

ANALYSE DER AC² MODELLBASIS HINSICHTLICH DER SPALT- PRODUKTFREISETZUNG ANHAND VON PHÉBUS EXPERIMENTEN

Florian Krist

Plant Simulation and Safety (PSS), Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
krist@pss.rub.de (ORCID-ID: 0000-0002-4089-5801)

Christoph Bratfisch, Marco K. Koch

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

KURZFASSUNG

Zur Analyse und Validierung der im Störfallanalysecode AC² – ATHLET-CD implementierten Modellbasis werden in dieser Arbeit Simulationen der Versuche Phébus FPT1 und FPT3 vorgestellt und diskutiert. Hierbei wird das Freisetzungsverhalten relevanter Spaltprodukte, das mithilfe verschiedener Berechnungsansätze simuliert wird, in einer vergleichenden Analyse untersucht. In Abhängigkeit des jeweiligen Modells wird die Freisetzung mit dem CORSOR-O-Ansatz auf der Basis der Arrhenius-Gleichung oder als Funktion des Partialdrucks berechnet. Die Analyse zeigt, dass für beide Experimente eine adäquate Abbildung des Freisetzungsverhaltens flüchtiger Spaltprodukte erreicht wird. Der Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen Modelle zeigt, dass das experimentelle Freisetzungsverhalten leichtflüchtiger Spaltprodukte mithilfe des Partialdruck-Ansatzes qualitativ und überwiegend auch quantitativ mit höherer Übereinstimmung wiedergegeben werden kann. Demgegenüber besteht weniger Zuverlässigkeit bei der Vorhersage schwachflüchtiger Spaltprodukte.

EINLEITUNG

Zur Bewertung eines postulierten Reaktorunfalls und für die Sicherheitsanalyse ist eine möglichst genaue Kenntnis der in das Kühlwasser freigesetzten Spaltproduktmassen erforderlich. Die Vorhersage des Spaltproduktverhaltens kann durch die Anwendung von Störfallanalysecodes erfolgen. Der Code ATHLET-CD des von der GRS entwickelten Programmpakets AC² ermöglicht die Simulation aller relevanten Vorgänge und Zustände im Rahmen auslegungsüberschreitender Störfälle in Leichtwasserreaktoren. Die erforderliche fortdauernde Validierung der Modellbasis kann anhand von Simulationen geeigneter Experimente erfolgen. In den durch das IRSN durchgeführten Integralversuchen der Phébus-Versuchsreihe wurde das Spaltproduktverhalten während eines postulierten Kühlmittelverluststörfalles detailliert erfasst, sodass sich die daraus gewonnenen Ergebnisse insbesondere für Validierungsrechnungen eignen.

In dieser Arbeit wird die AC² Modellbasis bezüglich der verfügbaren Möglichkeiten zur Abbildung der Spaltproduktfreisetzung analysiert und anhand der Nachrechnung der 1996 bzw. 2004 durchgeführten Versuche Phébus FPT1 und FPT3 mit AC² 2021.0 validiert. Die experimentellen Randbedingungen werden im folgenden Abschnitt zusammenfassend dargestellt. Zur Simulation der Spaltproduktfreisetzung werden verschiedene in ATHLET-CD implementierte Freisetzungsmodelle angewendet. In Abhängigkeit des jeweiligen Modells wird die Freisetzung mithilfe des auf der Arrhenius-Gleichung basierenden Ansatzes CORSOR-O oder als Funktion des Partialdrucks des jeweiligen Spaltprodukts berechnet. Im Rahmen der Analyse der Modellbasis wird ein Überblick über die Modellierung der Experimente gegeben sowie detailliert die Modellierung der Spaltproduktfreisetzung untersucht, um die wesentlichen Eigenschaften der zwei Berechnungsansätze herauszuarbeiten. Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt in einer vergleichenden Analyse in Gegenüberstellung zu den experimentellen Messdaten. In der abschließenden Zusammenfassung wird ein Fazit der wichtigsten Ergebnisse gezogen.

