

**BSVBUS-II**

**Brennstabverhalten  
im Betrieb und bei  
Störfällen**

## **BSVBUS-II**

### **Brennstabverhalten im Betrieb und bei Störfällen**

Abschlussbericht  
Kurzfassung

Felix Boldt  
Jonathan Sappl  
Florian Falk  
Robert Kilger

August 2023

#### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen RS1595 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**

Auslegungsstörfall, Brennstabverhalten, CABRI, CIP, FIDES, KMV, Lastrampen, LOCA, RIA, SCIP, TESP-ROD

## Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die aktuellen Arbeiten und Weiterentwicklungen an dem GRS Brennstabcode TESPА-ROD. Diese Arbeiten wurden mit der Zielsetzung einer weiter verbesserten Aussagefähigkeit zu sicherheitsrelevanten Parametern und Kenngrößen zum Brennstabverhalten in LWR unter den Bedingungen von Stör- und Unfällen durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Eigenforschungsvorhaben leisten einen wesentlichen Beitrag zur verbesserten sicherheitstechnischen Bewertung der Einhaltung der Schutzziele *Sicherer Einschluss der Aktivität* und *Kühlbarkeit des Kerns* unter Stör- und Unfallbedingungen.

Im Bereich der Reaktivitätsstörfälle (RIA) wurden Transientenexperimente aus dem Projekt FIDES JEEP HERA an den Versuchsreaktoren NSRR und TREAT modelliert, nachgerechnet und ausgewertet. Der Einfluss wesentlicher Eingangsparameter wie Pulsbreite und Hydridschichtdicke auf verschiedene relevante Brennstabgrößen während und nach den Experimenten wurde untersucht, und im Rahmen eines Rechenbenchmarks mit zwanzig anderen Teilnehmern verglichen. Bei letzterem zeigte sich eine hohe Bandbreite der Ergebnisse, bei denen TESPА-ROD im Durchschnitt lag.

Im Bereich der Kühlmittelverluststörfälle (KMV, engl. LOCA) wurden experimentelle Ergebnisse des SCIP III Projekts untersucht und analysiert. Hieraus lassen sich vielfache Schwellwerte für den Beginn einer Fragmentierung des  $UO_2$  Brennstoffs für LWR ableiten. Dazu gehören die Schwellwerte hinsichtlich der Effekte Temperatur, Abbrand des Kernbrennstoffs, Hüllrohrdehnung, Bersten mit gleichzeitigem Verlust des Drucks im Plenum-Volumen und die Auswirkungen auf den fragmentierten Brennstoff. In dem Brennstabcode TESPА-ROD wurde zu diesem Zweck ein Korngrößenmodell integriert, das die Kornvergrößerung im Brennstoff vorhersagt und die spaltgasbedingte Kornverfeinerung in der Hochabbrandzone am Rand des Brennstoffs ab einem Abbrand von 50 MWd/kgU abbildet. Zudem wurden statistische Auswerteprogramme speziell für die umfangreichen Ergebnisse der Experimente entwickelt, und exemplarisch angewandt.

Zur Weiterentwicklung und Qualifizierung wurden zwei Versuche des FIDES JEEP P2M modelliert, berechnet und ausgewertet. Ziel der Versuche ist, das Schmelzverhalten von Brennstoffen unter transienten Bedingungen zu untersuchen. Dabei zeigte sich u. a., dass die Schmelztemperatur von Uranoxid in den Rechnungen mit TESPА-ROD nicht erreicht wird. Ursachen und eine mögliche Behebung sind noch nicht vollständig geklärt, und werden Gegenstand künftiger Eigenforschungsvorhaben sein.

Das Refactoring des Brennstabcodes TESP-ROD wurde fortgesetzt. Der Code wurde auf die Versionsverwaltungssoftware Git übertragen. Die in dem Eigenforschungsvorhaben RS1577 entwickelte modernisierte GUI (*Graphical User Interface*) wurde übernommen und um mehrere Funktionen wie z. B. zur Verfolgung des Rechenfortschritts sowie zur Verifikation der Ergebnisse bei Versionsänderungen erweitert. Zusätzliche Funktionen für eine verbesserte, weniger fehleranfällige Bedienung wurden implementiert, darunter das JSON-Format zur Erstellung von Eingangsdatensätzen. Weiterer Entwicklungsbedarf für künftige Entwicklungs- und Refactoring-Arbeiten wurde identifiziert.

Zur Verfolgung und Begleitung internationaler Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten nahm und nimmt die GRS aktiv an den Forschungsprojekten der OECD/NEA in der *Technical Advisory Group* (TAG) und *Governing Board* (GB) im Rahmen von FIDES-II sowie der Project Review Group (PRG) und des *Management Boards* (MB) im Rahmen von SCIP IV teilgenommen. Weiterhin wurde am *Cladding Integrity Project* (CIP) aktiv teilgenommen. Die Ergebnisse und Erkenntnisse an Benchmark-Teilnahmen aus diesen Aktivitäten sind beschrieben.

Anmerkung: Da die Sperrfristen der in der vorliegenden Arbeit verwendeten, experimentellen Daten aus SCIP III und FIDES zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts noch nicht alle abgelaufen waren, sind diese Daten bis auf Weiteres proprietär. Deshalb liegt der Bericht im Augenblick lediglich als Kurzfassung zur Veröffentlichung vor. Nach Ablauf der Sperrfristen wird dieser Bericht in vollem Umfang frei zur Verfügung gestellt werden. Damit ist nach September 2031 zu rechnen. Bis dahin kann der vollständige Bericht bei der GRS unter den Bedingungen einer Vertraulichkeitserklärung angefragt werden.

## Abstract

This report describes the current work and further developments on the GRS fuel rod code TESPА-ROD. This work was carried out with the aim of further improving the informative value of safety-relevant parameters and characteristics of fuel rod behavior in LWR under the conditions of incidents and accidents. The results of this research project of own interest provide a significant contribution to the improved safety-related evaluation of compliance with the protection goals of safe enclosure of the activity and coolability of the core under fault and accident conditions.

In the field of reactivity accidents (RIA), transient experiments from the FIDES JEEP HERA project on the NSRR and TREAT test reactors were modeled, calculated and evaluated. The influence of essential input parameters such as pulse width and hydride layer thickness on various relevant fuel rod sizes during and after the experiments was examined and compared with twenty other participants within the framework of the calculation benchmark. The latter showed a wide range of results, with TESPА-ROD mostly in the middle, i. e. well on average.

In the area of the loss-of-coolant accident (KMV, LOCA), experimental results of the SCIP III project were investigated and analyzed. From this, multiple threshold values for the start of fragmentation of the UO<sub>2</sub> fuel for LWR can be derived. This includes the threshold values with regard to the effects of temperature, burnup of the nuclear fuel, cladding tube expansion, bursting with simultaneous pressure loss of the plenum volume and the effects on the fragmented fuel. For this purpose, a grain size model was implemented to the fuel rod code TESPА-ROD, which predicts grain coarsening in the fuel and maps the grain refinement caused by fission gas in the high burnup zone at the rim of the fuel from a burnup of 50 MWd/kgU. In addition, statistical evaluation programs were specially developed for the extensive results of the experiments and used as examples.

For further development and qualification, two tests of the FIDES JEEP P2M were modeled, calculated and evaluated. The aim of the experiments is to investigate the melting behaviour of fuels under transient conditions. This showed, amongst others, that the melting temperature of uranium dioxide is not reached in the calculations with TESPА-ROD. The causes and a possible remedy have not yet been fully clarified, and will be a subject of future projects.

The TESP-ROD fuel rod code refactoring continued. The code was transferred to the Git version control software. The modernized GUI (Graphical User Interface) developed in the in-house research project RS1577 was adopted and several functions added, such as to track the progress of calculations and to verify the results of version changes. Additional features for improved, less error-prone operation have been implemented, including the JSON format for creating input data sets. Further development needs for future development and refactoring work were identified.

To monitor and support international research and development activities, GRS actively participates in the research projects of the OECD/NEA in the Technical Advisory Group (TAG) and Governing Board (GB) within the framework of FIDES-II as well as the Project Review Group (PRG) and of the Management Board (MB) as part of SCIP IV. Furthermore, active participation was made in the Cladding Integrity Project (CIP). The results and findings of benchmark participation from these activities are described.

Note: Since the non-disclosure periods of the experimental data from SCIP III and FIDES used in the work at hand had not all expired at the time of publication of this report, these data are proprietary for the time being. For this reason, the report is currently only available for publication as an abridged version. After the expiry of the non-disclosure periods, this report will be made freely available in its entirety. This is expected after September 2031. Until then, the complete report can be requested from GRS under the conditions of a confidentiality agreement.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>I</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten der GRS</b> .....	<b>7</b>
3.1	Fragmentierung und Brennstoffauswurf bei Kühlmittelverluststörfall .....	7
3.2	Verhalten unter Lastrampen .....	10
3.3	Bisherige Arbeiten der GRS.....	11
3.3.1	Reaktivitätsstörfälle.....	11
3.3.2	Kühlmittelverluststörfälle .....	11
3.3.3	Lastrampen.....	13
3.3.4	Begleitung internationaler Forschungsprogramme.....	13
3.3.5	Abgrenzung zu anderen Vorhaben .....	15
3.4	Der Brennstab-Code TESPA-ROD .....	15
<b>4</b>	<b>Reaktivitätsstörfälle (RIA)</b> .....	<b>17</b>
4.1	Einführung .....	17
4.2	Transientenrechnungen im Projekt FIDES-II HERA.....	19
4.3	Ziele der Simulation .....	19
4.4	Theoretische Überlegungen.....	19
4.5	Modellbildung .....	19
4.6	Auswertung.....	19
4.7	Weiterführende Arbeiten zu HERA innerhalb FIDES-II .....	19
<b>5</b>	<b>Kühlmittelverluststörfälle (KMV, LOCA)</b> .....	<b>21</b>
5.1	Erkenntnisse aus SCIP III .....	21
5.2	Implementierung eines Korngrößenmodells in TESPA-ROD .....	21

5.3	Statistische Auswertungen der SCIP III Versuche.....	21
<b>6</b>	<b>Lastrampen .....</b>	<b>23</b>
6.1	Modellentwicklungen zum Erreichen der Schmelzbildung im Brennstoff basierend auf dem P2M Benchmark.....	23
6.2	Ergebnisse des Benchmarks zu Versuch HBC4 .....	23
6.3	Ergebnisse des Benchmarks zu Versuch xM3 .....	23
6.4	Auswirkungen des P2M-Benchmarks auf TESPA-ROD.....	23
<b>7</b>	<b>Refactoring von TESPA-ROD.....</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>Internationale Zusammenarbeit.....</b>	<b>27</b>
8.1	OECD/NEA FIDES-II .....	27
8.2	Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP III und SCIP IV)) .....	28
8.3	CABRI International Project (CIP).....	28
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>29</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>33</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>35</b>

# 1 Einleitung

Es ist zu erwarten, dass neben dem fortgesetzten Betrieb bestehender kerntechnischer Anlagen und Kernkraftwerke in den Nachbarländern der Bundesrepublik Deutschland dort zukünftig auch neue Reaktoren errichtet werden. Dazu gehören beispielsweise die in Großbritannien und Frankreich neu entstehenden Anlagen, der geplante Neubau in der Tschechischen Republik, als auch die Möglichkeit des Einstiegs Polens in die zivile Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung.

