

**Nachweis einer Restduktilität/Restfestigkeit mittels einer ECR-Grenzkurve**

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Anlass der Beratung und Beratungsauftrag.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sachstand.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>3</b>
3.1	Notwendigkeit einer Modifikation des bisherigen ECR-Kriteriums durch eine vom Wasserstoffgehalt abhängige ECR-Grenzkurve (ECR(H)-Grenzkurve) .....	3
3.2	Nachweisführung für Hüllrohre unter Nutzung einer ECR(H)-Grenzkurve.....	3
3.3	Nachweisführung für Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs .....	5
3.4	Nachweisführung für den Dehn-Berst-Bereich.....	7
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Empfehlungen.....</b>	<b>11</b>
<b>Anhang 1: Nachweisführung unter Verwendung der GRS-Grenzkurve mit Rückgriff auf experimentelle Ergebnisse der KIT-Versuche.....</b>		<b>12</b>
<b>Beratungsunterlagen .....</b>		<b>13</b>

---

## 1 Anlass der Beratung und Beratungsauftrag

Die GRS hatte in der 78. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 07.03.2012 zum aktuellen Stand der experimentellen Absicherung der Nachweiskriterien beim Kühlmittelverlust-Störfall (KMV-Störfall) in Druckwasserreaktoren (DWR) berichtet [1] und Zweifel an der Gültigkeit des Nachweises der Restduktilität der Hüllrohre geäußert. Grund hierfür waren experimentelle Erkenntnisse, nach denen die Restduktilität von Hüllrohren nicht nur von der Oxidation sondern auch von der Wasserstoffkonzentration im Hüllrohr abhängt. Sowohl die betriebliche wie die störfallbedingte (sekundäre) Wasserstoffaufnahme können demnach zu einem Verlust der Restduktilität bei Hüllrohroxidationswerten unterhalb des bisherigen Nachweiskriteriums führen. Insbesondere in Bereichen mit geborstenem Hüllrohr könnte dann ein Zerschneiden des Hüllrohrs beim Thermoschock (Quenchen) nicht sicher ausgeschlossen werden. Bei einem damit verbundenen Austrag von Brennstoff aus dem Hüllrohr könnten sich Fragen im Zusammenhang mit der Kühlbarkeit des Kerns ergeben.

In seiner 93. Sitzung am 24.10.2013 beauftragte der Ausschuss eine ad-hoc-Arbeitsgruppe mit den diesbezüglichen Beratungen. Die Arbeitsgruppe sollte hierzu zunächst klären, ob und ggf. unter welchen Bedingungen eine Zustimmung des Ausschusses zum Vorschlag der GRS („GRS-Grenzkurve“) erfolgen kann. Falls dies nicht konsensfähig erscheint, sollte die AG einen Vorschlag zu einer anderen Neufestlegung vorlegen.

Die AG bereitete in insgesamt 7 Sitzungen diese Empfehlung und den Sachstandsbericht [2] vor. Beide Unterlagen wurden vom Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK eingehend beraten und in der 107. Sitzung des Ausschusses am 28.05.2015 für die Vorlage bei der RSK fertiggestellt. Die RSK verabschiedete die Empfehlung in ihrer 476. Sitzung am 24.06.2015.

## 2 Sachstand

Der Sachstand

- zu Nachweiskriterien zur Gewährleistung der Kernkühlung bei einem Kühlmittelverluststörfall,
- zu neueren experimentellen Ergebnissen, insbesondere
  - zum Einfluss des Wasserstoffgehalts zu Beginn des Störfalls,
  - zur transienten Wasserstoffaufnahme nach Hüllrohrbersten (sekundäre Hydrierung),
  - zur Break-away-Oxidation,
  - zum Einfluss der Wasserstoffaufnahme auf die Versprödung,
- zum Vorschlag der NRC zur Anpassung des Equivalent Cladding Reacted (ECR)-Kriteriums sowie
- zu einem Vorschlag der GRS zur Anpassung des ECR-Kriteriums

ist detailliert im Bericht der ad-hoc AG ECR des AST [2] dargestellt. Eine Wiedergabe dieser Darstellungen erfolgt in dieser Stellungnahme nur in Auszügen.

---

### **3 Bewertung**

#### **3.1 Notwendigkeit einer Modifikation des bisherigen ECR-Kriteriums durch eine vom Wasserstoffgehalt abhängige ECR-Grenzkurve (ECR(H)-Grenzkurve)**

Die RSK stellt fest, dass das bisher gemäß den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ [3] zu verwendende 17 %-ECR-Kriterium die materialspezifischen Auswirkungen von betrieblicher sowie störfallbedingter Wasserstoffaufnahme nicht hinreichend berücksichtigt, folglich nach den vorgelegten neuen Erkenntnissen (siehe Bericht der Ad-hoc-AG ECR des AST [2]) aktualisiert werden muss. Diese Aktualisierung wird im Folgenden konkretisiert.

#### **3.2 Nachweisführung für Hüllrohre unter Nutzung einer ECR(H)-Grenzkurve**

Das bislang verwendete 17 %-ECR-Kriterium basiert auf sog. Ringdrucktests von Hüllrohrproben, die zuvor einer Hochtemperaturoxidation unterzogen wurden [4]. In den letzten Jahren ist eine Reihe neuer Ringdrucktests unter Verwendung von z.T. vorhydrierten bzw. bestrahlten Hüllrohrproben aus heute eingesetzten Hüllrohrmaterialien durchgeführt worden [5].