PHEBUS VERSUCHSANLAGE UND VERSUCHSABLAUF

Die Phébus Versuchsanlage beinhaltet alle erforderlichen Anlagenkomponenten zur Abbildung eines Kühlmittelverluststörfalls in einem 900 MW_{el} Druckwasserreaktor aufgrund des Bruchs einer Hauptkühlmittelleitung im kalten Strang des Primärkreislaufs im Maßstab 1:5.000. Diese umfassen das Brennstabbündel, die Kühlmittelleitung, den Dampferzeugsimulator sowie das Containment. Durch einen Treiberkern wird das wärmeisolierte Testbündel nuklear beheizt und die Störfallsequenz kontrolliert eingeleitet. Das Testbündel ist im Zentrum des Treiberkerns angeordnet. Um die durch die Leckage eingetretene Druckentlastung nachzubilden, wird Dampf mit einem Systemdruck von 2 bar und 438 K (165 °C) in das Testbündel eingespeist. Nach dem Durchströmen des Testbündels gelangt der aufgeheizte Dampf in die Kühlmittelleitung und anschließend in das Containment. [1], [2]

Die im Rahmen dieser Arbeit simulierten Versuche FPT1 und FPT3 unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Einsatz unterschiedlicher Absorberstabmaterialien (FPT1: AIC, FPT3: B₄C) sowie unterschiedliche Atmosphärenbedingungen. In FPT1 wird über den Dampfmassenstrom eine oxidierende Atmosphäre eingestellt, während dieser in Versuch FPT3 stärker begrenzt wird, so dass sich nur eine geringe Oxidation einstellen kann. Abbildung 1 zeigt die Bündelleistung sowie den eingespeisten Dampfmassenstrom während der verschiedenen Phasen der Experimente. Im Anschluss an die Kalibrierung des Testbündels, wird der Dampfmassenstrom in Experiment FPT1 im Verlauf der Voroxidationsphase auf ca. 2,2 g/s erhöht, wohingegen dieser bei FPT3 während des gesamten Versuchsablaufs bei ca. 0,5 g/s gehalten wird. Dies führt insbesondere bei FPT1 aufgrund der exothermen Zirkonium-Oxidationsreaktion im Verlauf der Oxidationsphase zu Temperatureskalationen und einer schnellen Aufheizung des Bündels. Größere Verlagerungen von zerstörtem Material treten in der anschließenden Aufheizphase auf, während die Leistung des Bündels nochmals erhöht wird. Mit der finalen Abkühlungsphase wird der Treiberkern abgeschaltet und das Versuchs Bündel gekühlt. [1], [3]

