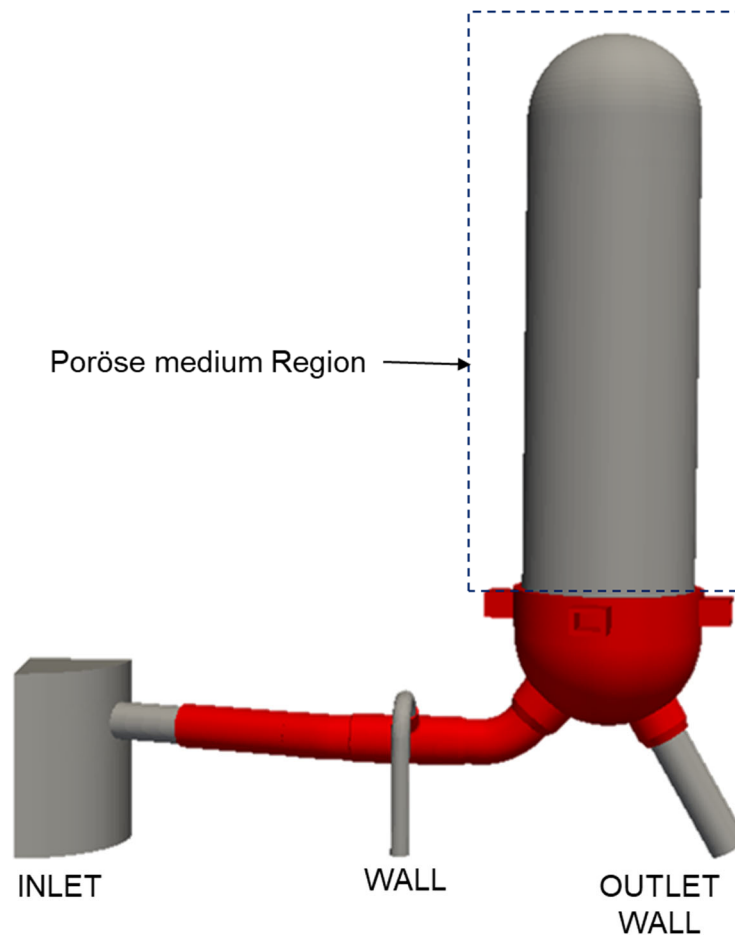


Abb. 4.3 Einrichten der „Stand-alone“-OpenFOAM-Simulation

Die Randbedingung INLET wird unten am oberen Plenum des RDB angewendet. Hier wird die Geschwindigkeit und die Temperatur des Fluids fest vorgegeben. Der Druck berechnet sich aus dem Druck innerhalb des Strömungsgebiets. Der Auslass der Volumenausgleichsleitung wurde als Wand modelliert. Die WALL-Randbedingung setzt die Geschwindigkeit auf 0,0 m/s. Die Temperatur und der Druck werden aus den Bedingungen innerhalb des Rechengebiets ermittelt und für die Größen des Turbulenzmodells werden Wandfunktionen verwendet. Je nach Simulation wird für den Auslassstutzen des Dampferzeugers zum kalten Strang entweder eine OUTLET oder eine WALL-Randbedingung verwendet (siehe Abb. 4.18). Bei einer OUTLET-Randbedingung wird der Druck vorgegeben und die restlichen Größen (Temperatur, Geschwindigkeit, Turbulenzgrößen) werden aus den Größen innerhalb des Rechengebiets ermittelt. Die beiden unterschiedlichen Randbedingungen an der Austrittsseite des DE (kalter Strang) wurden für die Kalibrierung der Region mit dem porösen Medium (OUTLET) und für die Plausibilitätsstudie des *chtMultiregionFoam* (WALL) verwendet. In der Plausibilitätsstudie wurde der Druckanstieg im System bei konstanter INLET-Strömung analysiert.

Turbulenzmodell für den Fluid-Region

Das „k-omega-SST (Shear Stress Transport)“ Turbulenzmodell wurde für alle Simulationen aktiviert, auch für die später beschriebenen gekoppelten Rechnungen mit ACD-C-OpenFOAM und AC²-OpenFOAM. Es ist ein Zweigleichungs-Wirbelviskositätsmodell und kombiniert das „k-epsilon“- und das „k-omega“-Turbulenzmodell und wendet beide auf die freie Strömung bzw. die Grenzschicht an. Die Verwendung einer „k-omega“-Formulierung in den inneren Bereichen der Grenzschicht, d. h. in der viskosen Teilschicht, der Pufferschicht und der logarithmischen Schicht, macht das Modell bis zur Wand hinunter direkt anwendbar. Wird jedoch nur das „k-omega“-Modell zur Vorhersage der Strömung in der gesamten Region angewandt, neigt es dazu, die Turbulenz in der freien Strömung oder im Bulk-Bereich überzubewerten. Das „k-epsilon“-Modell hingegen liefert eine zuverlässige Lösung für den Bereich der freien Strömung und neigt dazu, die wandinduzierte Turbulenz schlecht vorherzusagen. Sowohl die „k-epsilon“- als auch die „k-omega“-Turbulenzmodelle verwenden die Boussinesq-Wirbelviskositätsannahme, die postuliert, dass der durch turbulente Wirbel verursachte Impulsübertrag mit einer Wirbelviskosität modelliert werden kann. Zur Berechnung der Turbulenzeigenschaften der Strömung lösen die Modelle zwei Transportgleichungen, die empirische Schließungskoeffizienten verwenden (und über diese verbunden sind). Das „k-epsilon“-Turbulenzmodell löst die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie und die turbulente Dissipationsrate. Das „k-omega“-Turbulenzmodell löst die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie und die spezifische turbulente Dissipationsrate. Die Turbulenzdissipation ist die Rate, mit der die kinetische Energie der Turbulenz in thermische innere Energie umgewandelt wird (m^2/s^3). Die spezifische turbulente Dissipationsrate ist die Rate, mit der die kinetische Energie der Turbulenz pro Volumen- und Zeiteinheit in thermische innere Energie umgewandelt wird ($1/\text{s}$). Bei einer wandbegrenzten Strömung wird in der wandnahen Grenzschicht, in der die Geschwindigkeit gleich Null ist (non-slip Randbedingung), eine Turbulenz induziert. Um das Geschwindigkeitsfeld und weitere fallabhängige Strömungsparameter (z. B. Temperaturfeld) im gesamten Gebiet berechnen zu können, muss die Strömung in der Grenzschicht korrekt aufgelöst werden. Um die Lösung zu finden, kann man die Turbulenz bis zur Wand integrieren. Dies kann dazu führen, dass eine feine Gitterauflösung an den Wänden erforderlich ist, was bedeutet, dass ein erheblicher Rechenaufwand entsteht. Einen alternativen Ansatz zur Lösung dieses Problems bieten die so genannten Wandfunktionen. Bei den Wandfunktionen handelt es sich um empirische Korrelationen, die dazu dienen, die Physik der Strömung im wandnahen Bereich zu lösen. Sie setzen voraus, dass der Mittelpunkt der

ersten Zelle des Netzes in einem logarithmischen Bereich oder einer logarithmischen Schicht liegt, um die Genauigkeit des Ergebnisses zu gewährleisten. Daher muss die Grenzschicht beim Ansatz der Wandfunktionen nicht aufgelöst werden, was zu einer erheblichen Verkleinerung der Anzahl der Gitterzellen in Wandnähe und damit zu einer Reduzierung der Gesamtanzahl der Zellen im Rechengebiet führt. Auf diese Weise wirken die Wandfunktionen wie eine Brücke zwischen dem Randbereich der Wand und dem voll entwickelten Bereich. Da das „k-epsilon“-Turbulenzmodell ein High-Reynolds-Turbulenzmodell ist, muss für die Integration der Gleichungen durch die viskose/laminare Teilschicht ein "Low-Reynolds"-Ansatz verwendet werden. Zu diesem Zweck werden zusätzliche wandnahe, hochgradig nichtlineare Dämpfungsfunktionen eingeführt, die empirische Parameter enthalten. Abhängig von den lokalen Strömungsbedingungen können sie einerseits aus physikalischer Sicht unbefriedigend sein oder zu instabilen und divergierenden Berechnungen führen. Im Falle des „k-omega“-Turbulenzmodells, das im Prinzip ein Low-Reynolds-Turbulenzmodell ist, werden die Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und die spezifische Dissipationsrate direkt gelöst.

Das „k-omega SST“-Modell hat einen gemischten Ansatz für die Auswahl des Turbulenzmodells, wobei zwischen k-omega und k-epsilon auf der Grundlage einer Mischfunktion (blending function) in Abhängigkeit von der Entfernung zur Wand gewechselt wird. Die Kombination der beiden Modelle bietet eine Lösung für die Nachteile der beiden Modelle, die auftreten, falls eines allein angewendet wird. Das „k-omega SST“-Modell erzeugt etwas zu große Turbulenzwerte in Regionen mit großer normaler Dehnung, wie Stagnationsregionen und Regionen mit starker Beschleunigung. Diese Tendenz ist jedoch viel weniger ausgeprägt als bei einem normalen „k-epsilon“-Modell. Eine zusätzliche Verbesserung des kombinierten „k-epsilon - k-omega“-Turbulenzmodells wird erreicht, wenn der Schubspannungstransport berücksichtigt wird, was zu dem „k-omega SST“-Modell führt. Der Schubspannungstransport wird durch die Annahme von Bradshaw berücksichtigt, wonach die Schubspannung proportional zur turbulenten kinetischen Energie ist und in die Definition der Wirbelviskosität aufgenommen wird. Im Allgemeinen handelt es sich um ein numerisch sehr robustes Turbulenzmodell, das für eine breite Palette von Strömungsbedingungen geeignet ist.

Im *chtMultiregionFoam*-Setup werden somit die folgenden Wandfunktionen angegeben (FLUID-Region):

- `kqRWallFunction` für die turbulente kinetische Energie, die Null-Gradienten-Randbedingungen an der festen Wand verwendet,

- nutkWallFunction, die eine Randbedingung für die Turbulenzviskosität auf der Grundlage der kinetischen Turbulenzenergie darstellt, sowie
- omegaWallFunction für die spezifische turbulente Dissipationsrate, die Null-Gradienten-Randbedingungen an der festen Wand verwendet. Es werden unterschiedliche Korrelationen für die viskosen und die logarithmischen Teilschichten innerhalb der Wandgrenzschicht zur Berechnung der spezifischen Dissipation in Abhängigkeit vom Wandabstand verwendet.

Kalibrierung des Modells des porösen Mediums der U-Rohr-Region

Eine Strömung durch ein poröses Medium kann modelliert werden, indem der Impulsbilanzgleichung ein Senkenterm hinzugefügt wird. Das poröse Mediummodell von Darcy-Forchheimer wurde für den Bereich der U-Rohre aktiviert, wo auch eine Wärmesenke vorgegeben wurde. Die Simulationsergebnisse des „Stand-alone“-Modells von ATHLET wurden zur Kalibrierung des porösen Modells herangezogen. Auf der Außenseite der Wände wurde eine adiabate Randbedingung vorgegeben. Ein Wärmetransport in den Sicherheitsbehälter wurde also für diese allein stehende CFD-Simulationen nicht berücksichtigt.

Das Darcy-Forchheimer-Modell für poröse Medien ist eine Erweiterung des Darcy-Gesetzes, das auf den Widerstandseigenschaften beruht. Es verwendet eine polynomische Funktion zweiter Ordnung zur Berechnung des Druckverlustes:

$$\nabla p = av + bv^2 \quad (4.1)$$

Dabei ist ∇p der berechnete Druckverlust und v die Strömungsgeschwindigkeit. Die Parameter a und b sind der lineare bzw. der nichtlineare Geschwindigkeitsbeitrag zum Druckverlust und spiegeln den laminaren und turbulenten Beitrag zum Druckverlust wider:

$$a = \mu D \quad (4.2)$$

$$b = \frac{1}{2} \rho F \quad (4.3)$$

Dabei sind D und F Parameter des Darcy-Forchheimer-Modells von OpenFOAM, um den laminaren und turbulenten Anteil des Druckverlusts zu modellieren, und μ und ρ sind

die dynamische Viskosität bzw. Dichte des Fluids. In OpenFOAM wird die Fluidströmung immer dreidimensional modelliert, auch in den vereinfachten Fällen zweidimensionaler Strömung.

Für den aufsteigenden und den absteigenden Bereich der U-Rohre wird eine feste Strömungsrichtung (nach oben bzw. unten) vorgegeben, für die mit Hilfe der Darcy-Forchheimer-Gleichung der Druckverlust berechnet wird. Für Strömungen senkrecht dazu, also in horizontaler Richtung, wird ein eine Million Mal so hoher Druckverlust vorgegeben. Dies sorgt dafür, dass es zu keiner Querströmung in diesem Bereich kommen kann, was dem Strömungsverhalten in den U-Rohren entspricht, da dort auch kein Massenaustausch zwischen den einzelnen U-Rohren möglich ist. Im oberen Bereich der Heizrohre kann eine solche Modellierung nicht vorgenommen werden, da in der OpenFOAM-Implementierung des Darcy-Forchheimer-Modells nur eine feste Strömungsrichtung vorgegeben werden kann und keine gekrümmte. Deshalb werden im Bereich der Bögen der U-Rohre für alle drei Raumrichtungen die gleichen Parameter für den Druckverlust vorgegeben.

```
myD 2.956e5;

porosity1
{
    type            explicitPorositySource;
    active          yes;
    explicitPorositySourceCoeff
    {
        selectionMode    cellZone;
        cellZone          POROUS_RB_ZONE;
        type              DarcyForchheimer;

        d                (-1e6 -1e6 $myD);
        f                (0,0,0);

        coordinateSystem;
        {
            type          cartesian;
            origin         (0 0 0);
            coordinateRotation
            {
                type      axesRotation;
                e1         (1 0 0);
                e2         (0 1 0);
            }
        }
    }
}
```

Abb. 4.4 Spezifikation der Darcy-Forchheimer Koeffizienten im U-Rohrbereich

Abb. 4.4 zeigt ein Beispiel dafür, wie das Modell für die „porosity1“-Region aktiviert wird. Die Parameter $\vec{D}$ und $\vec{F}$ werden mit den in Abb. 4.4 angegebenen Parametern d und f , sowie einer Strömungsrichtung, definiert durch zwei Koordinatenachsen, vorgegeben.

Der resultierende Senken-Term in der Impulsbilanzgleichung besteht aus zwei Teilen, einem laminaren und einem turbulenten Verlustterm, die insgesamt einen Druckabfall erzeugen, der proportional zur Geschwindigkeit bzw. zum Geschwindigkeitsquadrat ist:

$$S_i = -\left(\mu D_i + \frac{1}{2}\rho|u_{kk}|F_i\right)u_i \quad (4.4)$$

Das Darcy-Forchheimer-Modell wurde anhand der Ergebnisse der „Stand-alone“-CFD- und ATHLET-Simulationen (Abb. 3.1, Kapitel 3.1) bzw. analytischen Berechnungen auf Basis des in ATHLET verwendeten Druckverlustmodells kalibriert. Dabei wurden zwei verschiedene Betriebsbedingungen berücksichtigt:

- im Normalbetrieb, bei dem in dem DH-Kühlmittelstrang Wasser das strömende Fluid bei nominalen und annähernd nominalen Reaktorbetriebsbedingungen ist sowie
- bei Störfallbedingungen, bei denen in dem DH-Kühlmittelstrang Wasserdampf das strömende Medium ist. Diese entsprechen dem Testfall 1 des vorherigen Projekts /BAN 17/.

Die Kalibrierung bei Normalbetriebsbedingungen wurde durchgeführt, um die *chtMulti-RegionFoam*-Vorhersagen mit den „Ansys CFX“- und ATHLET-Ergebnissen zu vergleichen und zu validieren und war Teil der Vorbereitungsarbeiten des CFD-Modells für die Kopplung mit ATHLET-CD. In diesem Fall wurde an den Auslassstutzen des Dampferzeugers zum kalten Strang eine OUTLET-Randbedingung festgelegt (Abb. 4.3). Die Simulationen wurden im eingeschwungenen Zustand durchgeführt. Die Anfangs- und Randbedingungen sind in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1 Anfangs- und Randbedingungen für die Simulation des stationären Zustands unter Normalbetriebsbedingungen

Domäneninitialisierungsparameter				
Strömungs- geschwindig- keit [m/s]	Temperatur [K]	Druck [MPa]	Fluid- dichte [kg/m ³]	Volumetrische Wärmesenke in der U-Rohr-Region [W/m ³]
0	597,71	16	670,4	1,186 10 ⁶

Randbedingungen		
INLET (Abb. 4.3)		
Massen- durchsatz [kg/s]	Temperatur [K]	Druck [MPa]
4970,5	597,71 <i>Dirichlet Randbedingung</i>	<i>Neumann Randbedingung</i>
OUTLET (Abb. 4.3)		
Strömungs- geschwindig- keit [m/s]	Temperatur [K]	Druck [MPa]
<i>Neumann Randbedingung</i>	597,71 <i>inletOutlet= Neumann-Randbedingung, die in eine Dirichlet-Randbedingung umgewandelt wird, wenn der Geschwindigkeitsvektor neben dem Rand ins Innere des Bereichs zielt</i>	1,6 10 ⁷ oder 1,54 10 ⁷ <i>Dirichlet Randbedingung</i>
WALLS (Abb. 4.3)		
Strömungs- geschwindig- keit [m/s]	Temperatur [K]	Druck [MPa]
<i>no-slip Dirichlet Randbedingung</i>	<i>Neumann Randbedingung /Wärmeübertragung zu den Wänden, falls vorhanden</i>	<i>fixedFluxPressure = Gradient aus hydrostatischen Unterschieden</i>

Analog zu den Ansys-CFX-Simulationen (Forschungsprojekt 3614R01307) wurde ein Viertel des oberen Plenums modelliert. Für die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Zonen des Fluidgitters wurden *cyclicAMI*-Randbedingungen verwendet, die damit zu einem Rechengbiet zusammengefasst wurden. Die Volumenausgleichsleitung

wurde als verschlossen simuliert. Dafür wurde eine WALL-Randbedingung am Auslass der Volumenausgleichsleitung vorgegeben (Abb. 4.3).

Die stationären Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den mit ATHLET berechneten Integralwerten für die Druckverluste und den Energietransfer von der Primär- auf die Sekundärseite. Ein Überblick über die berechnete Druckverteilung mit *cht-MultiRegionFoam* ist in Abb. 4.5 dargestellt. Die Gesamtdruckverluste von 0,317 MPa stimmen mit den ATHLET-Ergebnissen überein, und ein ähnliches Ergebnis (0,300 MPa) wurde mit dem Ansys-CFX-Modell im vorherigen Projekt berechnet. Der berechnete Temperaturabfall über dem DE von 35,27 K lag gleich mit dem von ATHLET berechneten Wert, wich jedoch geringfügig von der Ansys-CFX-Vorhersage ab, die 30 K betrug. Dieses vorab diskutierte Validierungsergebnis von OpenFOAM wurden mit den Darcy-Forchheimer-Modellparametern von $D = 2,956 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^2$ und $F = 0$ erzielt.

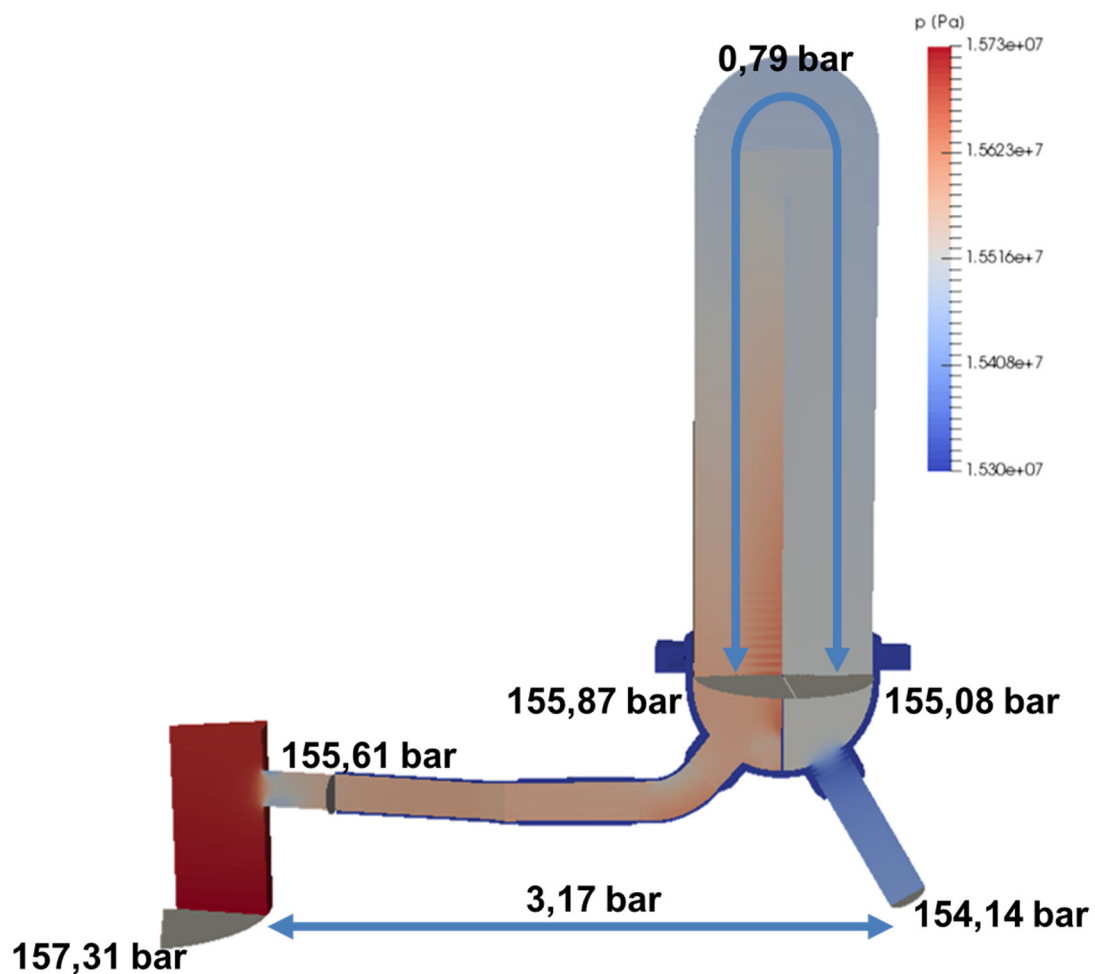


Abb. 4.5 Berechnete Druckverteilung im DH-Kühlmittelstrang unter Nominalbetriebsbedingungen

Das Modell des porösen Mediums wurde anschließend für Störfallbedingungen (Testfall 1, Forschungsprojekt 3614R01307) rekali­briert, bei denen in dem DH-Kühlmittelstrang Wasserdampf das strömende Medium ist. Dazu wurde der Parameter D des Darcy-Forchheimer Modells von OpenFOAM so angepasst, dass damit der gleiche Druckverlust bei laminaren Strömungsbedingungen berechnet wird wie mit dem Druckverlustmodell von ATHLET. Letzteres liefert bei laminaren Strömungsbedingungen für nicht zu kleine Geschwindigkeiten einen linearen Anstieg des Druckverlusts mit der Geschwindigkeit. Es wurde zu diesem Zeitpunkt von einer laminaren Strömung in den U-Rohren des Dampferzeugers ausgegangen, da im Vorgängerprojekt, insbesondere während der Zeiten, zu denen das DH-Abblaseventil geschlossen war, in einer größeren Anzahl von U-Rohren laminare als turbulente Strömung beobachtet wurde, wobei im Ansys-CFX-Modell als Ausgleich für die vereinfachende inkompressible Modellierung ein künstlicher Auslass im Bereich des oberen Plenums des RDBs verwendet wurde. Unter der Annahme, dass der gesamte Massenstrom, der während der Transienten aus dem Kernbereich in das obere Plenum des RDB hineinströmt, durch den Dampferzeuger Richtung kalten Strang abströmen würde, ist sogar eine vollständig laminare Strömung in den Dampferzeuger-U-Rohren zu erwarten. Die Berücksichtigung beider Strömungszustände hätte die Erweiterung des OpenFOAM-Modells notwendig gemacht.

Aus dem Vergleich des ATHLET-Modells mit dem OpenFOAM Modell ergibt sich der Darcy-Parameter $D = 2,831 \cdot 10^5 \text{ 1/m}^2$. Wie schon für den Fall für nominale Bedingungen wird für den Bereich der auf- und absteigenden U-Rohre dieser Wert in vertikaler Richtung verwendet. In horizontaler Richtung wird er mit 10^6 multipliziert. Im Bereich der U-Rohrbögen wird dieser Wert für alle drei Raumrichtungen verwendet.

Die im Folgenden beschriebenen verbesserten Modelle für die physikalischen Eigenschaften des Fluids wurden angewandt, um die beste Übereinstimmung mit den ATHLET-Ergebnissen zu erzielen. Die später beschriebenen gekoppelten Simulationen zeigen, dass die Vernachlässigung des Wasserstoffs im Wasserdampf-Wasserstoff-Gasgemisch zu einer Abweichung von den „Stand-alone“-Ergebnissen von ACD-C und AC² führt. Die Kalibrierung des Darcy-Forchheimer-Porenmodells wurde aber trotzdem unter der Annahme durchgeführt, dass nur Wasserdampf das fluide Medium ist.

Wärmeübertragung in der U-Rohr Region

Es wird für die untersuchte Transiente postuliert, dass auf der Sekundärseite der Dampferzeuger weiter eine gewisse Menge Wasserdampf vorhanden ist, zu der Energie von

der Primärseite übertragen werden kann. Im Vorgängerprojekt wurde dieser Effekt simuliert, indem eine fest vorgegebene Wärmesenke im Bereich der U-Rohre im CFD-Modell modelliert wurde. Die Wärmemenge wurde dabei mit einem konstanten Energieabfluss pro Volumen spezifiziert. Die lokalen Bedingungen in den U-Rohren, insbesondere die lokale Geschwindigkeit und die lokale Temperatur wurden dabei nicht berücksichtigt. Deshalb wurde im Rahmen dieses Projekts eine spezielle Wärmesenke *steamGeneratorHeatTransferSource* als OpenFOAM Bibliothek implementiert, die auf der gleichen Korrelation (Dittus-Boelter) basiert, wie sie in AC² verwendet wird.

Es hätte auch die Möglichkeit bestanden, diese Wärmesenke als Code, der erst zur Laufzeit der Simulation übersetzt wird, zu implementieren. Da aber OpenFOAM für die Implementierung von solchen Quell- oder Senkentermen als Bibliothek entsprechende Basisklassen zur Verfügung stellt, war die gewählte Art der Implementierung mit relativ geringem Aufwand möglich. Außerdem konnte so der Quellcode der Bibliothek in die zentrale Softwareversionsverwaltung der GRS aufgenommen werden. Diese Aufnahme stellt eine langfristige Verfügbarkeit und Qualitätskontrolle sicher.