Die in Ringdrucktests eingesetzten sehr kurzen Hüllrohr-Probenstücke sind hinsichtlich des Proben-Querschnitts und Oxidationszustands detailliert vermessen und weisen keine wesentlichen axialen Variationen der duktilitäts- und festigkeitsmindernden Parameter auf. Dies begünstigt die Ableitung von Korrelationen zwischen dem Wasserstoffgehalt des Hüllrohres und dem zulässigen ECR-Wert. Insofern ist die Auswertung von Ringproben mit genau charakterisierbaren Eigenschaften und Randbedingungen gegenüber der Auswertung von Semi-Integralversuchen<sup>1</sup> mit geringeren Unsicherheiten behaftet. Dadurch ist auch eine Auswertung der Ringdruckversuche mittels Finite-Elemente-(FE)Methoden möglich, wie von der GRS in [6] vorgenommen. Die Auswertung ermöglicht die Ableitung lokaler Material-Korrelationen, wie zum Beispiel das in [6] herangezogene Verhältnis der Bruchspannung zur Streckgrenze als Funktion des Sauerstoff- und Wasserstoff-Gehalts.

Die entweder direkt [7] oder mittels FE-Methoden [6] aus diesen Versuchen abgeleiteten wasserstoffabhängigen ECR-Grenzkurven (siehe Abbildung 1) können ohne zusätzliche Überlegungen auf Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs angewendet werden, da es hier im Verlauf des KMV-Störfalls nicht zu einer relevanten transienten Wasserstoffaufnahme (keine sekundäre Hydrierung) kommt (siehe dazu der folgende Abschnitt 3.3).

---

<sup>1</sup> Versuchsanordnungen bei denen für einen Einzelstab oder ein Brennstabbbündel die thermohydraulischen Randbedingungen eines KMV-Störfalls simuliert werden. Zum Einsatz kommen Hüllrohrabschnitte, die entweder mit realem Brennstoff oder mit einem Simulator-Material gefüllt sind.

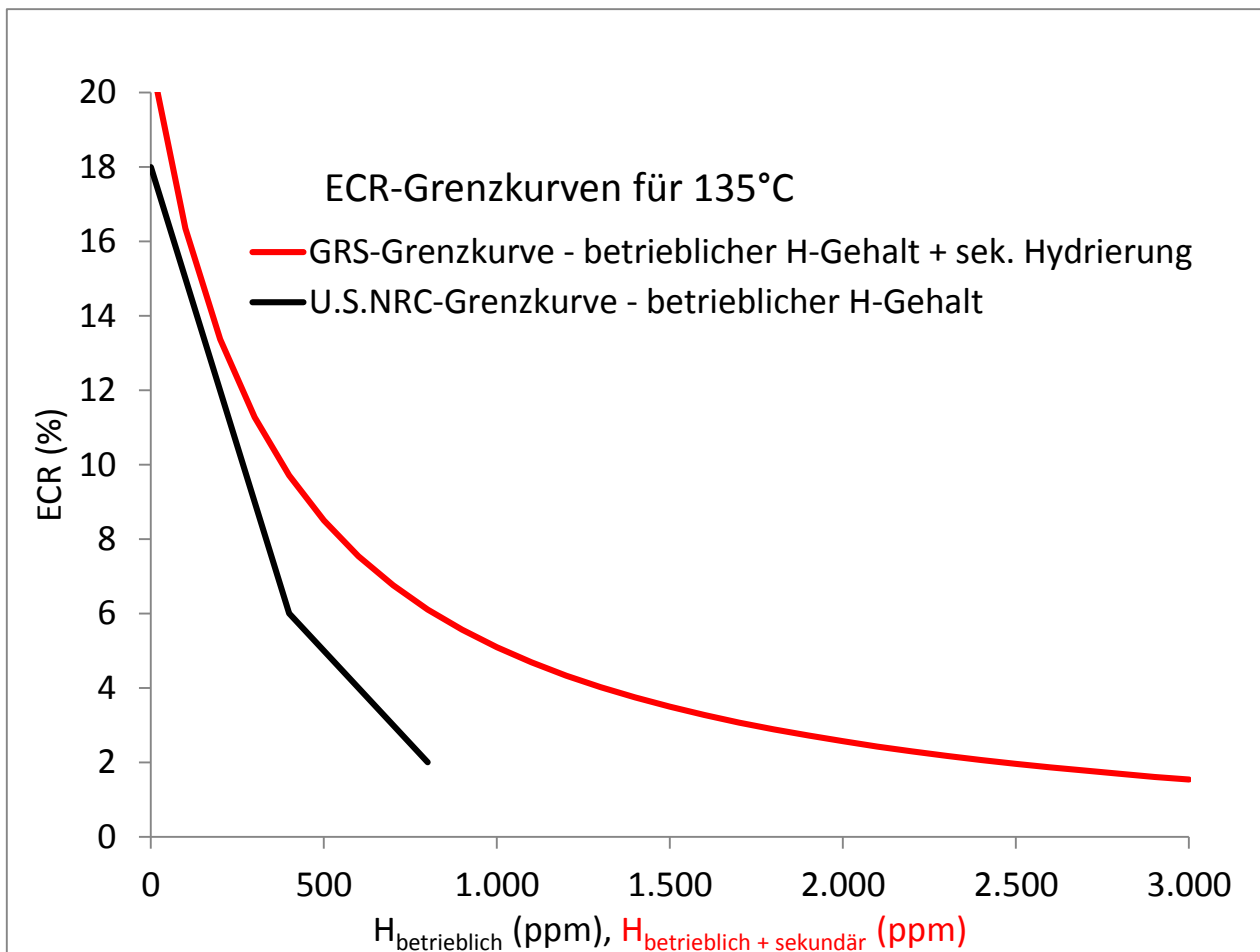


Abbildung 1: Vergleich der GRS-Grenzkurve nach [6] mit der NRC Grenzkurve nach [7].

