

## **RSK - STELLUNGNAHME**

### **Sicherheitsaspekte des Einsatzes hochabgebrannter Brennelemente unter Reaktivitätsstörfall-Bedingungen**

vom 27.01.2005 (379. Sitzung)

#### **1 Auftrag**

In der 372. Sitzung der RSK am 27.05.2004 bat das BMU die RSK um eine Stellungnahme zur zulässigen Enthalpieerhöhung für Brennstäbe mit bzw. ohne Oxidschichtabplatzungen bei Reaktivitätsstörfällen (RIA).

#### **2 Gang der Beratung**

*Vorbemerkung: Die RSK hatte auf ihrer 320. Sitzung am 16.09.1998 eine Stellungnahme zum Einsatz von Brennelementen mit hohen Abbränden abgegeben [1]. Diese Stellungnahme enthält unter anderem Empfehlungen, die sich an Betreiber von Kernkraftwerken richten und auf die Auslegung von Brennelementen beziehen. Insbesondere wird eine vertiefte experimentelle Absicherung der Brennelementauslegung empfohlen. In ihrer Stellungnahme hatte die RSK an Hersteller und Betreiber unter anderem den Wunsch gerichtet,*

- *abbrandabhängige RIA-Defektgrenzen für UO<sub>2</sub>- und MOX-Brennstäbe auf experimenteller Datenbasis durch Beteiligung an internationalen Experimenten (CABRI) zu ermitteln und*
- *einen Erfahrungsbericht zu internationalen Messungen zur RIA-Defektgrenze bei Hochabbrand von Brennelementen zu erhalten*

*und die Ansicht geäußert, dass neben dem Brennstab-Auslegungscode des Herstellers ein instationärer Brennstab-Code für RIA-Bedingungen entwickelt werden muss.*

*Im RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB wurde der Einsatz von Brennelementen mit hohen Abbränden in der 122. Sitzung am 08.12.1999 behandelt.*

Zur vertieften Vorbereitung der Beratung sicherheitstechnischer Fragen bei hohen Abbränden wurde auf der 330. Sitzung der RSK am 04.05.2000 in Abstimmung mit dem Vorsitzenden des RSK-Ausschusses REAKTORBETRIEB die Einrichtung einer Arbeitsgruppe HOCHABBRAND im RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB vorgeschlagen. Diese Arbeitsgruppe erhielt von der RSK folgendes Mandat:

Sie berät sicherheitstechnische Fragen des Einsatzes von hochabgebrannten Brennelementen in Leichtwasserreaktoren. Ihre Beratungen dienen der Vorbereitung der Meinungsbildung und Stellungnahme

im RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB und in der RSK.

Bezüglich RIA beriet die Arbeitsgruppe HOCHABBRAND auf ihrer 2. Sitzung am 18.01.2001, auf ihrer 3. Sitzung am 22.03.2001, auf ihrer 8. Sitzung am 19.06.2002, auf ihrer 9. Sitzung am 03.09.2002, auf ihrer 10. Sitzung am 19.11.2002 und auf ihrer 11. Sitzung am 20.02.2003 [2-21]

- die PIRT-Aktivitäten und internationale Einschätzung der mit höheren Abbränden verbundenen Phänomene,
- den Bericht des Herstellers SNP zum Einsatz von Brennelementen mit hohen Abbränden,
- den Bericht des Herstellers Westinghouse Atom zum Erfahrungsstand zu Brennelementen mit hohen Abbränden bei SWR,
- die neuen Ergebnisse und Versuchsprogramme zum Verhalten hochabgebrannter Brennelemente bei RIA,
- die Ergebnisse einer Literaturlauswertung zu den Auswirkungen von Hochabbrand bei RIA und
- den Einfluss der Pulsbreite bei RIA auf Brennstabbeanspruchungen.

Den vorliegenden Bericht hat die Arbeitsgruppe HOCHABBRAND in ihrer 12. und 13. Sitzung am 24.04.2003 und am 03.07.2003 beraten und im Anschluss im Umlaufverfahren entsprechend § 16 (1) der Satzung der Reaktor-Sicherheitskommission vom 22. Dezember 1998 gebilligt.

In seiner 158. Sitzung am 25.02.2004 wurde der RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB u.a. über den oben dargestellten Bericht der Arbeitsgruppe HOCHABBRAND informiert. Der Entwurf der Stellungnahme wurde in der 161. Sitzung am 25.08.2004 vom RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB verabschiedet. Die RSK beriet diesen Entwurf und verabschiedete die Stellungnahme auf der 379. Sitzung am 27.01.2005.

