

---

**RSK - STELLUNGNAHME**

**Einfluss von Wasserstoff auf das Zähigkeitsverhalten von bestrahlten RDB-Stählen  
Beratungsauftrag zum Abschlussbericht des Vorhabens 1501267 der Leibnitz-Institute IFW und FZR  
Dresden vom Dezember 2004**

**13.02.2008 (405. Sitzung)**

1	Beratungsauftrag .....	2
2	Sachverhalt und sicherheitstechnischer Hintergrund .....	2
3	Bewertungsmaßstäbe .....	2
4	Beratungsgang.....	3
5	Beratungsergebnis.....	4
6	Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise.....	5

---

## **1        Beratungsauftrag**

In der **53. Sitzung am 27.04.2005** war der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE darüber informiert worden, dass zum Vorhaben „Einfluss von Wasserstoff auf das Zähigkeitsverhalten von bestrahlten RDB-Stählen“ (Nr. 1501267) der Leibniz-Institute IFW und FZR Dresden vom Dezember 2004 ein Beratungsauftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) [1] an die RSK erteilt worden war (RDB = Reaktordruckbehälter).

## **2        Sachverhalt und sicherheitstechnischer Hintergrund**

Das Vorhaben hatte zum Ziel aufzuzeigen, ob es einen synergistischen Effekt zwischen Wasserstoff- und Neutronenversprödung gibt. Die zur Beantwortung dieser Frage angewandte Versuchsmethodik waren Wasserstoffbeladung, Zugversuche, Fraktografie, SANS-Untersuchungen (SANS: small angle neutron scattering/Neutronenkleinwinkelstreuung), Wasserstoffanalytik, Thermodesorptionsanalyse. Es wurde gezeigt, dass für unbestrahltes Material eine Abhängigkeit der Brucheinschnürung von der Wasserstoffbeladung und der Verformungsgeschwindigkeit in den Zugversuchen bei Raumtemperatur (RT) besteht. Nach Bestrahlung sei eine Abhängigkeit der Brucheinschnürung von der Wasserstoffbeladung und der Fluenz ( $d\epsilon/dt = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) nachgewiesen worden. Die Abnahme der Zähigkeit nach in-situ-Wasserstoffbeladung sei stark und der Versprödungseffekt infolge Neutronenbestrahlung werde durch zusätzliche Wasserstoffaufnahme verstärkt.

Zur Abhängigkeit der Brucheinschnürung von der Zugfestigkeit sei das folgende Ergebnis gefunden worden:

- Die Brucheinschnürung nimmt mit steigender Festigkeit ab.
- Eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoffversprödung ist auf Verfestigung durch Strahlendefekte zurückzuführen.
- Bestrahlungsinduzierte Defekte sind keine bevorzugten Plätze für Wasserstoff.
- Im unbestrahlten Material ist die Abnahme der Zähigkeit auch unter in-situ-Beladung geringer als im bestrahlten RDB-Stahl.

Eine zusätzliche Versprödung, d. h. additiv zur Neutronenversprödung, des RDB durch den Einschluss von Wasserstoff würde eine neue Bewertung der Integrität bedeuten. Der sicherheitstechnische Hintergrund ist somit aufgezeigt. Es gilt zu klären, ob mit einer zusätzlichen Versprödung unter Betriebsbedingungen zu rechnen ist.

## **3        Bewertungsmaßstäbe**

Einschlägige Anforderungen sind in dem in Deutschland vorliegenden kerntechnischen Regelwerk und hier insbesondere in den BMI-Sicherheitskriterien, den RSK-Leitlinien für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (DWR) und den entsprechenden KTA-Regeln für Leistungsreaktoren definiert.

Die Bewertung gründet sich ferner auf den in der Fachliteratur veröffentlichten Stand von Wissenschaft und Technik sowie auf die langjährige Erfahrung der zugezogenen Sachverständigen auf Grund ihrer

Die RSK hat geprüft, ob diese Anforderungen bei der Bewertung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt werden.