Dagegen werden die Materialveränderungen, die mit dem Dehnen und Bersten verbunden sind, von den Proben, die Ringdrucktests durchlaufen, nicht vollständig erfasst. Zur Ableitung von Grenzkurven können Ringdrucktests für Materialproben aus dem Dehn-Berst-Bereich aufgrund der geometrischen Bedingungen nicht angewendet werden. Das Schadensbild im Semi-Integralversuch im Umfeld der Berstöffnung resultiert aus der Kombination einer Minderung der tragenden Wandstärke (die sog. Prior-Beta-Schicht) durch Dehnung und Oxidation mit einer Aufnahme von Sauerstoff und Wasserstoff in diese tragende Schicht [8]. Da Semi-Integralversuche gezeigt haben [5, 9, 10], dass der Dehn-Berst-Bereich hinsichtlich Versprödung und Versagensanfälligkeit führend ist, besteht die Notwendigkeit, andere Ansätze zu dessen Bewertung heranzuziehen.

Der aus der betrieblichen Oxidation stammende Wasserstoffgehalt im Hüllrohr bleibt während der Hochtemperaturoxidation weitgehend unverändert. Hinzu kommt die Wasserstoffaufnahme in das Hüllrohr während des KMV-Störfalls, die ausschließlich nach einem Bersten des Hüllrohrs und nur im innenseitigen Bereich der Berstöffnung stattfindet (sog. sekundäre Hydrierung). Um zu einem konsistenten Ergebnis zu kommen, müsste bei Anwendung von ECR(H)-Grenzkurven mit Berücksichtigung des Wasserstoffgehaltes aus der sekundären Hydrierung (wie dies bei der von der GRS abgeleiteten ECR(H)-Grenzkurve der Fall ist) der zu-

---

lässige ECR-Wert einem unter KMV-Bedingungen entstandenen, axial verteilten ECR(H)- und H-Wert gegenübergestellt werden.

Für die Anwendung der ECR(H)-Grenzkurve auf den Dehn-Berst-Bereich im Rahmen der Nachweisführung müssten dazu mindestens die folgenden Voraussetzungen gegeben sein:

- a) Die ECR(H)-Grenzkurve muss das notwendige Spektrum an relevanten ECR-Werten und Wasserstoffkonzentrationen abdecken (erfüllt für die ECR(H)-Grenzkurve der GRS [6]).
- b) Die Geometrien des Beulenbereichs (incl. Wandstärken) und der Berstöffnung müssen analytisch vorhersagbar sein. Es ist anzunehmen, dass eine sensitive Abhängigkeit vom Brennstabzustand zu Beginn der KMV-Transiente und vom Hüllrohrtemperatur-Zeit-Verlauf während der Transiente vorliegt.
- c) Die lokalen Verteilungen der ECR-Werte und der Wasserstoffkonzentration infolge sekundärer Hydrierung müssen analytisch vorhersagbar sein. Es ist anzunehmen, dass hier eine starke Abhängigkeit von b) und vom Hüllrohrtemperatur-Zeit-Verlauf während der Transiente existiert.
- d) Mittels der jeweiligen lokalen Verteilungen der ECR- und H-Werte aus c) wäre lokal die Einhaltung der ECR(H)-Grenzkurve nachzuweisen.
- e) Einflüsse auf den Lastabtrag durch die Reduzierung der Hüllrohrwandstärke infolge Dehnens sowie der bruchmechanische Effekt der Rissgeometrie müssten zusätzlich berücksichtigt werden.

Nach Meinung der RSK ist eine derartige Nachweisführung derzeit aus den folgenden Gründen nicht möglich:

- Die Datenbasis für eine hinreichend genaue Modellierung von b), c) und e) ist nicht verfügbar.
- Hinsichtlich einer numerischen Berechnung der Punkte b), c) und e) sind aktuell höchstens Ansätze einer Modellierung für einzelne Effekte verfügbar.

Vor diesem Hintergrund wird für den Dehn-Berst-Bereich ein Nachweisweg vorgeschlagen, der sich aus verschiedenen Elementen zusammensetzt (siehe dazu Abschnitt 3.4).

Die NRC-Grenzkurve ist grundsätzlich auch für SWR-Hüllrohrwerkstoffe (Zry-2) gültig. Die Hüllrohr-Temperatur-Zeit-Verläufe bei KMV Störfällen für deutsche SWR unterscheiden sich deutlich von denjenigen eines DWR (generell niedrigeres Temperaturniveau), so dass eine vergleichbare Hochtemperaturoxidation (hohe ECR-Werte) oder Dehnen und Bersten der Hüllrohre nicht zu erwarten sind.

### **3.3 Nachweisführung für Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs**

Nachfolgend werden unter Hüllrohrabschnitten außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs solche verstanden, die während des KMV-Störfalles entweder keine nennenswerte transiente Dehnung erfahren haben oder bei denen die aufgetretene Dehnung nicht mit einem Bersten des Hüllrohrs verbunden ist.

---

Die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Probleme bei der Anwendung einer ECR(H)-Grenzkurve auf Hüllrohrabschnitte mit Dehn-Berst-Bereich treffen für Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs nicht zu. Da eine transiente Wasserstoffaufnahme nicht stattfindet, kann hier ein Nachweis unter Verwendung einer ECR(H)-Grenzkurve für den betrieblich aufgenommenen Wasserstoff erfolgen.