Auch nach dem Atomausstieg möchte die Bundesregierung bei internationalen Anlagen legitime nukleare Sicherheits- und/oder Sicherheitsinteressen geltend machen. Die hierzu auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit erforderliche wissenschaftliche Kompetenz gilt es daher sowohl national als auch – soweit möglich – im internationalen Erfahrungsaustausch zu gewährleisten. Dies schließt auch die Anpassung des mit Mitteln der nationalen Reaktorsicherheitsforschung geförderten Rechencodes TESPA-ROD /SON 17/ /BOL 20/ an die zukünftigen Anforderungen mit ein.

Das frühere Eigenforschungsvorhaben RS1557 *Brennstabverhalten im Betrieb und bei Störfällen* behandelte die entsprechende Modellentwicklung zur Vorhersage des Brennstabverhaltens sowie die Weiterentwicklung des Rechenprogramms TESPA-ROD für den Betrieb und unter den Bedingungen von Auslegungsstörfällen. Die Schwerpunkte des vorliegenden Eigenforschungsvorhabens RS1595 sind die Fortführung dieser Arbeiten, und damit die weitere Modellentwicklung und Anpassung der Modellierungsmöglichkeiten des Brennstabverhaltens unter Bedingungen von Reaktivitätsstörfällen (RIA), Kühlmittelverluststörfällen (KMV), Lastrampen, sowie des betrieblichen Verhaltens in TESPA-ROD. Die Ergebnisse dieses Eigenforschungsvorhabens leisten einen wesentlichen Beitrag zur verbesserten sicherheitstechnischen Bewertung der Einhaltung der Schutzziele *Sicherer Einschluss der Aktivität* und *Kühlbarkeit des Kerns* unter Stör- und Unfallbedingungen.

Auch unter Ausstiegsbedingungen gelten für den verbleibenden Betrieb deutscher Kernkraftwerke und weiterer kerntechnischer Anlagen die höchsten Sicherheitsanforderungen, entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik. Die kontinuierlich staatlich geförderte nukleare Sicherheitsforschung ist für den Erhalt und Ausbau von technisch-wissenschaftlicher Kompetenz langfristig essenziell /BMWI 19/, /BMBF 21/. Das vorliegende Eigenforschungsvorhaben steht im Einklang mit den formulierten Zielen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung /BMWI 18/

sowie des Kompetenzverbunds Kerntechnik /KVKT 13/ /BMWI 00/ und behandelt mit der detaillierten Beschreibung des Brennstabverhaltens ein Kernthema der Reaktorsicherheitsforschung. Die im Jahr 2000 vom BMWi berufene Evaluierungskommission /BMWI 00/ stellte seinerzeit weiterhin fest, dass innovative Konzepte im Ausland beobachtend zu begleiten seien.

Dieser Bericht gliedert sich in eine nähere Spezifizierung der Zielsetzung des Vorhabens in Kap. 2, dann eine Beschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie der bis dahin geleisteten Arbeiten der GRS zum Vorhabensbeginn in Kap. 3. Die geleisteten Arbeiten und erzielten Ergebnisse dieses Vorhabens sind beschrieben in Kap. 4 zum Thema Reaktivitätsstörfälle, in Kap. 5 zum Thema Kühlmittelverluststörfälle und in Kap. 6 zum Thema Lastrampen. Daran anschließend sind in Kap. 7 die Arbeiten zum Refactoring, d. h. der Modernisierung des Codes von TESPА-ROD näher beschrieben, und in Kap. 8 die Aktivitäten der GRS im Bereich der internationalen Zusammenarbeiten. Kap. 9 schließlich bietet eine kurze Zusammenfassung der Arbeiten in diesem Eigenforschungsvorhaben.

## 2 Zielsetzung

Die in diesem Eigenforschungsvorhaben durchgeführten Tätigkeiten tragen substantiell zum Gesamtziel bei, die Aussagefähigkeit in Deutschland zum Brennstabverhalten im Betrieb und bei Auslegungsstörfällen zu erhalten und auszubauen. Zu diesem Zweck erfolgte eine Weiterentwicklung der Rechenmethoden für die Bewertung des thermo-mechanischen Brennstabverhaltens in den Teilbereichen Kühlmittelverluststörfälle (KMV bzw. engl. *Loss-of-Coolant Accident*, LOCA) und Lastrampen sowie die Verfolgung einschlägiger internationaler Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die neuen Modelle wurden nach ihrer Entwicklung in das Rechenprogramm TESPА-ROD implementiert. Der Brennstab-Code repräsentiert dadurch weiterhin auf diesen Gebieten den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Neben den Modellentwicklungen erhält der Code strukturelle Neuerungen, so dass eine effektivere Anwendbarkeit als Einzelprogramm als auch in gekoppelter Form mit anderen Programmen erreicht wird.

Die Einzelziele werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

### **Wissenschaftliche und technische Einzelziele**

Das Projekt umfasst vier Teilziele:

1. Modellierung der Fragmentierung und des Brennstoffauswurfs bei KMV/LOCA,
2. Modellierung des Pellet- und Hüllrohrverhaltens bei Lastrampen,
3. Verfolgung von internationalen F&E-Vorhaben,
4. Refactoring von TESPА-ROD.

In den einzelnen Arbeitspaketen sollen folgende Einzelziele erreicht werden:

## **Arbeitspaket 1: Fragmentierung und Brennstoffauswurf bei LOCA**

Die einzelnen Punkte ordnen sich den Unterpaketen für UO<sub>2</sub> und MOX-Brennstoff zu:

- Quantifizierung des Auswurfs feinkörniger Fragmentierung bzgl. UO<sub>2</sub>-Brennstoff auf Basis der Auswertung von SCIP III<sup>1</sup> Experimenten,
- Entwicklung von Modellen zur feinkörnigen Fragmentierung von MOX-Brennstoff bei LOCA,
- Implementierung und Validierung der Modelle in TESP-ROD.

## **Arbeitspaket 2: Verhalten unter Lastrampen**

- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen leistungsabhängiger Pellet-Verformung und leistungsbedingter Rissbildung im Pellet,
- Überprüfung der Eignung eines starren Pelletmodells in Bezug auf die geometrischen und elastischen Einflüsse durch die Rissbildung,
- Implementierung und Validierung des Modells in TESP-ROD.

## **Arbeitspaket 3: Wissenschaftliche Begleitung aktueller F&E-Vorhaben**

- Wissenschaftliche Begleitung der CABRI-Water-Loop-Experimente sowie Auswertung der axialen Verteilungen der Pellet-Hüllrohr-Interaktionen,
- Wissenschaftliche Begleitung von SCIP IV, sowie Teilnahme an dem in diesem Rahmen geplanten Modelling Workshop,
- Wissenschaftliche Begleitung der im Rahmen des FIDES<sup>2</sup>-Kick-off-Meetings vorgestellten Projekte sowie des FIDES-Rahmenprogramms,
- Wissenschaftliche Begleitung und Mitarbeit bei nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Auslegungsstörfälle und transienten Phänomene bezüglich des Brennstabverhaltens.

---

<sup>1</sup> OECD-NEA Studsvik Cladding Integrity Project

<sup>2</sup> OECD-NEA Framework for Irradiation Experiments

#### **Arbeitspaket 4: Refactoring von TESPA-ROD**

- Weiterentwicklung der Zeitschrittweiten-Berechnung für spezifische Anwendungen z. B. Simulation von vollständigen Betriebszyklen,
- Wartung und Pflege des Quellcodes,
- Überprüfung und Entwicklung einer Modularisierung zur Leistungssteigerung von TESPA-ROD bei gleichzeitiger flexiblerer Bedienung.

#### **Strukturierung des vorliegenden Berichts**

Der vorliegende Bericht strukturiert sich weiterhin wie folgt:

- Kap. 3 stellt den Stand von Wissenschaft und Technik sowie die bisherigen Arbeiten der Auftragnehmerin zu Beginn des Vorhabens dar.
- Kap. 4 beschreibt die Arbeiten, Benchmark-Rechnungen, Untersuchungen und Ergebnisse zu Reaktivitätsstörfällen, sowie deren Implementierung in den GRS Brennstabcode TESPA-ROD.
- Kap. 5 beschreibt äquivalent die Arbeiten zu Kühlmittelverluststörfällen (KMV, engl. *Loss-off-coolant accident*, LOCA), und
- Kap. 6 die äquivalenten Arbeiten zu Lastrampen.
- In Kap. 7 sind die umfangreichen programmiertechnischen Arbeiten zum Refactoring von TESPA-ROD kurz beschrieben.
- In Kap. 8 sind die Aktivitäten zur internationalen Zusammenarbeit beschrieben, während
- Kap. 9 eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten bietet.