### **3 Angewandte Bewertungsmaßstäbe**

#### **3.1 Anforderungen**

Bei den der Auslegung für deutsche DWR- und SWR-Anlagen zugrunde liegenden Reaktivitätsstörfällen, also beispielsweise dem „Steuerelementauswurf“ im DWR und dem „Steuerstabausfall (Rod Drop)“ im SWR, sind für alle Abbrand- und Kernzustände die Anforderungen zu erfüllen, die sich aus den BMI-Sicherheitskriterien, den RSK-Leitlinien für DWR und den Störfalleitlinien ergeben. Nach dem BMI-Sicherheitskriterium 3.1 zur Reaktorauslegung muss der Reaktorkern so ausgelegt und hergestellt sein, dass die Einhaltung der jeweils für den bestimmungsgemäßen Betrieb und für Störfälle spezifizierten Grenzwerte für die Belastung der Brennelemente und die übrigen sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteile während ihrer gesamten Einsatzzeit gewährleistet ist. Nach den RSK-Leitlinien, Kapitel 3.1 (10) und (11) ist die Beherrschbarkeit eines unkontrollierten Ausfahrens von Steuerelementen und des Auswurfes eines Steuerelementes nachzuweisen. Es ist nachzuweisen, dass die Energiefreisetzung infolge des Auswurfes des

Steuerelementes mit dem größten Reaktivitätswert mit Sicherheit zu keiner Beschädigung des Reaktorkerns und des Reaktorkühlsystems führt. Des Weiteren werden in den Störfalleitlinien die Reaktivitätsstörfälle als beherrscht angenommen, so dass für sie keine radiologische Betrachtung erforderlich ist. Gemäß KTA 3101.2, Kapitel 4.1 a) soll es bei Störfällen, die zu einer Erhöhung der Leistungsdichte im Kern führen, nicht zu unzulässigen Belastungen der Brennstäbe kommen. Die Einhaltung dieser Anforderungen wird derzeit in der Praxis dadurch nachgewiesen, dass die Erhaltung der Brennstabintegrität für RIA gezeigt wird.

### 3.2 Prüfkriterien

Als Kriterium für die Integrität des Brennstabes wird die „Radial gemittelte Enthalpieerhöhung“ bzw. die „Radial gemittelte Enthalpie“ im höchst-belasteten Brennstab herangezogen. Der zulässige Wert ist aus dem Vergleich mit der experimentell bestimmten Datenbasis zu bestimmen.

Siemens/Framatome ANP und die EVU stützen sich für höheren Abbrand auf eine abbrandabhängige Defektgrenze der Brennstäbe ab, die sich an der von EPRI vorgeschlagenen ROS-Kurve orientiert. Die vorgeschlagene Defektgrenze für die Brennstabintegrität sinkt dabei von 170 cal/g Brennstoffenthalpieerhöhung für Brennstäbe mit sehr geringem Abbrand auf 100 bzw. 60 cal/g für Brennstäbe ohne bzw. mit lokalen Oxid-Abplatzungen bei hohen Stababbränden von  $> 50$  MWd/kg für DWR. Für SWR werden für den Einzelfall zwischen Betreiber und Gutachter festgelegte Grenzkurven verwendet, die sich konservativ an der ROS-Kurve von EPRI orientieren.

In ihrer Stellungnahme aus dem Jahr 1998 stimmt die RSK der vorläufigen Nutzung des von Siemens, heute Framatome-ANP, vorgeschlagenen Wertes von 100 cal/g für Brennstäbe mit einem Abbrand  $> 50$  MWd/kg und Hüllrohren ohne Oxidschichtabplatzungen zu und empfiehlt gleichzeitig, die Defektgrenzen mit einer verlässlichen experimentellen Datenbasis für die in deutschen LWR eingesetzten Brennstäbe zu ermitteln.

Bei den Gutachtern wird derzeit der quantitativen Betrachtung von RIA-Störfällen die von der RSK vorgeschlagene Grenzkurve für die maximale radial gemittelte Brennstoffenthalpieerhöhung für Brennstababbrände  $> 50$  MWd/kg zugrunde gelegt (100 cal/g). Für Brennstäbe mit Hüllrohren, bei denen Oxidabplatzungen auftreten können, werden 60 cal/g als Defektgrenze herangezogen. Unterhalb des Abbrandes von 50 MWd/kg wird die von EPRI vorgeschlagene abbrandabhängige Grenzkurve herangezogen, die für niedrige Abbrandwerte nach oben hin bei 140 cal/g abgeschnitten wird. Damit ergibt sich bis zu einem Abbrandwert von ca. 33 MWd/kg als obere Defektgrenze ein Wert von 140 cal/g für die maximale radial gemittelte Brennstoffenthalpieerhöhung. Die Werte werden sowohl auf Uran als auch auf MOX-Brennstäbe angewandt.

Darüber hinaus wurde und wird von den Gutachtern zur Beurteilung von Folgekernen das gesamte Feld der zum Zeitpunkt der Prüfung vorliegenden experimentellen Ergebnisse herangezogen. Dabei wird überprüft, inwieweit die experimentellen Ergebnisse auf den zu betrachtenden Folgekern der jeweiligen Anlage übertragbar und im Hinblick auf die Defektgrenzen zu berücksichtigen sind (Einzelfallbetrachtung). Bis zur endgültigen Absicherung des Verlaufs der Grenzkurve werden auch die von ausländischen Institutionen benutzten Grenzkurven in die Betrachtung einbezogen.

