

## **SIMULATION DER OSU-MASLWR VERSUCHSANLAGE MIT DEM SYSTEMCODE AC<sup>2</sup>**

**Julia Krieger**

Plant Simulation and Safety (PSS); Ruhr-Universität Bochum (RUB)  
Universitätsstraße 150; 44801 Bochum  
krieger@pss.rub.de (ORCID-ID: 0000-0002-6843-0918)

**Christoph Bratfisch und Marco K. Koch**

Plant Simulation and Safety (PSS), Ruhr-Universität Bochum (RUB)  
Universitätsstraße 150; 44801 Bochum  
bratfisch@pss.rub.de (0000-0003-4016-079X), koch@pss.rub.de (0000-0001-7260-5250)

### **ABSTRACT**

Im Rahmen eines nationalen Forschungsprojektes wird der von der GRS gGmbH entwickelte Systemcode AC<sup>2</sup>-ATHLET (Analysis of Thermal-hydraulics of Leaks and Transients) für die Simulation innovativer Reaktorkonzepte weiterentwickelt und validiert. Zur Bewertung der Anwendbarkeit von AC<sup>2</sup>-ATHLET für die Simulation von SMR wird die Experimentanlage OSU-MASLWR (Oregon State University- Multi Application Small Light Water Reactor) simuliert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Der Fokus liegt hierbei auf dem durch Naturkonvektion getriebenen Primärkreislauf sowie dem Wärmeübergang im helikalen Rohrbündelwärmeübertrager. Als Basis für die Datensatzmodellierung dienen die aktuell verfügbaren Daten des ICSP 3 (International Collaborative Standard Problem) Tests. Die Ergebnisse zeigen, dass AC<sup>2</sup>-ATHLET den Naturumlauf in guter Übereinstimmung abbilden kann, jedoch Abweichung des Temperatur- und Massenstromverlaufs auftreten. Durch Erhöhung des Wärmeübergangs werden sekundärseitig qualitative sowie quantitative Verbesserungen erzielt.

### **EINLEITUNG**

Small Modular Reactors (SMR) werden anhand ihrer elektrischen Leistung, die bis zu 300 MW betragen kann, charakterisiert. Aufgrund der zahlreichen Vorteile von SMR, insbesondere in Bezug auf die Sicherheit, wird die Forschung auf dem Gebiet der SMR zunehmend gefördert, wodurch zum jetzigen Zeitpunkt bereits mehr als 70 SMR-Designs für unterschiedliche Anwendungen entwickelt werden. Einige Konzepte befinden sich bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungs- bzw. Lizenzierungsstadium. Insbesondere integrale Druckwasserreaktoren, wie z.B. der NuScale Power, LLC. SMR, zählen zu den in der Entwicklung weit fortgeschrittenen SMR-Konzepten aufgrund der bereits fundierten und langjährigen Erfahrungen mit Druckwasserreaktoren. [1] Aufgrund der vielfältigen und voranschreitenden Entwicklungen ergibt sich die Notwendigkeit Systemcodes für die Simulation von SMR zu ertüchtigen. Aus diesem Grund wird eine generische Betrachtung am Beispiel der OSU-MASLWR (Oregon State University-Multi Application Small Light Water Reactor) Testanlage durchgeführt.