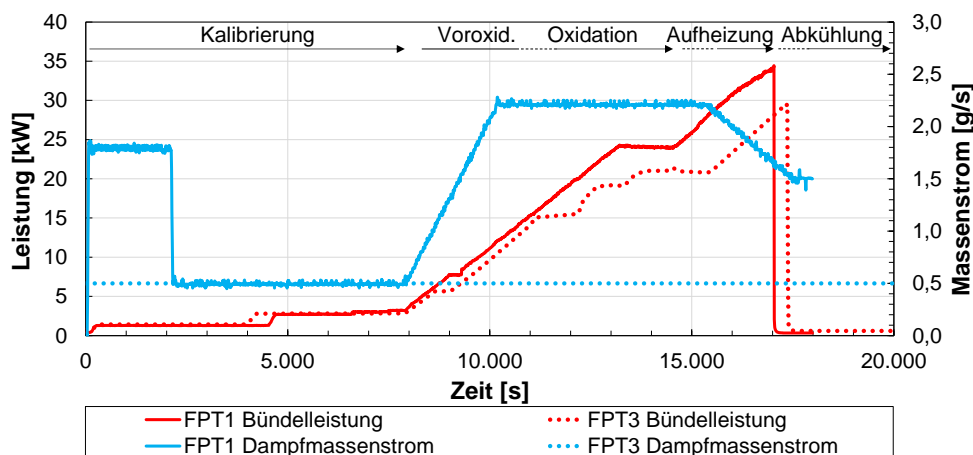


Abbildung 1 Bündelleistung und Dampfmassenstrom in Phébus FPT1 und FPT3

ANALYSE DER MODELLBASIS

Die Modellierung und die Simulation der Experimente Phébus FPT1 und FPT3 werden mit den Programmteilen ATHLET und ATHLET-CD von AC² 2021.0 durchgeführt. Die Modellierung der Experimente bildet die Anlagenkomponenten der Versuchsanlage ab, deren detaillierte Informationen den Berichten zu den Experimenten [1], [3] entnommen sind. Da der Versuchsaufbau in beiden Experimenten nur marginale Unterschiede aufweist, kann jeweils eine ähnliche Modellierung verwendet werden. Die jeweiligen Randbedingungen wie die eingebrachte Leistung und der Dampfmassenstrom sowie die Materialdaten für den jeweils verwendeten AIC- bzw. B₄C-Absorberstab sind im Datensatz entsprechend berücksichtigt. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die gewählte Modellierung der Versuchsanlage. Der Hauptströmungspfad wird durch die Thermohydraulik-Objekte (TFO) BUNDLE1 und BUNDLE2 abgebildet, welche jeweils mit einer der beiden Brennstabzonen, ROD1 bzw. ROD2, gekoppelt sind. ROD1 umfasst die acht inneren und ROD2 die zwölf äußeren Brennstäbe des Bündels. Die innere Kernsektion

enthält darüber hinaus den AIC- bzw. B₄C Absorberstab. Die jeweiligen axialen Kontrollvolumina der benachbarten TFOs BUNDLE1 und BUNDLE2 sowie BUNDLE2 und BYPASS sind miteinander verbunden, sodass eine Umströmung einer möglichen Blockade ermöglicht wird. Die Abstandshalter (STIFFENER) sowie die den Hauptströmungspfad umfassende Struktur (SHROUD) sind als wärmeleitende Objekte modelliert. Oxidationsprozesse werden durch ein auf Korrelationen von Leistikow - Prater/Courtright basierendem Modell abgebildet (vgl. [4]). Nach Durchströmen des Testbündels wird die Strömung über den Kühlkreislauf, abgebildet durch die TFOs Plenum, heißer sowie kalter Strang und Dampferzeuger, in das Containment geleitet, welches als Druck-Enthalpie-Randbedingung modelliert ist.