### **3 Stand von Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten der GRS**

Die in diesem Eigenforschungsvorhaben durchgeführten Arbeiten schließen an das Forschungsvorhaben RS1557 *Brennstabverhalten im Betrieb und bei Störfällen* an. Es gibt ebenfalls Verbindungen zu den Vorhaben RS1552 *Langzeitverhalten zwischengelagerter Brennelemente bei deutlich längerer Zwischenlagerung* und RS1577 *Sicherheitstechnische Entwicklungen und Analysen zu Accident-Tolerant Fuels*, die hier ebenfalls kurz erläutert werden.

#### **3.1 Fragmentierung und Brennstoffauswurf bei Kühlmittelverluststörfall**

Gemäß den RSK-Leitlinien für DWR /SIA 22/ ist nach einem Kühlmittelverluststörfall (KMV; engl. *Loss-of-coolant accident*, LOCA)) zu gewährleisten, dass

- die berechnete maximale Brennstabhüllentemperatur 1. /SIA 15/200 °C nicht überschreitet,
- die berechnete Oxidationstiefe der Hülle an keiner Stelle den Wert von 17 % der tatsächlichen Hüllrohrwandstärke überschreitet,
- bei der Zirkonium-Wasser-Reaktion nicht mehr als 1 % des gesamten in den Hüllrohren enthaltenen Zirkoniums reagiert,
- infolge von Hüllrohrschäden die zulässigen Freisetzungen von Spaltprodukten nicht überschritten werden,
- keine Änderungen in der Geometrie des Reaktorkerns auftreten, die eine ausreichende Kühlung des Reaktorkerns verhindern.

Des Weiteren muss sichergestellt sein, dass Brennstabfragmentieren (Zerbrechen des Brennstabs bei einem KMV sicher vermieden wird /COR 22/ /SIA 15/. Die Simulation des Hüllrohrverhaltens unter KMV-Bedingungen erfordert daher eine exakte Modellierung der beteiligten Phänomene. Das Aufblähen der Hüllrohre (*ballooning*) führt grundsätzlich zur lokalen Verengung des Kühlkanals und somit Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr der Kühlung. Ferner kann sich feinkörniger Brennstoff innerhalb des aufgeblähten Hüllrohrs axial verlagern. Das Phänomen des Fragmentierens, Verlagerns und des Auswurfes (*Fuel, Fragmentation, Relocation and Dispersal*, FFRD) von Brennstoff ist insbesondere bei feinkörniger Fragmentierung der Hochabbrandzone ab einem Abbrand von

ca. 60 GWd/tSM für UO<sub>2</sub> Brennstoff relevant /NEA 16/. Diese Grenze zeigte sich in Experimenten im Halden-Reaktor, in der Studsvik-KMV-Anlage, als auch bei den EPRI-Heating-Tests, die in separaten Versuchseinrichtungen durchgeführt wurden /STU 19a/. In Abb. 3.1 ist beispielhaft die Berst-Öffnung eines Brennstabs mit 74,5 GWd/t<sub>HM</sub> Abbrand nach einem KMV-Test im Halden-Reaktor dargestellt, sowie ausgeworfener feinkörniger Brennstoff daraus.



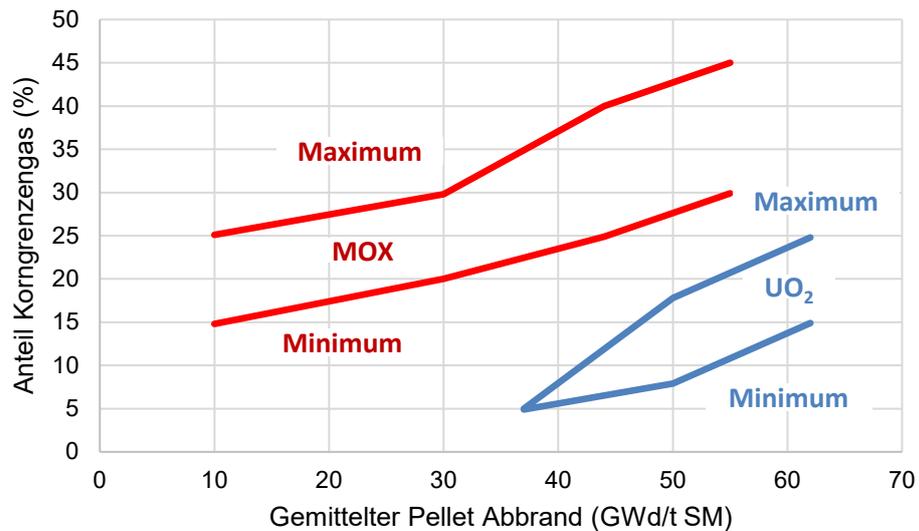
**Abb. 3.1** Beispiel einer Berst-Öffnung eines Brennstabs (74,5 GWd/t<sub>HM</sub>) nach einem KMV-Test im Halden-Reaktor (links), sowie ausgeworfener feinkörniger Brennstoff /STU 19a/

Die dafür verantwortliche Hochabbrandstruktur (*high burnup structure*, HBS) bildet sich von der Pellet-Außenseite in Richtung des Pelletzentrums aus, da der lokale Abbrand an der Pellet-Außenseite mit einem Faktor 3 bis 4 dem mittleren Pelletabbrand voraus-eilt. Die oben genannte Abbrandgrenze für die feinkörnige Fragmentierung gilt als gesichert, jedoch ist die Vorhersage sowohl der Menge als auch der Partikelgrößenverteilung von ausgeworfenem Brennstoff aufgrund der geringen Datenlage schwierig. Hier sind neue Angaben zu den zuvor genannten Fragestellungen zu erwarten.

Ob die experimentell für UO<sub>2</sub> bestimmte Abbrandgrenze von 60 GWd/t SM auch für MOX-Brennstoff gültig ist, ist fraglich. Es ist ein internationaler Konsens, die Abbrandgrenze für MOX-Brennstoff niedriger anzusetzen, da bei MOX-Brennstoff höhere Spaltgas-Konzentrationen, die sich an Korngrenzen in der Brennstoff-Matrix sammeln,

vorliegen. Abb. 3.2 zeigt zum Vergleich den Unterschied in den Spaltgas-Konzentrationen zwischen  $\text{UO}_2$ -Brennstoff (blaue Kurven) und MOX-Brennstoff (rote Kurven).

Grundsätzlich nimmt für einen Brennstoff der Anteil des Korngrenzengases mit dem Pelletabbrand zu. Im Verlauf eines KMV wird die Korngrenzen-Separation durch hohe Temperaturen begünstigt und führt zu einer feinen Fragmentierung des Pellets /L /LEM 06/. Zusätzlich besitzt der MOX-Brennstoff gegenüber  $\text{UO}_2$  eine heterogenere Struktur, die je nach Produktionsverfahren in zwei oder drei unterschiedliche Phasen aufgeteilt ist.



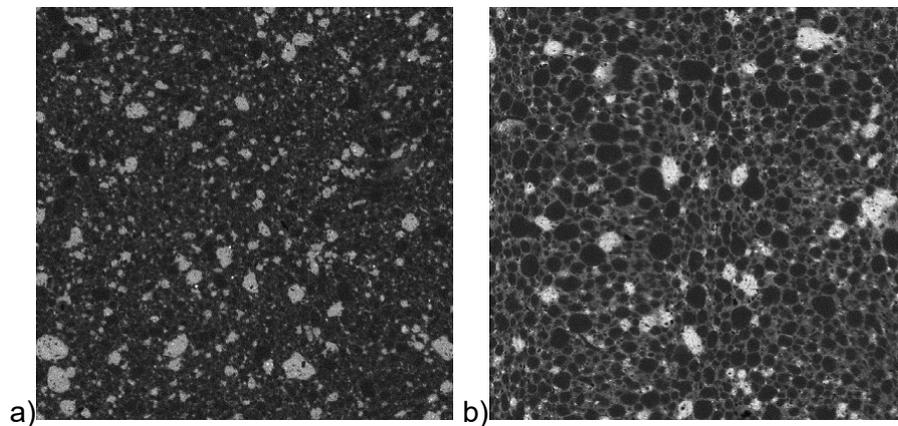
**Abb. 3.2** Anteil des Korngrenzengases am gesamten Spaltgas in Abhängigkeit zum Pelletabbrand /NEA 09/

Abb. 3.3 zeigt Abbildungen der Plutonium-(Pu)-Verteilungen, a) resultierend aus dem AUC<sup>3</sup>-Verfahren und b) aus dem ADU<sup>4</sup>-Verfahren. Ersteres zeigt zwei Phasen aus abgereichertem Uran und Plutonium. Letzteres besitzt eine dritte Phase mit einem niedrigen Plutoniumgehalt. Die heterogene Pu-Verteilung hat eine heterogene Leistungs- und Abbrandverteilung innerhalb des Pellets zur Folge /NOI 08/. Der Abbrand fokussiert sich auf die Pu-haltigen Agglomerate und zeigt daher eine frühzeitige Entwicklung der HBS. Somit verteilt sich bei MOX-Brennstoff eine großflächige HBS über weite Teile des gesamten Pellets.  $\text{UO}_2$ -Brennstoff bildet dem gegenüber die HBS nur am Pelletrand aus,

<sup>3</sup> AUC: Ammoniumuranylcarbonat (auch AUPuC-Verfahren genannt, Ammoniumuranylplutonylcarbonat)

<sup>4</sup> ADU: Ammoniumdiuranat

dem so genannten Rim-Effekt. Bisher gibt es keine bestätigte Abbrandgrenze für MOX-Brennstoff zur Ausbildung einer HBS mit feinkörniger Fragmentierung.