### **EXPERIMENT**

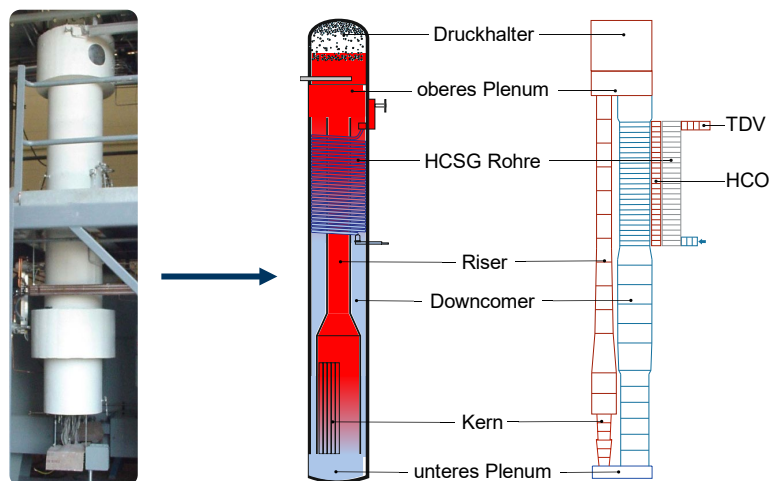
Das Konzept des MASLWR wurde vom Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, der Oregon State University und NEXANT-Bechtel entwickelt. Eine skalierte Testanlage mit einer maximalen Kernleistung von 398 kW wurde an der OSU errichtet und zur Untersuchung bei Leistungsbetrieb sowie unter transienten Bedingungen genutzt. Das Anlagenkonzept zählt zu den integralen Druckwasserreaktoren, das sich beispielsweise durch den im Reaktordruckbehälter (RDB) installierten helikalen Rohrbündelwärmeübertrager (Helically Coiled Steam Generator; HCSG) auszeichnet. [2]

Der Primärkreislauf im RDB wird durch Dichteunterschiede und den Höhenunterschied von Wärmequelle sowie -senke passiv betrieben. Das Kühlmittel steigt aufgrund der Erwärmung im Kern auf und umströmt im Downcomer die Rohre des helikalen Wärmeübertragers, wodurch Wärme von der Primär- an die Sekundärseite übertragen wird. Das Speisewasser wird durch die Erwärmung des auf der Außenseite strömenden Kühlmittels vollständig verdampft. [2] Die Besonderheit liegt hier in der Geometrie des Wärmeübertragers, da das darin strömende Speisewasser aufgrund der gewundenen Form Zentrifugalkräften unterliegt. Diese erzeugen aufgrund von Druckgradienten über den Rohrquerschnitt eine Sekundärströmung, die durch zwei gegenläufig verlaufende Wirbel charakterisiert wird. Dieser Effekt verbessert die Durchmischung und somit die Wärmeübertragung, wodurch eine kompaktere Auslegung des Wärmeübertragers ermöglicht wird. [3]

Der ICSP 3 Test der IAEA (International Atomic Energy Agency) diente der Untersuchung des sich ausbildenden Naturumlauf im Primärsystem bei steigender Leistung. Der Versuchszeitraum betrug 6000 s. Durch die Leistungszufuhr im Primärkreis und der übertragenen Wärme an die Sekundärseite wurde zunächst überhitzter Dampf am Austritt des HCSG erreicht. Ab ca. 4500 s wurde der Speisewassermassenstrom erhöht, um gesättigten Dampf am Austritt einzustellen. Dies führte dazu, dass zwischen 4500 s und 5500 s mehr Leistung abgeführt wurde als im Primärkreis eingebracht wurde. Als Konsequenz wurde ebenfalls eine Abkühlung auf der Primärseite beobachtet. Diese Kühlmittelabkühlung führte zu einer Druckabsenkung und einer Reduktion des gesamten RDB Inventarvolumens, woraufhin zwischen 4900 s bis 5400 s eine Kühlmittleinspeisung in das untere Plenum durchgeführt wurde. [2]

### AC<sup>2</sup>-Modellierung

Als Basis für die Datensatzmodellierung werden die Daten des ICSP 3 Tests zugrunde gelegt. Für die Simulationen wird der RDB sowie der helikale Wärmeübertrager modelliert. Primär- und Sekundärseite werden über Wärmeleitobjekte (HCO) miteinander gekoppelt. Die Experimentanlage sowie eine schematische Darstellung dieser können der Abbildung 1 (linke Seite und Mitte) entnommen werden. Darüber hinaus wird die schematische Nodalisierung in ATHLET gezeigt (rechte Seite).