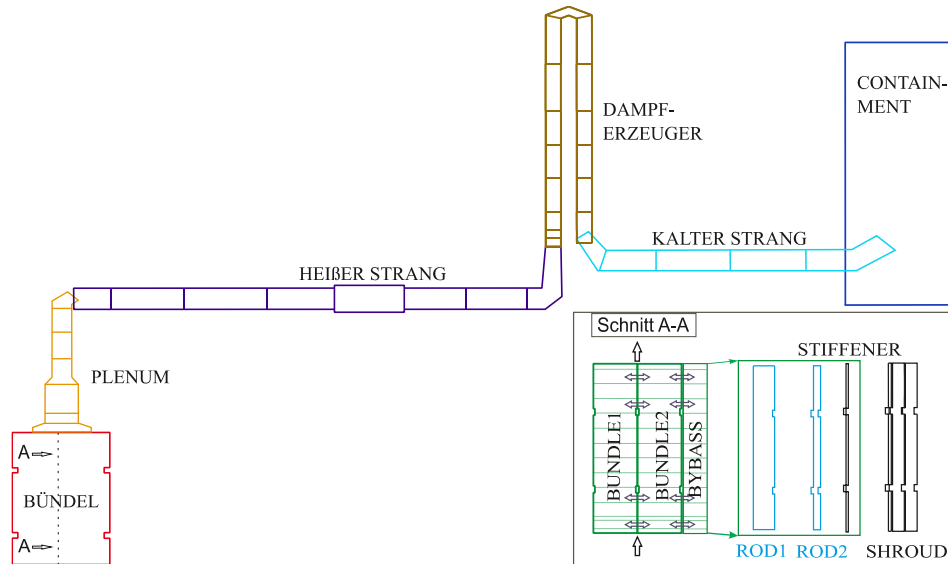


Abbildung 2 Modellierung der Phébus-Versuchsanlage mit AC²

Für die Simulation der Spaltproduktfreisetzung werden in ATHLET-CD empirische Modelle genutzt, die durch die getroffenen Annahmen und Idealisierungen im Vergleich zu mechanistischen Modellen grundsätzlich eine kompaktere Modellbasis aufweisen und weniger rechenzeitintensiv sind (vgl. [5]). Die in ATHLET-CD verfügbaren Freisetzungsmodele basieren auf einem Ratenansatz, bei dem ein exponentieller Verlauf der Spaltproduktfreisetzung angenommen wird. Entsprechend nimmt die im Brennstoff verbleibende Spaltproduktmasse über die Zeit exponentiell ab. Die zugehörige zeitabhängige Differentialgleichung für die verbleibende Masse m_x einer Komponente x wird gemäß Gl. 1 dargestellt [6]:

$$\frac{dm_x(t)}{dt} = -k_x m_x(t). \quad \text{Gl. 1}$$

k_x ist ein Maß für die freigesetzte Masse pro Zeit und wird als Freisetzungskoeffizient bezeichnet. Mit der Anfangsmasse $m_{x,0}$ der Komponente x zum Zeitpunkt $t = 0$ ergibt sich für die Freisetzung [5]:

$$f_x(t) = 1 - \frac{m_x(t)}{m_{x,0}} = 1 - e^{-k_x t}. \quad \text{Gl. 2}$$

Die Freisetzung wird durch die Reduzierung des Anfangsinventars beschrieben, wobei das Zeitintervall t in ATHLET-CD dynamisch berechnet wird. Die Berechnung des Freisetzungskoeffizienten k_x erfolgt über eine idealisierte empirische Funktion in Abhängigkeit der Temperatur. Je nach Freisetzungsmodele werden verschiedene Ansätze genutzt.

Mit dem CORSOR-O Ansatz wird die Spaltproduktfreisetzung einer Komponente x auf Basis des Freisetzungskoeffizienten von Krypton $k_{Kr}(T)$ und einem elementspezifischen Vorfaktor b_x berechnet. $k_{Kr}(T)$ wird nach dem auf der Arrhenius Gleichung basierenden CORSOR-M Modell unter Einbeziehung der Aktivierungsenergie $Q_{Kr} = 55 \text{ kcal/mol}$, dem elementspezifischen Grundwert des Freisetzungskoeffizienten für Krypton $k_{Kr,0} = 200 \text{ s}^{-1}$ und der allgemeinen Gaskonstante R in Abhängigkeit der Temperatur T berechnet (vgl. [7]). Entsprechend des CORSOR-O Ansatzes ergibt sich der Freisetzungskoeffizient einer beliebigen Komponente $k_x(T)$ durch Multiplikation von $k_{Kr}(T)$ mit dem Vorfaktor b_x [7]:

$$k_x(T) = b_x \cdot k_{Kr,0} \cdot e^{-\frac{Q_{Kr}}{RT}}. \quad \text{Gl. 3}$$

Über den Vorfaktor b_x , welcher Werte < 1 annimmt, wird die abweichende Flüchtigkeit des jeweiligen Spaltprodukts von der des Edelgasas Krypton berücksichtigt. b_x ist abhängig vom Abbrand des Brennstoffs und wird auf der Basis der Ergebnisse der ORNL-Versuchsreihe ermittelt (vgl. [7]).