**Abb. 3.3** Plutonium-Mikrosonden-Bilder für MOX-Brennstoff a) nach dem AUC-Verfahren und b) nach dem ADU-Verfahren /LEM 06/, /LIP 82/

### 3.2 Verhalten unter Lastrampen

Zu Beginn des Einsatzes eines Brennstabes kommt es zu Rissen im Brennstoff-Pellet und einer Verlagerung des Brennstoffs in radialer Richtung. Dieses Aufbrechen ist unvermeidbar und führt zu einem durchschnittlich kleineren Spalt zwischen Pellet und Hüllrohr, was den Wärmeübergang an dieser Stelle verstärkt. Durch ein Aufkriechen des Hüllrohrs erfolgt der Spaltschluss im weiteren Betrieb. Eine direkte Vorhersage von Rissbildungen ist bisher nicht möglich. Brennstabcodes verwenden unterschiedliche Modelle, um dieses Phänomen abzubilden. Im thermo-mechanischen Brennstabcode TESPA-ROD der GRS beschreibt ein analytisches Modell die Dehnung an der Pelletkante, die aufgrund von ungleichmäßiger thermischer Ausdehnung bei Lastrampen entstehen. Hierbei werden Vergleichsbetrachtungen zwischen der Position am Pelletkante (oben/unten) und in der mittleren Pellethöhe gemacht. TESPA-ROD simuliert hierbei das Pellet als starren Körper. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da das Hüllrohrmaterial deutlich weicher als das Pellet ist und im Reaktoreinsatz durch Kriechen Spannungen abbauen kann. Die Rissbildung und das radiale Verlagern von Brennstoff führt bei dieser Annahme zu einem größeren Pelletdurchmesser. Jegliche nachgelagerten Schwellvorgänge des Brennstoffs führen unweigerlich zu einer Zunahme des Pelletvolumens. In der Realität ist anzunehmen, dass durch diese Schwellvorgänge bestehende Risse geschlossen werden können, und dass dadurch die Volumenzunahme geringer ausfällt. Neben modell-

theoretischen Betrachtungen sind Reaktorexperimente mit Lastrampen von hohem Wert, um Modelle für die Rissbildung zu entwickeln.

### **3.3 Bisherige Arbeiten der GRS**

Die GRS entwickelt und validiert seit vielen Jahren das thermo-mechanische Brennstabprogramm TESP-ROD, um dieses für die Simulation des Brennstabverhaltens im Betrieb und bei Störfällen anzuwenden. Im letzten Vorhaben RS1557 wurden die drei Schwerpunkte Reaktivitätsstörfälle (RIA), Kühlmittelverluststörfälle (KMV, LOCA) und Lastrampen behandelt.

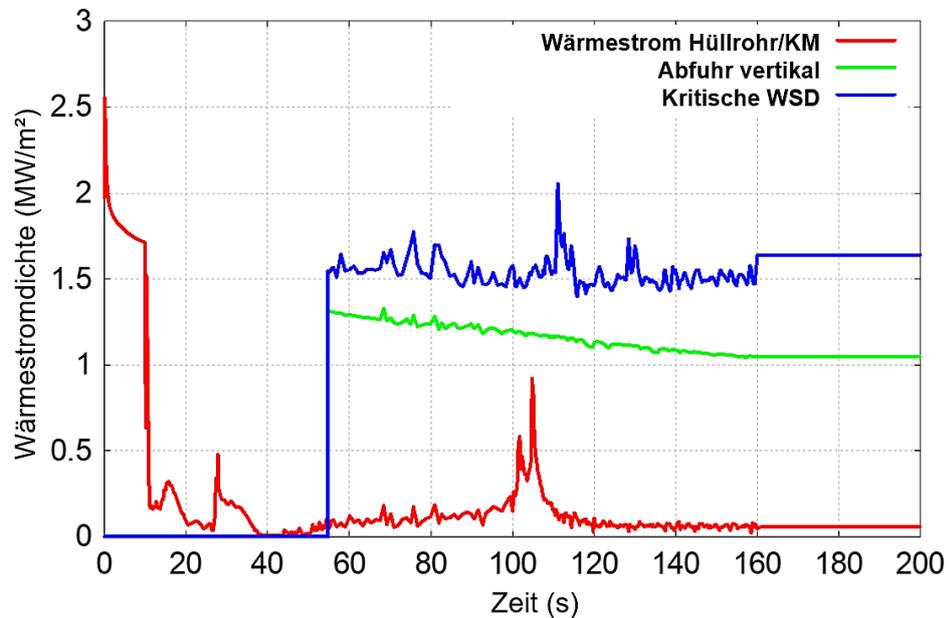
#### **3.3.1 Reaktivitätsstörfälle**

Schwerpunkt der Modellierung im Themengebiet Reaktivitätsstörfälle (RIA) waren die Beschreibung des transienten Pellet-Schwellens während eines RIA, das durch einen kurzfristigen Pellet-Hüllrohr-Kontakt (*Pellet-Cladding-Mechanical-Interaction*, PCMI) und den daraus resultierenden hohen mechanischen Hüllrohrbelastungen charakterisiert ist. Mit dem in vorhergehenden Eigenforschungsvorhaben entwickelten Modell konnten verschiedene Experimente zu Reaktivitätsstörfällen erfolgreich nachgebildet werden. Im Vorhaben RS1557 wurde dieses Modell unter der Verwendung von experimentellen Daten des OECD-NEA *CABRI International Project* (CIP) für MOX-Brennstoff erweitert. Um die Fähigkeiten von TESP-ROD zu bewerten (u. a. durch den Vergleich von Ergebnissen von Analysen mit anderen Codes), erfolgte innerhalb der vorhergehenden Eigenforschungsvorhaben eine Teilnahme an den drei Phasen des RIA-Benchmark der OECD-NEA *Working Group for Fuel Safety* (WGFS) von 2010 bis heute. Parallel zu der Weiterentwicklung von TESP-ROD ermöglicht die Teilnahme am RIA-Benchmark den Vergleich mit anderen Brennstab-Codes und erleichtert die Optimierung von neuen Modellen.

#### **3.3.2 Kühlmittelverluststörfälle**

Im Themengebiet Kühlmittelverluststörfälle (KMV) entspricht der Brennstabcode TESP-ROD in Bezug auf  $UO_2$ -Brennstoff dem Stand von Wissenschaft und Technik. TESP-ROD wurde im vorhergehenden Eigenforschungsvorhaben RS1557 substantiell erweitert, um die Kühlbarkeit des Brennstabs bei Brennstoff-Auswurf aus geborstenen Brennstäben simulieren zu können. Hierzu wurde das Schüttbett-Kühlungsmodell von

Lipinski in TESPА-ROD implementiert /LIP 82/. Hierbei wird angenommen, dass ein Teil des Brennstoffs nach dem Bersten des Hüllrohrs ausgeworfen wird, sich auf den Brennelementabstandshaltern ablagert und so die Wärmeabfuhr an das umgebene Kühlmittel (Wasser oder Dampf) behindert. Dies ist in Abb. 3.4 anhand eines Beispiels dargestellt.



**Abb. 3.4** Vergleich der kritischen Wärmestromdichte (WSD)

(Blau) gegenüber der aktuell abgeführten Wärme, (grün) bei einer KVM-Transienten mit Brennstoffauswurf nach ca. 55 s, wobei der aktuelle Wärmestrom (rot) zum Vergleich gezeigt wird.

TESPA-ROD berechnet anhand des Schüttbett-Kühlungsmodells die kritische Wärmestromdichte, bei deren Überschreitung postuliert wird, dass die Kühlung des betroffenen Brennstabes gemäß dem Lipinski Modell nicht mehr möglich ist (Abb. 3.4). TESPА-ROD vergleicht diese Wärmestromdichte mit der tatsächlichen Wärmestromdichte, die sich aufgrund einer Schüttbetthöhe mit der jeweiligen aktuellen Leistungsdichte des Brennstoffs (Nachzerfall) ergibt. Neben dem Lipinski-Modell wurden auch andere komplexere Modelle entwickelt, die neben der Schüttbetthöhe und der Porosität ebenfalls die Anströmung, Mehrphasigkeit des Kühlmittels und die Schüttbettgeometrie berücksichtigen /RAH 13/, /LEI 17/.

Im vorhergehenden Eigenforschungsvorhaben RS1557 wurde das Wasserstoffmodell von TESPА-ROD erweitert, um realistische zeitabhängige Lösungs- und Ausscheidungsprozesse für Wasserstoff in metallischem Zirkaloy abbilden zu können. Auf Basis von Experimenten am Argonne National Laboratory (ANL) wurden Ausscheidungs-

modelle für Hydride entwickelt und in TESPА-ROD implementiert. Das neue Modell ermöglicht nun eine dynamische Hydridauflösung und -ausscheidung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Abkühlrate. Bei der Flutung des Kerns kommt es zu einem Thermoschock im Hüllrohr (*Quenching*), der je nach Temperaturgradient und Wasserstoffgehalt so hohe Spannungen erzeugen kann, dass das Hüllrohr fragmentiert.

Um das Nachweisziel „Kühlbarkeit des Kerns“ sicherzustellen, ist in der Sicherheitsebene 3 unter Bedingungen eines LOCA ein Fragmentieren der Hüllrohre zu vermeiden /SIA 15/. Zur Bewertung des bei einem LOCA auftretenden Thermoschocks im Hüllrohr in der Außenfaser wurden geeignete Spannungsbeziehungen in TESPА-ROD implementiert, die nun zu zusätzlichen Spannungen führen kann. Anschließend wurde eine Analyse der *Integral Thermal Shock*-Tests von Nagase & Fuketa /NAG 05/ durchgeführt und die neu implementierten Modelle in Bezug auf Entwicklung der Spröbruchübergangstemperatur (*nil-ductility temperature*) mit dem Code TESPА-ROD angewendet. Hierbei zeigte sich, dass eine verzögerte Hydridausscheidung während des Quench-Prozesses die Versprödung so lange aufhält, bis durch die Plastifizierung des Hüllrohrs Spannungen abgebaut werden und letztendlich die Fragmentierung verhindert wird /SON 18/.

### **3.3.3 Lastrampen**

Im Teilbereich Lastrampen wurde das TESPА-ROD-Modell auf ein Mehrzonen-Modell erweitert. Zuvor betrachtete TESPА-ROD stets die höchstbelastete axiale Ebene im Brennstab, da hier bei KMV oder RIA die höchsten Belastungen auftreten. Mittels Gesamtstabbetrachtungen wurden Rückschlüsse auf die Spaltgasproduktion- und -druckentwicklung im Brennstab gemacht. Das aktuelle Modell ermöglicht die Simulation mehrerer Ebenen simultan, wobei programmtechnisch ein axialer Gastransport sowie eine axiale Diffusion von gelöstem Wasserstoff im Hüllrohr ermöglicht wird.