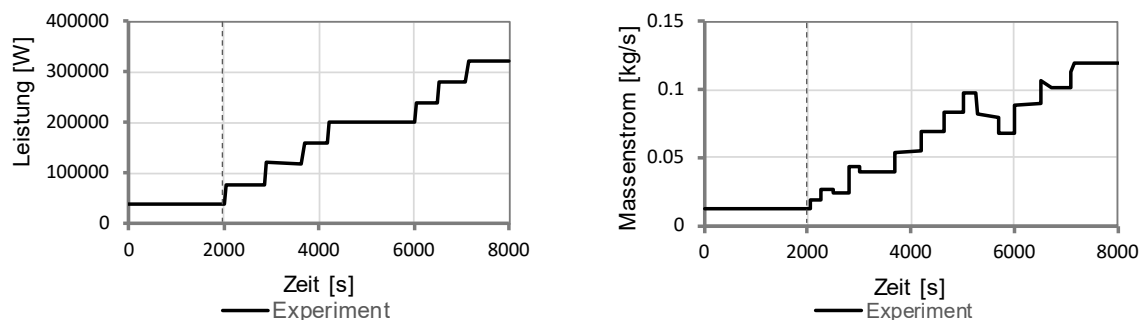


**Abbildung 1:** OSU-MASLWR Experimentanlage [2] und zugehörige ATHLET Modellierung

Es wurden im Vorfeld Simulationen mit zwei verschiedenen Längen zu Durchmesser-Verhältnissen im HCSG sowie des gekoppelten Downcomerbereichs durchgeführt, um den Einfluss der Nodegröße zu analysieren. Zum einen wurde ein Verhältnis von Sechs eingestellt, wodurch sich 80 Nodes ergeben. Zum anderen wurde das Verhältnis von Eins (480 Nodes) untersucht [4]. In diesem Zusammenhang konnte festgestellt werden, dass ein Verhältnis von Eins verbesserte Ergebnisse bezüglich des hochtransienten Verdampfungsprozesses erzielt. Aufgrund dessen wurden die Simulationen mit einer Anzahl von 480 Nodes über die Rohrlänge durchgeführt. Um eine geeignete Rohrkonfiguration für die Analysen der helikalen Rohre zu ermitteln, wurde ein gerades, vertikales sowie ein schräges Rohr modelliert und Simulationen durchgeführt. Anhand der Analysen wurde ersichtlich, dass die Simulationsergebnisse der geraden Rohrkonfiguration näher am Experiment liegen. Grund hierfür ist

Nutzung des *Mixture Level Modells*, das eine genauere Auflösung beider Phasen sowie der Gemischspiegeloberfläche ermöglicht. Das Modell kann jedoch nur für vertikale Rohre bzw. Rohre mit einer Steigung von  $\sin(\alpha) > 0,2$ , mit dem Steigungswinkel  $\alpha$ , angewendet werden. Da sich für den vorliegenden Fall  $\sin(\alpha) = 0,187$  ergibt, wird hier ein vertikales Rohr modelliert. [5] Zur Einstellung einer konstanten Strömung wird eine Speisewassereinspeisung am Rohreintritt sowie ein Time-Dependent-Volume (TDV) am Austritt, das als Druck- und Enthalpierandbedingung dient, eingefügt. Die Leistung im Kern wird durch ein *Heatadd* Signal, das eine zeitabhängige Leistungszufuhr ermöglicht, realisiert. Darüber hinaus werden zwei weitere Wärmeleitobjekte modelliert, die den Wärmeübergang zwischen Riser und Downcomer sowie zwischen Downcomer und der Umgebung berücksichtigen.