#### 4 Beratungsgang

In der **55. Sitzung am 05./06.07.2005** des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE wurde über die Ergebnisse des o. g. Vorhabens berichtet. Ausgangspunkt war laut mündlichem Bericht die Fragestellung gewesen, ob es einen synergistischen Effekt zwischen Wasserstoff- und Neutronenversprödung gibt. Im Bericht wurde auf die Motivation, die untersuchten Werkstoffe, die Versuchsmethodik (Wasserstoffbeladung, Zugversuche, Fraktografie, SANS-Untersuchungen, Wasserstoffanalytik, Thermodesorptionsanalyse) eingegangen. Bei den Zugversuchen waren dabei neben den Werten für die Festigkeit auch die Brucheinschnürung und die Bruchdehnung als Maß für die Zähigkeit bestimmt worden. Im Einzelnen seien folgende Ergebnisse erzielt worden:

- Versuche bei Raumtemperatur

Für unbestrahltes Material sei bei den Zugversuchen eine Abnahme der Brucheinschnürung durch Wasserstoffbeladung gefunden worden, jedoch nur bei in-situ-Wasserstoffbeladung während der Verformung. Dieser Effekt trete verstärkt bei niedriger Verformungsgeschwindigkeit ( $d\varepsilon/dt = 10^{-6}s^{-1}$ ) auf.

Nach Bestrahlung werde der Versprödungseffekt infolge Neutronenbestrahlung durch zusätzliche Wasserstoffaufnahme verstärkt. Der Versprödungseffekt durch Wasserstoff sei nach Bestrahlung stärker ausgeprägt als bei unbestrahlten Proben, trete aber auch hier nur bei in-situ-Wasserstoffbeladung auf und nehme auch hier mit abnehmender Verformungsgeschwindigkeit zu. Dies entspreche dem generellen Trend, dass die Brucheinschnürung mit steigender Festigkeit abnimmt. D.h. die höhere Empfindlichkeit der bestrahlten Proben gegenüber Versprödung durch Wasserstoff sei auf die vorhergehende Verfestigung des Werkstoffs durch Strahlendefekte zurückzuführen. Darüber hinaus werde das Ausbleiben eines Effektes der Wasserstoff-Vorbeladung dahingehend interpretiert, dass bestrahlungsinduzierte Defekte keine bevorzugten Plätze für Wasserstoff seien. Eine Ausnahme stellten hier Proben dar, die bei niedrigen Temperaturen (55°C) im Forschungsreaktor bestrahlt worden waren und daher besonders leerstellenreiche Defekte haben. Diese Proben zeigten auch eine Versprödung durch Wasserstoff-Vorbeladung.

- Versuche bei 250° C:

Die durchgeführten Zugversuche hätten ergeben, dass Festigkeitswerte und Zähigkeitswerte geringer als bei RT seien. Alle Bruchflächen zeigten einen duktilen Bruch. Die Abnahme von Festigkeit und Zähigkeit stehe nicht im Zusammenhang mit Wasserstoff. Anhand der SANS-Untersuchungen sei gebundener Wasserstoff detektiert worden, der aber nicht auf die Wechselwirkung mit Cu-reichen Strahlendefekten zurückzuführen sei. Zwar werde Wasserstoff im Stahl eingelagert, aber er effundiere bereits unterhalb der Betriebstemperatur des Reaktors. Zusätzliche potentielle Fallen (Trappplätze) für Wasserstoff entstünden nach Bestrahlung; diese leisteten aber unter Betriebsbedingungen keinen Beitrag zur Versprödung der RDB-Stähle.

Zusammenfassend habe man unter den gewählten praxisrelevanten Versuchsbedingungen zum Einfluss von Wasserstoff auf das Zähigkeitsverhalten und die Wechselwirkung von Wasserstoff mit Strahlendefekten von

---

RDB-Stählen festgestellt:

- Ein Versprödungseffekt durch Wasserstoff ist mit Ausnahme der bei niedriger Temperatur bestrahlten Proben nur bei in-situ-Wasserstoffbeladung und RT zu beobachten. Bei kleinen Verformungsgeschwindigkeiten nimmt der Versprödungseffekt bei RT zu.
- Die bei niedriger Temperatur bestrahlten Proben zeigen bei RT auch einen Versprödungseffekt durch Wasserstoff nach Wasserstoff-Vorbeladung.
- Bei 250° C wurde in keinem Falle eine Versprödung durch Wasserstoff gefunden.
- Bei RT korreliert die Anfälligkeit gegenüber Wasserstoffversprödung mit der Zunahme der Festigkeit der bestrahlten RDB-Stähle.
- Bestrahlungsinduzierte Defekte sind keine bevorzugten Plätze für einen Aufenthalt von Wasserstoff unter Betriebstemperaturen von RDB.