So wird beim TÜV Nord aufgrund von neuen Erkenntnissen, die im Zusammenhang mit RIA Experimenten mit SWR Brennstäben in Japan veröffentlicht wurden, auch geprüft, ob SWR-Brennstäbe mit Abbränden > 55 MWd/kg berechnete Enthalpieerhöhungen > 50 cal/g aufweisen, um ggf. anhand einer Einzelfallbetrachtung zu überprüfen, ob eine niedrigere Defektgrenze aufgrund der japanischen Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Hinsichtlich der Festlegung der Werte für die Defektgrenze kommt die RSK zu folgenden Ergebnissen: Mit dem Nachweis der Brennstabintegrität ist auch der Nachweis geführt, dass es mit Sicherheit zu keiner Beschädigung des Reaktorkerns und des Reaktorkühlsystems infolge der zu unterstellenden Reaktivitätsstörfälle kommt. Die erforderliche Vorsorge gegen Brennstoffdispersion in das Kühlmittel ist dann konservativ getroffen, denn bei Anwendung der Prüfkriterien für die Brennstabintegrität ist konservativ sichergestellt, dass der Abstand zu jener Versagensgrenze ausreichend groß ist. Da im Hinblick auf die radiologischen Folgen die Nachweise realistisch geführt werden können, können ebenfalls die Prüfkriterien für die Brennstabintegrität realistisch festgelegt werden.

Für den Fall, dass die Übertragbarkeitsbedingungen (s. u. Abschnitt 4.2) erfüllt sind, sollen nach Ansicht der RSK diejenigen abbrandabhängigen Werte für die Enthalpieerhöhungen als Defektgrenze herangezogen werden, bei denen es im Experiment zu keinen Brennstabschäden gekommen ist. Sollen im Einzelfall die Werte über den Erfahrungsbereich hinaus extrapoliert werden, so ist die Zulässigkeit der Extrapolation unter Berücksichtigung des vollen Umfangs der vorhandenen experimentellen Daten anhand von detaillierten theoretischen Überlegungen, ggf. unter Verwendung von transienten Brennstabcodes, zu begründen. Das letztere gilt auch, falls im Einzelfall für die Festlegung der Werte für die Defektgrenze experimentelle Daten herangezogen werden sollen, für die die Übertragbarkeitsbedingungen nur zum Teil erfüllt sind.

### **3.3 Prüfumfang**

Das Kriterium zur Erhaltung der Brennstabintegrität bei Reaktivitätsstörfällen wird für jede Nachladung geprüft. Die Berechnung der maximalen Brennstoffenthalpie oder der maximalen Enthalpieerhöhung erfolgt für repräsentative Kernbeladungen mit 3D-Kernmodellen. Die Übertragung und Prüfung für konkrete Kernnachladungen bezieht sich auf die wesentlichen Kenngrößen, wie die maximale Reaktivitätszufuhr durch das Steuerelement, die Leistungsdichteverteilung, die kinetischen Parameter wie  $\beta_{\text{eff}}$  und die Lebensdauer der prompten Neutronen sowie die Reaktivitätskoeffizienten.

## **4 Bewertung**

### **4.1 Maßgebende Hochabbrandeffekte bei Reaktivitätsstörfällen**

Eine ausführliche Beschreibung der Veränderungen des Brennstoffpellets, des Gasspaltes und des Hüllrohres bei hohen Abbränden wurde im Abschnitt 3.3.1 im Bericht „Sicherheitsaspekte des Einsatzes hochabgebrannter Brennelemente im bestimmungsgemäßen Betrieb, unter Kühlmittelverlust-(KMV-) sowie unter Reaktivitätsstörfall-(RIA-)Bedingungen“ (Anlage zum Ergebnisprotokoll der 372. RSK-Sitzung am 27.05.2004) gegeben.

Bei einem Reaktivitätsstörfall erfolgt die Belastung des Brennstabes durch einen schnellen, hohen Leistungspeak. Dieser Leistungspeak führt zur thermischen Aufheizung des Brennstoffpellets. Aufgrund der thermischen Dehnung des Brennstoffs kommt es zu einer mechanischen Wechselwirkung mit dem Hüllrohr (PCMI), die als dominanter Belastungsmodus für die Brennstäbe gilt. In der internationalen Fachliteratur wird der Beitrag der transienten Spaltgasfreisetzung aus der feinkörnigen Hochabbrandstruktur des Pellets zur Belastung des Hüllrohres kontrovers diskutiert [6]. Die Bestimmung der transienten Spaltgasfreisetzung aus der Hochabbrandstruktur ist Gegenstand von experimentellen Untersuchungen im französischen SILENE Programm.