Die RSK kommt für die Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs zu folgenden Ergebnissen:

- Das Kriterium für die Peak Cladding Temperature (PCT) von  $1.200^{\circ}\text{C}$  ist nach wie vor geeignet, eine unzulässige Versprödung des Hüllrohres infolge erhöhter Sauerstofflöslichkeit in der tragenden Prior-Beta-Schicht zu vermeiden.<sup>2</sup>
- Der Erhalt einer Restfestigkeit anstelle einer Restduktilität ist als Nachweisanforderung ausreichend, da auch bei Gewährleistung einer ausreichend hohen Restfestigkeit ein Fragmentieren<sup>3</sup> des Hüllrohres beim Quenchen mit hoher Sicherheit vermieden wird (siehe dazu im Detail Abschnitt 3.4).
- Zur Vermeidung des Fragmentierens des Hüllrohres bei einem KMV-Störfall muss der ECR-Wert in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme begrenzt werden. Hierfür wurde einerseits von der NRC eine ECR(H)-Grenzkurve [7] vorgelegt, die auf dem Erhalt einer Restduktilität in Ringdrucktests beruht. Andererseits wurde von der GRS eine ECR(H)-Grenzkurve [6] vorgelegt, die auf dem Erhalt einer Restfestigkeit in Höhe der Streckgrenze basiert, vgl. Abbildung 1. Beide Grenzkurven sind daher aus Sicht des Ausschusses auf Basis der aktuellen experimentellen Ergebnisse geeignet, eine Fragmentierung dieser Hüllrohrabschnitte zu vermeiden.

Im Rahmen der Nachweisführung mit der ECR(H)-Grenzkurve der GRS oder der NRC sind folgende Randbedingungen für die Berechnung des ECR-Wertes zu beachten:

- Zur Berechnung des ECR-Werts ist die Hochtemperatur-Oxidation auf der Hüllrohraußenseite zu berücksichtigen.
- Die betriebliche Voroxidation ist in Form einer Schwächung der Hüllrohrwandstärke zu berücksichtigen.
- Bei der Berechnung des ECR-Werts ist die Hüllrohrwandschwächung infolge Dehnung als Mittelwert über den Querschnitt zu berücksichtigen.
- Da die ECR(H)-Grenzkurve der NRC bzw. der GRS auf Basis der Cathcart-Pawel- bzw. Leistikow-Korrelation für die Oxidation ermittelt wurden, sind diese oder im Vergleich dazu konservative Korrelationen auch beim Nachweis für die Einhaltung des zulässigen ECR-Wertes zu verwenden.

---

<sup>2</sup> Beim Nachweis mittels der NRC-Grenzkurve ist dabei für betriebliche Wasserstoffkonzentrationen größer 400 ppm eine experimentell bedingte Begrenzung der zulässigen PCT zu beachten, vgl. hierzu die Ausführungen zur Herleitung der NRC-Kurve in [2].

<sup>3</sup> Unter einem Fragmentieren des Hüllrohrs wird in dieser Stellungnahme auch das Zerbrechen des Hüllrohrs im Dehn-Berst-Bereich verstanden.

- 
- Ein möglicher Beitrag einer zusätzlichen innenseitigen Sauerstoffaufnahme (z. B. aus einer innenseitigen Oxidschicht oder dem Bonding-Layer) kann vernachlässigt werden, da bei Hüllrohren ohne Bersten ein diesbezüglich günstiger Temperatur-Zeitverlauf vorliegt.
  - Bei der Ermittlung des zulässigen ECR-Wertes ist die betriebliche Wasserstoffaufnahme anhand experimentell validierter Korrelationen abzuleiten.

### 3.4 Nachweisführung für den Dehn-Berst-Bereich

Im Dehn-Berst-Bereich kann aufgrund der möglichen hohen sekundären Hydrierung sowie der Wanddickenschwächung in Kombination mit der Rissgeometrie eine Restduktilität nicht gewährleistet werden [4, 11].

Allerdings zeigen Versuche, dass eine Restfestigkeit der Hüllrohre ausreicht, um die bei einem KMV-Störfall auftretenden Lasten abtragen zu können, ein Fragmentieren des Hüllrohres auszuschließen und damit den Erhalt einer kühlbaren Geometrie zu gewährleisten [11]. Für die Gewährleistung einer ausreichenden Restfestigkeit ist eine entsprechende Begrenzung der transienten Oxidation notwendig und hinreichend. Dies ergibt sich im Einzelnen u. a. aus

- a) den KIT-QUENCH-LOCA-Versuchen: es handelt sich um Bündelversuche unter für deutsche DWR prototypischen Hüllrohrtemperatur-Zeit-Kurven;
- b) den JAERI/JAEA Versuchen: diese zeigen die Abtragbarkeit zusätzlicher axialer Lasten gegenüber den KIT-Versuchen auf;
- c) Überlegungen der NRC zur Anwendbarkeit ihrer ECR-Grenzkurve auch auf den Dehn-Berst-Bereich.

Zu a)

Bei den bisher durchgeführten, für deutsche DWR prototypischen KIT-QUENCH-LOCA-Versuchen (Zry-4, aber auch die aktuell eingesetzten Hüllrohrmaterialien M5 und Optimized Zirlo) sind zwar Brennstäbe geborsten, es ist aber kein Brennstab beim Quenchen fragmentiert; es kam zu Kühlkanalblockaden von maximal 30%. Die Nachuntersuchungen laufen noch (vgl. auch die Darstellungen in [12, 13, 14]).