Die Wärmeübertragung wird bestimmt durch die Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite, der Fläche der U-Rohre, den Wärmeübertragungskoeffizienten auf beiden Seiten der U-Rohre und der Wärmeleitfähigkeit der U-Rohrwände.

Die lokale Temperatur auf der Primärseite wurde vom OpenFOAM-Solver berechnet. Dagegen wurde die Temperatur auf der Sekundärseite mit 350 °C fest vorgegeben.

Der Wärmeübertragungskoeffizient auf der Primärseite ergibt sich aus der lokalen Geschwindigkeit und den temperaturabhängigen Materialeigenschaften des Fluids. Diese werden wieder vom OpenFOAM-Solver berechnet. Der Wärmeübertragungskoeffizient auf der Sekundärseite wird mit 100 W/(m² K) fest vorgegeben. Ebenfalls fest vorgegeben wird die Wärmeleitfähigkeit der U-Rohrwände (20 W/(m K)). Die Fläche der U-Rohre wird als Flächendichte berücksichtigt, die aus dem Durchmesser der U-Rohre und dem Abstand zwischen den U-Rohren („Pitch“) berechnet wird.

```

heatSource1
{
    type            steamGeneratorHeatTransferSource;
    active          yes;

    selectionMode   cellZone;
    cellZone        POROUS_PIPES_ZONE_TOP;

    d               0.0196;
    z               0.0012;
    pitch           0.030;
    lambda           20e0;
    Tsecondary      623;
    alphaSecondary  100;
}

```

Abb. 4.6 Spezifikation der Wärmesenke im U-Rohrbereich (u. a. Bereich des Rechengitters für den die Senke verwendet werden soll, Temperatur und Wärmeübergangskoeffizient auf die Sekundärseite, Geometrie der U-Rohre, Wärmeleitfähigkeit der U-Rohrwände)

Abb. 4.6 zeigt, wie die Parameter der Wärmesenke innerhalb eines OpenFOAM-Eingabedatensatzes spezifiziert werden.

Verbesserungen der physikalischen Modelle der fluiden Medien

Nachfolgend erfolgt eine kurze Beschreibung der Kalibrierung der verschiedenen Stoffwerte mit den Ansätzen von Sutherland (Viskosität), Janaf (Wärmekapazität), PengRobinsonGas (Zustandsgleichung/Dichte).

Standardmäßig bringt OpenFOAM keine Materialbibliothek mit Stoffwerten für verschiedene Fluide oder Fluidgemische mit. Vielmehr können die Stoffwerte mit Hilfe verschiedener, in OpenFOAM implementierten Modellen berechnet werden, wobei zusätzlich zur Angabe des zu verwendenden Modells auch noch Modellparameter für den jeweiligen Stoff angegeben werden müssen. Weiterhin ist zu beachten, dass bei der Simulation von Stoffgemischen alle Komponenten des Gemischs dieselben Modelle verwenden müssen.

Während des hier zu simulierenden Zeitabschnitts der Hochdruck-SBO-Transiente befinden sich in der Fluid-Region des CFD-Simulationsgebiets Wasserdampf und Wasserstoff. Die Temperaturen können dabei in einem Bereich knapp oberhalb der Sättigungstemperatur (bei 623 K und 165 bar) bis über 1300 K liegen. Da der Temperaturbereich in der Nähe des Phasenübergangs zu flüssigen Wasser startet, können einfache Modelle

wie das eines idealen Gases oder einfache Polynomansätze nicht verwendet werden. Mit den in Tab. 4.2 aufgeführten, in OpenFOAM verfügbaren Modellen, war es möglich, die Materialparameter von Wasserdampf und Wasserstoff im relevanten Temperatur- und Druckbereich mit hinreichender Genauigkeit zu modellieren.

Tab. 4.2 Modellierung der Stoffwerte

Stoffwert	Formelzeichen	Einheit	Modell
Dynamische Viskosität	μ	Pa s	Sutherland
Wärmekapazität	Cp	J/(K kg)	Janaf
Dichte	ρ	kg/m ³	Peng-Robinson

Die Modellparameter wurden für jedes der Modelle der beiden Stoffe bestimmt, indem die Vorhersagen des Modells mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an öffentlich zugängliche Materialdaten /LEM 22/ angepasst wurden /STF 19/.

In Abb. 4.7 sind die Parameter der Materialmodelle aufgeführt, die für die Simulationen mit Wasserdampf-Wasserstoff-Gasgemisch verwendet werden.

```
thermoType
{
    type            heRhoThermo;
    mixture          multiComponentMixture;
    transport        sutherland;
    thermo           janaf;
    equationOfState  PengRobinsonGas;
    specie           specie;
    energy           sensibleEnthalpy;
}
species
(
    H2O
    H2
);
inertSpecie H2O;
H2O
{
    specie
    {
        molWeight  18.0153;
    }
    thermodynamics
    {
        Tlow        600;
        Thigh       2500;
        Tcommon     750;
        highCpCoeffs ( 2.52014947e+01 -7.03156705e-02  8.92138794e-05
                        -4.97027651e-08  1.05023177e-11  716223.2997880644
                        20508.299817201478);
        lowCpCoeffs  ( 4.47605250e+03 -2.21652225e+01  4.11585766e-02
                        -3.39253564e-05  1.04720655e-08  0 0 );
    }
}
```

```

transport
{
    As          2.507347661514001e-06;
    Ts          1076.7103848804272;
}
equationOfState
{
    Tc          647.3;
    Vc          0.056;
    Pc          22.09e6;
    omega       0.344;
}
}
H2
{
    specie
    {
        molWeight 2.01594;
    }
    thermodynamics
    {
        Tlow      200;
        Thigh     3500;
        Tcommon   750; // 1000;
        highCpCoeffs ( 3.88035053e+00 -1.38705220e-03 1.69161731e-06
                        -6.34771532e-10 8.30622725e-14 0 0);
        lowCpCoeffs ( 3.88035053e+00 -1.38705220e-03 1.69161731e-06
                        -6.34771532e-10 8.30622725e-14 0 0);
    }
    transport
    {
        As          7.242337113220584e-07;
        Ts          132.9679344547118;
    }
    equationOfState
    {
        Tc          33.0;
        Vc          66.9e-3;
        Pc          12.9e5;
        omega       -0.216;
    }
}

```

Abb. 4.7 Für die Simulationen in OpenFOAM verwendete Materialdaten des Gasgemisches

Für den Vergleich zwischen den öffentlich zugänglichen Materialdaten und den vom CFD-Programm OpenFOAM verwendeten Werten wurden die in den folgenden Abbildungen Abb. 4.8 bis Abb. 4.13 dargestellten OpenFOAM-Werte ermittelt, indem die entsprechenden Werte in allen Zellen einer Simulation bei dem gegebenen Druck gegen die Temperatur geplottet wurden. Die Simulation wurde einmal mit reinem Wasserdampf als Medium und einmal mit reinem Wasserstoff durchgeführt. Bei niedrigen Temperaturen streuen die Werte um die veröffentlichten Daten. Das kann dadurch erklärt werden, dass nicht in allen Zellen exakt der gleiche Druck herrscht, da dieser durch die lokale

Strömung verändert wird. Entsprechend werden die Stoffwerte in der OpenFOAM-Simulation auch nicht exakt für den durch die Randbedingung vorgegeben Druckwert berechnet, sondern für den jeweils lokal herrschenden Druck. Dieser Effekt macht sich insbesondere bei der Dichte deutlich bemerkbar.

In Abb. 4.8 bis Abb. 4.10 ist die dynamische Viskosität, die Dichte und die spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf bei 165 bar im relevanten Temperaturbereich dargestellt und die Abb. 4.11 bis Abb. 4.13 zeigen diese Größen für Wasserstoff. Für beide Stoffe liegen die maximalen Abweichungen im niedrigen einstelligen Prozentbereich und tragen nicht wesentlich zu den Unsicherheiten in den Simulationen bei (siehe z. B. die in Kapitel 3.5.2 diskutierten Druckunterschiede).

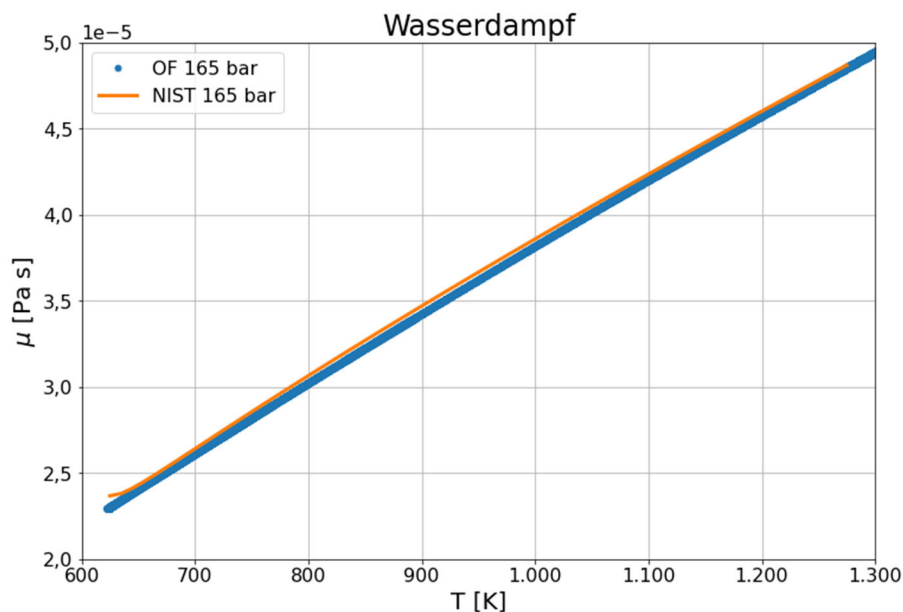


Abb. 4.8 Vergleich der dynamischen Viskosität von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Sutherland-Modells berechnet

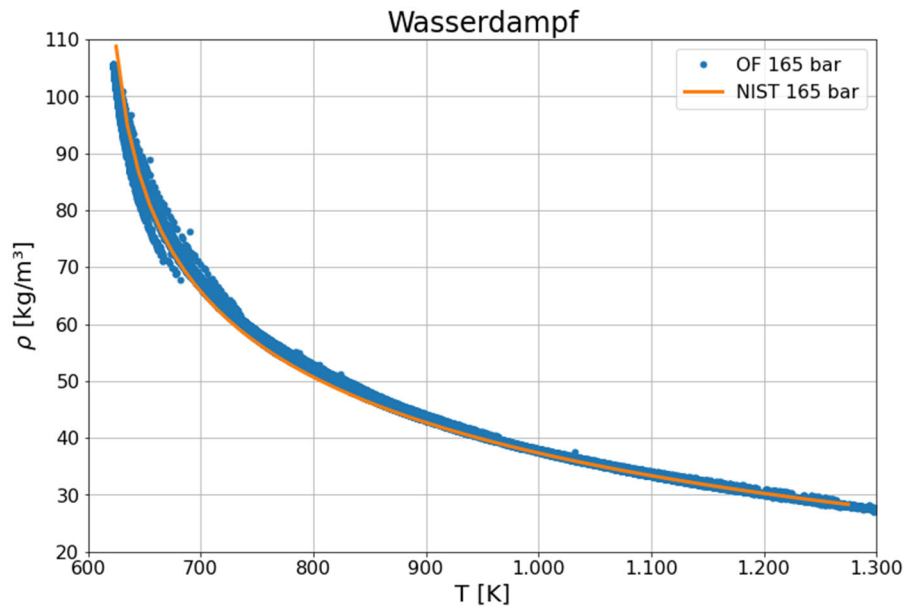


Abb. 4.9 Vergleich der Dichte von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng-Robinson-Modells berechnet

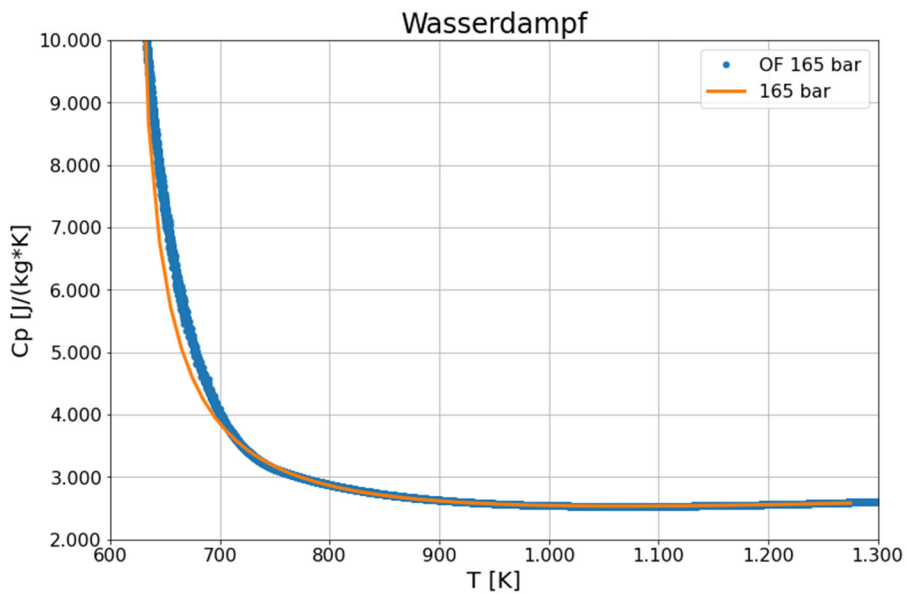


Abb. 4.10 Vergleich der spezifischen Wärmekapazität von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Janaf-Modells berechnet

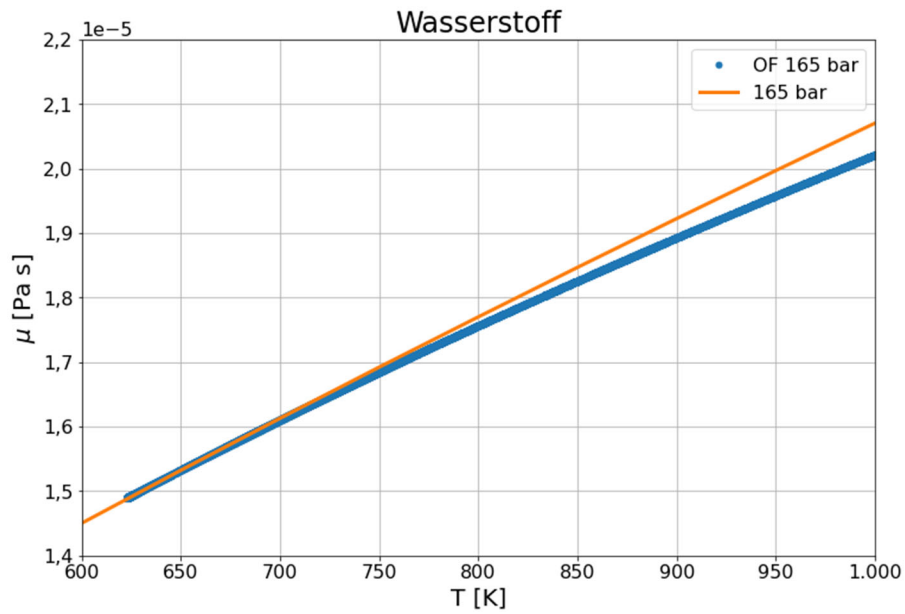


Abb. 4.11 Vergleich der dynamischen Viskosität von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Sutherland-Modells berechnet

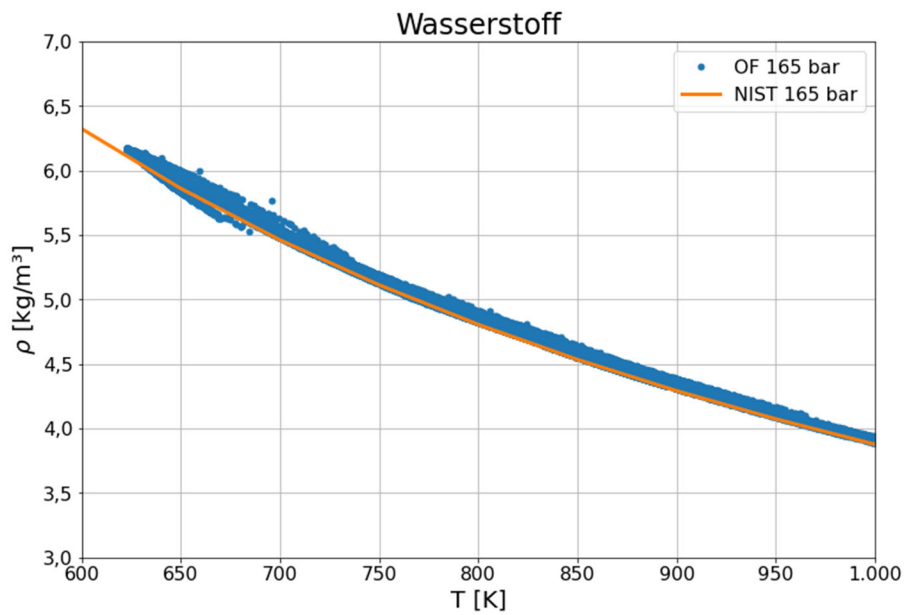


Abb. 4.12 Vergleich der Dichte von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng-Robinson-Modells berechnet

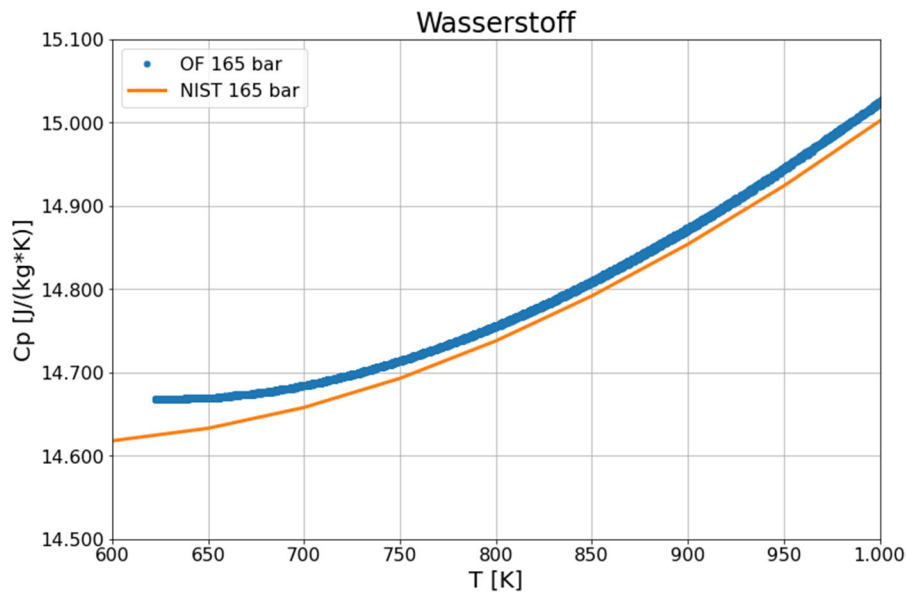


Abb. 4.13 Vergleich der spezifischen Wärmekapazität von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng-Robinson-Modells berechnet

Auf Basis der komponentenspezifischen Stoffwerte berechnet dann OpenFOAM für jede Zelle gemittelte Stoffwerte auf Basis der lokalen Konzentration der Komponenten /OFF 20/.

Eine weitere, zu Beginn des Projekts untersuchte Optimierung des Rechengitters wäre die Erhöhung der Anzahl der U-Rohrgruppen gewesen. Es stellte sich heraus, dass dazu eine deutliche Erhöhung der Gitterzellen im Bereich der U-Rohre und auch in den Dampferzeugerkammern notwendig gewesen wäre, insbesondere, um zu großen Massenflussfehler an der verwendeten *cyclicAMI*-Schnittstelle zwischen diesen Gebieten zu vermeiden. Wie oben diskutiert, konnte durch die Verwendung von anisotropen Porositätsparametern im Bereich der vertikalen U-Rohrabschnitte ein Queraustausch zwischen diesen verhindert werden. Hier bräuchte eine Erhöhung der U-Rohrgruppenanzahl also keine Verbesserung. Der gekrümmte Bereich der U-Rohre wurde im Vorgängerprojekt zum großen Teil durch rechtwinklige Wände zwischen den U-Rohrgruppen simuliert. In diesem Bereich wäre es deshalb notwendig geworden, das Gitter völlig neu zu erstellen, um den Vorteil einer höheren Anzahl von U-Rohrgruppen ausschöpfen zu können, da die Unsicherheit durch das rechtwinklige Gitter sicher größer ist als durch eine unterschiedliche Anzahl an U-Rohrgruppen. Aus den vorgenannten Gründen wurde deshalb entschieden, diese Optimierungsmethode nicht weiter zu verfolgen.

4.1.2 Vergleichsrechnungen zur Validierung

Die Simulationen mit dem Solver *chtMultiRegionFoam* wurden bei Störfallbedingungen durchgeführt, die dem Testfall 1 des Vorgängerprojekts /BAN 17/ entsprechen. Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, die Leistungsfähigkeit des OpenFOAM-Solvers zu bewerten. Die Simulationsergebnisse wurden mit den CFX-Vorhersagen der „Stand-alone“-Version verglichen, die im Rahmen des Forschungsprojekts 3614R01307 gewonnen wurden. Für den qualitativen Vergleich der OpenFOAM- und der CFX-Simulationen wurden zwei Strömungsszenarien betrachtet: offener Pumpenbogen und geschlossener Pumpenbogen mit OUTLET- bzw. WALL-Randbedingungen am kalten Strang (Abb. 4.1 und Abb. 4.3). In beiden Simulationen wurden die Randbedingungen am INLET (Abb. 4.3), der den Kernaustritt darstellt, wie folgt festgelegt:

- Massenstrom = 0,9 kg/s und
- Gastemperatur/Wasserdampftemperatur = 1.200 K.

In beiden Simulationen war das Kühlmittel im Primärkreislauf Dampf. Der Wasserstoff wurde nicht berücksichtigt. Der Wärmeübergang im Bereich des porösen Mediums der U-Rohre im DE wurde mit einem Wärmeübergangskoeffizienten auf der Sekundärseite von $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und einer Temperatur auf der Sekundärseite von 623 K modelliert. Der Wärmeübergang durch die festen Wände des heißen Stranges und die Außenwände der Ein- und Austrittskammern wurde mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und einer Sicherheitsbehältertemperatur von 350 K modelliert. Das „k-omega-SST“-Turbulenzmodell wurde für OpenFOAM in beiden Simulationen verwendet.

Die Gitter sind, wie in Kapitel 4.1.1 erwähnt, nicht völlig identisch, da das ursprüngliche CFX-Gitter verfeinert werden musste, um es für die empfindlicheren numerischen Solver in OpenFOAM geeignet zu machen. Außerdem wurde der OUTLET (Auslass) am äußeren Rand des oberen Plenums in OpenFOAM-Netz nicht modelliert.

Simulationen mit offenem Pumpenbogen

Die Ergebnisse der stationären CFX-Simulationen mit geöffnetem Pumpbogen sind in Abb. 4.14 links dargestellt. Die Geschwindigkeitsstromlinien sind mit den berechneten Werten für die Temperatur im Primärkreislauf farblich kodiert. Auf der rechten Seite der Abb. 4.14 sind die OpenFOAM-Vorhersagen für die Temperaturverteilung im Primärkreislauf und die Geschwindigkeitsstromlinien in der U-Rohr-Region des DE dargestellt.

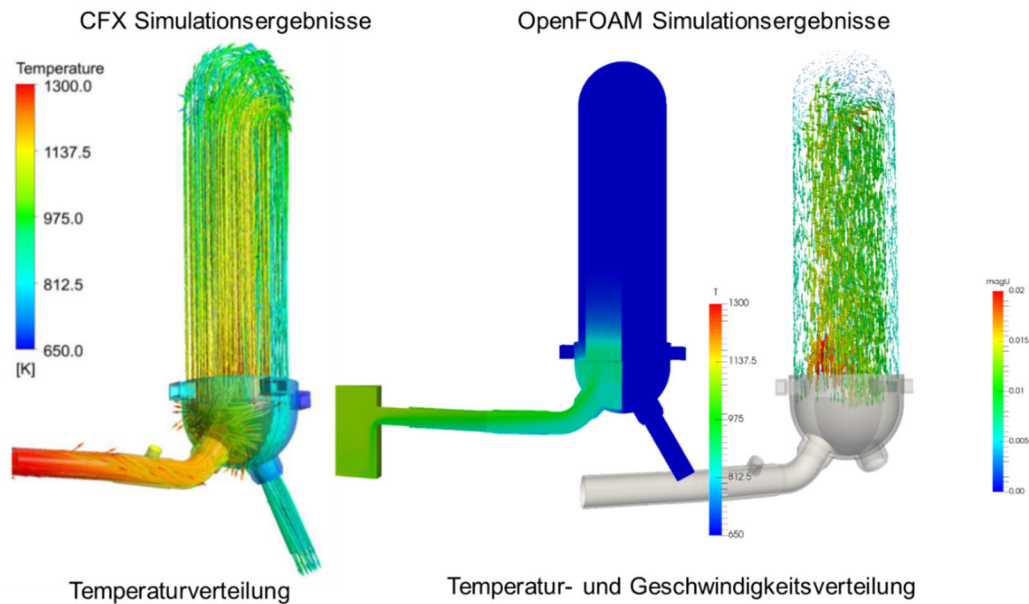


Abb. 4.14 Simulationsergebnisse von CFX und OpenFOAM der „Stand-alone“-Berechnungen mit offenem Pumpenbogen

Die Farbkodierung wurde so gewählt, dass sie mit der Darstellung der CFX-Ergebnisse übereinstimmt, auch wenn sie nicht völlig identisch ist. Der visuelle Vergleich des in Abb. 4.14 dargestellten Feldes zeigt identische Strömungsbedingungen, die von beiden CFD-Solvern vorhergesagt werden. Eine etwas höhere Temperatur wird durch die gelbe Farbe der Stromlinien in der Aufwärtsrichtung der U-Rohr-Region angezeigt. Die OpenFOAM-Ergebnisse deuten auf eine lokale Temperaturspitze hin, wenn das Fluid in die U-Rohr-Region eintritt. Die CFX-Vorhersagen lassen keinen klaren Hinweis auf Temperaturgradienten im heißen Strang erkennen. Andererseits deuten die OpenFOAM-Ergebnisse nicht nur auf einen Temperaturgradienten im heißen Strang hin, sondern auch auf das Vorhandensein einer rezirkulierenden Strömung in Richtung RDB.