Das Verhalten des Brennstoffpellets bei dem schnellen Leistungspeak bestimmt die Belastungen des Hüllrohres. Das Verhalten des Hüllrohres gegenüber diesen Belastungen hängt von dessen Duktilität und der mechanischen Festigkeit ab, diese wiederum von der Temperatur und dem Hüllrohrzustand. Von Bedeutung für den Hüllrohrzustand sind die Oxidschichtdicke, das Auftreten von Abplatzungen der Oxidschicht, der mittlere Wasserstoffgehalt, die lokale Wasserstoffverteilung im Hüllrohr einschließlich der Hydridorientierung in radialer oder tangentialer Richtung sowie lokale Korrosionseffekte. Die Duktilität des Hüllrohres wird entscheidend vom Wasserstoffgehalt beeinflusst. Der Wasserstoff entsteht im Zuge der Oxidation des Zirkoniums und wird zu einem bestimmten, vom Werkstoff abhängigen Teil vom Hüllrohr aufgenommen. Oberhalb von temperaturabhängigen Grenzkonzentrationen scheidet sich der Wasserstoff in Form von Hydriden aus. Der negative Einfluss der Hydridausscheidungen auf die Hüllrohrduktilität hängt von deren Konzentration und Orientierung ab. Radial orientierte Hydride vermindern die Duktilität stärker als tangential orientierte Hydride. Die Abplatzungen der Oxidschicht können zur Bildung lokaler Kaltstellen und dadurch zur Bildung lokaler Hydridakkumulationen führen, die unter Umständen eine starke Verminderung der Hüllrohrduktilität bewirken.

In DWR kommen unterschiedliche Hüllrohrlegierungen zum Einsatz, die ein deutlich unterschiedliches Korrosionsverhalten zeigen. Auch der Anteil des vom Hüllrohr aufgenommenen Wasserstoffs hängt vom Werkstoff ab. Daraus ergeben sich bei gleicher Standzeit wesentliche Unterschiede hinsichtlich des Korrosionsniveaus und des Wasserstoffgehaltes. Die zunehmend eingesetzten ZrNb-Werkstoffe, z. B. M5, zeigen geringere Korrosion und verminderte Wasserstoffaufnahme im Vergleich zu Zry-4, so dass insgesamt von einem günstigeren Ausgangszustand für das transiente Brennstabverhalten auszugehen ist.

Beim SWR ist aufgrund der im Vergleich zum DWR sehr viel geringeren Oxidation der Zry-2-Hüllrohre auch bei höheren Abbränden nicht mit Oxidabplatzungen zu rechnen. Damit bleibt auch die Wasserstoffaufnahme des Hüllrohres erheblich geringer als beim DWR. Allerdings gibt es für SWR-Hüllrohre in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens Anzeichen dafür, dass sich bei höheren Abbränden die Hydride vermehrt radial orientiert ausscheiden können.

Für das Brennstabverhalten unter den Bedingungen von Reaktivitätsstörfällen sind auch die Pulsbreite des Leistungspeaks und die Anfangstemperatur des Kühlmittels bzw. des Hüllrohres von Bedeutung. Berechnungen haben gezeigt, dass geringere Pulsbreiten zum Aufbau höherer Spannungen im Hüllrohr bei gleichzeitig niedrigeren Hüllrohrtemperaturen führen. Hierdurch ergibt sich eine höhere Hüllrohrbelastung bei vergleichbarer Enthalpieerhöhung. Niedrigere Hüllrohrtemperaturen sind mit einer verringerten Duktilität des Hüllrohres verbunden und verstärken den Einfluss des Wasserstoffs auf die Duktilität des Hüllrohres. Der Einfluss der Hüllrohrtemperatur auf die Duktilität zeigt sich deutlich in den Materialtests. Daraus folgt,

dass die niedrigere Anfangstemperatur bei den Reaktivitätsstörfällen im SWR, die aus „Nulllast kalt“-Bedingungen heraus erfolgen, die duktilitätsmindernde Wirkung des Wasserstoffs im Vergleich zu DWR-Bedingungen verstärkt.

## 4.2 Folgerungen

Auf der Grundlage ihrer Beratungen zum Verhalten von hochabgebrannten Brennelementen unter Reaktivitätsstörfallbedingungen beantwortet die RSK folgende Fragen:

1. Welche Übertragbarkeitsbedingungen für die experimentellen Ergebnisse sind in der Nachweisführung bei der Ableitung der Brennstab-Defektgrenzen zu beachten?
2. Sind die in der Stellungnahme der RSK [1] enthaltenen Kriterien weiterhin geeignet?
3. Sind die Empfehlungen der RSK-Stellungnahme aus dem Jahr 1998 zum RIA umgesetzt worden?

Zur 1. Frage der Übertragbarkeitsbedingungen der experimentellen Ergebnisse in der Nachweisführung kommt die RSK zu folgendem Ergebnis:

Die vorliegenden experimentellen Ergebnisse zur Bestimmung der Defektgrenze der Brennstabhüllrohre sollten im vollen Umfang herangezogen werden. Für die Übertragbarkeit der experimentellen Datenbasis sind die wesentlichen Faktoren: der Abbrand, der Brennstofftyp ( $\text{UO}_2$  oder MOX), der Hüllrohrzustand bezüglich äußerer Korrosion, Wasserstoffgehalt und Hydridorientierung, die Spaltweite und der Werkstoff des Hüllrohres sowie die Versuchsbedingungen bezüglich Pulsbreite und Ausgangstemperatur.