Die bisher durchgeführten KIT-QUENCH-LOCA-Versuche haben unter für deutsche DWR-Anlagen prototypischen geringen ECR-Werten von  $< 5\%$  bestätigt, dass es beim Quenchen nicht zu einem Fragmentieren des Brennstabhüllrohrs kommt.

Zu b)

Die JAERI/JAEA Semi-Integralversuche wurden unter Berücksichtigung unterschiedlicher externer axialer Lasten bis hin zu einer festen Einspannung der Hüllrohre durchgeführt, siehe Abbildung 2. Es wurden Zry-4-Hüllrohrsegmente mit und ohne Anfangswasserstoffgehalt einer Temperaturtransiente mit Zieltemperatur  $1200^{\circ}\text{C}$  unterzogen, in deren Verlauf Beulen und Bersten des Hüllrohrs sowie sekundäre Hydrierung auftraten.

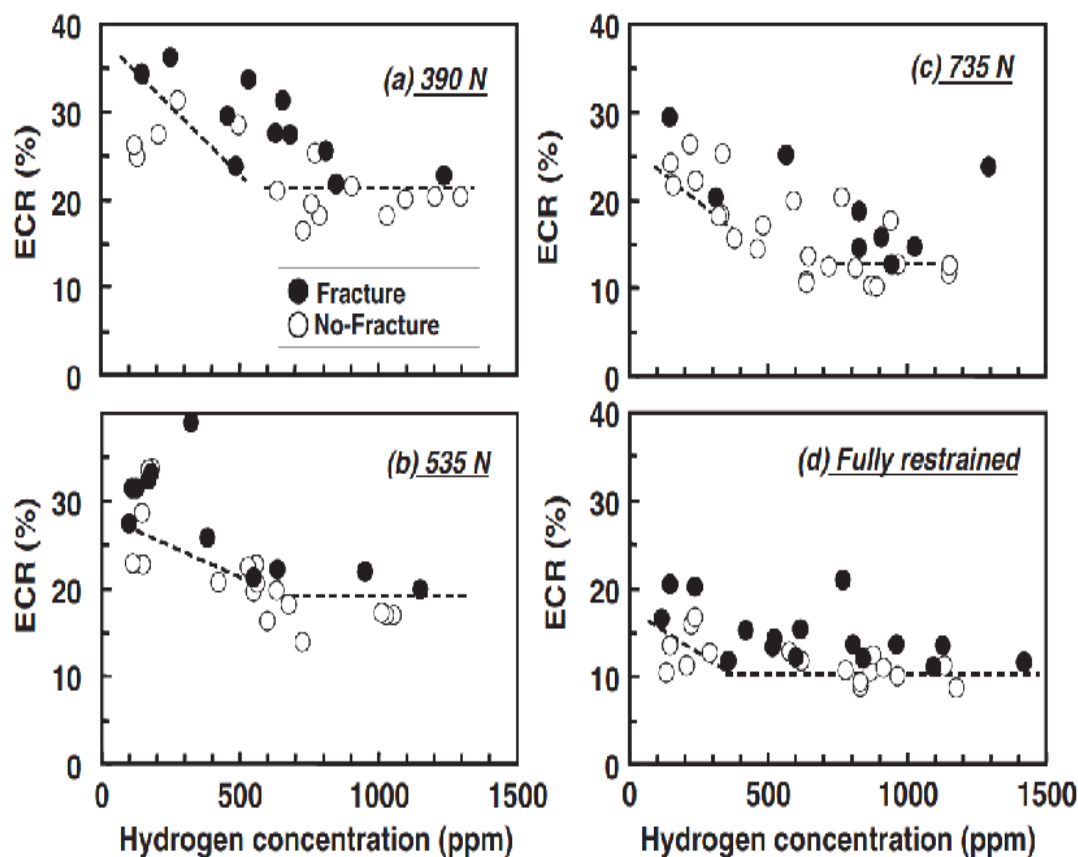


Abbildung 2: Zulässiger Baker Just-ECR Wert in Abhängigkeit von der aufgeprägten Last und dem betrieblichen Wasserstoffgehalt (Abbildung 12 aus [15])

Aufgrund der zusätzlichen Aufprägung externer axialer Lasten ergeben sich bei Einhaltung der bei der jeweiligen Last zulässigen ECR Werte erhebliche Reserven gegenüber den beim Quenchen auftretenden Thermoschockbeanspruchungen.

Die Wandstärke der bei diesen Versuchen verwendeten Hüllrohre für BE mit 17 x 17-Geometrie war mit 0,510 mm geringer als diejenige der deutschen DWR (0,725 mm bei 16x16-Brennstäben und 0,640 mm bei 18 x 18-Brennstäben). Einen gleichen ECR-Wert vorausgesetzt ist deshalb bei den Versuchen mit Brennstäben in 17 x 17-Geometrie die während des Quenchens lastabtragende Prior-Beta-Schicht dünner als bei Brennstäben der deutschen DWR, so dass sich hieraus weitere Reserven ergeben.

Somit können die in diesem Zusammenhang nach der Baker-Just-Korrelation ermittelten zulässigen ECR-Werte als Orientierung für eine Abschätzung der zulässigen Hochtemperaturoxidation für den Dehn-Berst-Bereich herangezogen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Bestimmung der ECR-Werte im Dehn-Berst-Bereich die mittlere Wandstärke des im Beulenbereich gedehnten Hüllrohrs zugrunde gelegt wurde.

Die JAERI/JAEA Versuche sichern die für die deutschen DWR prototypischen KIT-Versuche ab. Sie zeigen auf, dass bei entsprechender Begrenzung des ECR Werts über die Thermoschockbeanspruchung hinaus erhebliche zusätzliche mechanische Lasten abgetragen werden können.