### **3.3.4 Begleitung internationaler Forschungsprogramme**

Der GRS bot sich im Verlauf des Projektes die Möglichkeit, Einfluss auf die Gestaltung des experimentellen Programms /AND 14/ /STU 19b/ des vierten internationalen *Studsvik Cladding Integrity Projects* (SCIP IV, 2019-2024) zu nehmen, welches unter der Schirmherrschaft der OECD/NEA seitens der schwedischen Firma Studsvik durchgeführt wird. Neben internationalen Partnern aus Industrie, Aufsicht und Wissenschaft nehmen auf deutscher Seite neben der GRS auch die Bundesgesellschaft für

Zwischenlagerung (BGZ) sowie die Framatome GmbH teil. Das Vorläuferprojekt SCIP III ist 2019 ausgelaufen, erste Entwürfe der Abschlussberichte liegen der GRS vor, sind aber noch nicht veröffentlicht. Verbliebene Fragestellungen werden im Rahmen von SCIP IV weiter untersucht, das mit Verzögerungen im Jahr 2020 gestartet ist. Erste Vorarbeiten und Teilnahmen am Treffen der SCIP IV Partner wurden bereits im Vorläufervorhaben RS1557 angefangen und sollen in diesem Projekt lückenlos fortgeführt werden. Insbesondere beschäftigt sich SCIP IV mit Fragen zum Brennstabverhalten während LOCA und bei Lastrampen. Dabei werden auch Experimente durchgeführt, die von der GRS vorgeschlagen wurden und das Themenfeld der Brennstofffragmentierung und der brennstabinternen Gaskommunikation behandeln. Das Ziel der vorgeschlagenen Experimente ist, die Effekte von Abbrand, Temperaturverlauf und Hüllrohrzustand auf die feinkörnige Brennstoff-Fragmentierung und den Auswurf von Brennstoff zu bestimmen. Die dabei entstandenen Daten sind für die TESP-ROD-Entwicklung von großem Wert. Eine kontinuierliche fachliche Begleitung der weiteren Versuchsausgestaltung und Durchführung ist hierzu essenziell.

Im September 2019 wurde bei der OECD-NEA das *Framework for In-pile Fuel and Material Testing* (FIDES) vorgestellt /NEA 19/. FIDES befindet sich derzeit in der Planungsphase und soll in Zukunft – insbesondere nach endgültiger Abschaltung des Halden-Reaktors – den organisatorischen und finanziellen Rahmen für internationale Bestrahlungsexperimente in Forschungsreaktoren bilden. In FIDES sind mehrere Projekte (*Joint Experimental Programmes*, JEEP) zum Brennstab- und Materialverhalten vorgesehen, deren Planungsphase bereits heute weit fortgeschritten ist:

1. P2M: Experimente zur Untersuchung der thermo-mechanischen Belastungen von Brennstäben unter Lastrampen inklusive eines zentralen Brennstoff-Schmelzens /SCK 20/.
2. LOCA MIR: Experimente zum Verhalten von WWER-Brennstäben unter LOCA mit Focus auf Bersten, Hochtemperaturoxidation und FFRD im Forschungszentrum RIAR /RUS 20/.
3. HERA: Reaktivitätstransienten im TREAT-Reaktor im Idaho National Lab mit langen Pulsweiten /INL 20/.
4. INCA: Komplementäre Kriechversuche von Hüllrohrproben im tschechischen Forschungsreaktor LVR-15 und dem Kraftwerk Temelin /CVR 20/.

Darüber hinaus befinden sich weitere Vorschläge für JEEPs in den Forschungsreaktoren CABRI (Frankreich) und NSRR (Japan) in Vorbereitung. P2M und LOCA MIR sind bereits so weit geplant, dass diese Projekte möglicherweise auch ohne ein Zustandekommen von FIDES realisiert werden. Nach der Außerbetriebnahme des Halden-Reaktors bilden die Projekte innerhalb von FIDES eine der wenigen Möglichkeiten, sich an Reaktorexperimenten zum Brennstabverhalten zu beteiligen und wertvolle Daten zur Validierung von TESPAs-ROD zu erhalten. Bereits im Vorläufervorhaben wurden die ersten Entwürfe seitens des Projektleiters technisch begleitet, weshalb in diesem Projekt eine direkte Anknüpfung möglich ist.

### **3.3.5 Abgrenzung zu anderen Vorhaben**

Die aktuell laufenden, BMUV-geförderten Vorhaben RS1552 (BREZL) und RS1588 (BREZL-II), sowie RS1577 (ACTOFAN) und UMRS1614 (ACTOFAN-II) stehen bzw. stehen in Verbindung mit dem hier dokumentierten Eigenforschungsvorhaben. Die Vorhaben RS1552 und RS1588 behandeln das Brennstabverhalten während der verlängerten Zwischenlagerung. In diesem Vorhaben werden Zeitskalen und Umgebungsbedingungen untersucht, die sich von den Zuständen im Betrieb und bei Störfällen um Größenordnungen unterscheiden. Hier wird TESPAs-ROD zur Vorhersage des mechanischen Verhaltens von Brennstäben in Zeiträumen von Jahrzehnten angewendet. Das zweite, abgeschlossene Eigenforschungsvorhaben RS1577 sowie dessen Folgevorhaben UMRS1614 (ACTOFAN-II) behandeln Brennstäbe mit gesteigerten Widerstandsverhalten bei Störfällen, den sogenannten *Accident-tolerant Fuels* (ATF). Die für den Einsatz in LWR konzipierten ATF weichen von den bisherigen oxidischen Brennstoffen mit zirkoniumbasierten Hüllrohren zum Teil deutlich ab. In diesem Vorhaben wird TESPAs-ROD einer Ertüchtigung für die Simulation von ATF-Konzepten unterzogen. Da die heute üblichen Brennstäbe jedoch auch in Zukunft weltweit weiter eingesetzt werden, dient der hier vorgestellte Vorhabenvorschlag der Weiterentwicklung von TESPAs-ROD in dessen Kernkompetenz, der Simulation des Brennstabverhaltens im Betrieb und bei Störfällen, und grenzt sich von RS1552/RS1588 und RS1577/UMRS1614 ab.

### **3.4 Der Brennstab-Code TESPAs-ROD**

Der Brennstab-Code TESPAs-ROD (*TEmperature, Strain and Pressure Analysis for a Fuel ROD*) ist ein geeignetes Werkzeug zur ganzheitlichen Betrachtung des Brennstabverhaltens. Mit diesem Simulationsprogramm können die Belastungen eines Brennstabs

im Betrieb, bei Störfällen und in der Zwischenlagerung bestimmt werden. Dabei berücksichtigt es die material-, abbrand- und temperaturabhängigen Eigenschaften des Hüllrohrs und der Pellets. TESPА-ROD entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik und ist als etabliertes Werkzeug z. B. bei den Technischen Überwachungsvereinen (z. B. TÜV NORD und TÜV SÜD) für die Analyse des Schadensumfangs im Einsatz und wird von diesen u. a. regelmäßig zur Beurteilung von Folgekernen genutzt. Das Einsatzgebiet von TESPА-ROD reicht von sehr kleinen Zeitskalen im Bereich von Millisekunden bis hin zu Jahrzehnten.

Für sehr kurze Zeiträume, wie sie z. B. bei Reaktivitätstransienten oder bei Quench-Vorgängen auftreten, bietet TESPА-ROD ein eigenständiges Modell für die Ermittlung des Wärmeübergangs zwischen Hüllrohr und Kühlmittel, das bisher erfolgreich in Benchmarkrechnungen angewandt wurde. Alternativ nutzt TESPА-ROD thermohydraulische Eingabegrößen, wie z. B. Wärmeübergangskoeffizienten. Für die Leistungsentwicklung nutzt TESPА-ROD entweder das Neutronikmodul durch Eingabe der zeitabhängigen Reaktivität oder die Eingabe der thermischen linearen Stablängenleistung. Das Neutronikmodul basiert auf punktkinetischen Gleichungen mit sechs Gruppen verzögerter Neutronen. Durch die Flexibilität der Eingabedaten können sowohl Brennstäbe im Reaktor als auch in Versuchsständen simuliert werden.

Für lange Zeiträume, wie z. B. der Lagerung bestrahlter Brennelemente, wird TESPА-ROD ebenfalls angewendet. Abgesehen von dem Wechsel zwischen Nass- und Trockenlagerung befindet sich der Brennstab in einem quasistationären Zustand, da die erzeugte Wärme gleich der abgeführten Wärme ist und sich dieses nur sehr langsam ändert. Hier soll TESPА-ROD künftig auch bei BASE eingesetzt werden. Für die Bestimmung der expliziten Zeitschrittweiten wird das Courant-Limit auf die Wärmeströme im Brennstoff angewendet. Durch eine künstliche Erhöhung der Brennstoffwärmekapazität kann hierbei die Zeitschrittweite maximiert und der Fehler begrenzt werden. Somit kann das Programm dynamisch auf kurzfristige Änderungen innerhalb ansonsten quasistationärer Zustände reagieren und effizient rechnen.

TESPА-ROD wurde von der GRS im Rahmen von zahlreichen Projekten entwickelt. Zu TESPА-ROD wurden zahlreiche Artikel in Fachzeitschriften bzw. auf Konferenzen publiziert (u. a. /BOL 19/, /SON 18/, /BOL 19b/). Die Berechnungen können bisher ausschließlich auf Computern mit einem Windows-Betriebssystem durchgeführt werden.

## 4 Reaktivitätsstörfälle (RIA)

### 4.1 Einführung

Der Reaktivitätsstörfall (RIA) ist ein Auslegungsstörfall, der sich durch eine kurzzeitige Leistungserhöhung infolge eines Reaktivitätseintrags kennzeichnet. Diese Erhöhung führt zu Temperaturgradienten in Brennstoff- und Hüllrohr von ca. 10 000 K/s.