Mit dem Partialdruckansatz wird der Freisetzungskoeffizient über die Verdampfungsrates der jeweiligen Komponente von der Brennstoffoberfläche an die Atmosphäre bestimmt. Die Freisetzung einer Komponente entspricht näherungsweise deren Verdunstungsrate unter der Annahme, dass der Temperaturgradient zwischen Oberfläche und Gasströmung gering ist. Die Berechnung des Freisetzungskoeffizienten einer Komponente anhand des Partialdruckansatzes ergibt sich zu [8]:

$$k_x(T, p) = K_x T^{0,75} \frac{p_x}{p}. \quad \text{Gl. 4}$$

Hierbei sind einzelne Terme zu einer elementspezifischen Konstante K_x zusammengefasst, womit sich eine Größenwertgleichung ergibt. Für K_x sind in ATHLET-CD größtenteils einheitliche Werte hinterlegt:

$$K_x = \begin{cases} 6 \cdot 10^{-6} & \text{für } x = \text{Indium} \\ 3 \cdot 10^{-6} & \text{für } x = \text{Strontium, Silber} \\ 1 \cdot 10^{-6} & \forall x \setminus x = \text{Indium, Strontium, Silber} \end{cases}. \quad \text{Gl. 5}$$

Die detaillierte Herleitung der Gl. 4 ist in [8] dokumentiert. Anhand der Gleichung lassen sich die wesentlichen Zusammenhänge des Ansatzes veranschaulichen. Die Freisetzungsrates einer Komponente nimmt linear mit steigendem Partialdruck p_x an der Brennstoffoberfläche sowie mit der Temperatur T in der Potenz von 0,75 zu und fällt mit steigendem Systemdruck p linear ab. Entsprechend ist der Partialdruckansatz sowohl für niedrigen als auch hohen Systemdruck anwendbar. Die Beziehung zwischen der Temperatur T und dem Partialdruck einer Komponente p_x kann mithilfe der Antoine-Gleichung beschrieben werden [8]:

$$\log_{10} p_x(T) = A_x - \frac{B_x}{T + C_x}. \quad \text{Gl. 6}$$

Die Konstanten A_x , B_x und C_x der Antoine-Gleichung sind u. a. [9], [10] entnommen.

AUSWERTUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Die Validierung der Modellbasis wird anhand der Freisetzung ausgewählter Spaltprodukte, welche jeweils mit dem CORSOR-O bzw. dem Partialdruckmodell (PPM, für Partial Pressure Model) berechnet sind, in Gegenüberstellung mit den entsprechenden experimentellen Ergebnissen dargestellt. Die freigesetzten Massen sind zur besseren Vergleichbarkeit jeweils auf das Anfangsinventar des entsprechenden Spaltprodukts bezogen. Abbildung 3 zeigt den experimentellen und simulierten Verlauf der Freisetzung des leichtflüchtigen Cäsiums für die Experimente FPT1 (links) bzw. FPT3 (rechts).

