

**Forschungsvorhaben BMWi Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr. 1501390B:
Weiterentwicklung von Bewertungskonzepten zum Versagensverhalten ferritischer Stähle
im Übergangsbereich
Teilprojekt: Weiterentwicklung und Validierung eines nichtlokalen Schädigungsmodells zur
Vorhersage der Bruchzähigkeit im oberen Übergangsgebiet**

Kurzfassung

In der Kerntechnik ist bei Bauteilen mit hoher sicherheitstechnischer Bedeutung Versagen mit Sicherheit auszuschließen. Derzeit erfolgen die Sicherheitsnachweise hauptsächlich mit bruchmechanischen Methoden. Speziell im Übergangsgebiet der Bruchzähigkeit, in dem ein begrenztes stabiles Risswachstum vor dem Versagen durch Spaltbruch auftreten kann stößt diese derzeit eingesetzte Methode oft an ihre Grenzen.

Im Rahmen des BMWi-Vorhabens der RWTH Aachen, des IWM Freiburg und der MPA Universität Stuttgart erfolgt die Weiterentwicklung von Bewertungskonzepten zur Sicherheitsanalyse von mechanisch beanspruchten Bauteilen. Hierbei werden schädigungsmechanische Ansätze für den Gleitbruch und local-approach-Konzepten für den Spaltbruch eingesetzt um sowohl die Hochlage als auch das Übergangsgebiet der Zähigkeit zu beschreiben. Mikromechanisch basierte Modelle zur Beschreibung der duktilen Rissinitiierung und des daran anschließenden duktilen Risswachstums bis hin zur Spaltbruchinstabilität werden weiter entwickelt und verifiziert.

Im BMWi-Teilvorhaben 1501 390B der MPA Universität Stuttgart wird die zähe Rissinitiierung und das sich daran anschließende stabile Risswachstum im oberen Übergangsgebiet mit einem Schädigungsmodell berechnet. Bei den derzeit verwendeten lokalen Schädigungsmodellen ist die Lösung elementgrößenabhängig. Dieser Nachteil kann umgangen werden, indem die Elementgröße direkt an die Mikrostruktur gekoppelt wird. Bei großen Spannungsgradienten und kleinen Risswachstumsträgern, wie im Übergangsgebiet der Zähigkeit, werden jedoch sehr kleine Elemente benötigt. Dies steht im Konflikt zu einer aus der Mikrostruktur abgeleiteten Elementgröße. Abhilfe schaffen hier sogenannte nichtlokale Schädigungsmodelle. Der Gradient der Schädigung geht hierbei als zusätzlicher Freiheitsgrad in die Berechnung ein und die Ergebnisse werden dadurch unabhängig von der Elementgröße.

In diesem Teilvorhaben werden schädigungsmechanische Bewertungen mit dem nichtlokalen Rousselier Modell zur Bestimmung der Zähigkeitshochlage durchgeführt. Für diese Berechnungen wird ein vorliegendes benutzerdefiniertes Element in ein kommerzielles Finite Elemente Programm implementiert. Anhand einfacher Beispielrechnungen wird die korrekte Implementierung für zwei und drei Dimensionen verifiziert. Nichtlokale schädigungsmechanische Berechnungen erhöhen im Vergleich mit lokalen Modellen die Rechenzeiten um ein Vielfaches. Um diese Rechenzeiten zu reduzieren werden unterschiedliche Ansätze für die Berechnung des Tangentenmoduls untersucht, wobei eine Reduzierung der Rechenzeit von 5 % erzielt werden kann. Für die Vorhersage der Bruchzähigkeit von der Hochlage bis zur Tieflage wird das nichtlokale Rousselier Modell mit dem Beremin Modell gekoppelt. Dadurch kann sowohl duktiles Risswachstum als auch Versagen durch Spaltbruch parallel beschrieben werden.

Zur Verifizierung des Konzepts werden vorliegende Ergebnisse von Bruchmechanikproben aus dem Werkstoff 22NiMoCr3-7 herangezogen. Numerische Untersuchungen dieser Bruchmechanikproben (C(T)-Proben und SE(B)-Proben mit und ohne Seitenkerben) zeigen sehr gute Übereinstimmungen zu den experimentellen Ergebnissen. Das Kraft-Verformungsverhalten sowie die sich ausbildende Rissfronten können von der Hochlage bis zur Tieflage mit dem gekoppelten nichtlokalen Modell sehr gut beschrieben werden. Die mit dem gekoppelten nichtlokalen Modell berechnete Spaltbruchinstabilität in Abhängigkeit der Temperatur kann die Streuung der experimentellen Ergebnisse gut abbilden.

In Zusammenarbeit mit dem BMWi-Vorhaben 1501 390A der RWTH Aachen wird der Vorgang der Rissentstehung näher untersucht. Zum einen werden sogenannte Rissinitiierungskurven mit dem Rousselier Modell für verschiedene Temperaturen erstellt. Die mit dem Rousselier Modell bestimmten Initiierungswerte stimmen mit experimentellen Daten gut überein und beschreiben den Beginn eines makroskopischen Anrisses.

In einem weiteren Schritt werden Untersuchungen der Bruchflächen von gekerbten Flachzugproben und metallographischen Schliffen an Rundzugproben mit unterschiedlichem plastischem Deformationsgrad. Diese Proben wurden im Rahmen des BMWi-Vorhabens 1501 390A an der RWTH Aachen geprüft und an der MPA Universität Stuttgart metallographisch untersucht, um den mikro-mechanischen Schädigungsablauf zu ermitteln. Der Beginn der Schädigung (Hohlrauminitiierung) kann sehr gut mit der Gleichstrompotentialmethode an der RWTH Aachen bestimmt werden. Die gemessenen Initiierungswerte entsprechen nach den Untersuchungen der MPA Universität Stuttgart dem Zeitpunkt erster Ablösungen der Einschlüsse von der Matrix und liegen weit unter dem Zeitpunkt der makroskopischen Rissinitiierung. Die von der RWTH Aachen erstellte Kurve kann folglich als Schädigungsinitiierungskurve bezeichnet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem gekoppelten nichtlokalen Schädigungsmodell gute Ergebnisse für die hier untersuchten Proben im Übergangsbereich und in der Hochlage der Zähigkeit erzielt werden können. Das Vorhabenziel wurde erreicht.

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Ludwig Stumpfrock

MPA Universität Stuttgart

Abteilung 31 Berechnung

Telefon: 0711 685 63041

Email: ludwig.stumpfrock@mpa.uni-stuttgart.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**