Simulationen mit geschlossenem Pumpenbogen

Für die Simulationen mit geschlossenem Pumpenbogen wurden wie bei denen mit offenem Pumpenbogen die Randbedingungen von Testfall 1 angewendet. Die Berechnungen wurden als instationär/transient durchgeführt. Ein qualitativer Vergleich des Temperaturfeldes im CFD-Bereich ist in Abb. 4.15 dargestellt. Zur Visualisierung der CFX-Ergebnisse (Abb. 4.15 links) sind die Strömungslinien in Abhängigkeit von den lokalen Temperaturwerten eingefärbt. Die Geschwindigkeitsvektoren sind für diese Ergebnisse ebenfalls eingezeichnet (Abb. 4.15 links). Die OpenFOAM-Ergebnisse (Abb. 4.15 rechts) sind mit der Temperaturverteilung (Mittelteil des heißen Stranges) dargestellt.

Die dargestellten farbkodierten Temperaturfelder zeigen große Ähnlichkeiten zwischen beiden numerischen Vorhersagen. Es wird ein Temperaturgradient in vertikaler Richtung innerhalb des heißen Stranges berechnet. Beide Simulationen deuten auf eine umgekehrte Strömung in Richtung RDB hin. Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass die OpenFOAM-Simulationen im Gegensatz zu CFX keine künstlichen Wand- und Auslass-Randbedingungen im unteren Teil des oberen Plenums erfordern. Dennoch konnte mit den OpenFOAM-Simulationen die Rezirkulationsströmung in Richtung RDB reproduziert werden, wie Abb. 4.15 zeigt.

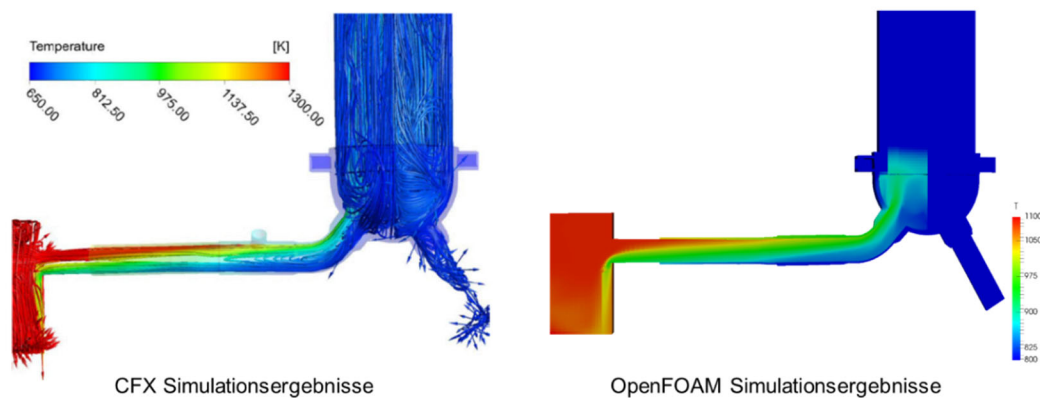


Abb. 4.15 Temperatur-Geschwindigkeitsverteilung bei geschlossenem Pumpenbogen

Abb. 4.16 zeigt einen qualitativen Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung im heißen Strang und in den DE-Kammern. Bei den CFX-Ergebnissen (Abb. 4.16 links) sind die Stromlinien wieder mit den berechneten lokalen Temperaturwerten eingefärbt, während für die OpenFOAM-Ergebnisse das berechnete Geschwindigkeitsfeld dargestellt ist (Abb. 4.16 rechts). Obwohl die dargestellten CFX-Ergebnisse in Bezug auf das Geschwindigkeitsfeld innerhalb der CFD-Region nicht direkt ablesbar sind, zeigen sie wichtige Merkmale der Strömung im heißen Strang und den DE-Kammern. Diese Merkmale sind in den in Abb. 4.16 rechts dargestellten OpenFOAM-Ergebnissen deutlicher zu erkennen. Das heiße Fluid aus dem Reaktorkern strömt im oberen Teil des heißen Strangs in Richtung DE. Am Eingang der DE-Eintrittskammer erreicht die Strömung ihren Höchstwert im oberen Teil der Stutzen (Abb. 4.16 rechts). In der DE-Eintrittskammer sind lokale Strömungszirkulationen um den Hauptstrom in der Nähe der Trennwand und der Außenwand zu beobachten. In der DE-Austrittskammer wird in beiden Vorhersagen eine viel größere Zirkulationsschleife gesehen. Sowohl die CFX- als auch die OpenFOAM-Simulationen zeigen eine umgekehrte Strömung in Richtung des RDB im unteren Teil des heißen Strangs.

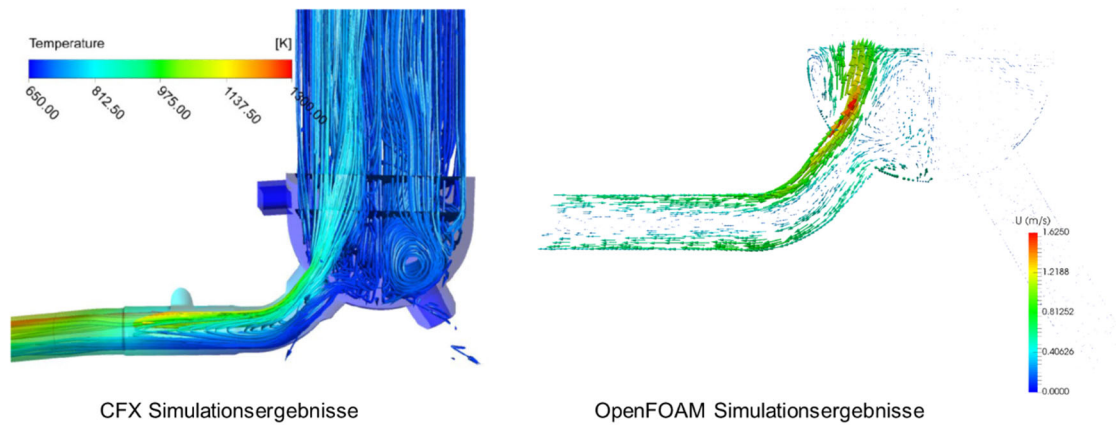


Abb. 4.16 Geschwindigkeitsverteilung im heißen Stang und DE-Kammern bei geschlossenem Pumpenbogen

Die Ähnlichkeiten zwischen den numerischen Vorhersagen von CFX und OpenFOAM werden in Abb. 4.17 noch deutlicher dargestellt. Die Erwärmung der heißen Rohrwand des heißen Stranges ist gemäß der Farbgebung in den CFX- und OpenFOAM-Ergebnissen praktisch identisch (Abb. 4.17 oben). Die Außenwand der DE-Eintrittskammer ist in den OpenFOAM-Simulationen stärker erwärmt. Die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung am Ein- und Austritt der U-Rohr-Region scheint recht ähnlich zu sein.

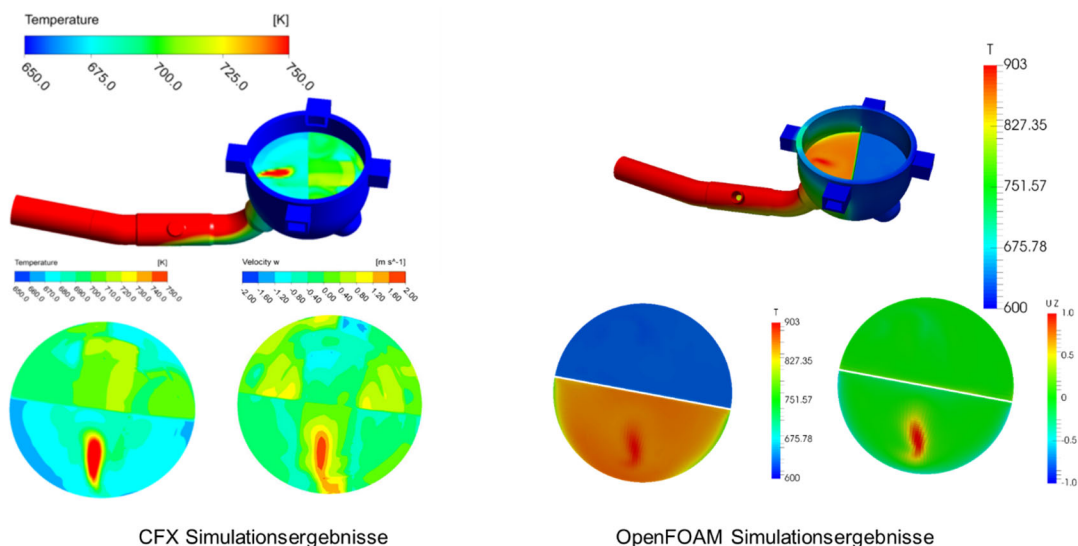


Abb. 4.17 Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im heißen Strang und Eintritt in den U-Rohr-Bereich bei geschlossenem Pumpenbogen

4.2 Erweiterungen im OpenFOAM-Modell

Im Vergleich zum CFX-Modell des Vorläufervorhabens wurde für das OpenFOAM-Modell eine detaillierte Darstellung des oberen Plenums des RDB entwickelt. Dabei wird das obere Plenum nicht nur zu einem Viertel, sondern vollständig mit einem 3D-Rechengitter abgebildet, wobei die dort vorhandenen Führungsrohre der 61 Steuerelemente berücksichtigt werden (kein Rechengitter in diesen Bereichen). Diese Erweiterung der Modellierung soll einerseits den künstlichen Auslass und die virtuelle Wand im oberen Plenum des CFX-Modells beseitigen. Andererseits ist die detailliertere Modellierung des oberen Plenums für die spätere Kopplung aller vier Kühlmittelstränge notwendig. Abb. 4.18 zeigt das neu erstellte Rechengitter des oberen Plenums.

Die explizite Berücksichtigung der Steuerstabführungsrohre im Bereich des oberen Plenums des RDB stellte sich bei der Generierung des Rechengitters als komplex heraus, da durch die große Anzahl an Führungsrohren eine manuelle Erstellung des Gitters zu zeitaufwändig gewesen wäre. Sowohl das mit ICEM CFD automatisiert erzeugte Tetra-, als auch das mit der Ansys-Workbench automatisiert erzeugte hexa-dominierte Gitter enthalten eine signifikante Anzahl von Elementen mit schlechter Qualität (maximale Nichtortogonalität, Schiefe). Daher wurde mit dem mit OpenFOAM mitgelieferten Werkzeug *snappyHexMesh* ein hexa-dominiertes Gitter erstellt, das die Anforderungen von OpenFOAM an die Gitterqualität erfüllt.

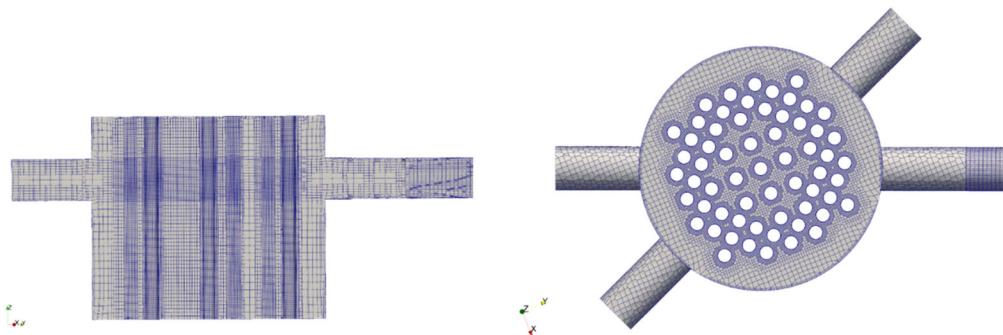


Abb. 4.18 Rechengitter des oberen Plenums

Um den Bypass vom Downcomer in das obere Plenum zu berücksichtigen, wird auf der Fläche, die das obere Plenum nach oben hin begrenzt, ein kreisförmiger Bereich mit einem Radius von 15 cm einer separat definierten Oberfläche zugewiesen. Diese dient dann als Kopplungsschnittstelle zu AC²/ACD-C für diesen Bypass. Da durch den Bypass nur niedrige Massenströme erwartet werden, reicht die gewählte, relativ kleine Fläche

aus, so dass trotzdem keine signifikante Verzerrung des Strömungsbilds in der Umgebung dieser Fläche erwartet wird.

4.3 CFD-seitigen Vorbereitungen für die Kopplung

4.3.1 Vorbereitung des OpenFOAM Datensatzes für die Kopplung

Analog zum Vorgehen zur Vorbereitung der Kopplung im ATHLET-Datensatz (siehe Kapitel 3.2) müssen auch im OpenFOAM-Datensatz die Kopplungsschnittstellen als solche spezifiziert werden. Dazu stehen in der GRS-Implementierung der Kopplung von OpenFOAM mit ATHLET verschiedene Randbedingungen zu Verfügung, mit denen die entsprechenden Größen der Strömung (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit/Massenstrom, die Konzentrationen der verschiedenen Fluidkomponenten (hier Wasserdampf und Wasserstoff)) an den Kopplungsschnittstellen zwischen den beiden Codes ausgetauscht werden können /PAP 21/. In Abb. 4.19 sind die Positionen der CFD-seitigen Kopplungsschnittstellen und die jeweils im ATHLET-Modell angeschlossenen Thermofluidobjekte angegeben.

Es werden insgesamt 7 (bzw. 13) Kopplungsschnittstellen benutzt, die sich an den folgenden Positionen befinden:

- Kernausslass im oberen Plenum des RDB,
- Deckelbypass zum Downcomer an der Oberseite des oberen Plenums des RDB,
- in der Volumenausgleichsleitung (VAL),
- am Auslass des Dampferzeugers zum kalten Strang sowie
- an den RDB-Stutzen bei der Verbindung zu je einem der drei nicht im CFD-Modell enthaltenen heißen Stränge (je 1 bzw. 3 Schnittstellen).

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, wurde auch ein ATHLET-Modell mit drei geschichteten Lagen für jeden der heißen Stränge entwickelt. Zur Kopplung dieses Modells müssen entsprechend drei Kopplungsschnittstellen pro heißem Strang im OpenFOAM-Modell verwendet werden.

Die Schnittstelle des Dampferzeugers in Richtung kaltem Strang wurde im CFD-Modell ca. 2,5 m unterhalb des Dampferzeugers gewählt. Grund dafür war, dass zwischen der

Auslasskammer des Dampfererzeugers und der Schnittstelle zu ATHLET eine gewisse Vergleichmäßigung der Strömung stattfinden konnte und deshalb die Strömung an der Kopplungsschnittstelle sinnvoll durch einen eindimensionalen Wert für die Geschwindigkeit abgebildet werden konnte. Gleichzeitig führte diese Wahl der Kopplungsposition aber auch dazu, dass im ATHLET-Modell dort zeitweise eine gewisse Menge flüssigen Wassers berechnet wurde. Da die OpenFOAM-Simulation aber ausschließlich mit einem gasförmigen Fluid arbeiten sollte, war es notwendig, die Schnittstelle auf Seiten von ATHLET zu einem höher gelegenen Punkt des kalten Strangs in Richtung Dampferzeuger zu verschieben, da dort nur Wasserdampf (und Wasserstoff) auftrat. Deshalb wurde das Thermofluidobjekt, dass sich in der Auslasskammer des Dampferzeugers befindet, für die Kopplung verwendet. Durch den 4 m großen Unterschied zwischen der Höhenposition der beiden Seiten dieser Kopplungsschnittstelle kommt es zwischen diesen beiden Seiten zu einem Druckunterschied. Dieser wurde durch einen aus der mittleren Fluidichte und dem Höhenunterschied zwischen den beiden Seiten berechneten Korrekturwert von 4.000 Pa in der Übertragung des Druckwerts an dieser Kopplungsschnittstelle ausgeglichen.

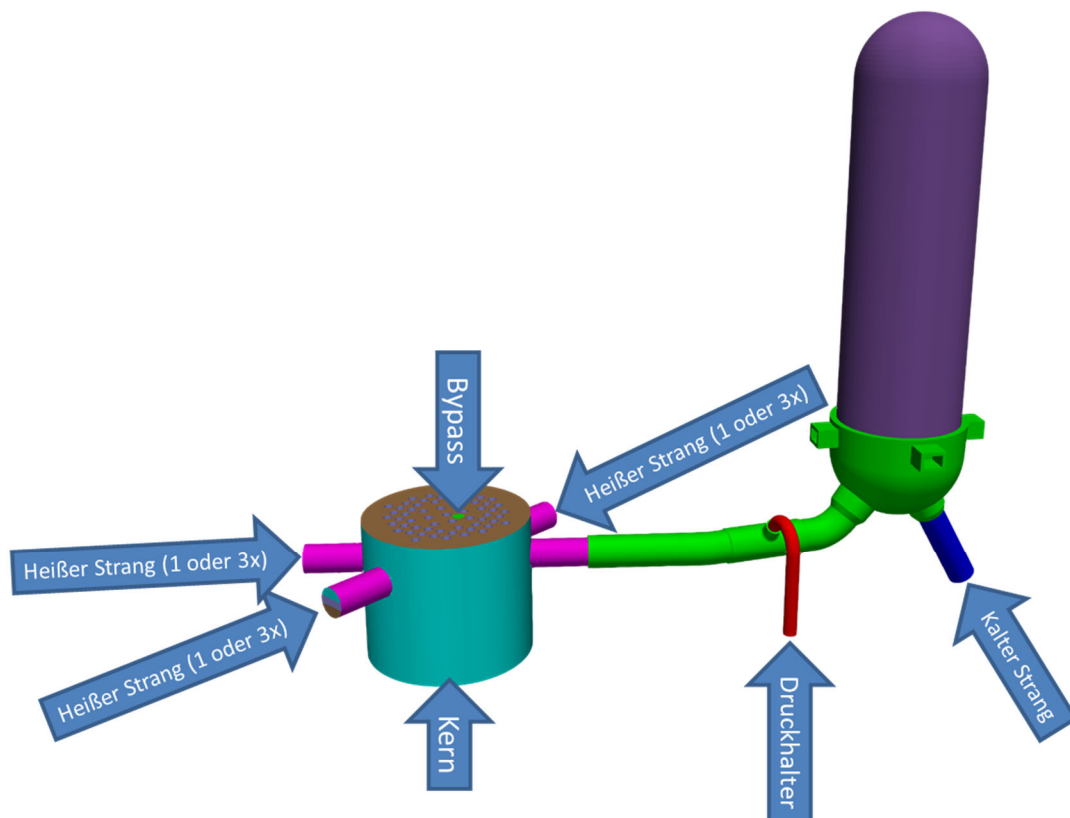


Abb. 4.19 Schnittstellen OpenFOAM zu ATHLET-CD

4.3.2 Vorbereitung des OpenFOAM-Solvers für die Kopplung

Wie oben beschrieben, wurden die „Stand-alone“-CFD-Simulationen mit dem OpenFOAM-Solver *chtMultiRegionFoam* durchgeführt. Mit diesem Solver ist es möglich, mehrere Regionen, die entweder aus einem in sich geschlossenem Strömungsgebiet oder einem Festkörper bestehen, für jeden Zeitschritt iterativ zu simulieren. Zwischen den Regionen kann an den Berührungsflächen eine Wärmeübertragung simuliert werden. Um die Konvergenz der Simulation bei einer nicht zu niedrigen Zeitschrittweite zu gewährleisten, kann jeder Zeitschritt mehrfach berechnet werden, was einer semi-impliziten Kopplung der Regionen entspricht. Das in diesem Projekt verwendete Simulationsgebiet bestand aus einer Fluidregion und einer Festkörperregion für die Wände des heißen Strangs, der Kammern des Dampferzeugers und der Zwischenwand zwischen der Ein- und Austrittskammer (grün dargestellt in Abb. 4.19).

Die GRS hat in einer Reihe von Forschungsprojekten verschiedene OpenFOAM-Solver so erweitert, dass sie mit dem AC²-Modul ATHLET gekoppelt werden können. Programmiertechnisch ist die Kopplung durch Klassen implementiert, die den Datenaustausch zwischen dem OpenFOAM-Solver und ATHLET durchführen, sowie einer Reihe von sogenannten Kopplungsrandbedingungen, die zum Einen die von ATHLET auf den dortigen Kopplungsstellen berechneten einfachen Werte (also nulldimensional) auf die zweidimensionalen Oberflächen von Open-FOAM projizieren, zum Anderen die Werte der zweidimensionalen Oberflächen von OpenFOAM so mitteln, dass sie an den nulldimensionalen Kopplungsschnittstellen in ATHLET verwendet werden können.

Durch das objektorientierte Design der Kopplungsimplementierung konnte aus dem OpenFOAM-Solver *chtMultiRegionFoam* zügig eine gekoppelte Variante *chtMultiRegionFoamCoupled* abgeleitet werden.

In Abb. 4.20 ist die Implementierung der Kopplung zwischen einem OpenFOAM-Solver und dem AC²-Modul ATHLET dargestellt. Der OpenFOAM-Solver und ATHLET bzw. dessen „Hülle“, bestehend aus einem Pythonskript, laufen jeweils in unterschiedlichen Prozessen. Zwischen diesen beiden Prozessen findet der Datenaustausch über eine Netzwerkschnittstelle statt [PAP 21]. Werden mehrere Prozesse auf Seiten von OpenFOAM verwendet, um das Gitter auf diese aufzuteilen und parallel zu simulieren, so findet der Austausch auf Seiten von OpenFOAM nur mit dem sogenannten Masterprozess statt. Die Kopplungsgrößen werden dabei OpenFOAM-intern durch die in OpenFOAM

standardmäßig verwendeten „Message Passing Interface“ (MPI)-Kommunikationswege zwischen den OpenFOAM-Prozessen ausgetauscht /OFF 20/.

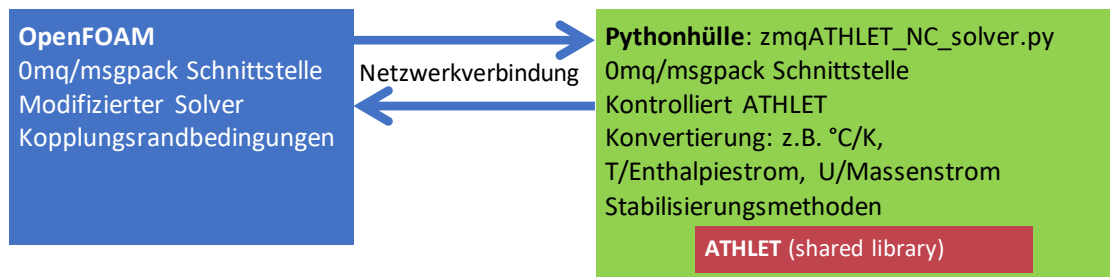


Abb. 4.20 Implementierung der Kopplung zwischen einem OpenFOAM-Solver und dem AC²-Modul ATHLET

Das Pythonskript, das ATHLET quasi umhüllt, übernimmt dabei den Datenaustausch mit dem OpenFOAM-Solver, kontrolliert den Ablauf von ATHLET und nimmt notwendige Konvertierungen, z. B. zwischen der Einheit der Temperatur (°C/K) oder von Größen wie Temperatur und Geschwindigkeit zu Enthalpie- und Massenströmen vor. In diesem Skript kann auch eine Stabilisierungsmethode, wie das in diesem Projekt verwendete „quasi-Newton“-Verfahren angewendet werden, um möglichst effizient eine gemeinsame Lösung der beiden Solver an den Kopplungsschnittstellen zu ermitteln /HEJ 19/.

Bisher wurden nur gekoppelte OpenFOAM-ATHLET-Simulationen durchgeführt, bei denen ein reines Fluid und keine Fluidgemische verwendet wurden. Deshalb war es notwendig, das Pythonskript derart anzupassen, dass alle zur Simulation von Gemischen relevanten Größen, insbesondere die Konzentration der verschiedenen Gaskomponenten an den Kopplungsschnittstellen übermittelt werden können.

Wie beschrieben, wurde vor diesem Projekt OpenFOAM nur mit dem AC²-Modul ATHLET gekoppelt. In diesem Projekt ist es nun notwendig, weitere AC²-Module wie ATHLET-CD, COCOSYS oder CONDRU zu verwenden. Je nach Kombination der verwendeten Module laufen diese Module entweder in einem oder mehreren Prozessen. Im letzteren Fall findet die Kommunikation ebenfalls mit Hilfe von MPI-Kommunikationswegen statt, die unabhängig von denen der OpenFOAM-Prozesse sind. Um diese Kommunikationswege richtig zu initialisieren, war es notwendig, das Pythonskript, das für die Steuerung von ATHLET und den Datenaustausch über die Kopplungsschnittstelle verantwortlich ist, statt in ATHLET in diesen MPI-Kommunikationsverbund einzufügen.

Die weiter oben beschriebenen unterschiedlichen OpenFOAM-Regionen werden von unterschiedlichen Teilen des OpenFOAM-Solvers gelöst, die in einem Prozess laufen.

Insgesamt stellen sich die Programmverbindungen für AC² bei Verwendung von COCOSYS, wie in Abb. 4.21 dargestellt, dar. Auf Seiten von AC² befindet sich ein MPI-Kommunikationsverbund, in dem ATHLET und ATHLET-CD in einem Prozess laufen, der via MPI mit COCOSYS kommuniziert. Auf Seiten von OpenFOAM laufen der Festkörpersolver und der Fluidsolver in einem Prozess (falls nicht das Rechengitter parallelisiert wurde, siehe oben). Zwischen dem Prozess, der das AC²-Modul ATHLET enthält und dem OpenFOAM-Masterprozess findet der Austausch der Kopplungsgrößen und die Steuerung von ATHLET statt. Für diese prozessüberschreitende Kommunikation wird eine Netzwerkschnittstelle auf Basis der OpenSource-Bibliothek zeroMQ eingesetzt /PAP 21/. Wird das AC²-Modul CONDRU statt COCOSYS eingesetzt, so läuft diese im gleichen Prozess wie ATHLET und eine MPI-Kommunikation ist zwischen den AC²-Modulen nicht notwendig (siehe Abb. 4.22).