Die experimentellen Bedingungen zur Erfassung der Phänomene, wie sie im direkten Vergleich mit einem Kühlmittelverluststörfall vorliegen, sind aufgrund des sehr steilen Temperaturgradienten nicht hinreichend durch *Out-of-pile*-Experimente nachbildbar. Dies erschwert die Entwicklung von physikalischen Korrelationen enorm. Zu nennen ist insbesondere der Wärmeübergang zwischen Brennstab-Oberfläche und Kühlmittel. Weiterhin gestaltet sich die Untersuchung der Brennstoffleistung während einer RIA-Transiente aufgrund der komplexen multiphysikalischen Wechselwirkungen am besten in Testreaktoren, die in der Lage sind, die Bedingungen der schnellen nuklearen Erwärmung im Brennstoff nachzubilden. Experimente mit Brennstoffen und hohem Abbrand über 60 MWd/kgU wurden sowohl im CABRI-Reaktor in Frankreich als auch im NSRR-Reaktor in Japan durchgeführt. Jedoch fanden die meisten dieser Experimente entweder mit stark oxidierten Hüllrohren oder mit schmaleren Pulsbreiten (5 ms – 30 ms Full-Width-Half-Maximum (FWHM)) statt, verglichen mit einem kommerziellen LWR (30 ms – 80 ms FWHM).

Während eines RIA-Störfalls kann die LWR-Brennstoffhülle durch einen von zwei Mechanismen durchbrochen werden: durch die mechanische Wechselwirkung zwischen Pellet und Hüllrohr oder durch Ausbeulen bei hohen Temperaturen und Bersten. Das Versagen der mechanischen Wechselwirkung zwischen Pellet und Hüllrohr (PCMI) tritt in der frühen Phase eines RIA-Transienten auf, wenn sich das Brennstoffpellet schnell in Richtung Hüllrohrinnenfläche ausdehnt, bevor ein effektiver Wärmeübergang vom Pellet auf das Hüllrohr stattfindet. Dies führt zu hohen Umfangsspannungen im Hüllrohr, die zu Rissausbreitung in der Zirkonium-Legierung und axial entlang des Hüllrohrs führen. Das Versagen durch PCMI ist eine spröde Versagensart und tritt bei geringen Umfangsspannungen auf, etwa 2% der azimuthalen Hüllrohrdehnung. Selbst wenn die Hülle die PCMI-Phase der RIA-Transienten übersteht, kann sie aufgrund von Aufblähungen (engl. *Ballooning*) und damit verbundener Rissbildung versagen, die durch eine längere Einwirkung hoher Temperaturen verursacht werden. Der Wärmetransport an der

Schnittstelle Kühlmittel/Hüllrohr wird erheblich reduziert, wenn der Siedeübergang an der äußeren Oberfläche des Hüllrohres stattfindet. Dadurch kommt es sowohl zu einem schnellen Anstieg der Brennstofftemperatur, was die Freisetzung von Spaltgasen fördert, als auch zu einem sprunghaften Anstieg der Hüllrohrtemperatur, was zu einem Verlust der mechanischen Festigkeit führt. Wenn der Innendruck des Brennstabs größer ist als der Systemdruck, kann sich die Hülle inelastisch verformen und schließlich Bersten. Versagen durch Aufblähung und Bersten tritt bei größeren Dehnungen auf, im Allgemeinen bei mehr als 5% azimuthaler Dehnung. Obwohl PCMI-Versagen im Allgemeinen als einschränkender angesehen wird, kann die Dominanz einer Versagensart gegenüber der anderen sowohl von den Materialbedingungen des Hüllrohres als auch von der transienten Entwicklung beeinflusst werden.

Wärmeübergangskorrelationen beruhen üblicherweise auf Messungen unter stationären Bedingungen, die sich deutlich von den hochgradig instationären Bedingungen der RIA-Transiente unterscheiden. Daher sind Versuchsreaktoren, wie z. B. der japanische NSRR- und der amerikanische TREAT-Reaktor am INL (Idaho National Laboratories, Idaho), unerlässlich für die Validierung von Brennstab-Codes zur Simulation von RIA-Transienten. In den Vorlaufervorhaben RS1193, 1518 und RS1557 wurden bereits die in TESP-ROD verwendeten Wärmeübergangsmodelle z. B. anhand der japanischen NSRR-Tests erfolgreich weiterentwickelt und validiert.

Zusätzlich zum Wärmeübergang ist das charakteristische kurzzeitige Brennstoffschwellen ein Merkmal einer RIA-Transiente. Insbesondere das Schwellverhalten von MOX-Brennstoff ist von Interesse, da die heterogene Verteilung der MOX-Bestandteile im Pellet zu einer entsprechend heterogenen Wärmeerzeugung führt und daher vermutlich ein anderes Verhalten als bei einem UO<sub>2</sub>-Brennstoff zeigt. Experimentelle Datenerhebungen aus Versuchen mit MOX-Brennstoff in RIA-Transienten stehen jedoch weiterhin aus.

Die experimentelle Betrachtung zu dem Verhalten des Brennstoffs während der RIA-Transiente über die gesamte Bestrahlungsdauer und dessen Auswirkung auf die mechanische Stabilität des Hüllrohres ist daher von unerlässlichem Mehrwert für die Modellierung in Brennstabcodes. Durch den hohen Enthalpie-Eintrag im Brennstoffpellet und der gekoppelten Temperaturerhöhung bis an die Hüllrohräußenseite muss es an den Schnittstellen Kühlmittel/Hüllrohr/Gasspalt/Brennstoffpellet zu einer ausreichenden Kühlung und Wärmeabfuhr kommen, um den Schadensumfang gemäß dem Regelwerk des Kerntechnischen Ausschusses, hier KTA 3101.3, zum Brennstoffschmelzen zu verhindern /KER 22/.

## **4.2 Transientenrechnungen im Projekt FIDES-II HERA**

Die Abschnitte 4.2 bis 4.7 können aufgrund der Sperrfrist der verwendeten experimentellen Daten noch nicht veröffentlicht werden und bleiben daher leer.

## **4.3 Ziele der Simulation**

## **4.4 Theoretische Überlegungen**

## **4.5 Modellbildung**

## **4.6 Auswertung**

## **4.7 Weiterführende Arbeiten zu HERA innerhalb FIDES-II**



## **5 Kühlmittelverluststörfälle (KMV, LOCA)**

Kühlmittelverluststörfälle (KMV, LOCA) führen zu einer schnellen Aufheizung der Brennstäbe und bedrohen die Kühlbarkeit des Kerns, da in der Dampfatmosfera nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit und damit -abfuhr gegeben ist. Laut den in den KTA-Regeln festgelegten Anforderung an die thermomechanische Stabilität der Hüllrohre bei einem LOCA muss die maximale Temperatur im Brennstoff grundsätzlich unter der Schmelztemperatur bleiben. Partielles Brennstoffschmelzen ist zulässig, sofern die Rückhaltefunktion der Brennstabhüllrohre nicht beeinträchtigt wird und großflächige Umlagerungen des Brennstoffs ausgeschlossen sind /KER 22/.

In Kap. 5.1 werden die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben mit hoher internationaler Beteiligung SCIP III hinsichtlich der Entwicklungen in LOCA und Heating-Tests (HT) vorgestellt. Kap. 5.2 beschreibt die Implementierung eines Korngrößenmodells in TESP-ROD, und Kap. 5.3 stellt schließlich eine Methode zur statistischen Auswertung der umfangreichen Daten aus SCIP III vor.

### **5.1 Erkenntnisse aus SCIP III**

Die Abschnitte 5.1 bis 5.3 können aufgrund der Sperrfrist der verwendeten experimentellen Daten noch nicht veröffentlicht werden und bleiben daher leer.

### **5.2 Implementierung eines Korngrößenmodells in TESP-ROD**

### **5.3 Statistische Auswertungen der SCIP III Versuche**



## **6 Lastrampen**

Die Abschnitte 6.1 bis 6.4 können aufgrund der Sperrfrist der verwendeten experimentellen Daten noch nicht veröffentlicht werden und bleiben daher leer.

**6.1 Modellentwicklungen zum Erreichen der Schmelzbildung im Brennstoff basierend auf dem P2M Benchmark**

**6.2 Ergebnisse des Benchmarks zu Versuch HBC4**

**6.3 Ergebnisse des Benchmarks zu Versuch xM3**

**6.4 Auswirkungen des P2M-Benchmarks auf TESPА-ROD**



## 7 Refactoring von TESPА-ROD

Die Einführung und Verwendung der Versionsverwaltungssoftware Git führte dazu, dass die Versionierung von TESPА-ROD einfacher und übersichtlicher wurde. Zusätzlich wurde TESPА-ROD an den gitLab Server der GRS angebunden, um die Datensicherung und die Datenzugriff zu erleichtern. Hierdurch wurde ein parallelisiertes Arbeiten vereinfacht. Der gemeinsame Zugriff auf den Quellcode in verschiedenen Entwicklungszweigen erfolgt getrennt für die einzelnen, TESPА-ROD-bezogenen BMUV-Eigenforschungsvorhaben RS1595 (BSVBUS-II), RS1577 (ACTOFAN) und RS1588 (BREZL-II), wobei Synergien noch effizienter identifiziert und genutzt werden können. Die in RS1577 entwickelte modernisierte GUI (*Graphical User Interface*) wurde übernommen und um mehrere Funktionen erweitert. Dazu gehören eine detaillierte Übersicht über den Rechenfortschritt, der einen gezielten Stopp der Rechnung zulässt, oder das Aufrufen eines extra Reiters für Entwicklerfunktionen und -werkzeuge. Überholte Funktionen wurden entfernt, um die Benutzeroberfläche zu verschlanken.

Um internen wie externen Mitarbeitern die Arbeiten am Code zu erleichtern, wurde damit begonnen, den TESPА-ROD Code auf eine zeitgemäße Struktur anzupassen. So wurden etwa die Funktionen in thematisch passende Module angeordnet, Variablen neu benannt, sowie der strukturelle Aufbau des Codes so angeordnet, dass er leichter verständlich ist. Des Weiteren wurden die Rechte der Funktionen und Subroutinen eingeschränkt, um das Auftreten von Fehlern weiter zu verringern. In diesem Zuge wurde auch das Eingabeformat von TESPА-ROD überarbeitet. Dieser basierte ursprünglich auf dem ASCII-Format, welches sich anfangs als vollkommen ausreichend erwies. Mit der Zunahme an Funktionen wurde der Anspruch an die Eingabe größer, was dazu führte, dass die Wahrscheinlichkeit an Einlesefehlern stieg. Aus diesem und auch anderen Gründen, wie z. B. der Austausch mit anderen Programmen, wurde entschieden, TESPА-ROD um ein modernes Input-Format zu erweitern. Es wurde das JSON-Format (JavaScript Object Notation) gewählt, welches für den Datenaustausch zwischen Anwendungen verwendet wird und Programmiersprachen-unabhängig ist. Obwohl es streng genommen bereits als Programmiersprache zählt, ist es für den Anwender gut lesbar und intuitiv anwendbar. Die Implementierung ist vollständig und wurde durch Anwendungen in verschiedenen TESPА-ROD Rechnungen überprüft. Derzeit können der neue JSON-Input und der alte ASCII-Input parallel verwendet werden, so dass Abwärtskompatibilität gegeben ist.