Für die Bewertung des Brennstabverhaltens sind die in den Kernberechnungen zum Reaktivitätsstörfall bestimmten Werte für die radial gemittelte Brennstoffenthalpie oder Brennstoffenthalpieerhöhung mit den experimentellen Ergebnissen und der daraus abgeleiteten Defektgrenze zu vergleichen. In den Berechnungen sollten, wie bisher üblich, konservative Annahmen für die Modellparameter und die Anfangs- und Randbedingungen berücksichtigt werden.

Die RSK empfiehlt, dass die Betreiber und Gutachter der RSK einen Sachstandsbericht über die in der Nachweisführung eingesetzten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Enthalpieerhöhung geben. Diese Sachstandsberichte sollten die verwendeten Modelle, die Erfassung der abbrandabhängigen Effekte und die Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Berechnungen darstellen.

Zur 2. Frage der Eignung der Bewertungsgröße „Radial gemittelte Enthalpieerhöhung“ und der bisher zu Grunde gelegten Kriterien entsprechend der RSK-Stellungnahme [1] stellt die RSK fest:

Die vorhandenen experimentellen Ergebnisse zum Brennstabverhalten unter Reaktivitätsstörfallbedingungen, also die früheren Ergebnisse aus den SPERT-, PBF- und NSRR-Versuchen wie auch die neueren Ergebnisse aus dem CABRI- und NSRR-Versuchsprogramm, werden durch Angabe der radial gemittelten Enthalpieerhöhung charakterisiert. Die Brennstabdefektgrenze entspricht dem am Versagenszeitpunkt erreichten Wert der radial gemittelten Gesamtenthalpie des Brennstoffs bzw. der radial gemittelten

Enthalpieerhöhung.

International ist bisher nicht einheitlich festgelegt, bei welchen Werten für die Enthalpieerhöhung bzw. Enthalpie in Abhängigkeit des Abbrandes Brennstabdefekte nicht auszuschließen sind. Maßgebend ist stets die vorhandene experimentelle Datenbasis, gegebenenfalls ergänzt durch Auswertungen mit transienten Brennstabcodes.

Die RSK hatte in ihrer Stellungnahme [1] zu den abbrandabhängigen Defektgrenzen bei RIA-Störfällen der vorläufigen Nutzung eines von Siemens vorgeschlagenen Wertes von 100 cal/g bei einem Abbrand  $> 50$  MWd/kg (Brennstabsegment) ohne Oxidabplatzungen zugestimmt. Die Ergebnisse der neueren Experimente bestätigen diesen Wert. Da es in zwei Versuchen (REP Na1, REP Na7) jedoch zu einer Dispersion von Brennstoff gekommen ist, darunter ein Fall mit einer Pulsbreite von 40 ms, schlägt die RSK eine Neubewertung des Sicherheitsabstandes für DWR vor und empfiehlt bei RIA-Störfällen für Brennstäbe ohne Oxidabplatzungen (mit fortgeschrittenen, korrosionsresistenten Hüllrohrmaterialien, wie z. B. Duplex oder M5) einen Grenzwert von 80 cal/g bei einem Brennstabsegment-Abbrand größer 65 MWd/kg (siehe Abbildung 1).

Für Brennstäbe, bei denen Oxidabplatzungen zu unterstellen sind, ist bei Abbränden  $> 50$  MWd/kg wie bisher ein Grenzwert von 60 cal/g heranzuziehen (siehe Abbildung 1).

Für SWR können für die Brennstabdefektgrenze die gleichen Grenzwerte wie für DWR angesetzt werden, also 80 cal/g für Abbrände größer 65 MWd/kg und Brennstäbe ohne Oxidabplatzungen. Bei SWR RIA-Störfällen mit niedriger Anfangsleistung oder aus Nulllast kalt ist bei berechneten Enthalpiefreisetzen  $> 60$  cal/g für Brennstabsegmentabbrände  $> 50$  MWd/kg eine Einzelfallprüfung erforderlich. Hierbei ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse japanischer SWR RIA-Versuche zum Brennstabversagen im Hinblick auf den Korrosionszustand der eingesetzten Hüllrohre zu bewerten. Dies kann z. B. dann zu einer Zulässigkeitsaussage führen, wenn der Hydrierungszustand besser ist als in japanischen Anlagen (Hüllrohrzustand). Auch aus der Berücksichtigung der größeren Pulsbreite als bei den Versuchen in Japan kann die Zulässigkeit abgeleitet werden.