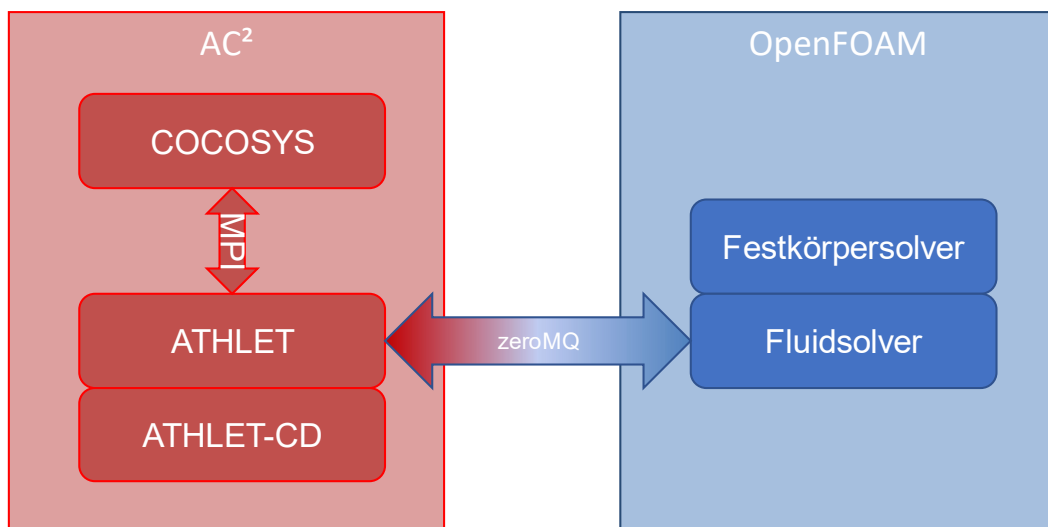


Abb. 4.21 Kommunikation zwischen den verschiedenen Prozessen einer gekoppelten Rechnung OpenFOAM-AC²

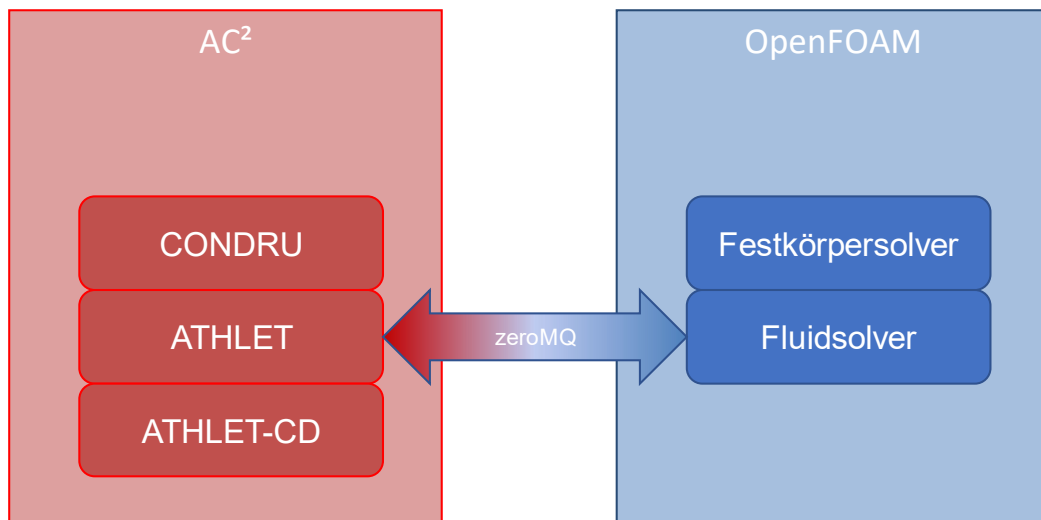


Abb. 4.22 Kommunikation zwischen den verschiedenen Prozessen einer gekoppelten Rechnung OpenFOAM-ACD-C

In Abb. 4.24 ist das gesamte Ablaufschema einer gekoppelten OpenFOAM-AC²-Simulation dargestellt, wenn der OpenFOAM-Solver *chtMultiRegionFoamCoupled* zum Einsatz kommt. Es werden dabei mehrere Schleifen verwendet, um ein konvergiertes Ergebnis zu erzielen. Für jeden Zeitschritt wird, nach einem ersten Aufruf von ATHLET, über den Fluid- und den Festkörpersolver iteriert, bis diese (fast) eine gemeinsam konvergierte Lösung für die OpenFOAM-Regionen gefunden haben. Dann werden die Werte an den Kopplungsschnittstellen an ATHLET geschickt, wobei eine Stabilisierungsmethode verwendet wird. Es steht entweder ein Unterrelaxationsverfahren oder ein quasi-Newtonverfahren zur Auswahl /HEJ 19/. Anschließend werden die aktualisierten Kopplungsdaten wieder an OpenFOAM geschickt und der Zeitschritt wieder von den OpenFOAM-Solvern berechnet. Dies wird so lange wiederholt, bis entweder eine gemeinsame, konvergierte Lösung für OpenFOAM und ATHLET gefunden wurde, oder eine maximale Anzahl an Iterationen erreicht wurde. Abschließend wird der Zeitschritt nochmals von ATHLET berechnet. Dann wird das Verfahren mit dem nächsten Zeitschritt fortgesetzt.

Auf Seiten von ATHLET basiert dieses Kopplungsverfahren darauf, dass ein Zeitschritt mehrfach berechnet werden kann, wobei jedes Mal das Ergebnis des vorhergehenden Zeitschritts aus einer speziellen Restartdatei geladen wird. Mehrere ATHLET-Module wie COCOSYS, Bestandteile von ATHLET-CD und CONDRO beherrschen diesen wiederholten Restart aber nicht. Deshalb dürfen sie nicht mehrmals pro Zeitschritt aufgerufen werden, sondern sie führen ihre Berechnungen jeweils nur beim letzten Aufruf von AC² pro Zeitschritt aus. Diese Module sind also „explizit“ mit OpenFOAM gekoppelt, während ATHLET „semi-implizit“ gekoppelt ist.

Da momentan keine Kopplungsschnittstelle zwischen OpenFOAM und AC² existiert, mit der Strukturkomponenten wie Wände gekoppelt werden können, wurde die Wandtemperatur der Rohraußenseiten des heißen Strangs und der Kammern des Dampferzeugers auf einen festen, aus den „Stand-alone“-Simulationen von AC² abgeleiteten Wert gesetzt. Die Auswertung der Sicherheitsbehälterraumtemperatur im Bereich des heißen Stranges mit DH in den „Stand-alone“-Simulationen mit ATHLET-CD zeigt, dass diese für den Zeitraum der Transiente (je nach Simulation zwischen ca. 15.400 s und 17.000 s) um nicht mehr als 15 K schwankt, was verglichen mit den Temperaturen der Wände (ca. 400 °C) vernachlässigbar sein sollte.

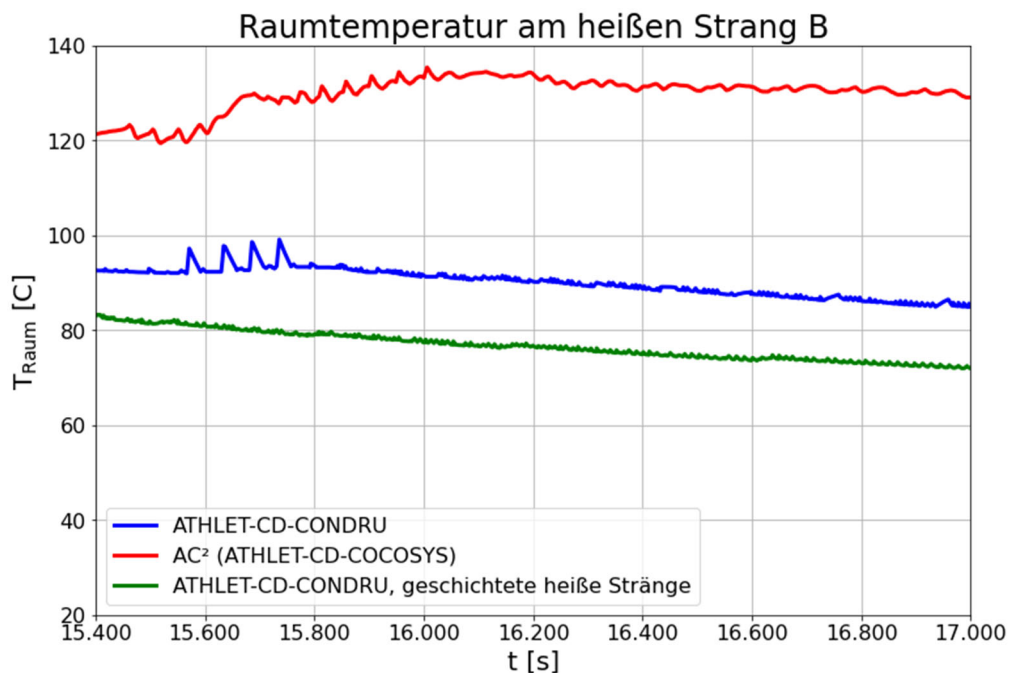


Abb. 4.23 Temperatur des Sicherheitsbehälters im Bereich des heißen Strangs mit DH in den „Stand-alone“-Simulationen mit AC² und ACD-C (sowohl mit einfachen wie geschichteten heißen Strängen)

Die Diskussion in Kapitel 3.3 zum Einfluss des Detaillierungsgrads der Simulation des Sicherheitsbehälters auf das Verhalten der Strömung im Reaktorkern hat gezeigt, dass die berechnete räumliche Temperaturverteilung im Sicherheitsbehälter zu unterschiedlichen Verläufen der Transiente führen kann. Deshalb sollte bei zukünftigen Simulationen detaillierter untersucht werden, inwieweit eine räumlich und/oder zeitlich aufgelöste Kopplung der Sicherheitsbehälterraumtemperatur an die Wände der Rohrleitungen des CFD-Rechengebiets einen Einfluss auf den Verlauf der Transiente hat.

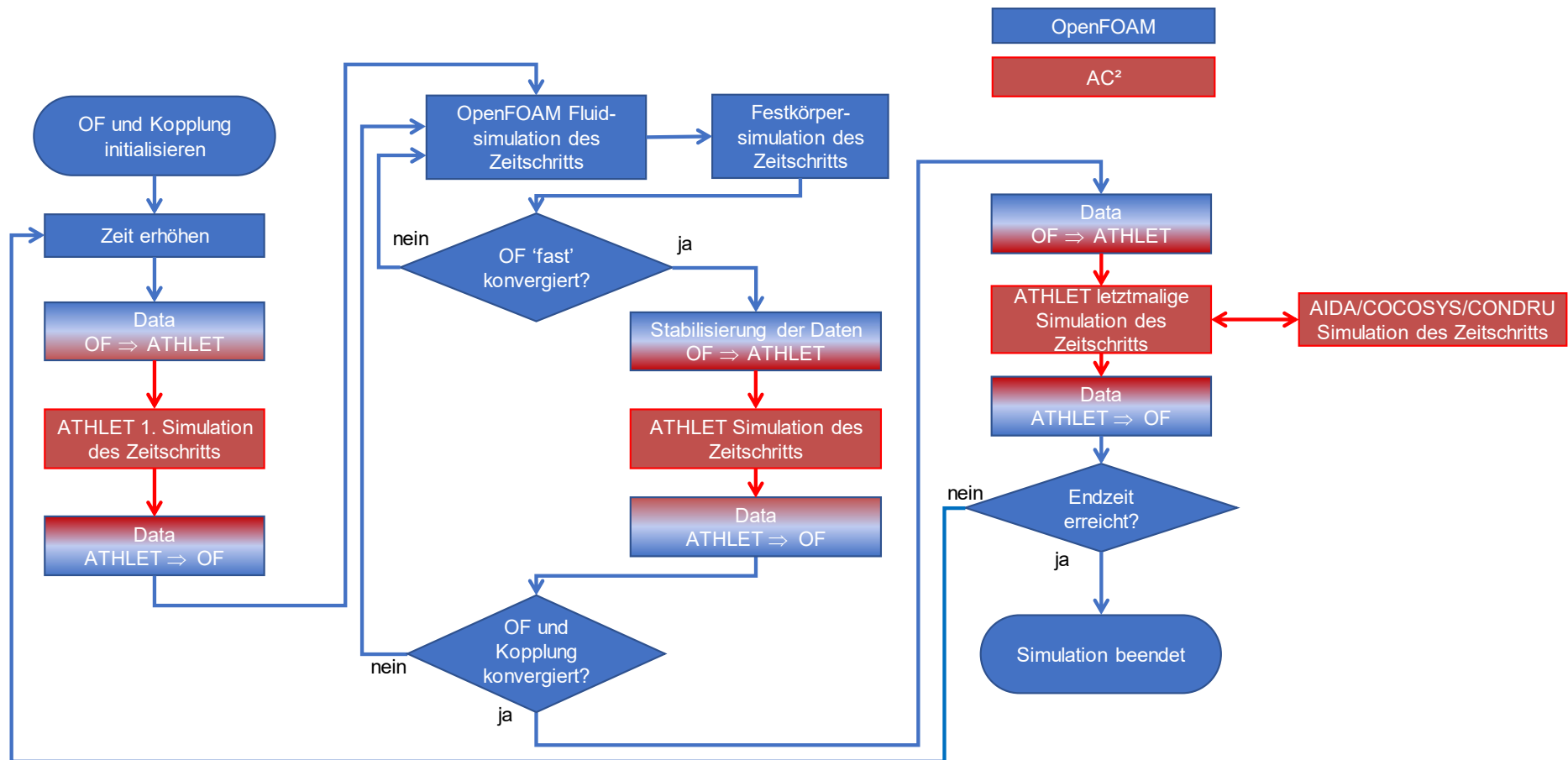


Abb. 4.24 Ablaufschema der Simulation mit einem gekoppelten OpenFOAM Solver

5 Umsetzung der Kopplung von ATHLET-CD mit dem Open-FOAM-Modell und Durchführung der gekoppelten Analysen

Bei der Kopplung des OpenFOAM-Rechengebietes mit AC²/ACD-C werden im „ATHLET“-Eingabedatensatz das obere Plenum des RDB sowie Teile des DH-Kühlmittelsstranges durch das OpenFOAM-Rechengebiet ersetzt und die ATHLET-Modellierung dieses Gebietes ausgeschaltet. Die transiente Kopplungsrechnung wird an einer vordefinierten Problemzeit gestartet. Dabei wird in dem Teil des Rechengebiets, das von AC² bzw. ACD simuliert wird, als Initialisierung eine Restartdatei verwendet, die aus der „Stand-alone“-Simulation mit dem entsprechenden Systemcode stammt. Das Rechengebiet von OpenFOAM wird für den Startzeitpunkt der gekoppelten Rechnung mit den Ergebnissen von eigenständigen OpenFOAM-Simulationen initialisiert, die eine konvergierte Lösung des Strömungsfeldes bereitstellen. Dadurch ist es leichter, möglichst sofort nach dem Start der gekoppelten Rechnung eine numerisch stabile Lösung zu erhalten.

Insgesamt werden drei gekoppelte Simulationen durchgeführt, wobei jeweils ein anderes Modell für den Systemcodeteil zum Einsatz kommt:

- ATHLET-CD-CONDURU (ACD-C) mit einfachen heißen Strängen,
- AC² mit einfachen heißen Strängen,
- ATHLET-CD-CONDURU (ACD-C) mit geschichteten heißen Strängen.

Die gekoppelten Rechnungen sollen sowohl den Anlagenzustand wie er bei offenem sowie geschlossenem DH-Abblaseventil herrscht, und, wenn möglich, den zeitlichen Verlauf über mehrere Ventilzyklen des DH-Abblaseventils gekoppelt simulieren.

5.1 Vorbereitung der gekoppelten Rechnungen

5.1.1 „Stand-alone“-Simulation von AC²

Für jede der oben aufgeführten Systemcodezusammenstellung wird eine „Stand-alone“-Simulation der Transiente durchgeführt. Auf Basis dieser „Stand-alone“-Systemcodesimulationen wird dann ein geeigneter Zeitpunkt ermittelt, zu dem die gekoppelte Rechnung starten soll. Dazu werden für den jeweiligen Zeitpunkt der interne Zustand des

Systemcodes in einer Restartdatei gespeichert. In der gekoppelten Rechnung wird dann der Systemcodeanteil mit diesem Zustand initialisiert.

Wie schon in Kapitel 3.3 und 3.5.2 diskutiert, liefern die verschiedenen Simulationen teilweise signifikante Unterschiede, z. B. im Druck und Temperaturverlauf im Primärkreis. Deshalb ist es nicht möglich, die gekoppelten Simulationen zum selben Zeitpunkt zu starten, sondern es muss für jede Simulation ein geeigneter Startpunkt definiert werden. Die Vorgabe dafür ist, dass ab diesem Zeitpunkt für den Verlauf der gekoppelten Simulation nur das Abblaseventil öffnet und schließt und außerdem bereits eine teilweise Freilegung des Kerns stattgefunden hat.

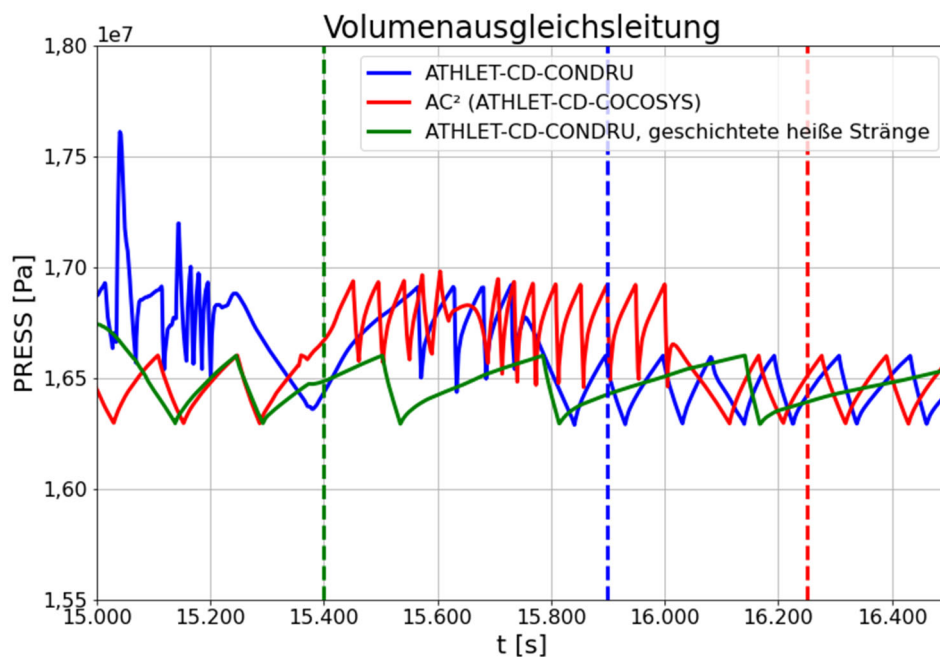


Abb. 5.1 Auswahl der Startzeitpunkte (vertikale, gestrichelte Linien) für die gekoppelten Analysen

Für die drei „Stand-alone“-Simulationen ist der Druckverlauf in der Volumenausgleichsleitung für den relevanten Zeitbereich in Abb. 5.1 dargestellt. Es handelt sich um dieselben Simulationen, die schon in den Kapiteln 3.2 und 3.5.2 diskutiert wurden. Die gewählten Startpunkte der gekoppelten Simulationen sind durch vertikale, gestrichelte Linien markiert. Sie wurden jeweils so gewählt, dass mindestens ein volles Intervall Schließen-Öffnen des DH-Abblaseventils nach dem letzten Schließen der Sicherheitsventile vergangen ist. Außerdem soll nach dem Startzeitpunkt nicht sofort entweder das Schließen oder das Öffnen des Abblaseventils stattfinden. Die so bestimmten Startzeitpunkte der gekoppelten Rechnungen sind in Tab. 5.1 aufgeführt.

Tab. 5.1 Startzeitpunkte der gekoppelten Simulationen (Zeit ist die gesamte Simulationszeit; für die transiente Zeit ab Ereigniseintritt müssen die 5.000 s der stationären Anfangsrechnung abgezogen werden)

Simulation	Startzeitpunkt [s]
ACD-C (ATHLET-CD-CONDRU)	15.900,2
AC ² (ATHLET-CD-COCOSYS)	16.250,1
ACD-C (ATHLET-CD-CONDRU) geschichtet	15.400,1

5.1.2 „Stand-alone“-Simulation von OpenFOAM

Damit die gekoppelten Simulationen jeweils von ihrem Startzeitpunkt möglichst stabil laufen, ist es hilfreich, wenn bereits eine konvergierte Lösung für das CFD-Rechengebiet vorliegt. Um dies zu gewährleisten, wird eine transiente OpenFOAM-Simulation mit der „Stand-alone“-Version durchgeführt. Dabei werden am Kernausslass (für die Geometrie der Randbedingung siehe Abb. 4.19), an den Stutzen zu den nicht mit OpenFOAM modellierten heißen Strängen, am Deckelraumbypass und am Auslass zum Pumpenbogen Massenströme und Temperaturen vorgegeben, wie sie in eigenständigen AC²-Simulationen für den hier betrachteten Zeitraum der Transiente bei offenem DH-Abblaseventil ermittelt worden sind. Am Auslass zum Druckhalter wurde ein fester Druckwert vorgegeben.

Da die Temperaturen der Wände auf Grund ihrer großen thermischen Trägheit stark vom gesamten Verlauf der Transiente abhängen, wurden diese nach Abschluss der eigenständigen OpenFOAM-Simulation mit den Werten überschrieben, die in den AC²-Simulationen mit der „Stand-alone“-Version für den entsprechenden Zeitpunkt ermittelt wurden. Es wurde dabei eine ACD-C-Simulation im „Stand-alone“-Modus mit einfacher Modellierung des heißen Strangs verwendet. Die erst später im Projekt zur Verfügung stehenden Ergebnisse der ATHLET-Modellierung mit geschichteten Strängen zeigte für die Wände der verschiedenen Schichten unterschiedliche Temperaturen (zwischen ca. 480 °C und 560 °C im Bereich zwischen RDB und Verbindung zur Volumenausgleichsleitung). Diese Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Projekts nicht mehr für die Initialisierung der gekoppelten Rechnungen berücksichtigt werden.

In Abb. 5.2 ist das Temperaturfeld am Ende der „Stand-Alone“-Simulation mit OpenFOAM dargestellt. Es ist zu erkennen, dass auch unter den gegebenen Randbedingungen, bei der Fluid sowohl aus dem Kernausslass, als auch von den drei RDB-Stutzen, die

nicht mit Dampferzeugern verbunden sind, in das Rechengebiet einströmt, sowie aus der Volumenausgleichsleitung das Rechengebiet verlässt, sich trotzdem im heißen Strang eine geschichtete Strömung ausbildet, bei der oben heißes Gas in Richtung Dampferzeuger strömt und unten kälteres Gas in Richtung RDB.

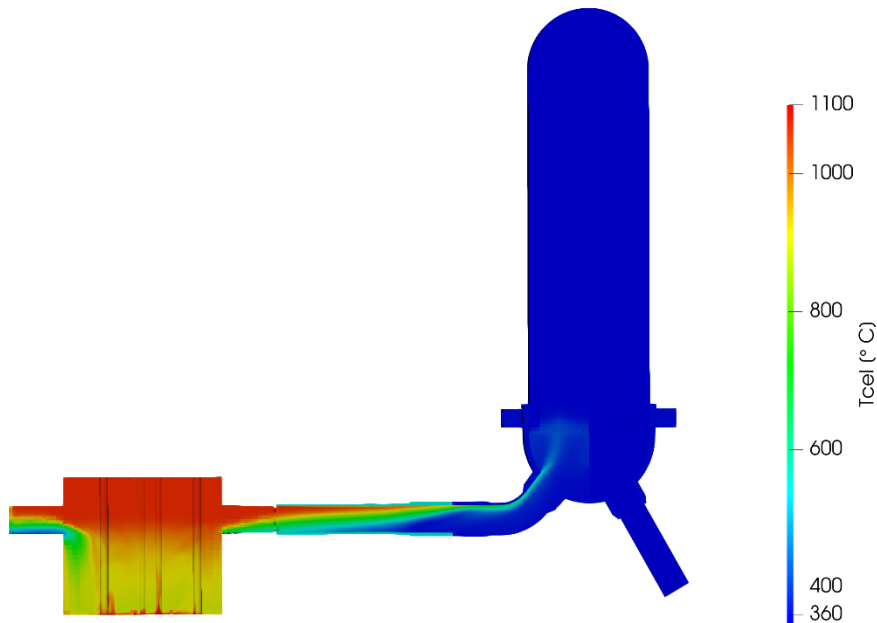


Abb. 5.2 Temperaturfeld am Ende der „Stand-Alone“-Simulation mit OpenFOAM

Bei genauer Betrachtung von Abb. 5.2 erkennt man auch die oben beschriebene Initialisierung der Temperaturen der Wände auf Basis der Systemcodesimulationen für die gekoppelten Rechnungen. Vom RDB bis zum Verbindungspunkt der Volumenausgleichsleitung wurden nach Beendigung der „Stand-alone“-OpenFOAM-Simulation diese mit einer höheren Temperatur (550 °C) und von dort bis zum Sammler des Dampferzeugers mit einer niedrigeren Temperatur (355 °C) belegt.

5.1.3 Start der gekoppelten „OpenFOAM-AC²“-Simulation

Die gekoppelten Rechnungen werden jeweils als Restart der jeweiligen „Stand-alone“-Systemcodesimulation und der „Stand-alone“-OpenFOAM-Simulation durchgeführt.

In Abb. 5.3 sind die Kopplungsarchitektur und die Kopplungsschnittstellen schematisch dargestellt. An sechs (ungeschichtete heiße Stränge) bzw. zwölf (geschichtete heiße Stränge) Kopplungsschnittstellen (gelber Hintergrund) stellt ATHLET den Massenstrom

bereit und OpenFOAM den Druck. An der Kopplungsschnittstelle in der Volumenausgleichsleitung (oranger Hintergrund) liefert ATHLET den Druck und OpenFOAM den Massenstrom. Die ATHLET-internen Verbindungen sind in der Abbildung in Rot dargestellt, die von OpenFOAM berechneten Gebiete in Blau.

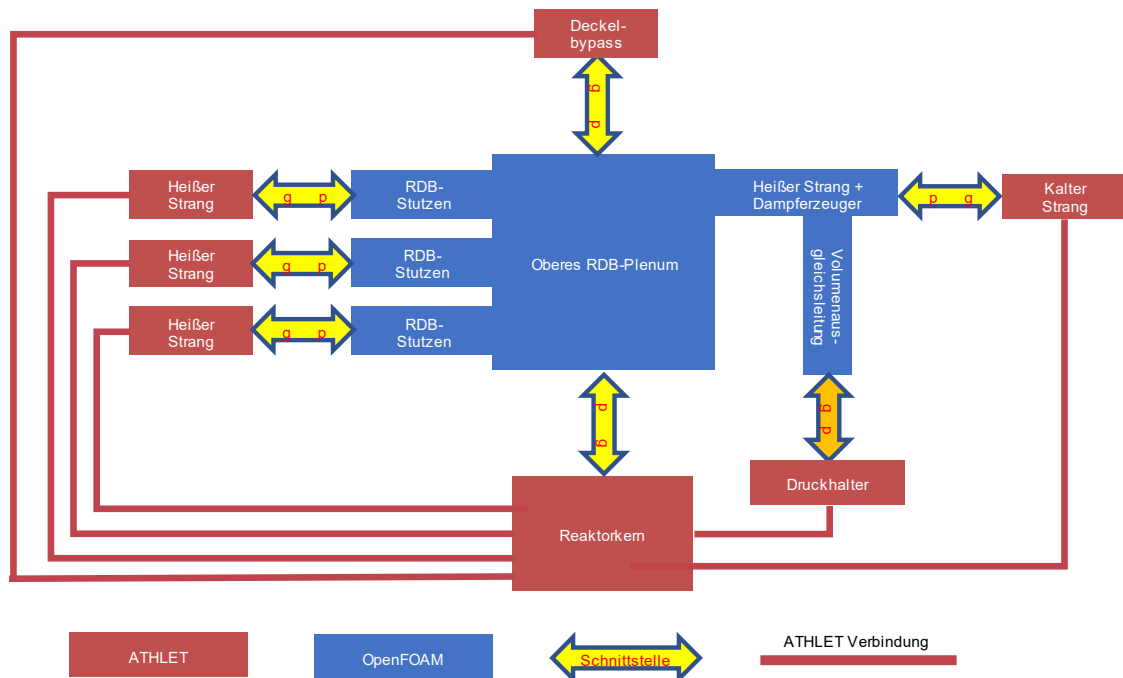


Abb. 5.3 Schematische Darstellung der Kopplungsarchitektur und der Kopplungsschnittstellen (für die Simulation mit geschichteten heißen Strängen ist jeder heiße Strang links über drei Kopplungsschnittstellen mit dem jeweiligen RDB-Stutzen verbunden)

Um einen stabilen Start der gekoppelten Rechnungen zu ermöglichen, konnte allerdings nicht das Druckfeld der „Stand-alone“-OpenFOAM-Simulation verwendet werden. Stattdessen war es notwendig, an den einzelnen Kopplungsschnittstellen genau die Druckwerte vorzugeben, die dort in der jeweiligen „Stand-Alone“-Systemcodesimulation berechnet worden sind. Für das interne Druckfeld wurde der Wert vorgegeben, der vom Systemcode an der Kopplungsschnittstelle in der Volumenausgleichsleitung berechnet worden war.