---

Zu c)

Die NRC hat in [16] Überlegungen zur Anwendbarkeit ihrer aus Ringdrucktests abgeleiteten ECR(H)-Grenzkurve auch auf den Dehn-Berst-Bereich angestellt und dabei die relevanten Einflüssen der Bruchgeometrie, der Wanddickenschwächung, der innenseitigen Oxidation durch Dampfeintritt und der daraus resultierenden erhöhten sekundären Wasserstoffaufnahme einbezogen. Hintergrund ist, dass diese Effekte durch die Ringdrucktests nicht abgedeckt werden. Zusätzlich zu den Ringdrucktests sind semi-integrale LOCA-Tests durchgeführt und bewertet worden [9]. Aus diesen folgert die NRC, dass bei Einhaltung der aus Ringdrucktests hergeleiteten zulässigen ECR-Werte in Abhängigkeit vom betrieblichen Wasserstoffgehalt ein akzeptables Materialverhalten (ausreichende Restfestigkeit) auch im Dehn-Berst-Bereich gewährleistet ist.

Wie die Auswertung in [9] zeigt, sind die Ergebnisse der bei ANL und Studsvik durchgeführten Semi-Integral-Versuche (Hochtemperaturoxidation ohne externe axiale Lasten) und anschließenden 4-Punkt-Biegeversuche konsistent mit denen der JAERI/JAEA Versuche.

Vor dem Hintergrund der unter a) bis c) dargestellten Erkenntnisse kommt die RSK zu dem Ergebnis, dass für den Nachweis einer ausreichenden Begrenzung des ECR-Werts im Dehn-Berst-Bereich die ECR(H)-Grenzkurve der NRC [7] herangezogen werden kann, da diese gemäß aktuellem Kenntnisstand den Oxidationsgrad für den Dehn-Berst-Bereich in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme ausreichend begrenzt. Der verspröde Effekt der Wasserstoffaufnahme aus sekundärer Hydrierung ist hierbei implizit mit abgedeckt. Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, dass bei einer Begrenzung des ECR-Werts gemäß der Grenzkurve der NRC eine ausreichende Restfestigkeit im Dehn-Berst-Bereich gewährleistet ist, um eine Fragmentieren des Hüllrohrs beim Quenchen ausschließen zu können. Daher sind für den Nachweis über den betrieblichen Wasserstoffgehalt und den aus der Hochtemperaturoxidation resultierenden maximalen ECR-Wert hinaus keine zusätzlichen Daten erforderlich.

Im Rahmen der Nachweisführung ist für die Berechnung des ECR-Wertes nach dem Hüllrohrbersten eine zweiseitige Oxidation im Dehn-Berst-Bereich zu berücksichtigen. Ansonsten gelten die in Abschnitt 3.3 aufgeführten Randbedingungen für die Nachweisführung.

Die ECR-Werte im Dehn-Berst-Bereich decken die ECR-Werte der nicht geborstenen Hüllrohrabschnitte ab.

Eine ausreichende Restfestigkeit des Hüllrohres kann auch nachgewiesen werden, indem die ECR(H)-Grenzkurve der GRS auf das im Dehn-Berst-Bereich vorliegende Profil der Wasserstoff- und Sauerstoffaufnahme angewendet wird. Im Gegensatz zur ECR(H)-Grenzkurve der NRC sind hier für den Nachweis zusätzliche Daten zum ortsabhängigen Grad der Oxidation und Wasserstoffaufnahme aus den KIT-QUENCH-LOCA-Versuchen erforderlich. Die Randbedingungen für diesen Nachweisweg sind im Anhang 1 dargestellt.

#### **4 Schlussfolgerungen**

Zusammengefasst leitet die RSK aus den Beratungen zum Nachweis einer Restduktilität/Restfestigkeit mittels einer ECR(H)-Grenzkurve folgende Schlussfolgerungen ab:

---

#### Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs<sup>4</sup>

- Das Kriterium für die Peak Cladding Temperature (PCT) von 1200°C ist nach wie vor geeignet, eine unzulässige Versprödung des Hüllrohres infolge erhöhter Sauerstofflöslichkeit in der tragenden Prior-Beta-Schicht zu vermeiden.<sup>5</sup>
- Zur Vermeidung des Fragmentierens des Hüllrohres bei einem KMV-Störfall muss der ECR-Wert in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme begrenzt werden. Hierfür wurde einerseits von der NRC eine ECR(H)-Grenzkurve [7] vorgelegt, die auf dem Erhalt einer Restduktilität in Ringdrucktests beruht. Andererseits wurde von der GRS eine ECR(H)-Grenzkurve [6] vorgelegt, die auf dem Erhalt einer Restfestigkeit in Höhe der Streckgrenze basiert.
- Beide Grenzkurven sind aus Sicht des Ausschusses geeignet, eine Fragmentierung dieser Hüllrohrabschnitte zu vermeiden.