Zur Einstellung der Anfangsbedingungen wird der initiale Massenstrom im Primärkreislauf mit 0,68 kg/s definiert. Der Kühlmittelmassenstrom stellt sich über den Experimentverlauf basierend auf der zugeführten Leistung ein. Die Leistung im Kern wird von 40 kW auf 320 kW schrittweise um je 40 kW erhöht (siehe Abbildung 2 linke Seite). Zu Beginn wird eine Kerneintrittstemperatur von 250,3 °C sowie eine Kernaustrittstemperatur von 262,8 °C vom Experiment vorgegeben. Aufgrund der initialen Erwärmung der Sekundärseite werden zur adäquaten Einstellung des stationären Zustands die Temperaturen um 10 °C erhöht. Der Druck wird durch das im Druckhalter installierte Heizelement bei 87,18 bar gehalten. Der Sekundärseite wird ein zeitlich variierender Speisewassermassenstrom mithilfe einer hinterlegten Tabelle im Datensatz aufgeprägt, der insgesamt 14 Rohre mit einem Durchmesser von 0,0126 m und einer durchschnittlichen Länge von 6,14 m durchströmt (siehe Abbildung 2 rechte Seite). Am Austritt des HCSG wird initial (bei 40 kW Leistung) eine Dampftemperatur von 256,4 °C im Experiment erreicht. Der Druck wird am Austritt auf 14,46 bar eingestellt. [2] Der Datensatz umfasst die gesamte Experimentdauer sowie eine Vorkalkulationsphase von 2000 s, um zu Beginn einen stationären Zustand einzustellen. [2]



3

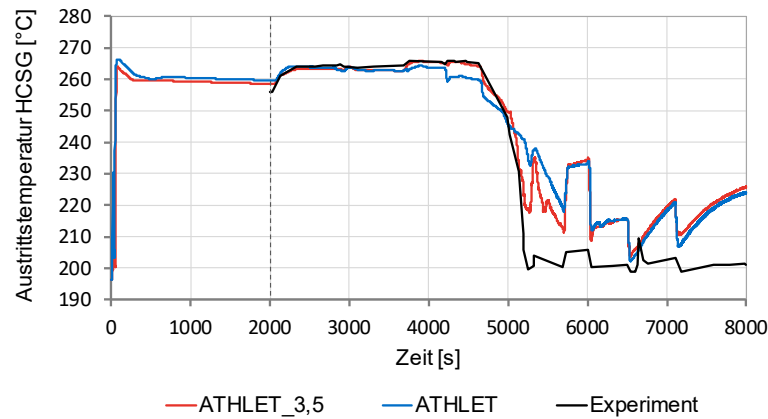
**Abbildung 2:** Zugeführte Leistung im Kern und Massenstrom im Primärkreis [2]

## ERSTE SIMULATIONSERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ATHLET-Simulationen im Vergleich zu den Experimentdaten präsentiert. Die mit ATHLET durchgeführten Simulationen bestehen zum einen aus der originalen Modellbasis (ATHLET) und zum anderen aus einer angepassten, internen Arbeitsversion des Quellcodes (ATHLET\_modi). Zunächst wurden Korrelationen speziell für helikale Wärmeübertrager in den Quellcode implementiert und analysiert. Diese zeigen bisher jedoch keine Verbesserungen. Aus diesem Grund werden weitere Analysen sowie Simulationen durchgeführt und der Quellcode dahingehend angepasst, dass die bestehenden Korrelationen beibehalten werden, aber um den Faktor 3,5 erweitert werden. Explizit werden die Wärmeübergänge einphasiger Fluide, die Wärme aufnehmen und abgeben sowie zweiphasiger Fluiden, die Wärme aufnehmen angepasst. Hierdurch wird die Erhöhung des Wärmeübergangs auf der Innen- und Außenseite des helikalen Wärmeübertragers erzielt. Da die Wärmeübergänge für das gesamte System angepasst werden und die separate Implementierung noch weiterer Entwicklung bedarf, ergibt sich ebenfalls ein Einfluss auf die weiteren Wärmeleitobjekte.