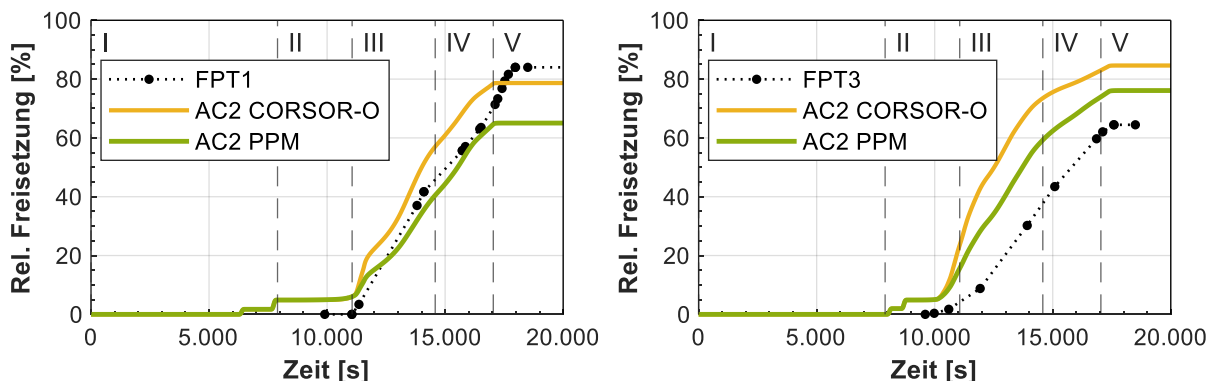


Abbildung 3 Experimenteller und simulierter Verlauf der Cäsiumfreisetzung

Für beide Experimente wird in den Simulationen jeweils ein früherer Beginn der Cäsiumfreisetzung berechnet, für FPT1 bereits zum Ende der Kalibrierungsphase (I). Übereinstimmend mit den Messdaten wird ein starker Anstieg der Freisetzungsrates zu Beginn der Oxidationsphase (III) simuliert, welcher für FPT1 besser wiedergegeben wird als für FPT3. Für FPT1 wird die Freisetzung bis zum Ende der Aufheizphase (IV) adäquat wiedergegeben, während diese in FPT3 bis zur Mitte der Oxidationsphase überschätzt wird. Mit dem PPM wird im Vergleich zum CORSOR-O Modell eine verbesserte Abbildung des Freisetzungsverlaufs erreicht. Bei FPT3 wird die Überschätzung der Freisetzung zu Beginn der Oxidationsphase reduziert. Der erneute Anstieg der Freisetzungsrates zu Beginn der Abkühlphase (V) in FPT1 wird von keinem der Modelle abgebildet, weshalb die Gesamtfreisetzung unterschätzt wird.

Die Freisetzung des leichtflüchtigen Tellurs, in Abbildung 4 dargestellt, setzt in beiden Experimenten zum Ende der Voroxidationsphase (II) ein, was in den Simulationen wiedergegeben wird. Mit der CORSOR-O Modellierung wird die experimentelle Freisetzung bereits zu Beginn der Oxidationsphase (III) jeweils deutlich unterschätzt. Für beide Experimente wird ein Anstieg der Freisetzungsrates zum Ende dieser Phase berechnet. Die Freisetzung wird durch das CORSOR-O Modell insgesamt stark unterschätzt. Mit dem PPM wird ein annähernd linearer Verlauf der Freisetzung simuliert, welcher den experimentellen Freisetzungsverlauf besser repräsentiert. Für FPT3 wird das Freisetzungsverhalten bis ca. 14.000 s annähernd wiedergegeben. In der Folge wird die Tellurfreisetzung auch mit dem PPM unterschätzt. Die freigesetzte Gesamtmenge wird mit beiden Modellen sowohl für FPT1 als auch für FPT3 unterschätzt. Allerdings fällt die Abweichung mit dem PPM signifikant geringer aus.