Als Stabilisierungsmethode kam das „quasi-Newton“-Verfahren zum Einsatz. Zu Beginn jeder der drei gekoppelten Simulationen wurde einmal die Jacobi-Matrix bestimmt. Diese wurde dann für die gesamte Simulation verwendet.

5.2 Analysen der Ergebnisse der gekoppelten Simulationen

Insgesamt wurden drei verschiedene Kombinationen aus Modellen der Systemcodeseite und des CFD-Codes simuliert. In zwei der Simulationen wurde der Sicherheitsbehälter mit dem ATHLET-Modul CONDRU simuliert, einmal mit COCOSYS. Bei einer der beiden Simulationen mit CONDRU wurde die geschichtete Modellierung der heißen Stränge angewandt. In den beiden anderen Simulationen wurde die einfache Modellierung für die heißen Stränge verwendet.

Alle drei gekoppelten Simulationen liefen so lange, dass mindestens ein vollständiger Öffnungs-Schließzyklus des Druckhalter-Abblaseventils berechnet werden konnte. Die wesentlichen Größen, die bei der Auswertung betrachtet werden, ist die Temperaturverteilung im Bereich des Rohrbodens des Dampferzeugers, der oberhalb der Eintrittskammer liegt, und die Strömungsrichtung im heißen Strang.

5.2.1 OpenFOAM mit ATHLET-CD-CONDURU

Wie oben beschrieben, wurden zwei der gekoppelten Simulationen mit dem ATHLET-Modul CONDRU zur Simulation des Sicherheitsbehälters durchgeführt. In den folgenden beiden Abschnitten werden diese ausgewertet.

5.2.1.1 Einfache Modellierung heiße Stränge

Der Startzeitpunkt der gekoppelten Simulation war, wie in Abb. 5.1 dargestellt, bei $t = 15.900,2 \text{ s}$ (Gesamtzeit entspricht $10.900,2 \text{ s}$ transiente Zeit). In Abb. 5.4 ist zu erkennen, dass dies in eine Phase fallenden Primärkreisdrucks fiel, bedingt durch das geöffnete DH-Abblaseventil. Anschließend lieferte die Simulation drei volle Zyklen mit geschlossenem bzw. geöffnetem Abblaseventil, gekennzeichnet jeweils durch ansteigenden bzw. abfallenden Druck. Nach dem dritten Schließen des Abblaseventils bei ca. 16.200 s verlangsamte sich der Druckanstieg sichtbar. Statt 50 s sind nun ca. 400 s notwendig, damit der Druck um 3 bar ansteigt. Nach einem weiteren Öffnen (bei ca. 16.600 s) und Schließen (bei ca. 16.640 s) stieg der Druck dann nur noch um ca. 1 bar an, um danach fast konstant zu bleiben. Der Grund für dieses Verhalten wird weiter unten erklärt.

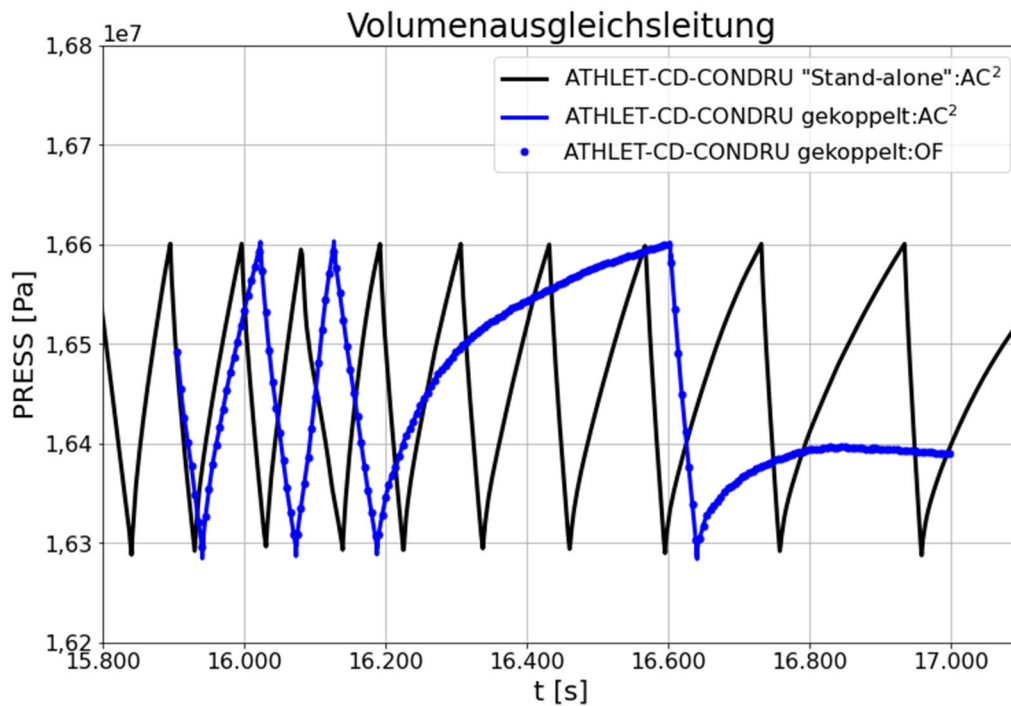


Abb. 5.4 Druckverlauf der „Stand-alone“ und der gekoppelten Rechnung ATHLET-CD-CONDRU mit OpenFOAM mit einfach modellierten heißen Strängen (Linie: Von ATHLET berechnete Werte an der Kopplungsschnittstelle, Punkte: Von OpenFOAM berechnete Werte)

Zur Kontrolle des Kopplungsalgorithmus sind in Abb. 5.4 die Werte der gekoppelten Rechnung (blaue Linie bzw. Punkte), die von ATHLET für die Kopplungsschnittstelle in der Volumenausgleichsleitung berechnet wurden, als Linien und die Werte, die von OpenFOAM berechnet wurden, als Punkte dargestellt. Die Werte stimmen exakt überein.

In Abb. 5.5 ist der Verlauf der Minimal-, Maximal- und der Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens oberhalb des Eintrittskammer des von OpenFOAM simulierten Dampferzeugers dargestellt. Man erkennt, dass die Maximal- und Durchschnittstemperatur von ihren Startwerten bis ca. zum Zeitpunkt 16.000 s um ca. 150 °C ansteigen, dann innerhalb von 200 s wieder um ca. 150 °C abfallen und danach sehr langsam weiter abnehmen.

In Abb. 5.6 sind für zwei Zeitpunkte der Simulation links das Temperaturfeld am Einlass des Rohrbodens oberhalb der Eintrittskammer des Dampferzeugers und rechts die vertikale Geschwindigkeit dargestellt. Zum Zeitpunkt der maximalen lokalen Temperatur ($t = 16.025$ s, Abb. 5.6 links oben) ist zu erkennen, dass die vertikale Geschwindigkeit (Abb. 5.6 rechts oben) fast nur positive Werte hat (rötliche Farbtöne). Negative vertikale

Geschwindigkeiten (blaue Farbtöne) treten nur in kleinen Bereichen auf. In den restlichen Bereichen ist die vertikale Geschwindigkeit fast 0 (schwarz). Dies bedeutet, dass Fluid lokal nur in die U-Rohre hineinströmt, aber fast keine Rückströmung aus den U-Rohren in Richtung Eintrittskammer stattfindet.

Zu einem späteren Zeitpunkt ($t = 16.192$ s, Abb. 5.6 unten) hingegen gibt es neben einem Bereich, in dem die Strömung aufwärtsgerichtet ist, auch ausgedehnte Bereiche, in denen das Fluid nach unten strömt (hellblaue Farbtöne). Da das Fluid im Dampferzeuger gekühlt wird und das aus verschiedenen Richtungen in die Eintrittskammer strömende Fluid teilweise gemischt wird, führt dies insgesamt zu einer Abkühlung. Dies sorgt dafür, dass sowohl die lokale Maximaltemperatur im Bereich des Rohrbodens, als auch die Durchschnittstemperatur sinkt.

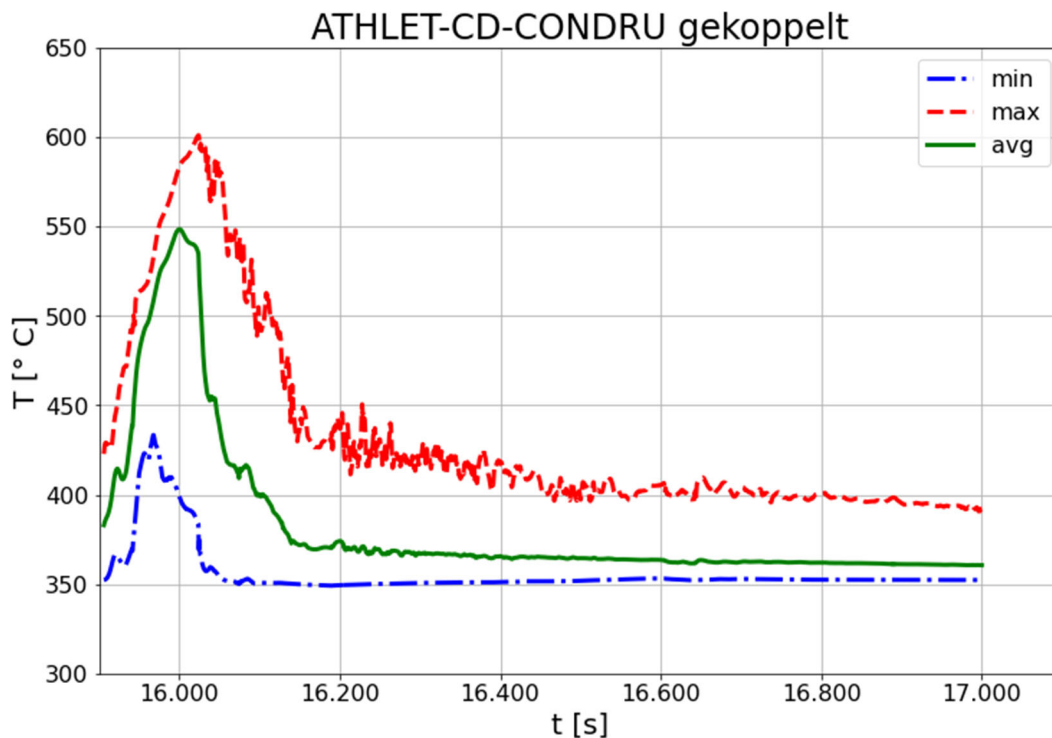
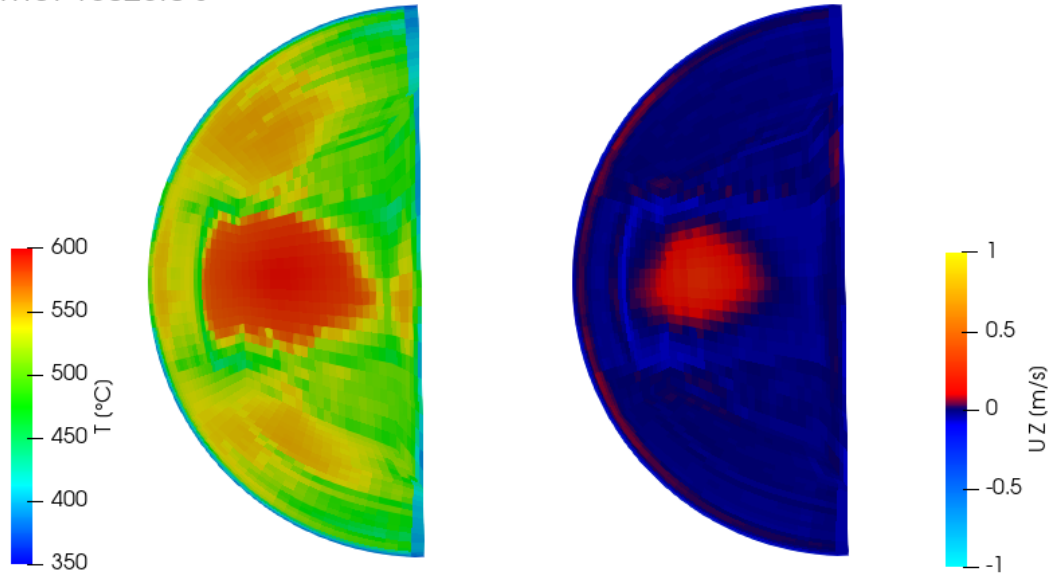


Abb. 5.5 Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers

Time: 16025.0 s



Time: 16192.0 s

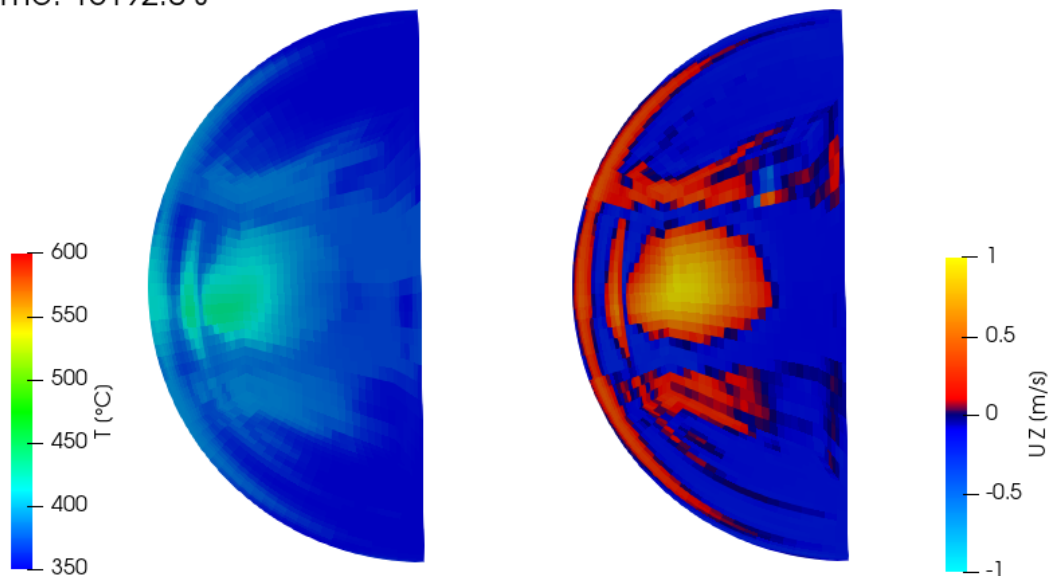


Abb. 5.6 Temperatur (jeweils links) und vertikale Geschwindigkeit (jeweils rechts) im Rohrboden oberhalb der Eintrittskammer des Dampferzeugers zum Zeitpunkt des höchsten Temperaturwertes während der Simulation (oben) und nach Ende der Periode starker Temperaturschwankungen (unten)

In Abb. 5.7 ist das Verhältnis zwischen der Maximal- und der Durchschnittstemperatur, berechnet auf Basis der Werte in [°C], dargestellt. Dieses Verhältnis kann in der Strukturmeechanik verwendet werden, um die zusätzliche thermische Belastung abzuschätzen. Der in dieser Simulation erreichte Maximalwert beträgt 1,34. Anschließend fällt der Wert ab und schwingt sich bei einem Wert von ca. 1,1 ein.

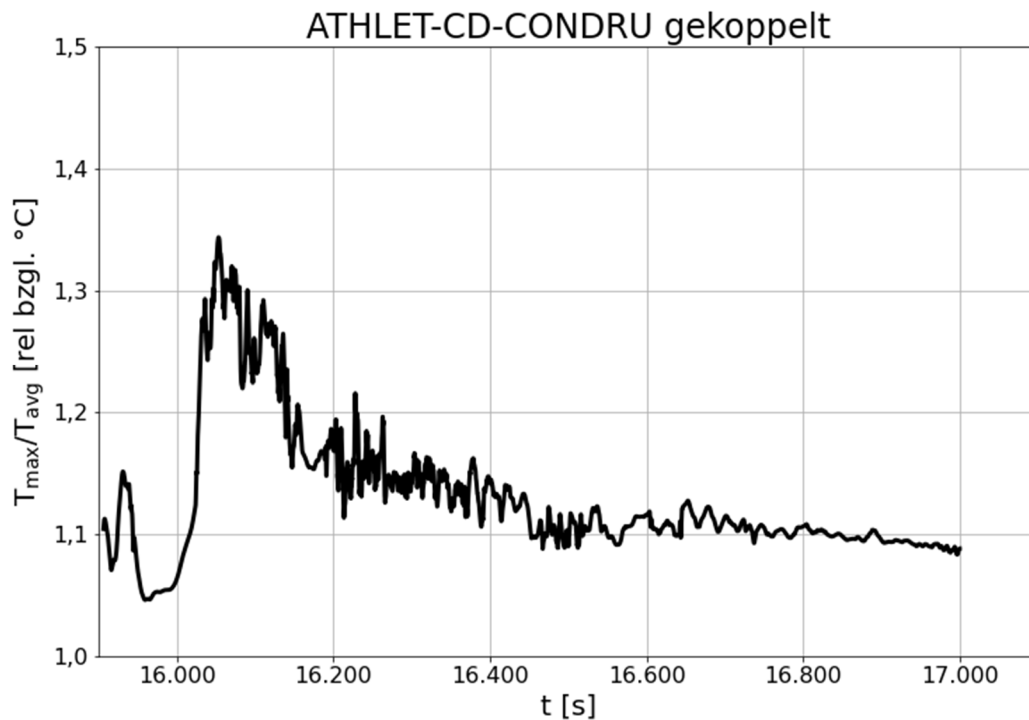


Abb. 5.7 Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (in °C) im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers

Eine weitere zu untersuchende Eigenschaft der Strömung ist das Verhalten im heißen Strang zwischen dem RDB und der Abzweigung der Volumenausgleichsleitung. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, konnte in den OpenFOAM-Simulationen mit der „Stand-alone“-Version eine Gegenströmung aus Richtung Dampferzeuger in Richtung RDB beobachtet werden. Dies war sowohl für Randbedingungen, die ein offenes wie auch ein geschlossenes Druckhalterabblaseventil nachbilden sollten, der Fall.

Um diesen Effekt für den gesamten Verlauf der gekoppelten Rechnungen zu evaluieren, wurde das Geschwindigkeitsfeld für alle Flächenelemente des Rechengitters an der Verbindungsstelle zwischen RDB und heißem Strang (siehe Abb. 5.8) für jeden Zeitschritt der Simulation gespeichert. Anschließend wurde für jedes Flächenelement dieser Ebene bestimmt, ob die Strömung in Richtung RDB oder in Richtung Dampferzeuger strömt. Die Flächen der beiden Strömungsrichtungen werden aufsummiert und zur Gesamtfläche ins Verhältnis gesetzt.

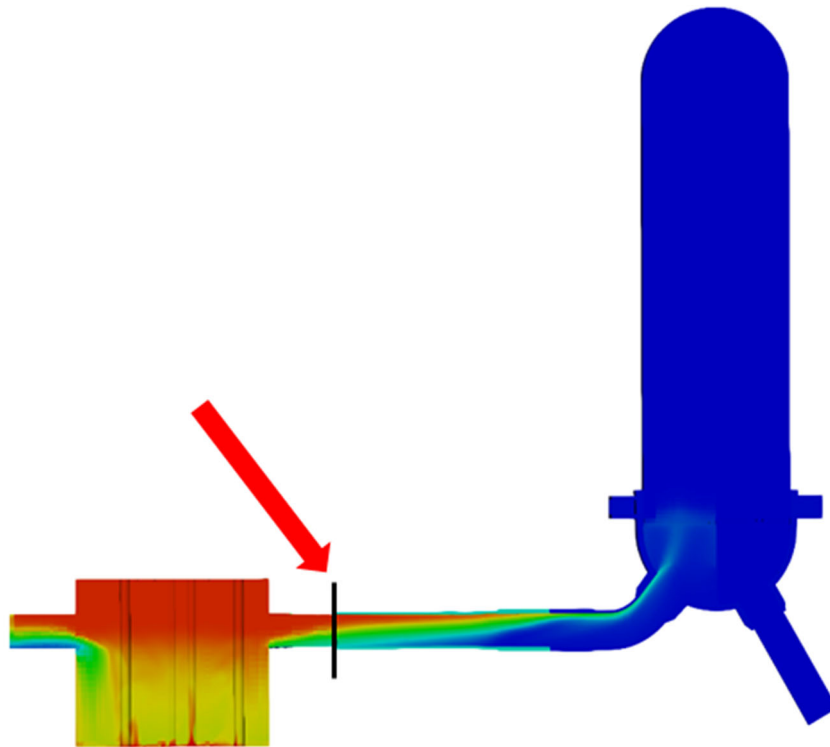


Abb. 5.8 Position der Auswertungsebene für die Strömungsrichtung im heißen Strang

In Abb. 5.9 ist der zeitliche Verlauf des Flächenanteils für die beiden Strömungsrichtungen dargestellt. Vergleicht man Abb. 5.9 und Abb. 5.4, so ist zu erkennen, dass immer dann, wenn das DH-Abblaseventil offen ist, sprich der Druck fällt, auf ca. 70 % der Fläche die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. Abzweigung der Volumenausgleichsleitung fließt. Ist das DH-Abblaseventil hingegen geschlossen, so ist das Verhältnis der beiden Strömungsrichtungen nahezu gleich.

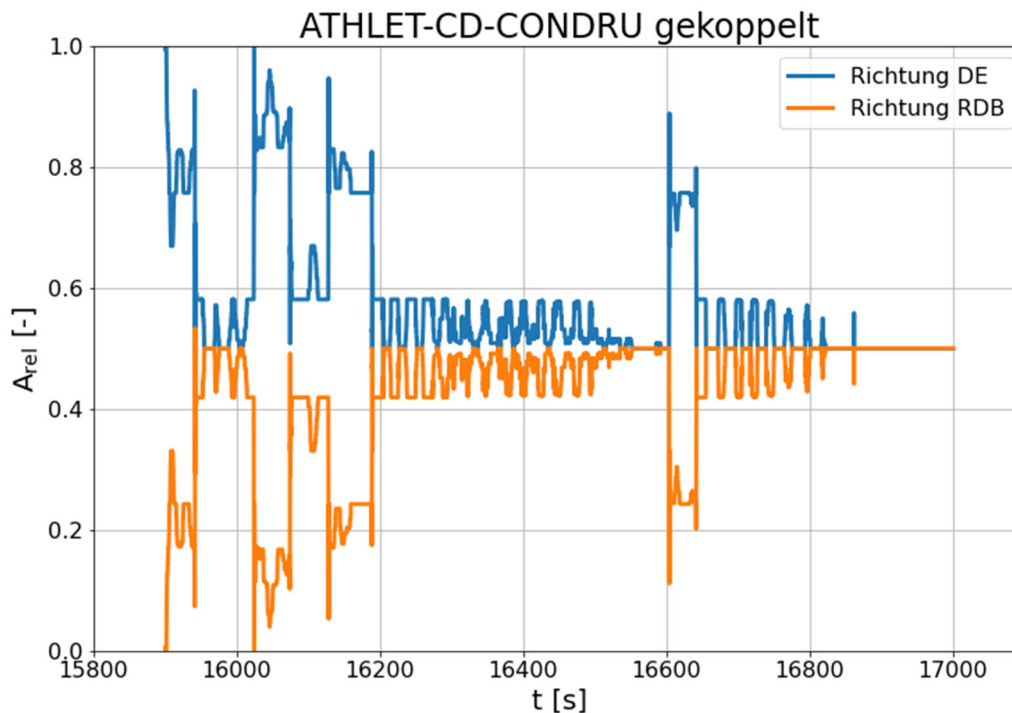


Abb. 5.9 Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt

Über den gesamten Zeitraum der gekoppelten Simulation strömt also auf einem Teil der Fläche Gas in Richtung RDB. Da das vom Dampferzeuger kommende Gas kälter ist als das vom RDB, kommt es dort bei der Durchmischung des Gases, das aus dem Reaktorkern strömt, und dem Gas aus dem Dampferzeuger zu einer Abkühlung. Dies wiederum führt das dazu, dass auch die Temperatur des Gases, das Richtung Druckhalter strömt, im Laufe der Simulation abnimmt. Dieser Kühleffekt erklärt, warum es nach einiger Zeit (300 s ab Start der gekoppelten Simulation) zu einer deutlichen Verlängerung der Zeit kommt, die notwendig ist, bis der Druck nach dem Schließen des Abblaseventils wieder den Wert erreicht, bei dem dieses öffnet.

In Abb. 5.10 ist das Strömungsverhalten für zwei Zeitpunkte (analog zu Abb. 5.6 ungefähr zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur im Bereich des Rohrbodens und nach der Periode der starken Temperaturschwankungen) dargestellt. Man erkennt das zum Zeitpunkt der Maximaltemperatur (links) nur eine schwach ausgeprägte Strömung im Bereich der U-Rohre herrscht. Im Bereich der Eintrittskammer hat sich eine Zirkulationsströmung ausgebildet, im Bereich der Austrittskammer ruht die Strömung näherungsweise.