Da das Erstellen eines TESPА-ROD Inputs immer mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden ist, wurde hierfür ein Programm in der Programmiersprache Python entwickelt, welches den Zeitaufwand reduziert und die Fehlerhäufigkeit durch Falscheingaben minimieren soll. Dieses Programm wurde erprobt und liefert überzeugende Ergebnisse.

Ebenso wurde ein Verifizierungswerkzeug entwickelt, welches TESPА-ROD öffnet und automatisch einige Testrechnungen startet und die Ergebnisse mit Referenzwerten vergleicht. Somit wird gewährleistet, dass während der Entwicklung keine Parameter an unbeabsichtigten Stellen verändert werden. Dieses Werkzeug wurde bereits im Zusammenhang mit der Erweiterung der Eingabe ausführlich getestet.

Weiterhin wurde Erfordernis bzw. Potential für mögliche künftige weitere Entwicklungen identifiziert. Dazu gehört die Trennung von GUI und Code, und die damit verbundene Abtrennung der Differentialgleichungslöser vom restlichen Code. Dies soll eine bessere Wartbarkeit durch weniger Verflechtung und besserer Austauschbarkeit, sowie eine Beschleunigung der Rechenzeit des Codes ermöglichen, auch im Hinblick auf eine einfachere Kopplung von TESPА-ROD an andere Programme.

## 8 Internationale Zusammenarbeit

Zur Verfolgung und Begleitung internationaler Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten nahm und nimmt die GRS aktiv an den Forschungsprojekten der OECD/NEA in der *Technical Advisory Group* (TAG) und *Governing Board* (GB) im Rahmen von FIDES-II (Kap. 8.1) sowie der *Project Review Group* (PRG) und des *Management Boards* (MB) im Rahmen von SCIP IV (Kap. 8.2) teilgenommen. Weiterhin wurde am *CABRI International Project* (CIP) aktiv teilgenommen (Kap. 8.3).

### 8.1 OECD/NEA FIDES-II

Während des Berichtszeitraumes von September 2020 – August 2023 wurde an den wiederkehrenden Arbeitsgruppen Treffen des JEEP HERA teilgenommen. Während der Zeit der Corona-Pandemie wurde aus Vorsicht und zur Einhaltung der auferlegten Regularien der teilnehmenden Länder innerhalb des internationalen Projekts FIDES-II auf Präsenzveranstaltungen verzichtet und daher Onlinetreffen veranstaltet. Ab dem zweiten Halbjahr 2022 wurden wieder eine Präsenzveranstaltung in Idaho, USA durch Mitarbeitende der GRS sowie eine Veranstaltung in Prag, Tschechien besucht.

#### HERA

Während der Zeit vom 17.04. – 20.04. nahmen zwei Mitarbeiter der GRS innerhalb der TAG als auch innerhalb des GB an den Präsentationen des aktuellen Forschungsstands der einzelnen JEEP-Vorhaben teil. Wichtigstes Augenmerk wurde dem *Strategic Plan* (SP) für die kommenden zehn Jahre geschenkt, innerhalb dem sich die GRS mit einer ausführlichen Kommentierung und mit Hinweisen zum korrekten Wording engagierte. Einer der wichtigsten Vorschläge innerhalb des Meetings zum SP war die Aufnahme eines wiederkehrenden 1,5-jährlichen Treffens, das sich ausschließlich mit dem Inhalt des SP beschäftigt, da der Zeitliche Rahmen innerhalb des regulären halbjährlichen FIDES-II Meetings nicht ausreiche. Weiterhin gab es Vorschläge zur Ausarbeitung einer Materialdatenbank zur Veröffentlichung der Experimentergebnisse in Abhängigkeit der Materialeigenschaften.

FIDES-II HERA eröffnete im letzten Halbjahr 2022 einen *Blind Benchmark* zum Hüllrohr- und Pellet-Verhalten während einer Reaktivitätsstörfalltransiente, an dem die GRS teilnahm (vgl. auch Kap. 2 des vorliegenden Berichts). Die erste Phase des Benchmarks, an der sich 21 internationale Institute mit Ihren Rechencodes zum Hüllrohrverhalten

beteiligten, ist abgeschlossen. Die Ergebnisse zeigten, dass der GRS-Brennstabcode TESPА-ROD für alle angeforderten Rechnungen im Code-zu-Code Vergleich im Bereich des Mittelwertes liegt.

## **P2M**

Es wurde an mehreren FIDES Workshops teilgenommen. Zum einen erfolgte die Teilnahme am JEEP für den Benchmark zum *Power-to-Melt-and-Manoeuvrability* (P2M) Versuch (siehe Kap. 6). Vor dem eigentlichen Benchmark fand eine sog. *Simulation Exercise* statt, bei der zwei bereits durchgeführte Versuche simuliert wurden. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse der einzelnen Benchmark-Teilnehmer sollen sicherstellen, dass der eigentliche P2M-Benchmark reibungslos simuliert werden kann. Hier wurde von der GRS mit TESPА-ROD teilgenommen.

## **8.2 Studsvik Cladding Integrity Project (SCIP III und SCIP IV)**

Während des Zeitraums von September 2020 bis August 2023 nahmen Repräsentanten der GRS im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens RS1595 an den wiederkehrenden Arbeitsgruppentreffen des SCIP III und SCIP IV in Nyköping, Schweden, teil.

## **8.3 CABRI International Project (CIP)**

Im November 2022 fand das CABRI TAG Online-Meeting statt. Auf diesem Treffen wurden die vertieften Untersuchungsergebnisse des CIPQ-Versuchs vorgestellt und intensiv diskutiert. Es wurde zudem vom 26.07.2023 bis zum 27.07.2023 am CABRI Meeting am IRSN in Fontenay-aux-Roses, Frankreich, teilgenommen. Hierbei wurde über den Status der geplanten Versuche gesprochen. Ebenso wurde eine Auswahl an Brennstäben gezeigt, die sich für kommende Versuche ab 2025 eignen würden. Die Teilnehmer konnten sich dazu äußern an welchen dieser zur Auswahl gestellten Brennstäbe. Ein gesteigertes Interesse besteht.

## 9 Zusammenfassung

Anmerkung: Da die Sperrfristen der in der vorliegenden Arbeit verwendeten, experimentellen Daten aus SCIP III und FIDES zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts noch nicht alle abgelaufen waren, sind diese Daten bis auf Weiteres proprietär. Deshalb liegt der Bericht im Augenblick lediglich als Kurzfassung zur Veröffentlichung vor. Nach Ablauf der Sperrfristen wird dieser Bericht in vollem Umfang frei zur Verfügung gestellt werden. Damit ist nach September 2031 zu rechnen. Bis dahin kann der vollständige Bericht bei der GRS unter den Bedingungen einer Vertraulichkeitserklärung angefragt werden.

Im Rahmen des Eigenforschungsvorhabens RS1595 Brennstabverhalten im Betrieb und bei Störfällen – BSVBUS-II wurden die Arbeiten an der Modellentwicklung und Qualifizierung in dem GRS Brennstabe Code TESPА-ROD fortgeführt. Die Ergebnisse dieses Eigenforschungsvorhabens leisten einen wesentlichen Beitrag zur verbesserten sicherheitstechnischen Bewertung der Einhaltung der Schutzziele *Sicherer Einschluss der Aktivität* und *Kühlbarkeit des Kerns* unter Stör- und Unfallbedingungen. Folgende Punkte wurden hier bearbeitet.

### **Reaktivitätsstörfälle (RIA)**

Die Modellentwicklungen zum Hüllrohrverhalten während realistischen RIA-Transienten in TESPА-ROD werden basierend auf den Ergebnissen des HERA-Benchmarks und den noch ausstehenden Auswertungen der experimentellen Daten im entsprechenden FIDES JEEP durchgeführt.

### **Kühlmittelverluststörfälle (KMV, LOCA)**

Es wurden zahlreiche Einflussfaktoren auf das Fragmentierungsverhalten unter KMV-Bedingungen aufgrund der Datenbasis des SCIP III Programms erläutert. Auf den erläuterten Beobachtungen zur Strukturänderung der Brennstoffpellets wurde ein Korngrößenmodell im Brennstabcode implementiert das sensitiv auf Temperaturerhöhungen und einen effektiven Abbrand in Abhängigkeit des Pelletradius reagiert. Weiterhin wurde eine Methode zur statistischen Auswertung Proben gegebener und experimenteller Einflussgrößen auf die Anteile feinfragmentiert vorliegenden Brennstoffs und dem Anteil des ausgeworfenen Brennstoffs vorgestellt und anhand eines Beispiels demonstriert.

## **Lastrampen**

Die Modellentwicklungen in TESPА-ROD zum Erreichen der Schmelzbildung im Brennstoff wurden basierend auf dem P2M-Benchmark im entsprechenden FIDES JEEP durchgeführt. Hierbei wurden ausgewählte Experimente nachgerechnet. Die Ergebnisse mit TESPА-ROD wurden vorgestellt und diskutiert. Dabei zeigte sich, dass in den Rechnungen auch unter der Annahme von Leistungsvariationen bis 7 % der Schmelzpunkt von  $UO_2$  nicht erreicht wird. Einzelne Defizite des Codes bei der Berechnung der Wärmebilanz wurden identifiziert, und teilweise behoben, sowie Vorschläge zu einer künftigen Anpassung diskutiert. Hierdurch wurden rechnerisch höhere Temperaturen erzielt, die jedoch auch nicht zum Erreichen der Schmelztemperatur führen.