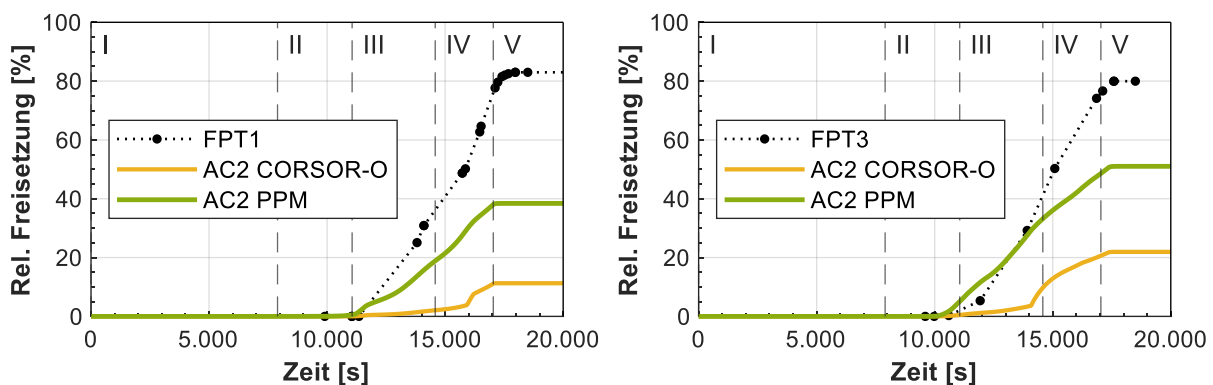


Abbildung 4 Experimenteller und simulierter Verlauf der Tellurfreisetzung

Die Freisetzung des schwachflüchtigen Rutheniums zeigt in den beiden Experimenten eine unterschiedliche Charakteristik, wie in Abbildung 5 dargestellt. In Experiment FPT1 werden erst zu Beginn der Aufheizphase relevante Freisetzungsmassen gemessen, was mit dem PPM bis zur Mitte dieser Phase adäquat wiedergegeben wird. Der anschließende Anstieg der Freisetzungsrates wird jedoch nicht ausreichend simuliert und die Gesamtfreisetzung infolgedessen unterschätzt. Die Freisetzung in FPT3 ist geringer und verläuft annähernd linear. Beide Aspekte werden durch das PPM abgebildet. Mit dem CORSOR-O Modell wird die Freisetzung für FPT1 und insbesondere für FPT3 deutlich überschätzt.

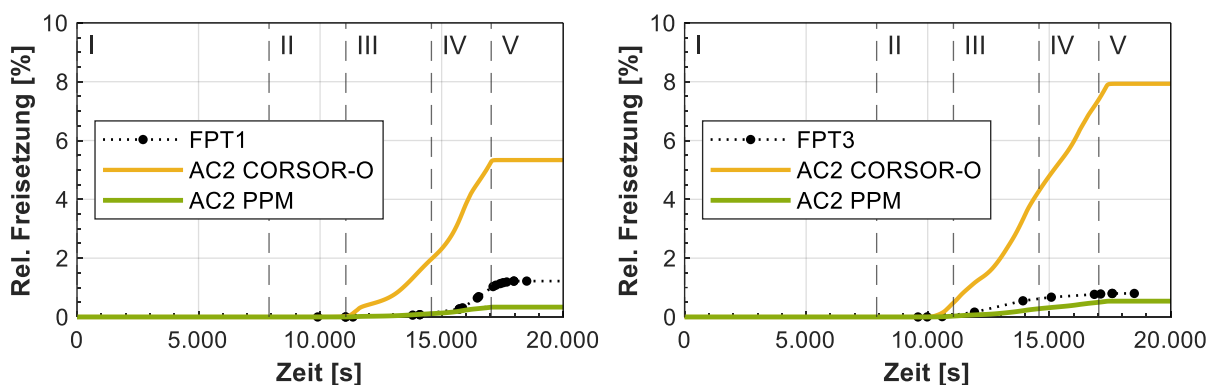


Abbildung 5 Experimenteller und simulierter Verlauf der Rutheniumfreisetzung

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

In dieser Arbeit werden die Modellbasis des Störfallanalysecodes AC² 2021.0 bezüglich der Spaltproduktfreisetzung analysiert und entsprechende Validierungsrechnungen der Experimente Phébus FPT1 und FPT3 durchgeführt. Das Hauptaugenmerk der Analyse liegt auf den zwei verschiedenen Berechnungsansätzen CORSOR-O und PPM. Wesentliche Erkenntnisse der Validierung werden anhand ausgewählter Simulationsergebnisse dargelegt.