Die Temperaturen am Austritt des HCSG sind in Abbildung 3 dargestellt. ATHLET ist in der Lage die Dampfaustrittstemperaturen in guter Übereinstimmung mit dem Experiment zu berechnen. Der stationäre Zustand in der Vorkalkulationsphase wird jedoch überschätzt mit einer Temperaturdifferenz von 3 °C (ATHLET\_modi) bzw. 4 °C (ATHLET). Der Temperaturabfall sowie der Temperaturgradient

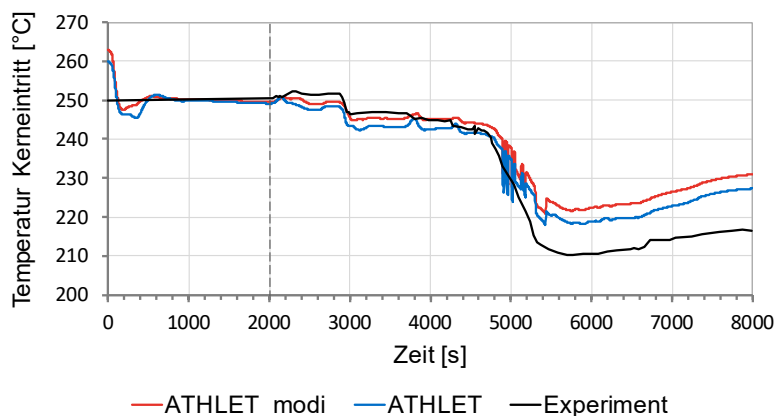
(ab ca. 4600 s), der aus der Erhöhung des Massenstroms folgt, wird mit ATHLET nicht adäquat abgebildet. Mit Erhöhung des Wärmeübergangs um den Faktor 3,5 lässt sich jedoch eine wesentliche Annäherung an das Experiment erzielen, indem der Temperaturabfall verzögert berechnet wird. Darüber hinaus wird der darauffolgende Temperaturgradient in guter Übereinstimmung abgebildet.



**Abbildung 3:** Temperaturen am Austritt des helikalen Wärmeübertragers

Die Temperaturen ab 5200 s werden jedoch ebenfalls überschätzt berechnet. Es ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung um ca. 10 %. Der Temperaturverlauf des Experiments sowie der Simulation zeigt eine direkte Abhängigkeit des Speisewassermassenstroms. Dieser Einfluss wird in den Simulationen jedoch verstärkt wiedergegeben, wodurch quantitativ größere Abweichungen zu erkennen sind.

Die Ergebnisse der Temperaturen am Kerneintritt können der Abbildung 4 entnommen werden. Zu Beginn ist in den Simulationen ein Einschwingvorgang des Naturumlaufs zu erkennen, der auf die initiale Erwärmung der Sekundärseite zurückzuführen ist. Da für die ATHLET\_modi Simulation der Wärmeübergang des gesamten Systems angepasst wird, wird hier zu Einstellung des stationären Zustandes eine Erhöhung der Kerneintritts- sowie- Kernaustrittstemperaturen um insgesamt 13 °C durchgeführt.



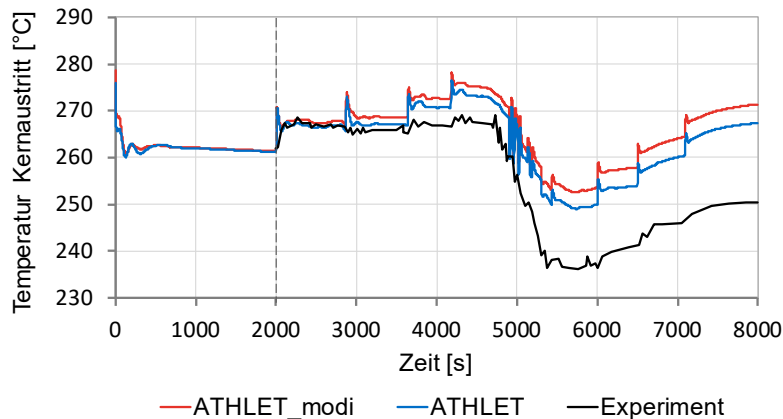
**Abbildung 4:** Temperaturen am Kerneintritt

Im weiteren Verlauf lässt sich erkennen, dass die Temperatur nach 1000 s mit dem Experiment in guter Übereinstimmung berechnet wird. Der qualitative Verlauf kann mit beiden Simulationen gut abgebildet werden. Der Temperaturabfall ab 4650 s aufgrund der Erhöhung des Speisewassermassenstroms bei gleichbleibender Leistung sowie der Zufuhr von weiterem Kühlmittel wird hingegen quantitativ nicht exakt wiedergegeben. Begründet werden kann dies durch Unsicherheiten der Randbedingungen, wie z.B. der zusätzlichen Kühlmittelspeisung sowie in Bezug auf die Wärmeverluste des RDB.