Für MOX-Brennstoff liegen im Abbrandbereich zwischen 47 und 65 MWd/kg nur drei Datensätze aus integralen Experimenten vor. Es ist aus Sicht der RSK auf Basis dieser drei Experimente sowie unter Berücksichtigung weiterer Ergebnisse aus MOX-spezifischen Einzeleffektversuchen nicht zu erwarten, dass die bisher in Experimenten beobachteten Unterschiede in der transienten Spaltgasfreisetzung zwischen  $UO_2$ - und MOX-Brennstoff bei höheren Abbränden so groß werden, dass sie die Hüllrohrbelastungen maßgebend erhöhen. Die laufenden bzw. zukünftigen experimentellen und analytischen Untersuchungen zur transienten Spaltgasfreisetzung sind jedoch im Verlauf der Abbranderhöhungen für MOX-Brennelemente entsprechend zu verfolgen.

Die o. g. Grenzkurven für die Erhaltung der Brennstabintegrität können daher aus Sicht der RSK grundsätzlich für  $UO_2$ - und MOX-Brennstoff angesetzt werden, da nach dem bisherigen Kenntnisstand der Hüllrohrzustand und seine Fähigkeit, die Belastungen abzutragen, die entscheidenden Einflussfaktoren für die Brennstabintegrität sind. Bei Begrenzung der Hüllrohrkorrosion (keine Oxidschicht-Abplatzungen) ist eine explizite Abbrandbegrenzung nicht erforderlich, die zulässigen Abbrände ergeben sich aus dem Bereich der experimentellen Datenbasis und den o. g. Übertragbarkeitsbedingungen.

Bei der Herleitung dieser Defektgrenzen wurde berücksichtigt, dass bei den in deutschen DWR- und SWR-Anlagen derzeit realisierten Kernauslegungen die Pulsbreite des Leistungspeaks bei einem Reaktivitätsstörfall größer als 30 ms ist.

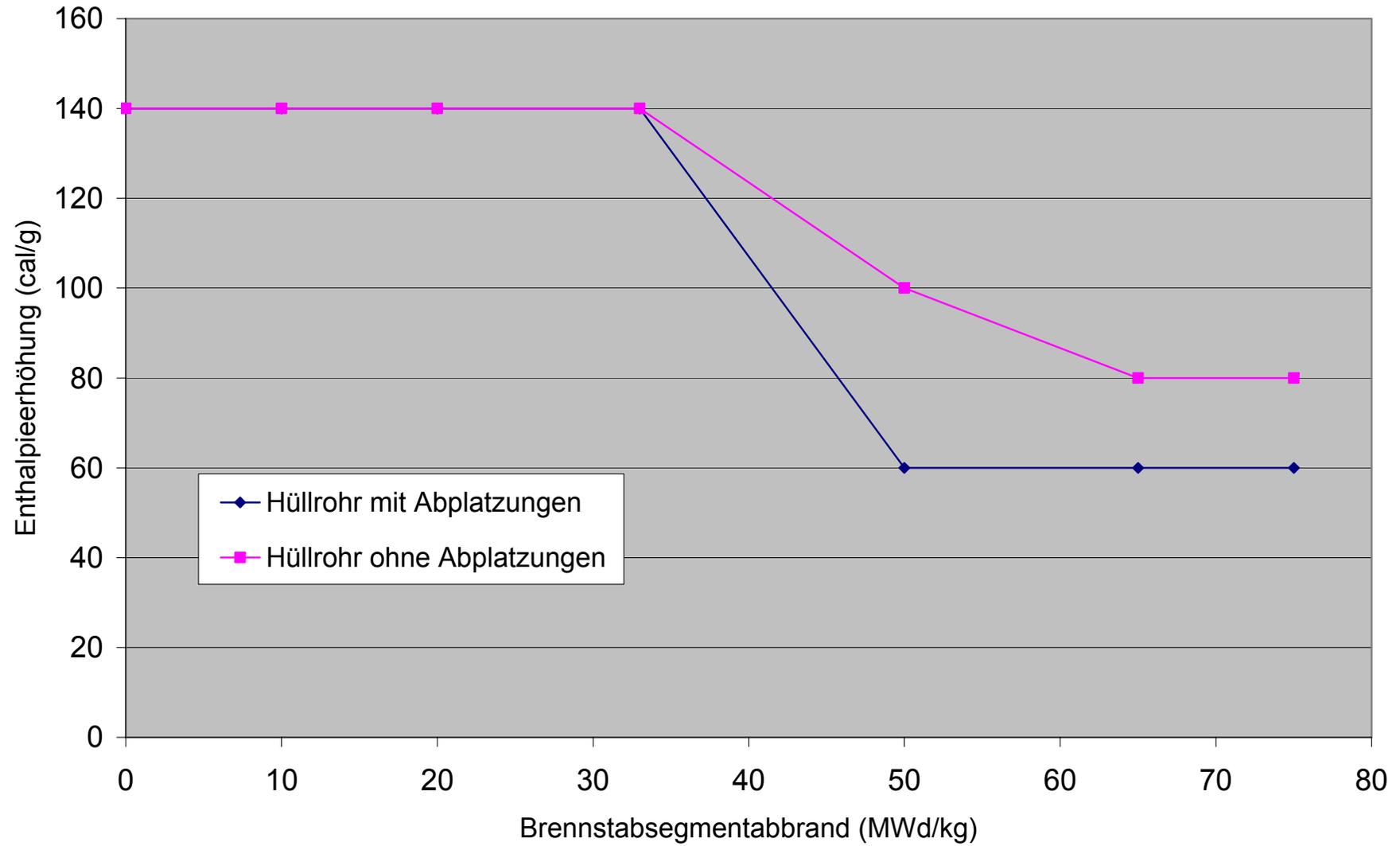
Aus den Auslegungsbedingungen für die Fertigung und den Transport der Brennelemente wie auch aus den heute üblichen Brennelementeinsatzstrategien ergibt sich eine Begrenzung der maximalen Urananreicherung auf 5 %. Unter diesen Bedingungen sind im Reaktoreinsatz maximale Brennstababbrände von etwa 75 MWd/kg zu erreichen.