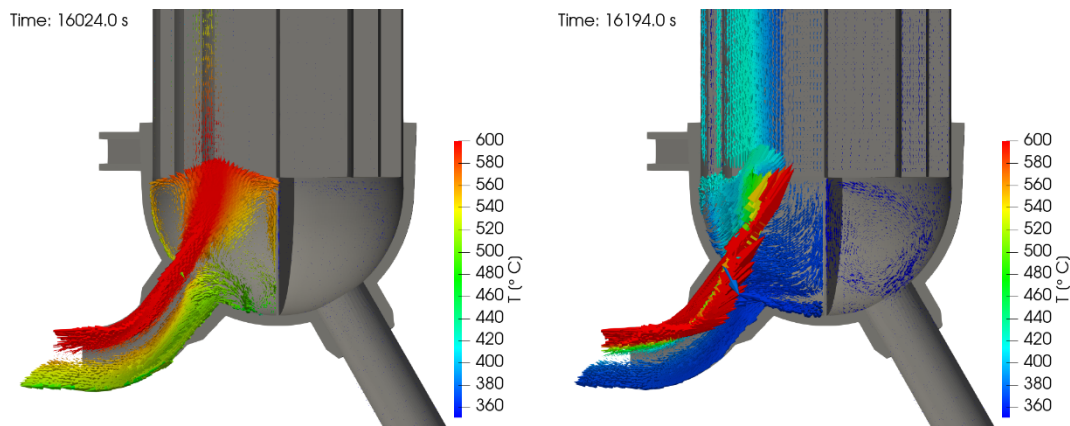


Abb. 5.10 Strömungsverhalten und Temperaturen im Bereich der Sammler, des Rohrbodens und der U-Rohre

Nach ca. 200 s hat sich eine Strömung im Bereich der U-Rohre herausgebildet, wobei in einem Teil der Rohre die Strömung von der Eintritts- zur Austrittskammer verläuft und in anderen Bereichen in die umgekehrte Richtung. Dies führt zu der oben beschriebenen stärkeren Kühlung des Gases im Bereich der Eintrittskammer. In Abb. 5.10 (rechts) erkennt man deutlich, dass die Temperatur des Gases, das in Richtung RDB strömt, deutlich niedriger liegt als zuvor (Abb. 5.10 (links)).

Insgesamt lief die gekoppelte Rechnung mit ATHLET-CD-CONDRU und OpenFOAM über einen Zeitraum von ca. 1.100 s stabil. Dafür wurden auf 48 CPU-Kernen eine Rechenzeit von ca. 3,9 Millionen Sekunden bzw. 44,6 Tagen benötigt.

5.2.1.2 Geschichtete Modellierung heiße Stränge

Der Startzeitpunkt der gekoppelten Simulation zwischen ATHLET-CD-CONDRU mit geschichteten heißen Strängen und OpenFOAM war, wie in Abb. 5.11 dargestellt, bei $t = 15.400,1$ s (Gesamtzeit entspricht 10.400,1 s transiente Zeit). In Abb. 5.11 ist zu erkennen, dass der Startzeitpunkt der gekoppelten Simulation in der „Stand-Alone“-ATHLET-CD-CONDRU-Simulation in eine Phase steigenden Primärkreisdrucks fiel, bedingt durch das geschlossene DH-Abblaseventil. In der gekoppelten Simulation hingegen traten kurzzeitig starke Druckschwankungen auf, bevor sich die gekoppelte Simulation stabilisierte. Anschließend fiel der Druck zunächst ab, bevor er wieder anstieg, allerdings langsamer als in der „Stand-alone“-Simulation. Nach Erreichen des Ansprechdrucks des Abblaseventils und dessen Öffnen wurde ein vollständiger Zyklus aus offenem und geschlossenem Abblaseventil sowie eine weitere volle Phase mit offenem Ventil simuliert.

Wie schon in Abschnitt 3.5.2 diskutiert, dauert es in der „Stand-alone“-Simulation mit geschichteten heißen Strängen länger, bis nach Schließen des Abblaseventils der Druck erneut den Ansprechdruck erreicht. Dieses Verhalten kann in Abb. 5.11 auch für die gekoppelte Simulation beobachtet werden.

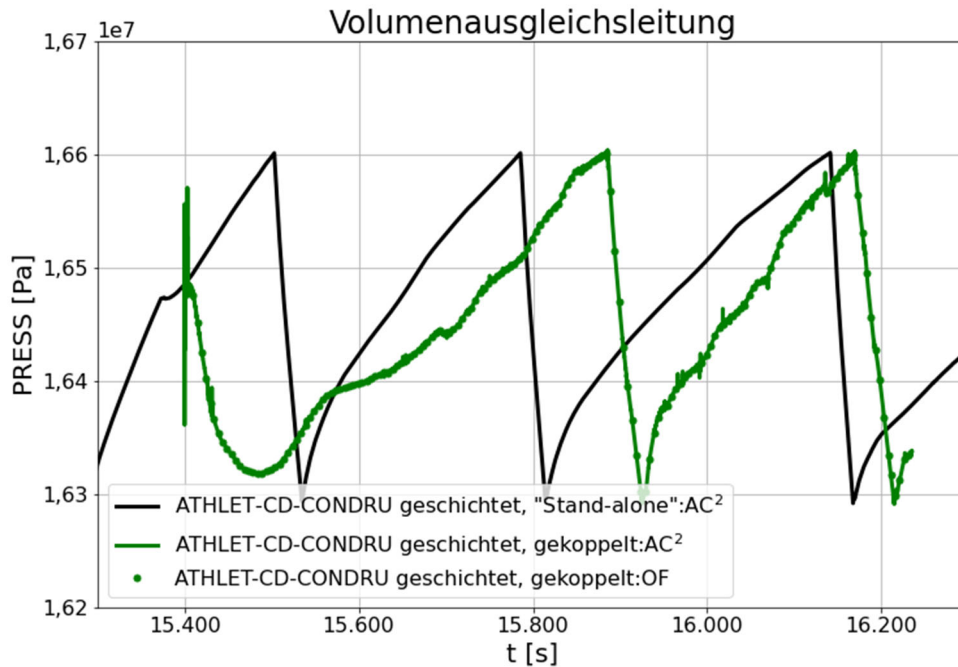


Abb. 5.11 Druckverlauf der „Stand-alone“-Version von ACD-C und der gekoppelten Rechnung ATHLET-CD-CONDRU mit OpenFOAM mit geschichteten heißen Strängen

In Abb. 5.12 ist der zeitliche Verlauf der Minimal-, Durchschnitts- und Maximaltemperatur im Bereich des Rohrbodens des Dampferzeugers oberhalb der Eintrittskammer dargestellt. Im Gegensatz zu der gekoppelten Simulation mit einfacher Modellierung der heißen Stränge (siehe Abb. 5.5) tritt der höchste Werte sowohl für die örtliche Maximaltemperatur wie auch die Durchschnittstemperatur am Beginn der Simulation bzw. wenige Sekunden danach auf. Der Grund dafür ist, dass die Rückströmung durch den von OpenFOAM simulierten Dampferzeuger und dadurch die Kühlung sofort zu Beginn der Simulation einsetzt.

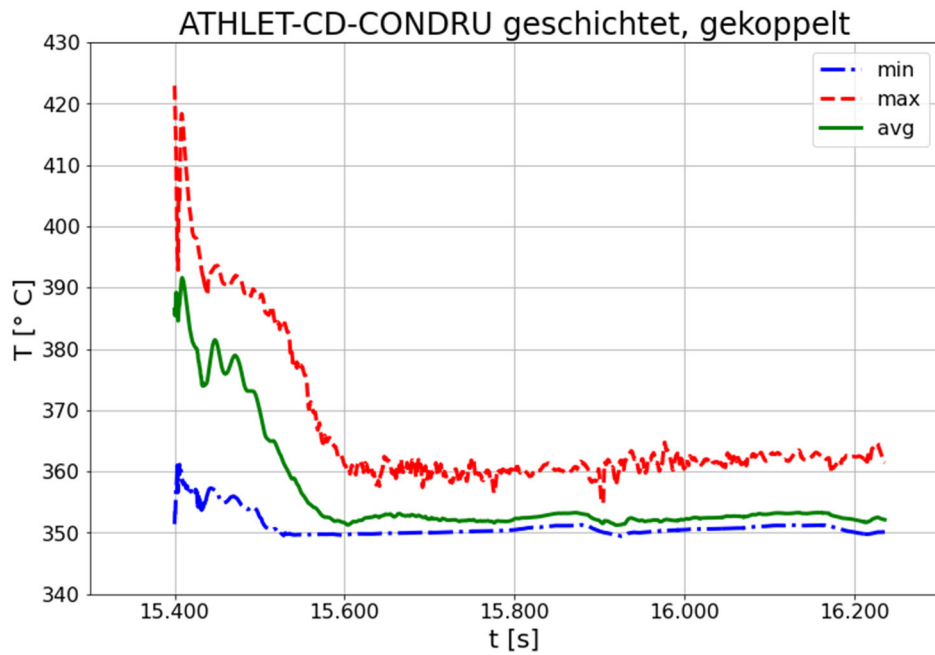


Abb. 5.12 Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers

Auch der Maximalwert für das Verhältnis zwischen Maximal- und Durchschnittstemperatur (siehe Abb. 5.13) tritt bereits am Beginn der Simulation auf und beträgt 1,1. Bei ca. 15.520 s tritt noch ein weiteres ausgeprägtes lokales Maximum mit ca. 1,06 auf. Danach schwingt sich das Ergebnis auf ca. 1,03 ein.

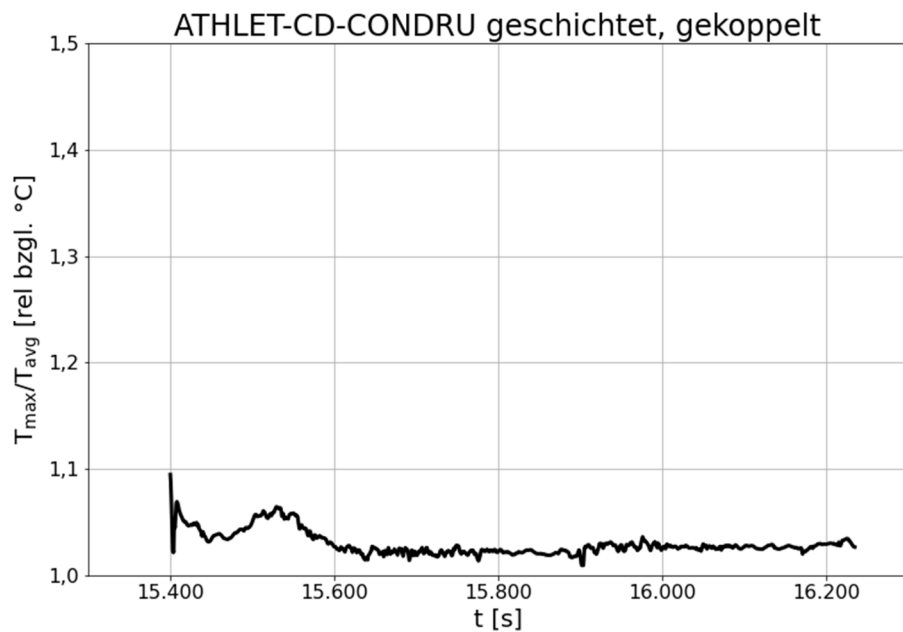


Abb. 5.13 Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (mit °C berechnet) im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers

Time: 15403.9 s

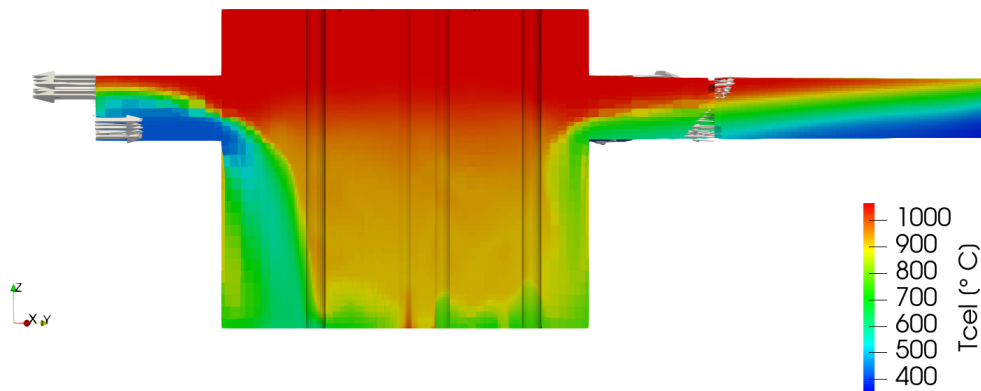


Abb. 5.14 Temperatur und Strömungsrichtungen im oberen Plenum, dem Stutzen zu einer RDB-Kopplungsschnittstelle (links) und dem heißen Strang, der von OpenFOAM simuliert wird (rechts)

In Abb. 5.14 ist auf einer Schnittebene durch zwei heiße Stränge und das obere Plenum des RDB die Temperatur und die Strömungsrichtung und -größe (durch Pfeile) kurz nach Beginn der gekoppelten Simulation dargestellt. Der RDB-Stutzen auf der linken Seite der Abbildung ist mit ATHLET-CD-CONDURU gekoppelt, während der heiße Strang auf der rechten Seite durch OpenFOAM simuliert wird. Deutlich zu erkennen ist, dass die Strömung auf der linken Seite an den drei Kopplungsschnittstellen zum von ATHLET-CD-CONDURU berechneten heißen Strang in unterschiedliche Richtungen weist. Im oberen Bereich, in dem die Temperatur höher ist, bewegt sich die Strömung in Richtung Dampferzeuger, während im unteren Bereich eine kältere Strömung Richtung RDB fließt. Die Geschwindigkeit auf der mittleren Kopplungsschnittstelle beträgt zu diesem Zeitpunkt näherungsweise Null. Die Geschwindigkeiten im von OpenFOAM simulierten heißen Strang zeigen qualitativ das gleiche Verhalten. Das heißt, auch dort fließt die Strömung im oberen Teil des heißen Strangs in Richtung Dampferzeuger, im unteren Teil in Richtung RDB und in der Mitte ist die Strömungsgeschwindigkeit näherungsweise Null. Durch die deutlich höhere räumliche Auflösung der CFD-Simulation sind die Übergänge dort zwischen benachbarten Flächenelementen fließend, während sich die Geschwindigkeiten benachbarter Schichten in den mit ATHLET-CD-CONDURU simulierten Strängen stark unterscheiden. Darüber hinaus sind die Absolutbeträge der Geschwindigkeiten im mit OpenFOAM simulierten Strang deutlich kleiner.

In der gekoppelten Simulation zwischen ATHLET-CD-CONDURU mit geschichteten heißen Strängen und OpenFOAM kam es in den von ATHLET-CD-CONDURU simulierten heißen Strängen und Dampferzeugern zu einem anderen Strömungsverhalten als in den „Stand-alone“-ATHLET-CD-CONDURU-Simulation. Vergleicht man den Massenstrom in einem von ATHLET-CD-CONDURU in der gekoppelten Rechnung simulierten heißen Strang und dem dazugehörigen Dampferzeuger (siehe Abb. 5.15) mit den Ergebnissen der „Stand-alone“-ATHLET-CD-CONDURU-Simulation (siehe Abb. 3.12), so erkennt man, dass in der gekoppelten Rechnung der Massenstrom im Dampferzeuger deutlich kleiner ist als in der „Stand-alone“-Simulation. Die Zirkulationsströmung findet also nur in den verschiedenen Schichten des heißen Strangs statt. Der Dampferzeuger nimmt an der Zirkulation praktisch nicht teil. Das erklärt auch die in Abb. 5.16 (links) dargestellten Temperaturverläufe der drei Schichten. Da in der gekoppelten Simulation durch den Dampferzeuger keine Kühlung erfolgt, sind die Temperaturen in den drei Schichten in der gekoppelten Simulation ab ca. 15.500 s sehr ähnlich (siehe Abb. 5.15). In der nicht gekoppelten „ATHLET-CD-CONDURU“-Simulation hingegen ist die Temperatur in der oberen Schicht zu jedem Zeitpunkt deutlich höher als in der unteren. Die Differenz beträgt mindestens 20 K. Eine Erklärung für diese Beobachtung ist, dass in der gekoppelten Simulation das obere Plenum des RDB von OpenFOAM simuliert wird, und es dort zu einer Durchmischung kommt. Dadurch ist die Temperaturdifferenz zwischen oberer und unter Schicht des heißen Strangs kleiner und es kommt deshalb zu keinem Naturumlauf mit dem Dampferzeuger. In der „Stand-alone“-ATHLET-CD-CONDURU-Simulation ist dagegen eine Durchmischung im oberen Plenum des RDB nicht möglich, da dieses eindimensional modelliert wird.

Das gleiche Verhalten wurde in allen drei von ATHLET-CD-CONDURU simulierten Strängen/Dampferzeuger beobachtet.

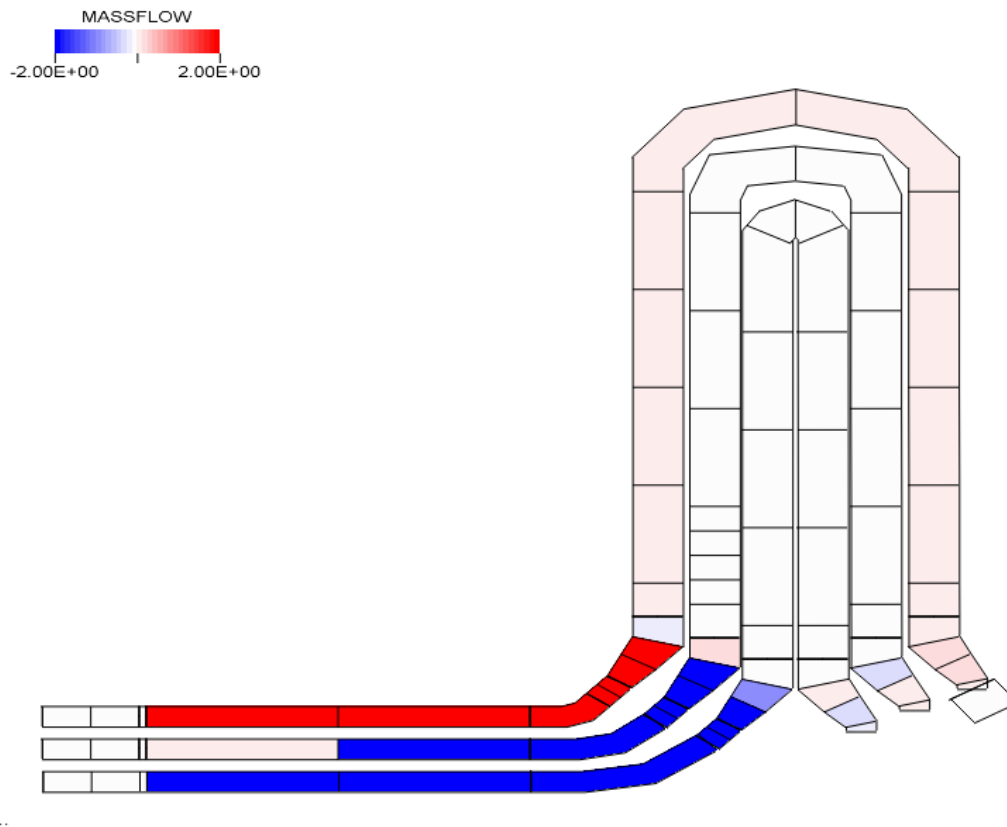


Abb. 5.15 Massenstrom in einem von ATHLET-CD-CONDURU in der gekoppelten Rechnung simulierten heißen Strang

Auffällig in Abb. 5.16 (rechts) ist, dass in der gekoppelten Rechnung die Massenströme in der oberen und unteren Schicht deutlich größer sind als in der nicht gekoppelten „ATHLET-CD-CONDURU“-Simulation. Ein Grund hierfür konnte nicht gefunden werden. In weiteren Analysen sollte deshalb zum einen der Einfluss einer detaillierteren Modellierung des oberen Plenums in „Stand-Alone“-ATHLET-Simulationen untersucht werden. Außerdem könnte der Effekt auch durch gekoppelte Simulation mit einem reduzierten Rechengebiet, z. B. nur das obere Plenum des RDB als CFD-Rechengebiet und ein heißer Strang und Dampferzeuger als ATHLET-Rechengebiet, untersucht werden. Dadurch könnten Probleme bei der Modellierung der Querverbindungen („cross connections“) zwischen den Schichten des heißen Strangs als Ursache des beobachteten Phänomens ausgeschlossen werden. Ebenfalls sollte untersucht werden, ob durch Maßnahmen im CFD-Rechengebiet, z. B. durch Verhindern von Querströmung in der unmittelbaren Nähe der Kopplungsschnittstellen der drei Schichten, die beobachteten hohen Massenströme beeinflusst werden.

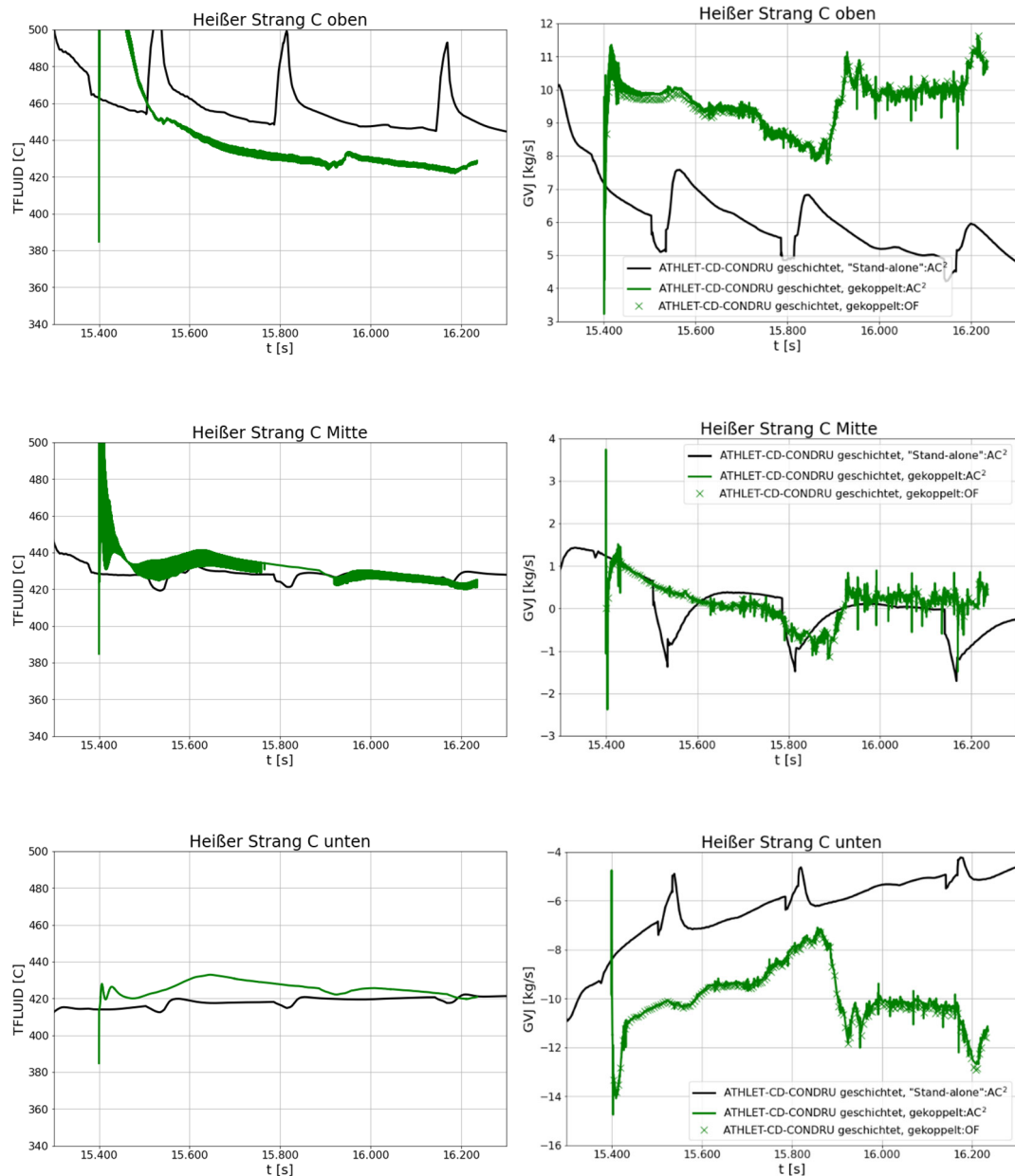


Abb. 5.16 Temperatur (links) und Massenstrom (rechts) in den unterschiedlichen Schichten eines von ATHLET-CD-CONDRU simulierten heißen Strangs

In Abb. 5.17 ist der zeitliche Verlauf des Flächenanteils für die beiden Strömungsrichtungen im von OpenFOAM simulierten heißen Strang dargestellt. Wie schon für die gekoppelte Simulation mit einfach modellierten heißen Strängen im Rechenggebiet von ATHLET-CD-CONDRU fließt immer dann, wenn das DH-Abblaseventil offen ist, sprich der Druck fällt, auf ca. 75 % der Fläche die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. Abzweigung der Volumenausgleichsleitung. Ist das DH-Abblaseventil hingegen geschlossen, so ist das Verhältnis der beiden Strömungsrichtungen nahezu gleich (50 %/50 %).

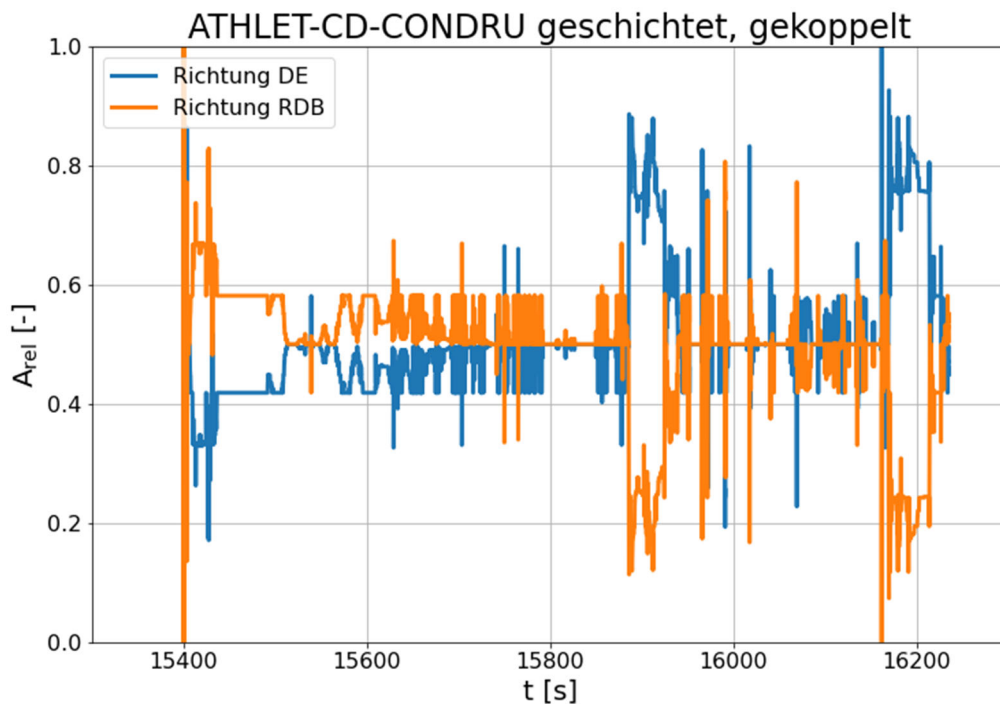


Abb. 5.17 Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt

Insgesamt lief die Simulation mit ATHLET-CD-CONDRU bzw. OpenFOAM über einen Zeitraum von ca. 830 s stabil. Allerdings wurde selbst mit 250 Iterationen pro Zeitschritt oft keine konvergierte Lösung für die Kopplungsgrößen erzielt. Dies führte zu den Ausschlägen, die in den verschiedenen Größen an den Kopplungsschnittstellen (siehe Abb. 5.11 und Abb. 5.16) wie auch beim Flächenverhältnis (siehe Abb. 5.17) beobachtet wurden.