#### Hüllrohrabschnitte im Dehn-Berst-Bereich

- Im Dehn-Berst-Bereich kann aufgrund der möglichen hohen sekundären Hydrierung sowie der Wanddickenschwächung in Kombination mit der Rissgeometrie eine Restduktilität nicht gewährleistet werden. Allerdings zeigen Versuche, dass eine Restfestigkeit der Hüllrohre ausreicht, um die bei einem KMV-Störfall auftretenden Lasten abtragen zu können, ein Fragmentieren des Hüllrohres auszuschließen und damit den Erhalt einer kühlbaren Geometrie zu gewährleisten. Für die Gewährleistung einer ausreichenden Restfestigkeit ist eine entsprechende Begrenzung der transienten Oxidation notwendig und hinreichend.
- Wird der ECR-Wert in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme gemäß der ECR(H)-Grenzkurve der NRC begrenzt, so ist eine ausreichende Restfestigkeit gewährleistet, um ein Zerbrechen des Hüllrohrs beim Quenchen ausschließen zu können. Der versprödende Effekt der Wasserstoffaufnahme aus sekundärer Hydrierung ist hierbei implizit mit abgedeckt. Daher sind für den Nachweis über den betrieblichen Wasserstoffgehalt und den aus der Hochtemperaturoxidation resultierenden maximalen ECR-Wert hinaus keine zusätzlichen Daten erforderlich.
- Eine ausreichende Restfestigkeit des Hüllrohres kann auch nachgewiesen werden, indem die ECR(H)-Grenzkurve der GRS auf das im Dehn-Berst-Bereich vorliegende Profil der Wasserstoff- und Sauerstoffaufnahme angewendet wird. Im Gegensatz zur ECR(H)-Grenzkurve der NRC sind hier für den Nachweis zusätzliche Daten zum ortsabhängigen Grad der Oxidation und Wasserstoffaufnahme aus den KIT-QUENCH-LOCA-Versuchen erforderlich. Die Randbedingungen für diesen Nachweisweg sind im Anhang 1 dargestellt.

---

<sup>4</sup> Hüllrohrabschnitte, die während des KMV-Störfalls entweder keine nennenswerte transiente Dehnung erfahren haben oder bei denen die aufgetretene Dehnung nicht mit einem Bersten des Hüllrohrs verbunden ist.

<sup>5</sup> Beim Nachweis mittels der NRC-Grenzkurve ist dabei für betriebliche Wasserstoffkonzentrationen größer 400 ppm eine experimentell bedingte Begrenzung der zulässigen PCT zu beachten, vgl. hierzu die Ausführungen zur Herleitung der NRC-Kurve in [2].

---

Die NRC-Grenzkurve ist grundsätzlich auch für SWR-Hüllrohrwerkstoffe (Zry-2) gültig. Die Hüllrohr-Temperatur-Zeit-Verläufe bei KMV Störfällen für deutsche SWR unterscheiden sich deutlich von denjenigen eines DWR (generell niedrigeres Temperaturniveau), so dass eine vergleichbare Hochtemperaturoxidation (hohe ECR-Werte) oder Dehnen und Bersten der Hüllrohre nicht zu erwarten sind.

## 5 Empfehlungen

Die RSK empfiehlt bei der Nachweisführung zur Vermeidung einer Fragmentierung des Brennstabhüllrohres beim KMV-Störfall:

- für Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs die ECR(H)-Grenzkurve der GRS [6] oder der NRC [7] zur Begrenzung des ECR Werts in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme heranzuziehen.
- für Hüllrohrabschnitte im Dehn-Berst-Bereich die ECR(H)-Grenzkurve der NRC [7] zur Begrenzung des ECR Werts in Abhängigkeit von der betrieblichen Wasserstoffaufnahme heranzuziehen. Der versprödende Effekt der Wasserstoffaufnahme aus sekundärer Hydrierung ist hierbei implizit mit abgedeckt.

Alternativ kann die ECR(H)-Grenzkurve der GRS angewendet werden. Die Randbedingungen für diesen Nachweisweg sind im Anhang 1 dargestellt.

Bei der Anwendung der ECR(H)-Grenzkurven sind folgende Randbedingungen einzuhalten:

- Zur Berechnung des ECR-Werts für Hüllrohrabschnitte außerhalb des Dehn-Berst-Bereichs ist die Hochtemperatur-Oxidation auf der Hüllrohraußenseite zu berücksichtigen.
- Zur Berechnung des ECR-Werts für Hüllrohrabschnitte im Dehn-Berst-Bereich ist nach dem Bersten eine zweiseitige Hochtemperatur-Oxidation zu berücksichtigen.
- Die betriebliche Voroxidation ist in Form einer Schwächung der Hüllrohrwandstärke zu berücksichtigen.
- Bei der Berechnung des ECR-Werts ist die Hüllrohrwandschwächung infolge Dehnung als Mittelwert über den Querschnitt zu berücksichtigen.
- Da die ECR(H)-Grenzkurven der NRC bzw. der GRS auf Basis der Cathcart-Pawel- bzw. Leistikow-Korrelation für die Oxidation ermittelt wurden, sind diese oder im Vergleich dazu konservative Korrelationen auch beim Nachweis für die Einhaltung des zulässigen ECR-Wertes zu verwenden.
- Die jeweilig anzusetzende betriebliche Wasserstoffaufnahme ist mittels einer anhand experimenteller Daten validierten Korrelation zu bestimmen.

---

## **Anhang 1: Nachweisführung unter Verwendung der GRS-Grenzkurve mit Rückgriff auf experimentelle Ergebnisse der KIT-Versuche**

Die Nachweisführung mittels der GRS-Grenzkurve für den gedehnten und geborstenen Bereich erfordert, dass sowohl der umfangsgemittelte ECR-Wert als auch der umfangsgemittelte Wasserstoff-Gehalt nach sekundärer Hydrierung zu allen axialen Positionen des Dehn-Berst-Bereichs bekannt sind. Prototypische KIT-QUENCH-LOCA-Versuche liefern den Zusammenhang von umfangsgemittelten ECR-Werten und den damit einhergehenden umfangsgemittelten Wasserstoff-Gehalten. Für die Nachweisführung mit der ECR-Grenzkurve der GRS muss zusätzlich eine repräsentative Zuordnung zwischen Brennstäben einer Kernbeladung und in KIT getesteten Hüllrohren hergestellt werden.