Von den ausführenden Instituten wurden Untersuchungen des Zähigkeitsverhaltens wasserstoffbeladener, bestrahlter RDB-Stähle im spröde-duktilen Übergangsbereich durch Ermittlung der Referenztemperatur  $T_0$  bei Anwendung des Master-Curve-Konzeptes empfohlen.

In der an den mündlichen Bericht anschließenden Diskussion wurden die folgenden Aspekte angesprochen:

- Voraussetzungen für die Existenz von Wasserstoff: Radiolyse, Herstellung, Korrosion,
- Versprödung bei RT und im Übergangsbereich und
- Aussagekraft der durchgeführten Zugversuche bzgl. einer Zähigkeitsabnahme.

In der **70. Sitzung am 07.03.2007** hatte der Ausschuss ein Positionspapier erstellt, das der abschließenden Beratung in der **78. Sitzung am 07.11.2007** zu Grunde lag.

## **5 Beratungsergebnis**

In der Beratung wurde die Frage behandelt, ob der Einfluss von Wasserstoff auf das Zähigkeitsverhalten von bestrahlten RDB-Stählen relevant ist und ob und ggf. welche zusätzlichen Kriterien für die Integritätsbewertung von RDB-Stählen in die Regelwerkserstellung Eingang finden sollten und wie diese zu berücksichtigen seien.

Die RSK stellt fest, dass für den Fall, dass Wasserstoff im Leistungsbetrieb infolge Korrosion und Radiolyse vorhanden sei (die Einlagerung von Wasserstoff bei der Komponentenfertigung scheidet nach Meinung der RSK aufgrund der bei der Herstellung üblichen Wärmebehandlungen als Ursache aus) oder in den Betriebsphasen An- und Abfahren sowie im anomalen Betrieb oder bei Störfällen erzeugt wird, kein wesentlicher Einfluss auf das Sprödebruchverhalten im für die Nachweisführung der Sprödebruchsicherheit sicherheitstechnisch interessanten Temperaturbereich (Thermoschock, Kühlmittelverluststörfall bei Betriebstemperatur mit Abkühlung bis 60° C) vorliegt. Auch nach Neutronenbestrahlung ist dieser Effekt vernachlässigbar. Es ist experimentell nachgewiesen, dass bei Temperaturen über 250° C Wasserstoff aus dem Metallgitter effundiert, sodass keine Versprödung durch Wasserstoff eintritt. Somit ist nach Einschätzung der RSK ein solcher Effekt auch nicht für die Betriebstemperaturbereiche von SWR-Anlagen (260° C) und DWR-

---

Anlagen (290° C) relevant. Dieser Sachverhalt ergibt sich anhand der dargelegten Ergebnisse aus Zugversuchen. Nach Einschätzung der RSK würden sie auch für den angerissenen Werkstoffzustand gelten.

Die RSK sieht unter diesen Randbedingungen keine zusätzlichen Effekte, die man bei der Nachweisführung für die RDB-Integrität berücksichtigen müsste.

## **6 Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise**

Die RSK kommt zu dem Schluss, in Bezug auf einen potentiellen Versprödungseffekt von Wasserstoff keine zusätzlichen Kriterien für die Integritätsbewertung von RDB-Stählen zu berücksichtigen.

---

## Beratungsunterlagen

- [1] Schreiben (Az.: RS I 3 – 17018/1) des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 08.04.2005 an die RSK-Geschäftsstelle, betr.: Einfluss von Wasserstoff auf das Zähigkeitsverhalten von bestrahlten RDB-Stählen, Beratungsauftrag zum Abschlussbericht des Vorhabens 1501267 des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden vom Dezember 2004
  
- [2] Einfluss von Wasserstoff auf die Zähigkeitsabnahme von bestrahlten RDB-Stählen Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, Institut für Metallische Werkstoffe, Autoren: M. Uhlemann, G. Müller, A. Ulbrich, J. Böhmert, Abschlussbericht Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr. 1501267, Dezember 2004 (als Druck und als CD)
  
- [3] Kopien von Folien zum mündlichen Bericht des IFW und FZR Dresden in der 55. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 05./06.07.2005