Da die anderen beiden gekoppelten Rechnungen stabil liefen, deutet dies stark darauf hin, dass das Problem in der Dreiteilung der Kopplungsschnittstellen zu den heißen Strängen an den RDB-Stützen lag. Hier traten an den Kopplungsschnittstellen zu den direkt benachbarten Flächen nicht nur betragsmäßig stark unterschiedliche Strömungen auf, sondern sie unterschieden sich auch in der Richtung. Gleichzeitig wurde durch die Kopplung auf der gesamten Kopplungsfläche der gleiche Geschwindigkeitsbetrag mit einer Unstetigkeit an der Grenze zur benachbarten Kopplungsfläche vorgegeben.

Insgesamt wurden auf 48 CPU-Kernen eine Rechenzeit von ca. 6,0 Millionen Sekunden bzw. 69,4 Tage benötigt. Soll das Modell für weitere gekoppelte Rechnungen weiterverwendet werden, so sind Modifikationen vorzunehmen, die zu physikalisch sinnvolleren Kopplungsrandbedingungen führen.

5.2.2 OpenFOAM mit AC² mit einfacher Modellierung der heißen Stränge

Der Startzeitpunkt der gekoppelten Simulation zwischen AC² (ATHLET-CD-COCOSYS) und OpenFOAM war, wie in Abb. 5.18 dargestellt, bei $t = 16.250,1$ s (Gesamtzeit entspricht 11.250,1 s transiente Zeit). In Abb. 5.18 ist zu erkennen, dass dieser in eine Phase steigenden Primärkreisdrucks fällt, bedingt durch das geschlossene DH-Abblaseventil. Anschließend lieferte die Simulation einen vollen Zyklus mit geöffnetem bzw. geschlossenem Abblaseventil, gekennzeichnet jeweils durch abfallenden bzw. steigenden Druck, sowie einem Zyklus mit geöffnetem Abblaseventil.

Im Gegensatz zu den ersten Zyklen der gekoppelten Simulation mit ATHLET-CD-CONDURU (siehe Abb. 5.4) und der „Stand-Alone“-Simulation mit AC² verlaufen die Druckanstiege langsamer (ca. 150 s statt ca. 60 s). Dieses ist darauf zurückzuführen, dass sich bereits von Beginn der gekoppelten Simulation eine kühlende Rückströmung in Richtung RDB einstellt. Verursacht wurde dies durch die Initialisierung des OpenFOAM-Rechengebiets durch ein Zwischenergebnis der gekoppelten Rechnung von ATHLET-CD-CONDURU mit OpenFOAM. Dies zeigt die hohe Sensitivität der Ergebnisse mit Bezug auf die Initialisierung des CFD-Rechengebiets.

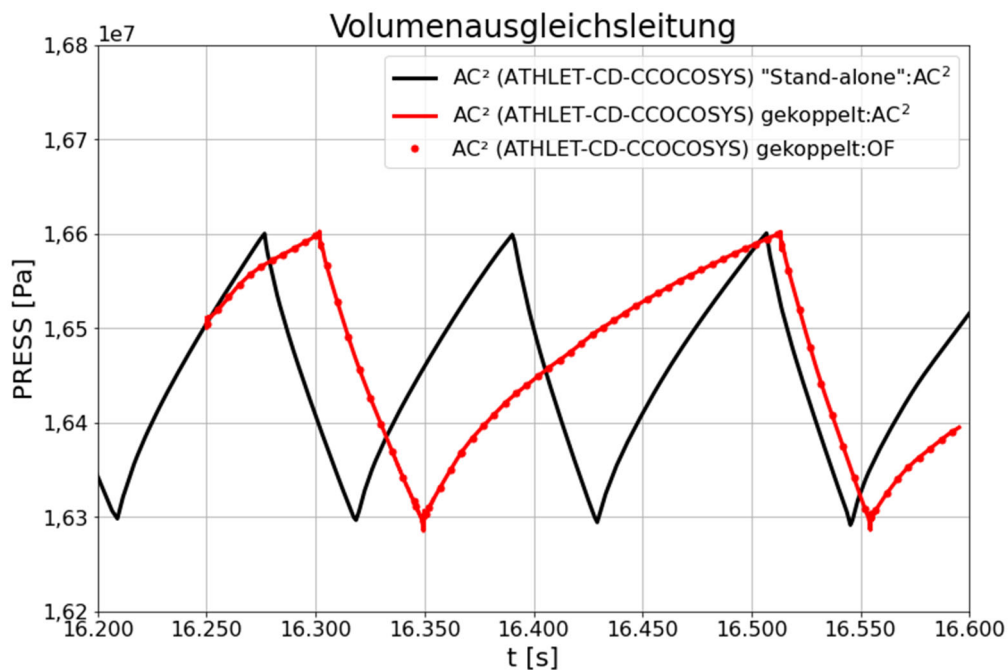


Abb. 5.18 Druckverlauf der „Stand-alone“ und der gekoppelten Rechnung AC² mit OpenFOAM mit einfach modellierten heißen Strängen

Das schnellere Einsetzen der kühlenden Rückströmung Richtung RDB erkennt man auch in Abb. 5.19. Die Maximal- und Durchschnittstemperaturen im Rohrboden oberhalb der Eintrittskammer des Dampferzeugers sinken quasi von Beginn der gekoppelten Simulation an bzw. ca. 10 s – 20 s nach dem Start.

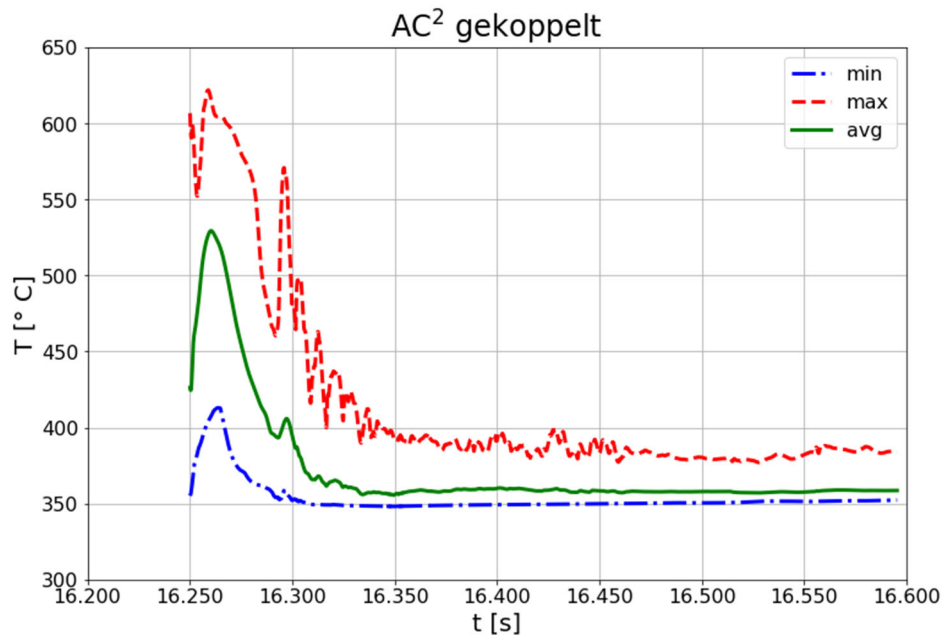


Abb. 5.19 Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers

In Abb. 5.20 ist das Verhältnis zwischen der Maximal- und der Durchschnittstemperatur, berechnet auf Basis der Werte in [°C], dargestellt. Während der Simulation treten zweimal sehr hohe Werte auf, einmal direkt zu Beginn der Simulation und das zweite Mal direkt nach dem Öffnen des Abblaseventils bei ca. 16.300 s. Zu beiden Zeitpunkten liegt der Wert für das Temperaturverhältnis bei ca. 1,43.

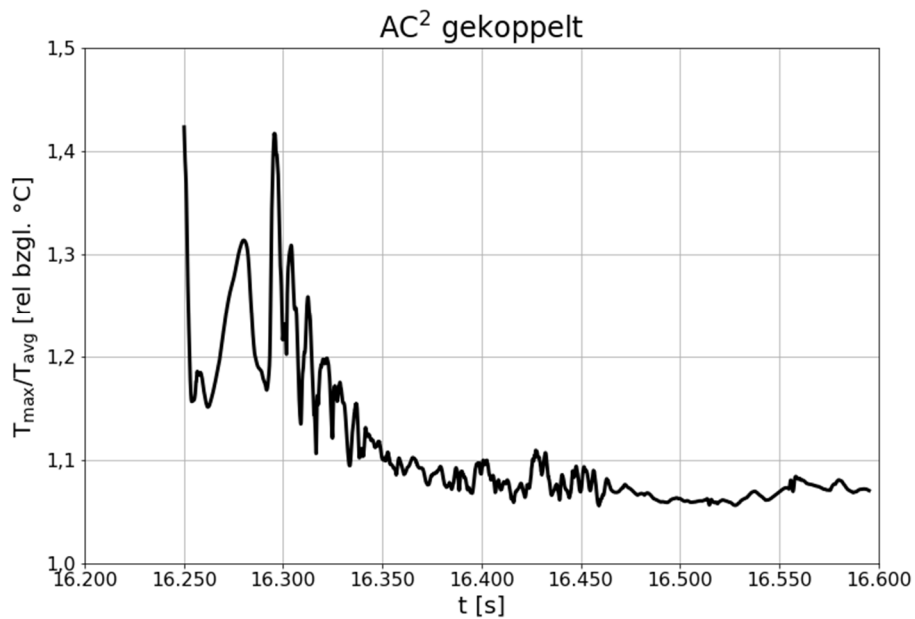


Abb. 5.20 Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (berechnet mit den Temperaturwerten in °C) im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers

In Abb. 5.21 ist analog zu Abb. 5.9 das Verhältnis der Flächen mit Strömung in Richtung RDB bzw. Dampferzeuger dargestellt. Wieder kann man erkennen, dass zu den Zeiten in der Simulation, in denen das Abblaseventil geschlossen ist, genau auf jeweils 50 % der Querschnittsfläche des heißen Strangs die Strömung in Richtung RDB bzw. in Richtung Dampferzeuger strömt. Für die Dauer des geöffneten DH-Abblaseventils teilt sich die Strömung auf ca. 75 % der Fläche in Richtung Dampferzeuger bzw. Abzweigung zur Volumenausgleichsleitung auf. Die verbleibenden 25 % strömen in Richtung RDB.

Insgesamt lief die gekoppelte Rechnung mit AC² (ATHLET-CD-COCOSYS) und OpenFOAM über einen Zeitraum von ca. 345 s stabil. Dafür wurde auf 48 CPU-Kernen für den OpenFOAM-Anteil und zwei CPU-Kernen für den AC²-Anteil eine Rechenzeit von ca. 1,6 Millionen Sekunden bzw. 18,9 Tage benötigt.

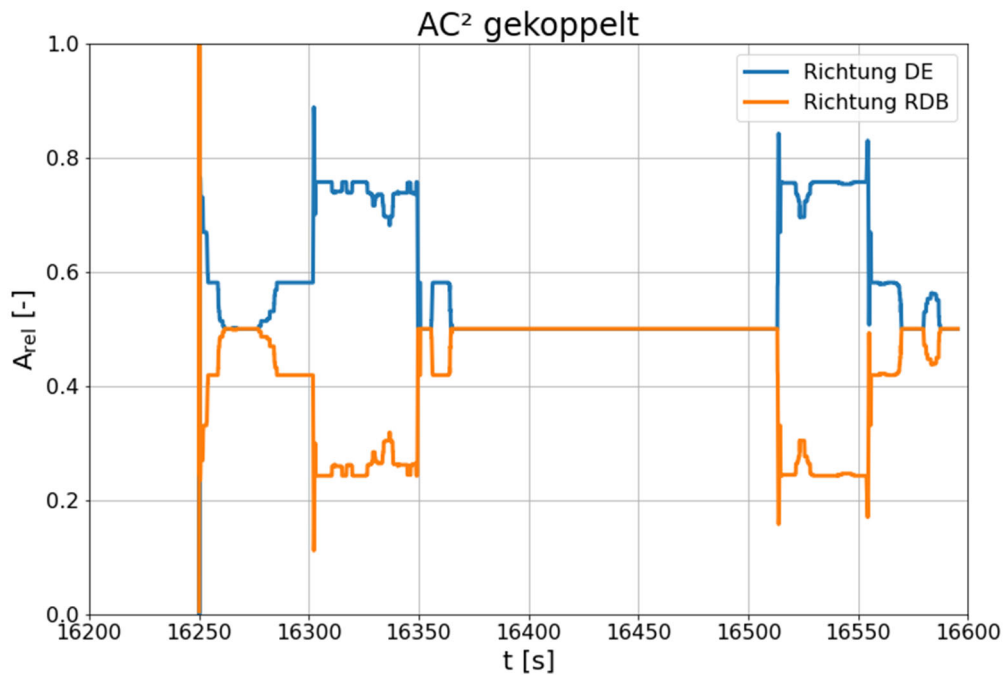


Abb. 5.21 Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt

5.2.3 Zusammenfassende Bewertung der gekoppelten Analysen

Insgesamt war die Umsetzung der gekoppelten Rechnungen erfolgreich. Mit allen Modellierungen auf der Systemcodeseite (AC² sowie ACD-C) war es möglich, mindestens einen Zyklus aus Öffnen und Schließen des Abblaseventils zu simulieren. Sowohl mit einem vereinfachten Anlagenmodell mit ATHLET-CD und CONDURU (ACD-C) wie auch mit dem vollen Programmsystem AC², jeweils bei Verwendung der zu Beginn des Projekts vorhandenen einfachen Modellierung der heißen Stränge, lief die Kopplung stabil.

Zusätzlich wurde ein Anlagenmodell mit geschichteten heißen Strängen (drei parallele TFOs je heißer Strang) für ATHLET-CD+CONDURU und AC² erstellt, um die Zirkulationsströmung in allen Strängen und ohne die Verwendung eines CFD-Codes darstellen zu können. Bei der gekoppelten Rechnung mit diesem Anlagenmodell bei Verwendung von ATHLET-CD+CONDURU kam es an den Kopplungsschnittstellen zu numerischen Problemen, die sich vor allem in einer deutlich längeren Rechenzeit bei gleicher Simulationsdauer äußerten. Außerdem trat in den von ATHLET-CD-CONDURU in dieser gekoppelten Simulation berechneten heißen Strängen ein Strömungsverhalten auf, das nicht erklärt werden konnte (Rezirkulation nur in den heißen Strängen und nicht durch die Dampferzeuger).

In allen gekoppelten Simulationen wurde eine Gasgegenströmung bzw. Rezirkulationsströmung durch den von OpenFOAM simulierten heißen Strang und die Dampferzeuger-Heizrohre beobachtet. Basierend auf den Ergebnissen von OpenFOAM für die Temperatur im Bereich des Rohrbodens des Dampferzeugers oberhalb der Eintrittskammer konnte die thermische Mehrbelastung einzelner Heizrohre dargestellt und quantifiziert werden.

Der Vergleich der „Stand-alone“-Simulationen mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und der entsprechenden gekoppelten Rechnungen zeigte, dass es durch den Kühleffekt über den von OpenFOAM simulierten Dampferzeuger zu einem signifikant unterschiedlichen Verhalten in den gekoppelten Simulationen im Vergleich zu den eigenständigen Systemcode-Rechnungen kam, wie z. B. der längeren Dauer, die nach einem Schließen des Abblaseventils notwendig war, bis erneut der Ansprechdruck erreicht wurde.

Insgesamt wurde im Rahmen des Vorhabens die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse zum Verhalten des DWR bei Hochdruck-Unfallabläufen durch eine deutlich realistischere Modellierung, wie der Verwendung von kompressiblen, realen Gasgemischmodellen, der detaillierteren Darstellung des oberen Plenums, der Berücksichtigung aller Kühlmittelstränge und des Ersetzens der zusätzlichen Auslassrandbedingung im Bereich des oberen Plenums des RDBs durch die Kopplungsrandbedingungen im Vergleich zu den Analysen im Vorläufervorhaben erhöht.

Mit der geschichteten Modellierung der heißen Stränge in ATHLET-CD kann die Gegenströmung in den heißen Strängen sowie die Zirkulationsströmungen in den DE für alle Stränge auch ohne CFD berechnet werden. Diese Umsetzung war aber nur durch die vorausgegangenen Arbeiten zur Modellierung des Phänomens der Rezirkulation mit CFD-Programmen möglich, die im Vorläufervorhaben begonnen und in diesem Vorhaben weiterentwickelt wurde. In Abb. 5.22 ist für die „Stand-Alone“-ATHLET-CD-CONDRU-Simulation mit geschichteten heißen Strängen die Minimal-, Durchschnitts- und Maximaltemperatur im Bereich des Rohrbodens oberhalb der Eintrittskammer dargestellt. Abb. 5.23 zeigt das Verhältnis aus der Maximal- zur Durchschnittstemperatur. Sowohl das zeitliche Maximum der Maximaltemperatur, als auch das Maximum des resultierenden Verhältnisses tritt schon vor Beginn der gekoppelten Rechnung auf, d. h. wenn es zur Teilfreilegung des Reaktorkerns und zur Oxidation der Brennstabhüllrohre

kommt. Der Maximalwert der Temperatur beträgt ca. 510 °C. Der Maximalwert des Verhältnisses auf Basis von °C beträgt ca. 1,2. Nach dem Maximum schwingt sich das Temperaturverhältnis auf einen Wert von ca. 1,03 ein.

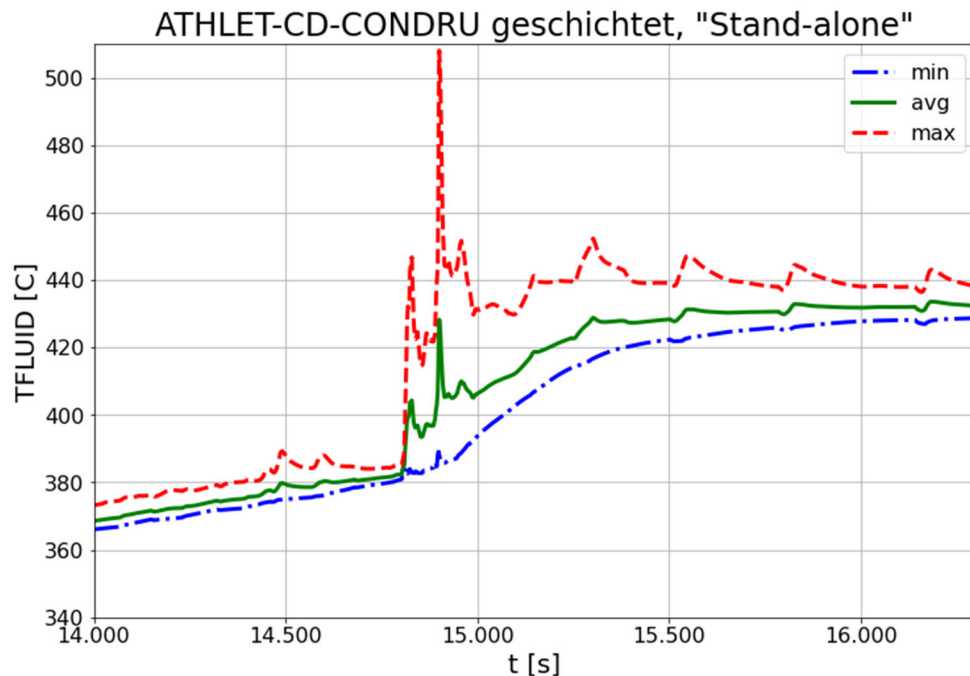


Abb. 5.22 Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbo-
dens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers in der „Stand-Alone“-
ATHLET-CD-CONDRU Simulation mit geschichteten heißen Strängen

Damit verhält sich die „Stand-Alone“ Simulation mit geschichteten heißen Strängen qua-
litativ sehr ähnlich wie die gekoppelten Rechnungen. Es scheint also möglich zu sein,
die hier zu betrachtenden Effekte auch in einer reinen Systemcodeanalyse zu ermitteln.
Allerdings sind noch weitere Arbeiten notwendig, um die Modellierung zu verbessern,
wie z. B. die quasi-dreidimensionale Modellierung des oberen Plenums des RDBs, um
dort Durchmischungsvorgänge realistischer abbilden zu können. Bei diesen Arbeiten
können Ergebnisse der gekoppelten Rechnungen zur Kalibrierung der ATHLET-CD-Mo-
dellierung (z. B. geschichtete Stränge, oberes Plenum des RDB) genutzt werden.

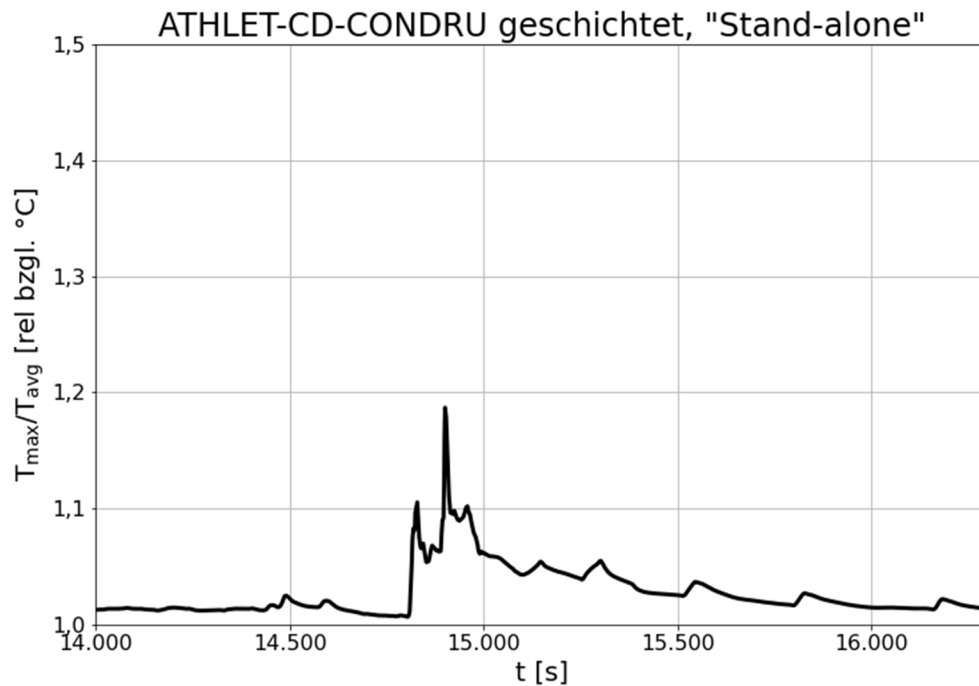


Abb. 5.23 Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (in °C) im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers in der „Stand-Alone“-ATHLET-CD-CONDRU Simulation mit geschichteten heißen Strängen

In Tab. 5.2 werden die Rechenzeit bzw. der Rechenaufwand für die verschiedenen gekoppelten bzw. „Stand-Alone“-Systemcodesimulationen verglichen. Berücksichtigt man die Simulationsdauer, so sind je nach Modellierung die „Stand-alone“-Systemcodesimulationen um den Faktor 3.000 bis fast 10.000 schneller als die gekoppelten Rechnungen, obwohl bei Letzteren die 25-fache Anzahl an Prozessorrechenkernen verwendet wurden. Dies demonstriert, dass, falls die zu berücksichtigenden physikalischen Phänomene in die Systemcodemodellierung aufgenommen werden können, diese eine sehr starke Ersparnis an Rechenkapazität ermöglichen, durch die z. B. Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen erst praktisch möglich werden.

Tab. 5.2 Rechenzeit bzw. -aufwand der Simulationen

Simulation	CPUs	Simulationszeit [s]	Rechenzeit [d]	Rechenzeit/ Simulationszeit [-]
gekoppelt ATHLET-CD- CONDURU	48	461,5	22,0	4.126,9
gekoppelt AC ² (ATHLET-CD- COCOSYS)	48 (OF) + 2 (AC ²)	345,2	18,9	4.734,9
gekoppelt ATHLET-CD- CONDURU, geschichtet	48	836	69,4	7.172,2
"Stand-alone" ATHLET-CD- CONDURU	2	20.000	1,1	4,9
"Stand-alone" ATHLET-CD- CONDURU, geschichtet	2	20.000	1,3	5,7
"Stand-alone" AC ² (ATHLET-CD- COCOSYS)	2	20.000	3,9	16,8

Im Vergleich zum Vorgängervorhaben können die dort erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich der Entwicklung der Gasgegenströmung bzw. Zirkulationsströmung im heißen Strang und den DE-Heizrohren in der Phase des Abblasens über die DH-Armaturen während eines HD-Kernschmelzablaufes sowie die daraus resultierende thermische Mehrbelastung einzelner Heizrohre bestätigt werden. Hinsichtlich der thermischen Mehrbelastung einzelner Heizrohre zeigen die gekoppelten Rechnungen im Vergleich zum Vorläufervorhaben etwas höhere Maximaltemperaturen am Eintritt des Rohrbodens (600 °C bis 620 °C im Vergleich zu 530 °C aus dem Vorläufervorhaben) sowie etwas größere Verhältnisse der Maximaltemperatur zur mittleren Eintrittstemperatur am Rohrboden (1,34 bis 1,43 im Vergleich zu 1,23 aus dem Vorläufervorhaben). Damit werden die Ergebnisse des Vorläufervorhabens qualitativ bestätigt. Die abweichenden Ergebnisse sind auf die geänderte CFD-Modellierung sowie die Kopplung mit dem Systemcode zurückzuführen. Die in diesem Vorhaben etwas höheren Maximaltemperaturen des Gasgemisches am Rohrbodeneintritt stellen aber unter Berücksichtigung der Abschätzungen aus Kapitel 5.2 des Abschlussberichtes des Vorläufervorhabens /BAN 17/ aus

struktur-mechanischer Sicht keine Gefährdung der Integrität von intakten Heizrohren dar, da die temperaturabhängige Zugspannung des Heizrohrwerkstoffes erst zwischen ca. 700 °C bis 800 °C signifikant abfällt. Bei einer postulierten Vorschädigung der Heizrohre von 40 % ist, wie bereits in /BAN 17/ dargestellt, wahrscheinlich mit einem etwa gleichzeitigen Versagen von Hauptkühlmittelleitung und den höher belasteten Heizrohren zu rechnen. Die im Vergleich zur Abschätzung des Vorläufervorhabens hier um etwa 20 Kelvin höhere Maximaltemperatur des in die Heizrohre einströmenden Gases sollte nicht zu einem wesentlich früheren Versagen der vorgeschädigten Heizrohre führen.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens bestätigen auch die für DWR-Anlagen in den bisherigen PSA der Stufe 2 gemachten Annahmen, dass bei einem HD-Kernschmelzablauf und intakten Heizrohren bzw. maximalen Vorschädigungen von 40 % (siehe /BAN 17/) auch unter Berücksichtigung der hier untersuchten Strömungsphänomene mit großer Wahrscheinlichkeit der heiße Strang bzw. die Volumenausgleichsleitung durch Kriechen versagen und es nicht zu einem induzierten Heizrohrversagen und damit auch nicht zur Radionuklidfreisetzung über einen Bypass zur Sekundärseite kommt.