Im direkten Vergleich beider Simulationen wird ersichtlich, dass die Ergebnisse der ATHLET\_modi

Simulation leicht erhöhte Temperaturen erreichen, die über den Experimentverlauf ansteigen. Ursächlich hierfür ist eine erhöhte Wärmeübertragung von Riser zu Downcomer, wodurch mehr Wärme im Primärsystem verbleibt. Erkennbar wird dies anhand der Differenz des übertragenen Wärmestroms beider Simulationen (ATHLET\_modi – ATHLET), die am Riser-Eintritt über die Experimentdauer von zu Beginn ca. 100 W auf über 300 W zum Experimentende ansteigt.

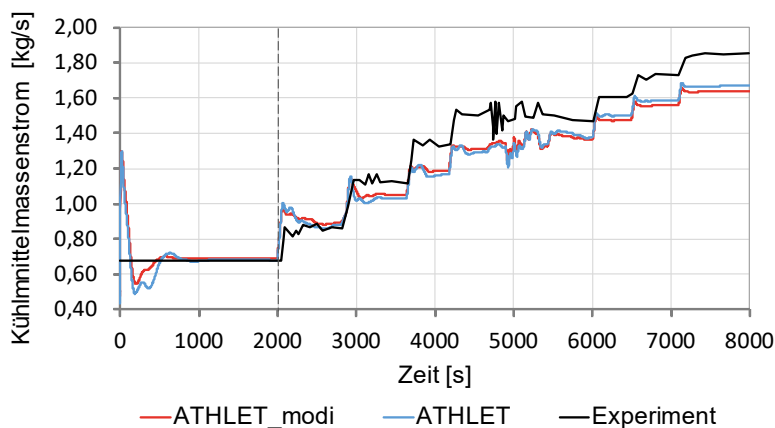
In Abbildung 5 sind die Temperaturen am Kernaustritt dargestellt. Wie bereits zuvor zeigt sich eine qualitativ gute Abbildung des Verlaufs.



**Abbildung 5:** Temperaturen am Kernaustritt

Die Temperaturerhöhungen zwischen 3700 s und 4700 s werden in den Simulationen überschätzt und es stellt sich eine Temperaturdifferenz zum Experiment von ca. 5 °C ein. Dies ist auf die ab 3700 s immer stärker unterschätzten Massenströme zurückzuführen. Da der Massenstrom direkt abhängig von der Leistung ist, zeigt sich ein größerer Einfluss auf die Kernaustemperatur im Gegensatz zur Kerneintrittstemperatur. Der Gradient des anschließenden Temperaturabfalls wird ebenfalls unterschätzt, wodurch ein flacherer Verlauf zu beobachten ist. Daraufhin ergibt sich eine Differenz zum Experiment bei 5500 s von 13 °C, die bis zum Experimentende ansteigt. Weiterhin zeigen sich auch hier die erhöhten Temperaturen der ATHLET\_modi Simulation im Vergleich zu ATHLET.

Nachfolgend werden in Abbildung 6 die Kühlmittelmassenströme im Primärkreis dargestellt. Da die Reibungskoeffizienten aus dem Experiment nicht bekannt sind, wird für die Simulationen eine Parametervariation durchgeführt, um die Anfangsbedingungen adäquat abbilden zu können. Somit zeigt sich initial eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulationen. Die Massenströme stellen sich basierend auf der Leistung im Kern ein, wodurch der Verlauf der eingestellten Leistung folgt.