Eine Bewertung von Kernbeladungen im Zusammenhang mit der ECR-Grenzkurve der GRS sollte nach folgendem Muster erfolgen:

- 1 Anhand der thermohydraulischen KMV-Störfall-Analyse für die in der Kernbeladung enthaltenen Brennstab-Klassen gestaffelt nach Abbrand und Brennstableistung werden jeweils sowohl die Hüllrohr-Temperaturen und die Berst-Dehnungen als auch die Hüllrohr-Oxidationen für die Berst-Stelle (maximaler ECR-Wert nach Leistikow) sowie für den ungedehnten Hüllrohrabschnitt (ECR-Wert im Nahbereich der Berst-Öffnung nach Leistikow) analytisch ermittelt.
- 2 Da die zur Hüllrohr-Oxidation des geborstenen Hüllrohrs auftretende sekundäre Hydrierung nach heutigem Stand nicht berechnet werden kann, erfolgt ein Rückgriff auf Brennstabbündel-Versuche des KIT, die eine prototypische Nachbildung des Brennstabverhaltens unter KMV-Störfall-Bedingungen bereitstellen. Dieser Rückgriff sieht vor, dass passend zum berechneten maximalen ECR-Wert und passend zum ECR-Wert des ungedehnten Hüllrohrabschnitts, derjenige Brennstab aus den KIT-Brennstabbündeln herangezogen wird, der beide ECR-Werte konservativ abdeckt. Die an diesem Brennstab gemessene axiale Verteilung der sekundären Hydrierung wird verwendet und mit den analytisch bestimmten ECR-Werten kombiniert.
- 3 Der Nachweis einer Restfestigkeit ist dann gegeben, wenn alle Wertekombinationen von ECR-Werten und Wasserstoffkonzentrationen im Bereich der Berstöffnung unterhalb der GRS-Grenzkurve liegen.

---

## Beratungsunterlagen

- [1] Sonnenburg, H. G. (GRS): Aktueller Stand der experimentellen Absicherung der Notkühlkriterien. Präsentation 78. AST-Sitzung am 07.03.2012
- [2] AG ECR des RSK-Ausschusses AST, Sachstandsbericht, 11.06.2015  
Nachweis einer Restduktilität/Restfestigkeit mittels einer ECR-Kurve
- [3] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke  
03. März 2015, BAnz AT 30.03.2015 B2
- [4] Hache, G.; Chung, H. M.: The History of LOCA Embrittlement Criteria  
28. Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, MD, United States,  
23-25 Oct 2001, NUREG/CP-0172, p. 205-237
- [5] U.S.-NRC, Office of Nuclear Regulatory Research: Cladding Embrittlement During  
Postulated Loss-of-Coolant Accidents. NUREG/CR-6967, July 2008
- [6] Herb, J.; Sievers, J.; Sonnenburg, H.-G.: Ermittlung der Festigkeit von Brennstab-  
Hüllrohren aus Zry-4, M5, ZIRLO und Zry-4-low-tin anhand von Ringdruckversuchen.  
GRS-A-3698, April 2013
- [7] U.S.-NRC, Office of Nuclear Regulatory Research: Draft Regulatory Guide DG-1263.  
ADAMS Accession No. ML12284A323. March 2014
- [8] OECD NEA: LOCA State-of-the-art Report der OECD. NEA No. 6846, ISBN 978-92-  
64-99091-3, 2009
- [9] U.S.-NRC, Office of Nuclear Regulatory Research: Mechanical Behavior of Ballooned  
and Ruptured Cladding. NUREG-2119, ADAMS Accession No. ML12048A475, Feb-  
ruary 2012
- [10] U.S.-NRC, Office of Nuclear Regulatory Research: Post-Test Examination Results  
from Integral, High-Burnup, Fueled LOCA Tests at Studsvik Nuclear Laboratory.  
NUREG-2160, August 2013
- [11] Brettner, M. (Physikerbüro Bremen): Überlegungen zur Neufestlegung des zulässigen  
ECR-Werts bei Kühlmittelverluststörfällen; Überarbeitete und ergänzte Fassung des  
Vortrags zur 2. Sitzung der RSK AST AG ECR am 7. März 2014, 19. März 2014
- [12] Stuckert, J.; Große, M.; Rössger, C.; Steinbrück, M.; Walter, M.: Results of the com-  
missioning bundle test QUENCH-L0 performed under LOCA conditions. Report-Nr.  
KIT-SR 7571, ISBN 978-3-86644-720-2, 2011

- 
- [13] Stuckert, J., et al.: Results of the reference bundle test QUENCH-L1 with Zircaloy-4 claddings performed under LOCA conditions. Report-Nr. KIT-SR 7651, 2013
- [14] Stuckert, J. et al.: Results of the LOCA bundle test QUENCH-L2 with M5® claddings, Report-Nr. KIT-SR 7677, Karlsruhe, June 2015
- [15] Nagase, F.; Fuketa, T.: Behavior of Pre-hydrided Zircaloy-4 Cladding under Simulated LOCA Conditions. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 42, No. 2, p. 209–218, February 2005
- [16] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Performance-Based Emergency Core Cooling Systems Cladding Acceptance Criteria; Proposed Rule 10 CFR Parts 50 and 52. Federal Register Vo. 79, No. 59, March 24, 2014