Das PPM gibt über die Partial-Systemdruck-Beziehung die Verdunstung an der Brennstoffoberfläche als wesentlichen Freisetzungsmechanismus wieder. Demgegenüber besitzt CORSOR-O lediglich eine Temperaturabhängigkeit. Das Freisetzungsverhalten flüchtiger Spaltprodukte wird durch den Code überwiegend adäquat wiedergegeben. Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass die Freisetzung leichtflüchtiger Spaltprodukte mit dem PPM qualitativ und überwiegend auch quantitativ genauer wiedergegeben wird. Ein Beispiel hierfür liefert Tellur, dessen Freisetzung mit diesem Modell sowohl für FPT1 als auch für FPT3 deutlich verbessert repräsentiert wird. Zudem stimmt das simulierte Freisetzungsverhalten von Cäsium qualitativ besser mit den experimentellen Daten überein. Trotz der verbesserten qualitativen Wiedergabe des Freisetzungsverhaltens mit dem PPM zeigen die Abweichungen in der freigesetzten Gesamtmasse bei beiden Experimenten Verbesserungspotenzial auf. In weiterführenden Arbeiten könnte eine stärkere Differenzierung der elementspezifischen Konstanten des PPM entsprechend der Freisetzungsscharakteristik der jeweiligen Spaltprodukte entwickelt werden, um eine quantitativ verbesserte Simulation der Freisetzung zu ermöglichen. Bei der Vorhersage schwachflüchtiger Spaltprodukte besteht weniger Zuverlässigkeit. Möglicherweise wird für diese Spaltproduktgruppe mit dem PPM die Temperaturabhängigkeit der Freisetzung unterschätzt, welche im PPM im Vergleich zum CORSOR-O Modell in geringerer Potenz in die Berechnung eingeht.

DANKESAGUNG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die dargestellten Arbeiten werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 1501629 gefördert. Die Zuständigkeit für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Ergebnisse wurden unter Verwendung des GRS DV-Programms AC² 2021.0 erzielt.

LITERATUR

- [1] Jacquemain, D., Bourdon, S., de Bremaecker, A., Barrachin, M.: Final Report FPT1. IRSN Document PH-PF IP/00/479, Saint Paul-lez-Durance Cedex, 2000.
- [2] March, P.; Simondi-Teisseire, B.: Overview of the facility and experiments performed in Phébus FP. Annals of Nuclear Energy, 61, S. 11–22, DOI: 10.1016/j.anucene.2013.03.040, 2013.
- [3] Payot, F., Haste, T., Biard, B., Bot-Robin, F., Devoy, J., Garnier, Y., Guillot, J., Manenc, C., March, P.: Final Report FPT3. IRSN Document IP/10/587, Saint Paul-lez-Durance Cedex, 2011.
- [4] Lovasz, L. et al.: ATHLET-CD 3.3 – Models and Methods, GRS – P – 4/Vol. 2, 2021.
- [5] Wright, A. L.: Primary System Fission Product Release and Transport, A State-of-the-Art Report to the Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI). NUREG/CR-6193, Oak Ridge, 1994.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Technical bases for estimating fission product behavior during LWR accidents, NUREG-0772. Washington, DC 1981.
- [7] Lorenz, R. A.; Osborne, M. F.: A Summary of ORNL Fission Product Release Tests With Recommended Release Rates and Diffusion Coefficients. NUREG/CR-6261, Oak Ridge, 1995.
- [8] Trambauer, K. et.al.: Weiterentwicklung des Rechenprogrammsystems ATHLET/ATHLET-CD – Abschlussbericht. GRS-A-3215, 2004.
- [9] Powers, D. A.: Behaviour of Control Rods During Core Degradation: Pressurization of Silver-Indium-Cadmium Control Rods. NUREG/CR-4401, SAND85-0469, U.S. NRC, 1985.
- [10] Dean, J. A.; Lange, N. A.: Lange's Handbook of Chemistry [13. ed.]. McGraw-Hill, ISBN: 0070161925, New York, 1985.