**Abbildung 6:** Kühlmittelmassenstrom im Primärkreislauf

Nach der Vorkalkulationsphase zeigt sich zunächst eine gute Abbildung des Massenstroms in den Simulationen. Ab 3000 s wird er hingegen bis zum Ende des Experiments immer stärker unterschätzt,

wodurch eine Abweichung am Experimentende von ca. 0,2 kg/s auftritt. Dieser Verlauf kann auf eine über den Experimentverlauf zu hohe Berechnung der Reibungskoeffizienten im Primärkreis zurückzuführen sein, da insbesondere die Reibung im Kern den Massenstrom beeinflusst.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Fokus der Analysen liegt auf dem sich ausbildenden Naturumlauf sowie der Wärmeabfuhr über den helikalen Wärmeübertrager. Hierfür wird ein Datensatz entsprechend der OSU-MASLWR Versuchsanlage modelliert und mit AC<sup>2</sup>-ATHLET simuliert. Die Analysen haben gezeigt, dass ein Längen zu Durchmesser Verhältnis der Nodes von Eins sowie eine gerade Rohrkonfiguration in Verbindung mit dem Mixture Level Modell zur Modellierung eines HCSG empfohlen werden können. Darüber hinaus kann anhand der Ergebnisse sowie weiterer Analysen darauf geschlossen werden, dass durch eine modifizierte Berechnung des Reibungskoeffizienten sowie Kenntnis der Wärmeverluste die Belastbarkeit der Simulation erhöht werden kann, woraus eine weitere Annäherung der Ergebnisse an das Experiment resultiert. Im Allgemeinen zeigt sich bereits eine qualitativ gute Abbildung der Primär- sowie Sekundärseite der originalen ATHLET Simulation. Insbesondere durch die Erhöhung des Wärmeübergangs der Innen- und Außenseite des HCSG können die sekundärseitigen Temperaturen in guter Übereinstimmung mit dem Experiment berechnet werden. In diesem Zusammenhang wird speziell der Temperaturgradient von überhitztem zu gesättigtem Dampf adäquat abgebildet, da dieser verzögert und steiler berechnet wird. Im weiteren Verlauf zeigen sich jedoch Abweichungen, die eine erhöhte Sensitivität in Bezug auf den Massenstrom erkennen lassen. Aufgrund des globalen Einflusses der Wärmeübertragung auf die Wärmeleitstrukturen im Primärsystem, werden fortführende Untersuchungen einer auf den HCSG begrenzenden Implementierung durchgeführt. Weitere Analysen werden ebenfalls bezüglich einer generischen Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für helikale Wärmeübertrager durchgeführt.

## DANKSAGUNG

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Arbeit wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 1501607B aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Projektpartner des Konsortiums sind die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, das Institut für Kerntechnik und Energiesysteme (IKE) der Universität Stuttgart und die Plant Simulation and Safety Group (PSS) der Ruhr-Universität Bochum.

Die Ergebnisse wurden unter Verwendung des GRS DV-Programms AC<sup>2</sup>-2021.0 erzielt.

## QUELLEN

- [1] International Atomic Energy Agency; „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments“; [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf) (2020); Zugriff: 31.03.2021
- [2] International Atomic Energy Agency; „Evaluation of Advanced Thermohydraulic System Codes for Design and Safety Analysis of Integral Type Reactors“; IAEA-TECDOC-1733 (2014)
- [3] Dravid, A.N.; Smith, K.A.; Merrill, E.W.; Brian, P.L.T.; „Effect of Secondary Fluid Motion on Laminar Flow Heat transfer in Helically Coiled Tubes“, AIChE Journal, 17 (5), S. 1114-1122 (1971)
- [4] Bratfisch, C.; Bratfisch, C.; Frist, F.; Peschel, J.M.; Koch, M.K.; „Externe Validierung und Analyse ausgewählter Modelle der Störfallanalysecodes ASTEC, ATHLET und ATHLET-CD (EVA3A)“; PSS-TR-10 (2019)
- [5] Austregesilo, H.; Lee, J.; Schöffel, P.; Skorek, T.; Von der Cron, D.; Weyermann, F.; Wing Wong, K.; „ATHLET 3.3, Models and Methods“; Vol. 4 Rev. 6; (2021)