## **Refactoring von TESPА-ROD**

Die Entwicklung des Codes TESPА-ROD wurde auf die Versionsverwaltungssoftware Git übertragen. Die in RS1577 entwickelte modernisierte GUI (*Graphical User Interface*) wurde übernommen und um mehrere Funktionen erweitert. Ein neuer, zeitgemäßer und weniger fehleranfälliges Eingabeformat in JSON wurde entwickelt und implementiert. Der alte ASCII-Input kann parallel verwendet werden, so dass Abwärtskompatibilität gegeben ist. Weitere Werkzeuge zur verbesserten Anwendung von TESPА-ROD sowie zu den Verifikationen neuer Programmversionen wurden entwickelt und implementiert. Der Programmcode wurde besser strukturiert und Fehleranfälligkeiten reduziert. Weitere Anforderungen bzw. Potential für mögliche und sinnvolle künftige Entwicklungen an dem Brennstabcode TESPА-ROD wurden identifiziert.

## **Internationale Zusammenarbeit**

Zur Verfolgung und Begleitung internationaler Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten nahm und nimmt die GRS aktiv an den Forschungsprojekten der OECD/NEA in der *Technical Advisory Group* (TAG) und *Governing Board* (GB) im Rahmen von FIDES-II sowie der *Project Review Group* (PRG) und des *Management Boards* (MB) im Rahmen von SCIP IV aktiv teilgenommen. Weiterhin wurde am *CABRI International Project* (CIP) aktiv teilgenommen. Die Aktivitäten wurden verfolgt und begleitet. An verfügbaren Benchmark-Rechnungen aus diesen Gremien wurde, soweit für das Vorhaben relevant, aktiv teilgenommen. Die bisher erzielten Ergebnisse sind im vorliegenden Bericht beschrieben.

## **Ausblick**

In künftigen Eigenforschungsvorhaben soll die Entwicklung und Qualifizierung von TESPА-ROD weitergeführt und ausgebaut werden, um dem voranschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik weiterzufolgen und diesen mitzubestimmen. Die internationalen Aktivitäten und Kooperationen sollen dazu weiterhin auf hohem Niveau fortgeführt und nach Möglichkeit weiter intensiviert werden.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Beispiel einer Berst-Öffnung eines Brennstabs ( $74,5 \text{ GWd/t}_{\text{HM}}$ ) nach einem KMV-Test im Halden-Reaktor (links), sowie ausgeworfener feinkörniger Brennstoff /STU 19a/.....	8
Abb. 3.2	Anteil des Korngrenzengases am gesamten Spaltgas in Abhängigkeit zum Pelletabbrand /NEA 09/ .....	9
Abb. 3.3	Plutonium-Mikrosonden-Bilder für MOX-Brennstoff a) nach dem AUC-Verfahren und b) nach dem ADU-Verfahren /LEM 06/, /LIP 82/ .....	10
Abb. 3.4	Vergleich der kritischen Wärmestromdichte (WSD) .....	12



## Literaturverzeichnis

- /AND 14/ Andreades, C., Cisneros, A. T., Choi, J. K., Chong, A. Y. K., Fratoni, M., Hong, S., Huddar, L. R., Huff, K. D., Krumwiede, D. L., Laufer, M. R., Munk, M., Scarlet, R. O., Zweibaum, N., Greenspan, E., Peterson, P. F.: Technical Description of the "Mark 1" Pebble-Bed Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor (PB-FHR) Power Plant. University of California, Berkeley (UC Berkeley), Department of Nuclear Engineering, UCBTH-14-002, 2014.
- /BMBF 21/ Richtlinie zur Förderung von Zuwendungen im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung in der nuklearen Sicherheitsforschung und der Strahlenforschung, Bundesanzeiger vom 29.07.2021 zuletzt geändert 30. Juli 2021 (BAnz AT 29.07.2021 B5).
- /BMWi 00/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.): Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland, Bericht der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) berufenen Arbeitsgruppe (Evaluierungskommission). 21. Januar 2000.
- /BMWi 18/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Hrsg.: Bundesregierung (BR), 100 S., September 2018.
- /BMWi 19/ Förderbekanntmachung Nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung im 7. Energieforschungsprogramm "Innovationen für die Energiewende" zuletzt geändert 7. Januar 2019 (BAnz AT 22.01.2019 B1).
- /BOL 19a/ Boldt, F., Sonnenburg, H.-G.: Transient MOX fuel swelling in TESP-ROD code applied at CABRI RIA tests. Proceedings of GLOBAL/TOPFUEL 2019, 2019.
- /BOL 19b/ Boldt, F.: Implementation of Hydrogen Solid Solubility Data and Precipitation Threshold Stresses in the Fuel Rod Code TESP-ROD. Nuclear Engineering and Radiation Science, DOI 10.1115/1.4042118, 2019.

- /BOL 20/ Boldt, F., Sonnenburg, H.-G., Boldt, F.: Brennstabverhalten im Betrieb und bei Störfällen. GRS-Bericht, GRS-609, 85 S., ISBN 978-3-947685-95-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2020.
- /COR 22/ Corson, J., Chung, A., Kyriazidis, L., Bales, M.: NRC's Research Information Letter on Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal. In: TopFuel 2022 Light Water Reactor Fuel Performance Conference (Hrsg.): Conference Proceedings, TopFuel 2022. TopFuel 2022, Raleigh, NC, 9. - 13. Oktober 2022, S. 566–575, ISBN 978-0-89448-787-3, American Nuclear Society, ANS, 2022.
- /CVR 20/ Centrum výzkumu Řež (CVŘ): In-pile Creep Studies of ATF Claddings, Joint project proposal for OECD/NEA Framework, Project Acronym INCA. CVŘ, UJV, VTT, CEA, Alvel, 12 S., Februar 2020.
- /INL 20/ Idaho National Laboratory (INL): High-burnup Experiments in Reactivity Initiated Accidents (HERA). Hrsg.: Idaho National Laboratory (INL), Department of Energy (DOE), INL/EXT-20-57844, 18 S., März 2020.
- /KER 22/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 3101.3 Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung. Regelwerk:2022-11, 2022.
- /KVKT 13/ Kompetenzverbund Kerntechnik: Nukleare Sicherheitsforschung; Neuorientierung an aktuellen energiepolitischen Rahmenbedingungen. März 2013.
- /LEI 17/ Leininger, S.: Experimentelle Untersuchungen der Kühlbarkeit prototypischer Schüttungskonfigurationen unter dem Aspekt der Reaktorsicherheit, Dissertation. Universität Stuttgart, IKE (IKE), 2017.
- /LEM 06/ Lemoine, F.: Estimation of the Grain Boundary Gas Inventory in MIMAS/AUC MOX Fuel and Consistency with REP-Na Test Results. Journal of Nuclear Science and Technology, Bd. 43, Nr. 9, S. 1105–1113, DOI 10.3327/jnst.43.1105, 2006.

- /LIP 82/ Lipinski, R.: A Model for Boiling and Dryout in Particle Beds. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), NUREG-CR-2646; SAND82-0765, 198 S., 1982.
- /NAG 05/ Nagase, F., Fuketa, T.: Behavior of Pre-hydrated Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 42, No.2, S. 209–218, 2005.
- /NEA 16/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Report on Fuel Fragmentation, Relocation, Dispersal (FFRD). NEA/CSNI/R(2016)16, 221 S.: Paris, 2016.
- /NEA 19/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Preparing the Kick-off of FIDES Joint Experimental Programmes. OECD Conference Centre, 3.-5. September 2019, erreichbar unter <https://www.oecd-nea.org/download/science/workshops/fides/>, abgerufen am 20. Januar 2020.
- /NOI 08/ Noirot, J., Desgranges, L., Lamontagne, J.: Detailed characterisations of high burn-up structures in oxide fuels. Journal of Nuclear Materials, Nr. 372, S. 318–339, 2008.
- /RAH 13/ Rahman, S.: Coolability of Corium Debris under Severe Accident Conditions in Light Water Reactors, Dissertation. Universität Stuttgart, IKE (IKE), IKE 2-155, 143 S., 2013.
- /RUS 20/ Russian Institute of Atomic Reactors: JEEP "LOCA MIR" proposed for NEA FIDES Programme, LOCA Simulation Test with High Burn-up Gd-doped Fuel in MIR M1 Reactor. Hrsg.: Rosatom State Corporation Enterprise (ROSATOM), 14 S., Juni 2020.
- /SCK 20/ SCK-CEN: Join Experimental Project (JEEP) "P2M" - "Power to melt and maneuverability". 15 S., Juni 2020.
- /SIA 15/ Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 (Si-Anf) in der Fassung von 3. März 2015 - Neufassung (BANz AT 30.03.2015 B2).

- /SIA 22/ Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 (Si-Anf) zuletzt geändert 25. Februar 2022 (BAnz AT 15.03.2022 B3).
- /SON 17/ Sonnenburg, H.-G., Boldt, F.: Brennstabverhalten im Normalbetrieb, bei Störfällen und bei Langzeitlagerung. GRS-Bericht, GRS-464 // 464, 108 S., ISBN 978-3-946607-47-2, DOI 10.2314/GBV:1011412691, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2017.
- /SON 18/ Sonnenburg, H.-G., Boldt, F.: Dynamic hydride precipitation during LOCA quench process can significantly preserve cladding's ductility. In: European Nuclear Society (ENS) (Hrsg.): Reactor Fuel Performance 2018. TOPFUEL 2018, Prague, Czech Republic, 30. September - 4. Oktober 2018, 2018.
- /STU 19a/ Studsvik: SCIP III - Subtask 1.1: Fuel fragmentation, relocation and dispersal / DRAFT, Final summary report. Studsvik Nuclear AB, STUDSVIK/N-19/105, 132 S.: Nyköping, Schweden, 16. Oktober 2019.
- /STU 19b/ Studsvik: SCIP IV - Technical Description, Studsvik-SCIP IV-220. Studsvik Nuclear AB, N-18-027 public Rev. 3, 69 S.: Nyköping, Schweden, 2. Mai 2019.

**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](http://www.grs.de)