6 Bewertung der Analyseergebnisse

Das obere Plenum des RDB sowie ein Teil des DH-Kühlmittelstranges einer DWR-Referenzanlage wurde mit dem CFD-Code OpenFOAM dargestellt. Dieses Modell wurde sowohl als „Stand-alone“-Modell als auch gekoppelt mit ATHLET-CD auf ein postuliertes Hochdruck-Kernschmelzszenarium einer DWR-Referenzanlage angewendet, um während der Abblasephase eines „Station Blackout“-Ereignisses mit Ausfall der primärseitigen Druckentlastung die sich einstellende freie Konvektionsströmung in dem DH-Kühlmittelstrang, die zu einer höheren thermischen Belastung einiger DE-Heizrohre führen kann, zu modellieren und zu untersuchen.

Im Vergleich zu den Arbeiten mit dem CFD-Programm „Ansys CFX“ des Vorläufervorhabens wurde im Rahmen dieses Vorhabens die Modellierung des DH-Kühlmittelstranges mit dem CFD-Programm OpenFOAM durchgeführt und weiter verbessert. Des Weiteren wurde eine Kopplung des OpenFOAM-Rechengebietes mit dem Systemcode ATHLET-CD realisiert. Dadurch wurden die Unsicherheiten der reinen „Stand-alone“-Modellierung des Vorläufervorhabens vermieden und damit eine noch realistischere Simulation ermöglicht. Diese Unsicherheiten lagen in der Übertragung der Daten für die Anfangs- und Randbedingungen vom Systemcode AC² in das isolierte CFX-Modell, der vereinfachten Modellierung des oberen Plenums des Reaktordruckbehälters, der Nichtberücksichtigung der restlichen drei Kühlmittelstränge sowie der isobaren Behandlung des Problems.

Die Arbeiten des Vorhabens zeigen, dass die verbesserte Modellierung des DH-Kühlmittelstranges in der „Stand-alone“-Version von OpenFOAM qualitativ vergleichbare Ergebnisse zu denen des Vorläufervorhabens liefert. Des Weiteren konnte die Kopplung des OpenFOAM-Modells mit drei verschiedenen Anlagenmodellen (ATHLET-CD mit CONDRU, AC² und ATHLET-CD mit CONDRU sowie geschichteter Modellierung der heißen Stränge) durchgeführt werden.

Auch die gekoppelten Rechnungen zeigen qualitativ vergleichbare Ergebnisse zur Gasgegenströmung in den heißen Strängen und der Zirkulationsströmung in den Heizrohren. Zudem konnte auch die thermische Mehrbelastung einzelner Heizrohre dargestellt und quantifiziert werden. Hinsichtlich der thermischen Mehrbelastung einzelner Heizrohre zeigen die gekoppelten Rechnungen im Vergleich zum Vorläufervorhaben etwas höhere Maximaltemperaturen am Eintritt des Rohrbodens (600 °C bis 620 °C im Vergleich zu

530 °C aus dem Vorläufervorhaben) sowie etwas größere Verhältnisse der Maximaltemperatur zur mittleren Eintrittstemperatur am Rohrboden (1,34 bis 1,43 im Vergleich zu 1,23 aus dem Vorläufervorhaben). Damit werden die Ergebnisse des Vorläufervorhabens qualitativ bestätigt. Aus struktur-mechanischer Sicht bedeuten diese Abweichungen hinsichtlich der maximalen Gastemperaturen aber keine größere Gefährdung als die bereits im Vorläufervorhaben abgeschätzte.

Mit dem weiter entwickelten OpenFOAM-Modell und den darauf aufbauenden gekoppelten Rechnungen konnten, wie oben bereits angemerkt, die im CFD-Modell des Vorläufervorhabens noch enthaltenen Ergebnisunsicherheiten, die aufgrund von Begrenzungen in der Modellierung des DH-Kühlmittelstranges noch enthalten waren, vermieden werden, was zu einer realistischeren Simulation der zu untersuchenden Strömungsphänomene im Primärkreis eines DWR während eines HD-Kernschmelzablaufes führte. Diese realistischere Darstellung führte zu der oben diskutierten quantitativen Ergebnisabweichungen im Vergleich zum Vorläufervorhaben.

Die CFD-Untersuchungen zum Verhalten des DH-Kühlmittelstranges erlaubten auch eine Änderung der ATHLET-CD-Modellierung der heißen Stränge. Diese wurden jeweils durch drei parallele ThermoFluid-Objekte modelliert (als geschichtete Modellierung bezeichnet). Mit dieser geänderten Darstellung der heißen Stränge konnte auch mit einem Systemcode die geschichtete Gegenströmung in den heißen Strängen und die Zirkulationsströmung in den Heizrohren dargestellt werden. Diese Darstellung war insbesondere durch die vorab durchgeführten CFD-Untersuchungen möglich. Damit konnte dargestellt werden, dass das untersuchte Strömungsphänomen nicht nur auf den DH-Kühlmittelstrang begrenzt ist, sondern sich auch in den drei anderen Strängen einstellt. Allerdings sind die dort entstehenden maximalen Gastemperaturen geringer.

7 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorläufervorhabens 3614R01307 wurden die Untersuchungen zu dem DE-Heizrohrverhalten bei HD-Kernschmelzabläufen in Druckwasserreaktoren mit senkrecht stehenden U-Rohr-Dampferzeugern vertieft untersucht. Dabei kommt es bei durch Wasser isolierten Pumpenbögen zu einer freien Konvektionsströmung innerhalb der Dampferzeuger-Heizrohre bei gleichzeitiger geschichteter freien Gasgegenströmung in den heißen Strängen, die in ihrer Gesamtheit zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Heizrohre führt. Im Rahmen der Arbeiten wurden das CFD-Modell des Vorläufervorhabens weiter verbessert sowie das verbesserte Modell mit dem „ATHLET-CD“-Anlagenmodell der DWR-Referenzanlage gekoppelt. Ziel der Arbeiten war es, die im CFX-Modell des Vorläufervorhabens enthaltenen Ergebnisunsicherheiten zu vermeiden und durch die Kopplung eine noch realistischere Modellierung und Simulation der Strömungsvorgänge während der Abblasephase über die DH-Armaturen eines HD-Kernschmelzunfalles zu ermöglichen.

Zuerst wurde das CFX-Modell des Vorläufervorhabens, das einen Teil des DH-Kühlmittelstrangs (Oberes Plenum RDB, heißer Strang, Anschluss Volumenausgleichsleitung, Ein- und Austrittskammer Dampferzeuger, Heizrohre sowie ein Teil des kalten Stranges) darstellt, in ein Modell für das CFD-Programm OpenFOAM überführt. Die wesentlichen Modellierungsmerkmale wurden dabei erhalten. Zusätzlich wurden Verbesserungen durchgeführt, welche die Gitterqualität, die Darstellung des oberen Plenums, die Modellierung der Trennwand zwischen Ein- und Austrittskammer sowie die Berücksichtigung einer nicht-isobaren Rechnung betrafen. Vergleichsrechnungen der beiden eigenständigen CFD-Modelle wurden durchgeführt, wobei die Ergebnisse eine sehr gute qualitative Übereinstimmung bezüglich der Darstellung der freien Gasgegenströmung im heißen Strang, der freien Zirkulationsströmung innerhalb der Heizrohre sowie der thermischen Mehrbelastung einzelner Heizrohre zeigten. Der Übergang vom CFX- auf das OpenFOAM-Modell war dadurch begründet, dass letzteres durch die Verfügbarkeit des Quellcodes von OpenFOAM flexibler mit dem AC²-Anlagenmodell der DWR-Referenzanlage zu koppeln war.

Im Anschluss wurde das eigenständige OpenFOAM-Modell mit dem Anlagenmodell des Systemcodes ATHLET-CD gekoppelt. Dafür wurde für den interessierenden Zeitbereich des Unfallablaufes die „ATHLET-CD“-Modellierung des DH-Kühlmittelstranges durch das OpenFOAM-Rechengebiet ersetzt und anschließend der weitere Unfallablauf transient mit der gekoppelten Version weitergerechnet.

Die Kopplung von ATHLET-CD mit OpenFOAM konnte für verschiedene Systemcodevarianten des Anlagenmodells erfolgreich umgesetzt werden. Bedingt durch die Arbeiten zur Umsetzung der Kopplung wurden die Systemcodevarianten ATHLET-CD mit dem sehr einfachen CONDRU-Sicherheitsbehältermodell (im Folgenden ACD-C genannt) sowie AC²-Anlagenmodell mit dem detaillierten COCOSYS-Sicherheitsbehältermodell verwendet. Ersteres war für die erste Umsetzung der Kopplung notwendig. Anschließend konnte das für die Kopplung kompliziertere AC²-Modell basierend auf den Erfahrungen aus der ersten Kopplung gekoppelt werden.

Die gekoppelten Rechnungen zeigen im Vergleich zu den eigenständigen CFD-Rechnungen qualitativ vergleichbare Ergebnisse zur freien Gasgegenströmung in den heißen Strängen und der freien Zirkulationsströmung in den Heizrohren. Des Weiteren konnten auch die thermische Mehrbelastung einzelner Heizrohre aus den Ergebnissen der gekoppelten Rechnungen dargestellt und quantifiziert werden. Diesbezüglich zeigen die Ergebnisse der gekoppelten Rechnungen im Vergleich zum Vorgängervorhaben etwas höhere maximale Gastemperaturen am Rohrbodeneintritt, die auch zu einer höheren thermischen Belastung einzelner Heizrohbereiche führen. Diese Abweichungen sind aufgrund der verbesserten Modellierung des CFD-Bereiches sowie auf die Kopplung mit dem Systemcode, die zu einer realistischeren Darstellung des Unfallablaufes führten, zurückzuführen. Dadurch konnten die noch im CFD-Modell des Vorläufervorhabens enthaltenen Ergebnisunsicherheiten, die aufgrund von Begrenzungen in der Modellierung des DH-Kühlmittelstranges resultierten, vermieden werden. Aus struktur-mechanischer Sicht bedeuten diese Abweichungen hinsichtlich der maximalen Gastemperatur aber keine größere Gefährdung als die bereits im Vorläufervorhaben abgeschätzte.

Die CFD-Untersuchungen zum Verhalten des DH-Kühlmittelstranges erlaubten zudem eine Änderung der ATHLET-CD-Modellierung der heißen Stränge. Diese wurden jeweils durch drei parallele Thermofluid-Objekte modelliert (als geschichtete Modellierung bezeichnet). Mit dieser geänderten Darstellung der heißen Stränge konnte auch mit einem Systemcode und ohne Einsatz von CFD die geschichtete Gegenströmung in den heißen Strängen und die Zirkulationsströmung in den Heizrohren unter Berücksichtigung des Einflusses aller vier Kühlmittelstränge dargestellt werden. Diese Darstellung war nur durch die vorab durchgeführten CFD-Untersuchungen möglich. Durch diese geänderte ATHLET-CD-Modellierung konnte insbesondere dargestellt werden, dass die untersuchten Strömungsphänomene nicht nur auf den DH-Kühlmittelstrang begrenzt sind, sondern

sich auch in den drei anderen Strängen einstellen. Allerdings sind dort die sich einstellenden Temperaturen der Gasströmung geringer.

Trotz des sehr komplexen und detaillierten Ansatzes der hier durchgeführten Kopplung konnten im Verlauf der Arbeiten einige wenige Möglichkeiten zur weiteren Optimierung identifiziert werden, die im Rahmen der Arbeiten aber nicht mehr berücksichtigt werden konnten und die ggf. in einem zukünftigen Forschungsvorhaben noch bearbeitet werden können. Deren Umsetzung kann genutzt werden, um die Unsicherheiten in den CFD-Simulationsergebnissen bzw. den gekoppelten Rechnungen noch etwas weiter zu reduzieren:

- Das Modell poröser Medien könnte speziell für die Verhältnisse in den U-Rohren der Dampferzeuger bei laminarer und turbulenter Strömung weiterentwickelt werden.
- Die Gitterqualität könnte weiter verbessert sowie eine Untersuchung hinsichtlich der Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Gitterauflösung durchgeführt werden.
- Die Temperaturen in den unterschiedlichen Zonen des Sicherheitsbehälters könnten als gekoppelte Randbedingungen für die Außenseiten der Wände des Primärkreises berücksichtigt werden.

Abschließend ist festzustellen, dass die Ergebnisse dieses Vorhabens wiederum die für DWR-Anlagen in den bisherigen PSA der Stufe 2 gemachten Annahmen bestätigen, dass bei einem HD-Kernschmelzablauf auch unter Berücksichtigung der hier untersuchten Strömungsphänomene mit intakten Heizrohren bzw. bis zu einer maximalen Vorschädigung der Heizrohre von ca. 40 % mit großer Wahrscheinlichkeit im Verlauf eines HD-Unfallablaufes der heiße Strang bzw. die Volumenausgleichsleitung durch Kriechen versagen und es dadurch nicht zu einem induzierten Heizrohrversagen und damit auch nicht zu einer Radionuklidfreisetzung über einen Bypass zur Sekundärseite kommt.

Literaturverzeichnis

- /BAN 17/ Band, S., Bläsius, C., Scheuerer, M., Steinrötter, Th., Thermohydraulisches Verhalten und Komponentenverhalten eines DWR bei ausgewähltem Kernschmelzszenarium infolge Station Blackout (SBO), GRS-473, ISBN 978-3-946607-56-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2017.
- /HEJ 19/ Herb, J., Coupled OpenFOAM-ATHLET simulations of the primary circuit of a liquid sodium cooled reactor, 14th OpenFOAM Workshop, Duisburg, 2019.
- /LEM 22/ Lemmon, Eric W., Bell, Ian H., Huber, Marcia L., McLinden, Mark O., "Thermophysical Properties of Fluid Systems" in NIST Chemistry Web-Book, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <https://doi.org/10.18434/T4D303>, (abgerufen am 24. Mai 2022).
- /OFF 20/ The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM v8 User Guide, <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v8>, (abgerufen 25. Mai 2022).
- /PAL 20/ Palazzo, S., Pointner, W., Wenzel, S., Cuesta Morales, A., Perin, Y., Fortschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Durchführung und Bewertung von Störfallanalysen und der Verwendung von Analysesimulatoren, GRS-A-3991, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2020.
- /PAP 21/ Papukchiev, A., Herb, J., Yang, Z., CFD-Untersuchungen von multiphysikalischen Phänomenen im Rahmen der Sicherheitsbewertung bestehender Reaktoranlagen, GRS-657, ISBN 978-3-949088-48-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, 2021.
- /SAL 16/ Sancaktar, S.; M. Salay, M.; Iyengar, R.; Azarm, A.; Majumdar, S.: Consequential SGTR Analysis for Westinghouse and Combustion Engineering Plants with Thermally Treated Alloy 600 and 690 Steam Generator Tubes, NUREG–2195, Draft Report for Comment, May 2016.

/STF 19/ STF Solutions. Solving for your own Sutherland Coefficients using Python. <https://curiosityfluids.com/2019/04/24/solving-for-your-own-sutherland-coefficients-using-python/>, (abgerufen am 25. Mai 2022).

Abkürzungen

AC ²	Systemcode der GRS für Unfallanalysen; Kopplung von ATHLET-CD und COCOSYS
ACD-C	ATHLET-CD mit CONDRU Sicherheitsbehältermodell
ATHLET	Thermohydraulik-Programm der GRS
ATHLET-CD	In-vessel Unfallanalyseprogramm der GRS
BMU/BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CD	Core Degradation Plugin von ATHLET
CFD	Computational Fluid Dynamics
COCOSYS	C ontainment C ode S ystem der GRS
CONDRU	ATHLET-Plugin zur einfachen Modellierung eines Sicherheitsbehälters
DE	Dampferzeuger
DH	Druckhalter
DWR	Druckwasserreaktor
HD	Hochdruck
MELCOR	Integraler Unfallanalysecode von den Sandia National Laboratories
OpenFOAM	„Open Source“ CFD-Software
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RDB	Reaktordruckbehälter

SBO	Station Blackout
SCDAP/RELAP5	Thermohydraulik-Programmsystem zur Berechnung von Unfallabläufen in Leichtwasserreaktoren entwickelt vom Idaho National Engineering Laboratory
TDV	Time Dependent Volume
TFO	Thermo Fluid Objekt
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VAL	Volumenausgleichsleitung
W&T	Wissenschaft und Technik

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Nodalisierung des ATHLET-Eingabedatensatzes in der „Stand-alone“-Version mit ATHLET	7
Abb. 3.2	AC ² thermohydraulisches Modell der DWR-Referenzanlage	9
Abb. 3.3	Primärkreisdruck in den „Stand-alone“-Simulationen mit AC ² und ACD-C	11
Abb. 3.4	Temperatur in der Volumenausgleichsleitung in den „Stand-alone“-Simulationen ab dem Zeitpunkt der Brennstabhüllrohroxidation.....	12
Abb. 3.5	Darstellung der Bypässe im RDB-Bereich	14
Abb. 3.6	Quasi-dreidimensionales Nodalisierungskonzept	17
Abb. 3.7	Nodalisierung ATHLET-CD mit geschichteten heißen Strängen.....	18
Abb. 3.8	Vergleich der „ACD-C“-Simulationen („Stand-alone“-Versionen) bei geschlossenen DH-Ventilen anhand der Massenströme in den Strängen 1 und 2 (links geschichtete heiße Stränge, rechts einfache Modellierung der heißen Stränge).....	19
Abb. 3.9	Druckverlauf für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC ² , ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge.....	21
Abb. 3.10	Temperatur im Druckhalter für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC ² , ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge	21
Abb. 3.11	Temperaturverlauf für die „Stand-alone“-Simulationen mit AC ² , ACD-C mit einfacher Modellierung der heißen Stränge und ACD-C mit geschichteter Modellierung der heißen Stränge.....	22
Abb. 3.12	Vergleich des Strömungsverhaltens in den heißen Strängen bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen	24
Abb. 3.13	Strömungsbild im Primärkreislauf bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen	26
Abb. 3.14	Temperaturverteilung im Primärkreislauf bei geschlossenen und geöffneten DH-Ventilen.....	27
Abb. 3.15	Temperaturverteilung im Primärkreislauf bei geöffnetem DH-Ventil: geschichteten heißen Strang	28

Abb. 4.1	CFD-Rechengebiet	33
Abb. 4.2	Beispiel der Temperaturverteilung in Austrittskammer und Zwischentrennwand	34
Abb. 4.3	Einrichten der „Stand-alone“-OpenFOAM-Simulation	35
Abb. 4.4	Spezifikation der Darcy-Forchheimer Koeffizienten im U-Rohrbereich	39
Abb. 4.5	Berechnete Druckverteilung im DH-Kühlmittelstrang unter Nominalbetriebsbedingungen	42
Abb. 4.6	Spezifikation der Wärmesenke im U-Rohrbereich (u. a. Bereich des Rechengitters für den die Senke verwendet werden soll, Temperatur und Wärmeübergangskoeffizient auf die Sekundärseite, Geometrie der U-Rohre, Wärmeleitfähigkeit der U-Rohrwände)	45
Abb. 4.7	Für die Simulationen in OpenFOAM verwendete Materialdaten des Gasgemisches	47
Abb. 4.8	Vergleich der dynamischen Viskosität von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Sutherland- Modells berechnet.....	48
Abb. 4.9	Vergleich der Dichte von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng- Robinson-Modells berechnet	49
Abb. 4.10	Vergleich der spezifischen Wärmekapazität von Wasserdampf laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Janaf-Modells berechnet	49
Abb. 4.11	Vergleich der dynamischen Viskosität von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Sutherland- Modells berechnet.....	50
Abb. 4.12	Vergleich der Dichte von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng- Robinson-Modells berechnet	50
Abb. 4.13	Vergleich der spezifischen Wärmekapazität von Wasserstoff laut NIST /LEM 22/ und den Werten, wie sie OpenFOAM mit Hilfe des angepassten Peng-Robinson-Modells berechnet	51
Abb. 4.14	Simulationsergebnisse von CFX und OpenFOAM der „Stand-alone“- Berechnungen mit offenem Pumpenbogen.....	53
Abb. 4.15	Temperatur-Geschwindigkeitsverteilung bei geschlossenem Pumpenbogen	54

Abb. 4.16	Geschwindigkeitsverteilung im heißen Strang und DE-Kammern bei geschlossenem Pumpenbogen.....	55
Abb. 4.17	Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im heißen Strang und Eintritt in den U-Rohr-Bereich bei geschlossenem Pumpenbogen	55
Abb. 4.18	Rechengitter des oberen Plenums	56
Abb. 4.19	Schnittstellen OpenFOAM zu ATHLET-CD	58
Abb. 4.20	Implementierung der Kopplung zwischen einem OpenFOAM-Solver und dem AC ² -Modul ATHLET	60
Abb. 4.21	Kommunikation zwischen den verschiedenen Prozessen einer gekoppelten Rechnung OpenFOAM-AC ²	61
Abb. 4.22	Kommunikation zwischen den verschiedenen Prozessen einer gekoppelten Rechnung OpenFOAM-ACD-C	62
Abb. 4.23	Temperatur des Sicherheitsbehälters im Bereich des heißen Strangs mit DH in den „Stand-alone“-Simulationen mit AC ² und ACD-C (sowohl mit einfachen wie geschichteten heißen Strängen)	63
Abb. 4.24	Ablaufschema der Simulation mit einem gekoppelten OpenFOAM Solver	64
Abb. 5.1	Auswahl der Startzeitpunkte (vertikale, gestrichelte Linien) für die gekoppelten Analysen	66
Abb. 5.2	Temperaturfeld am Ende der „Stand-Alone“-Simulation mit OpenFOAM	68
Abb. 5.3	Schematische Darstellung der Kopplungsarchitektur und der Kopplungsschnittstellen (für die Simulation mit geschichteten heißen Strängen ist jeder heiße Strang links über drei Kopplungsschnittstellen mit dem jeweiligen RDB-Stutzen verbunden).....	69
Abb. 5.4	Druckverlauf der „Stand-alone“ und der gekoppelten Rechnung ATHLET-CD-CONDUR mit OpenFOAM mit einfach modellierten heißen Strängen (Linie: Von ATHLET berechnete Werte an der Kopplungsschnittstelle, Punkte: Von OpenFOAM berechnete Werte)	71
Abb. 5.5	Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers.....	72

Abb. 5.6	Temperatur (jeweils links) und vertikale Geschwindigkeit (jeweils rechts) im Rohrboden oberhalb der Eintrittskammer des Dampferzeugers zum Zeitpunkt des höchsten Temperaturwertes während der Simulation (oben) und nach Ende der Periode starker Temperaturschwankungen (unten)	73
Abb. 5.7	Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (in °C) im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers.....	74
Abb. 5.8	Position der Auswertungsebene für die Strömungsrichtung im heißen Strang.....	75
Abb. 5.9	Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt.....	76
Abb. 5.10	Strömungsverhalten und Temperaturen im Bereich der Sammler, des Rohrbodens und der U-Rohre	77
Abb. 5.11	Druckverlauf der „Stand-alone“-Version von ACD-C und der gekoppelten Rechnung ATHLET-CD-CONDUR mit OpenFOAM mit geschichteten heißen Strängen	78
Abb. 5.12	Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers.....	79
Abb. 5.13	Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (mit °C berechnet) im Bereich des Rohrbodens über dem Einlasssammler des Dampferzeugers.....	79
Abb. 5.14	Temperatur und Strömungsrichtungen im oberen Plenum, dem Stutzen zu einer RDB-Kopplungsschnittstelle (links) und dem heißen Strang, der von OpenFOAM simuliert wird (rechts)	80
Abb. 5.15	Massenstrom in einem von ATHLET-CD-CONDUR in der gekoppelten Rechnung simulierten heißen Strang	82
Abb. 5.16	Temperatur (links) und Massenstrom (rechts) in den unterschiedlichen Schichten eines von ATHLET-CD-CONDUR simulierten heißen Strangs	83
Abb. 5.17	Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt.....	84
Abb. 5.18	Druckverlauf der „Stand-alone“ und der gekoppelten Rechnung AC ² mit OpenFOAM mit einfach modellierten heißen Strängen.....	85
Abb. 5.19	Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers	86

Abb. 5.20	Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (berechnet mit den Temperaturwerten in °C) im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers	87
Abb. 5.21	Verhältnis der Fläche im Bereich des RDB-Stutzens, in dem die Strömung in Richtung Dampferzeuger bzw. in Richtung RDB strömt	88
Abb. 5.22	Minimal-, Maximal- und Durchschnittstemperatur im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers in der „Stand-Alone“-ATHLET-CD-CONDUR Simulation mit geschichteten heißen Strängen	90
Abb. 5.23	Verhältnis der Maximal- zur Durchschnittstemperatur (in °C) im Bereich des Rohrbodens über der Eintrittskammer des Dampferzeugers in der „Stand-Alone“-ATHLET-CD-CONDUR Simulation mit geschichteten heißen Strängen	91

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Geometrische Parameter für die Aufteilung des heißen Stranges	16
Tab. 4.1	Anfangs- und Randbedingungen für die Simulation des stationären Zustands unter Normalbetriebsbedingungen	40
Tab. 4.2	Modellierung der Stoffwerte	46
Tab. 5.1	Startzeitpunkte der gekoppelten Simulationen (Zeit ist die gesamte Simulationszeit; für die transiente Zeit ab Ereigniseintritt müssen die 5.000 s der stationären Anfangsrechnung abgezogen werden).....	67
Tab. 5.2	Rechenzeit bzw. -aufwand der Simulationen	92

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-949088-89-8