Zur 3. Frage der Umsetzung der RSK-Empfehlungen zur RIA-Problematik kann festgestellt werden, dass der Empfehlung zur Erweiterung der experimentellen Datenbasis für hohe Abbrände durch die Beteiligung der deutschen Betreiber an dem CABRI-Waterloop Projekt Rechnung getragen wurde. Die deutschen Betreiber stellen für das Versuchsprogramm auch eigene Brennstäbe mit hohen Abbränden zur Verfügung. Von dem Versuchsprogramm wird erwartet, dass in ausreichendem Umfang experimentelle Ergebnisse für die im Reaktoreinsatz geplanten höheren Abbrände erzielt werden, und das Verständnis für die wesentlichen Effekte des Hüllrohrversagens verbessert wird. Die Durchführung des CABRI-Versuchsprogrammes sollte wie geplant begleitet werden. Die in CABRI vorgesehenen Versuche werden allerdings Versuchsdaten liefern, die in erster Linie für DWR-Bedingungen repräsentativ sind. Die RSK empfiehlt daher, dass Anstrengungen unternommen werden, z. B. im Rahmen des internationalen Informationsaustausches der RSK oder des BMU, um auch Zugang zu den Details der in Japan stattfindenden, auf den SWR bezogenen Versuche zu erhalten.

In ihrer Stellungnahme von 1998 hat die RSK die Entwicklung eines transienten Brennstabcodes für das Brennstabverhalten bei Reaktivitätsstörfällen empfohlen. International sind die Brennstabcodes FALCON, FRAPTRAN und SCANAIR weiterentwickelt und für die Nachrechnung von Testbrennstäben unter Reaktivitätsstörfallbedingungen des NSRR- und CABRI-Programmes eingesetzt worden. Die Modellierung der physikalischen Prozesse im Brennstoffpellet, der Wechselwirkung zwischen Pellet und Hüllrohr und des mechanischen Verhaltens des Hüllrohrs unter den Belastungen bei Reaktivitätsstörfällen sind für hohe Abbrände noch nicht im vollen Umfang zufriedenstellend gelöst. Die Simulation des transienten Brennstabverhaltens leistet jedoch einen wichtigen Beitrag zur Bestimmung der maßgebenden Beiträge für die Hüllrohrbelastungen und unterstützt die Übertragung der Ergebnisse von den Versuchs- auf die Reaktorbedingungen. Die GRS hat das Rechenprogramm SCANAIR von IRSN übernommen, um die Berechnungsmethoden für das transiente Brennstabverhalten weiterzuentwickeln und zu überprüfen, wie weit das Hüllrohrversagen mit verbesserten Modellen rechnerisch bestimmt werden kann. Der RSK sollte über die Erfahrungen des Programmeinsatzes berichtet und eine Einschätzung des Potentials der transienten Brennstabcodes zur Beschreibung des Brennstabverhaltens bei hohen Abbränden unter Reaktivitätsstörfallbedingungen gegeben werden.

Vor dem Hintergrund der anhaltenden internationalen Diskussion [22, 23] und den laufenden experimentellen Versuchsprogrammen empfiehlt die RSK darüber hinaus in ca. drei Jahren die Beratung über die RIA-Defektgrenze wieder aufzugreifen.

Abbildung 1: RIA: zulässige Enthalpieerhöhung für Brennstäbe mit bzw. ohne Oxidschichtabplatzungen



## **Abkürzungsverzeichnis**

EPRI	Electric Power Research Institute
KMV	Kühlmittelverlust
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NSRR	Nuclear Safety Research Reactor
PBF	Power Burst Facility
PIRT	Phenomena Identification and Ranking Table
PCMI	Pellet Clad Mechanical Interaction
RIA	Reactivity Initiated Accident
ROS	Region of Success
SNP	Siemens Nuclear Power
SPERT	Special Power Excursion Reactor Test

## Beratungsunterlagen

- [1] Einsatz von Brennelementen mit hohen Abbränden  
STELLUNGNAHME  
Anlage 4 zum Ergebnisprotokoll der 320. RSK-Sitzung am 16.09.1998
  
- [2] Brennelemente der Westinghouse  
Erfahrungen, Entwicklung-Hochabbrand  
Bericht für RSK Bonn 22 März 2001  
Gunnar Vesterlund, Westinghouse Atom, Folienkopien
  
- [3] PIRT-Aktivitäten und internationale Einschätzung der mit höheren Abbränden  
verbundenen Phänomene  
Foliensatz der GRS, 18. Januar 2001
  
- [4] Neue Ergebnisse und Versuchsprogramme zum Verhalten von hochabgebrannten  
Brennelementen bei RIA  
S. Langenbuch, Folienkopien, 19. Juni 2002
  
- [5] Verhalten hochabgebrannter Brennstäbe beim RIA  
M. Brettner, R. Donderer (Physikerbüro Bremen)  
Tischvorlage zur 9. Sitzung der RSK AG HOCHABBRAND am 3.9.2002, Bonn  
Folienkopien
  
- [6] BfS Forschungsvorhaben SR 2368  
Ermittlung von Anforderungen an die experimentelle Nachweisführung zur  
Brennstabsicherheit unter Störfallbedingungen für UO<sub>2</sub>- und MOX-Brennstäbe mit  
hohen Abbränden in Leichtwasserreaktoren  
Technischer Überwachungs-Verein Nord e. V.  
Physikerbüro Bremen  
Abschlussbericht 26. Juni 2002
  
- [7] A regulatory assessment of test data for reactivity-initiated accidents  
Meyer, R. O. et al  
Nuclear Safety, Vol. 37, No. 4, 1996

- [8] L.J. Callahan, "Agency Program Plan for High-Burnup Fuel", NRC-Memorandum to the Commissioners (ADAMS # ML=11380094), July 6, 1998
- [9] Revised reactivity initiated accident acceptance criteria for high burnup fuel  
Rosa Yang, Robert Montgomery, Nicolas Waeckel  
TOPFUEL 2003, 16.-19.März 2003, Würzburg
- [10] Answer to the Questionnaire Regarding Safety Issues and Regulation of High Burn Up Fuels  
M. Reocreux  
GPR-RSK Information Meeting; Köln, December 14<sup>th</sup>, 2000
- [11] EDF proposed safety domain for rod ejection accidents in a PWR  
Waeckel, N. et al.  
Proceedings of the 2000 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance; Park City, Utah, April 10-13, 2000
- [12] Regulatory Status on Transient Behavior of High Burnup Fuel and Related Research Activities in Japan  
T.Sato, T.Fujishiro  
Proc. of the OECD/CSNI Specialist Meeting, Cadarache, 12-14 September 1995, OECD/GD(96)197
- [13] RIA criteria in Japan; Proceedings of the Topical Meeting on RIA Fuel Safety Criteria  
Nakajima, T.  
Aix-en-Provence, 13.-15. Mai 2002; NEA/CSNI/R(2003)8/Vol2
- [14] Sicherheitsaspekte des Einsatzes hochabgebrannter Brennelemente unter Kühlmittelverlust-(KMV) Bedingungen  
Bericht der Arbeitsgruppe HOCHABBRAND für den RSK-Ausschuss  
REAKTORBETRIEB
- [15] CIP0-1 Preliminary test results  
CABRI International Seminar, Aix en Provence, April 2<sup>nd</sup>, 2003  
F. Jeury, CEA

- [16] CIP0-2 Preliminary test results  
CABRI International Seminar, Aix en Provence, April 2<sup>nd</sup>, 2003  
B. Duc, CEA
- [17] Post-test calculations of CIP0-1 and CIP0-2 using the SCANAIR code  
J.C. Garcia (CIEMAT), E. Federici, V. Georgenthum, J. Desquines (IRSN)  
CABRI International Seminar, Aix en Provence, April 2<sup>nd</sup>, 2003
- [18] Behaviour of high-burnup PWR fuels with low-tin zircaloy-4 cladding under reactivity-initiated-accident conditions  
Fuketa, T. et al.  
Nuclear Technology, Vol. 133, 50-62, Jan. 2001
- [19] High-burnup BWR fuel behaviour under simulated reactivity-initiated accident conditions  
Nakamura, T. et al.  
Nuclear Technology, Vol. 138, 246-259, June 2002
- [20] Main Outcomes from the Cabri Test Results  
Papin, J. et al.  
Proceedings of the Topical Meeting on RIA Fuel Safety Criteria, Aix-en-Provence, France 13-15 May 2002, OECD NEA/CSNI/R(2003)8/Vol.2, April 2003
- [21] Synthesis of CABRI-RIA tests interpretation  
Papin, J. et al.  
EUROSAFE 2003, Paris, 25.-26.Nov. 2003
- [22] USNRC, Research Information Letter on an Assessment of RIAs, Ralph Meyer, July 7, 2004
- [23] Bundesamt für Energie, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Sicherheitskriterien für Reaktivitätsstörfälle in schweizerischen Kernkraftwerken, HSK-AN-5208, 15. Juli 2004