

In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens mit zerstörungsfreien Messmethoden

Ralf TSCHUNCKY*, Klaus SZIELASKO*, Iris ALTPETER*, Hans-Georg HERRMANN*,
Gerd DOBMANN*, Christian BOLLER*

* Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
(Campus E3 1, 66123 Saarbrücken)

Kurzfassung. Das Basissicherheitskonzept zur Auslegung kerntechnischer Anlagen erfordert u.a. die Absicherung der Werkstoffqualität bezüglich Zähigkeit und Sprödbrochenanfälligkeit. Hierzu werden derzeit Kerbschlagbiegeversuche (z.B. zur Ermittlung der Sprödbrechübergangstemperatur) durchgeführt. Die Compact Tension-Versuche (C(T)-Versuche) dienen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit, Rissinitiierung, des Risswachstums usw. Die Quantifizierung des Versagensverhaltens im Übergangsbereich der Zähigkeit ist derzeit nur bedingt möglich, was entsprechend hohe Sicherheitsabstände zur Bewertung des Versagensverhaltens erforderlich macht. Die zusätzliche Instrumentierung solcher Versuche sollte weitere Informationen über den Versagensablauf liefern und eine bessere bruchmechanische Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit erlauben.

Hierzu wurden in Analogie zum C(T)-Versuch Dreipunkt-Biegeversuche und in Analogie zum Kerbschlagbiegeversuch Fallversuche mit in-situ ZfP-Sensorik zur Erfassung von Ultraschalllaufzeiten und Streuflusssignalen durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die gemessene Ultraschalllaufzeit als auch die Streuflusssignale Informationen über das Rissgeschehen während des Biegeversuches liefern. Insbesondere die Ultraschalllaufzeit kann das Risswachstum in-situ kontinuierlich nachweisen. Dies belegt ein linearer Zusammenhang zwischen der Ultraschalllaufzeit und dem Risswachstum. Darüber hinaus konnte auch der Zeitpunkt der Rissinitiierung sowohl im Ultraschalllaufzeitsignal als auch im Streuflusssignal detektiert werden. Besonders im Fallversuch, konnten die Streuflusssignale Informationen zum Risswachstum liefern.

1. Ausgangssituation

Bei der Nutzung der Kernenergie zur Energiegewinnung sind reaktorkernahe Elemente der Kernreaktordruckbehälter unterschiedlich hohen Bestrahlungen ausgesetzt. Aus diesem Grund erfahren die verbauten Werkstoffe infolge der Auslagerungszeit unter Betriebsbedingungen eine durch die Bestrahlung bedingte Veränderung des Mikrogefüges. Es findet eine betriebsbedingte Versprödung der reaktornah eingesetzten Werkstoffe statt.

Das Basissicherheitskonzept zur Auslegung kerntechnischer Anlagen erfordert deshalb unter anderem die Absicherung der Werkstoffqualität bezüglich Zähigkeit bzw. Sprödbrochenanfälligkeit. Hierzu werden in der Regel Kerbschlagbiegeversuche an ISO-V-Proben und Bruchmechanikversuche an Compact Tension-Proben (C(T)-Versuche) zur Bestimmung der Rissinitiierung, des Risswachstums usw. durchgeführt. Grundsätzlich besteht kein Anlass, diese bewährte Vorgehensweise zu ändern. Jedoch kann aus heutiger Sicht das Versagensverhalten im Übergangsbereich der Zähigkeit mittels der zerstörend



ermittelten Versuchsergebnisse nicht mit zufriedenstellender Genauigkeit quantifiziert werden. Die Einflussgrößen im Versagensprozess sind zwar phänomenologisch bekannt und qualitativ beschreibbar, eine zuverlässige und vollständige Quantifizierung der Versagensbeanspruchung gelingt jedoch nicht mit der wünschenswerten Genauigkeit.

Dies bedingt, dass mit entsprechend großen Sicherheitsabständen gearbeitet werden muss. Darüber hinaus kann das Risswachstum nur indirekt z.B. über die Steifigkeitsänderung der Probe oder über die Interpretation von DMS-Signalen (DMS: **D**ehnungs**M**ess**S**treifen) ermittelt werden. Dies erfordert bei quasistatischen Bruchmechanikversuchen die Durchführung von Teilentlastungen, wobei die Daten von Kraft und Rissöffnung (COD: **C**rack **O**pening **D**isplacement) mit einer hochgenauen Messtechnik erfasst werden müssen [1]. Durch die Verwendung der Teilentlastungsmethode kann das Risswachstum jedoch nur nach Versuchsende ermittelt und dem jeweiligen Teilentlastungszeitpunkt zugeordnet werden. Es besteht daher Interesse an Informationen über dem Risswachstum bereits während des Versuchsablaufs.

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Die zusätzliche Instrumentierung des Kerbschlagbiege- und C(T)-Versuchs unter Verwendung von ergänzenden zerstörungsfreien Messmethoden stellt eine Möglichkeit dar, zusätzliche Informationen über das Werkstoffverhalten bzw. Risswachstumsverhalten zu erhalten, was eine bessere bruchmechanische Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit ermöglichen kann. Durch die in-situ Instrumentierung von Bruchmechanikversuchen ist zusätzlich eine wesentliche Zeit- und Aufwandsminderung möglich, denn durch die Rissverfolgung während der Versuche wird die Teilentlastungsmethode hinfällig.

Um dies zu erreichen, wurde in einem ersten Schritt mit Hilfe von Vorversuchen unter vereinfachten Bedingungen die grundsätzliche Machbarkeit aufgezeigt. In den Vorversuchen wurden Dreipunkt-Biege- und Fallversuche in Analogie zum C(T)- und zum Kerbschlagbiegeversuch durchgeführt [2-7]. Der Dreipunkt-Biegeversuch an SE(B)-Proben (**S**ingle-**E**dge(**B**ending)-Proben) bietet bezüglich des Risswachstumsverhaltens vergleichbare Bedingungen wie der C(T)-Versuch, jedoch sind die hierfür benötigten Biegeproben mit weniger Kostenaufwand herzustellen. Der Fallversuch bietet bezüglich des dynamischen Risswachstumsverhaltens vergleichbare Bedingungen wie der Kerbschlagbiegeversuch, jedoch können die benötigten Proben größere Dimensionen aufweisen, was die Applikation zusätzlicher Sensorik erleichtert und zunächst auch ein berührendes Anbringen der Sensorik erlaubt. Es wurden sowohl für die Dreipunkt-Biege- als auch für die Fallversuche SE(B)-Proben mit einer Querschnittsfläche von 25 x 50 mm² und einer Länge von 240 mm des Werkstoffs 22NiMoCr3-7 (Biblis C) verwendet.

3. Zerstörungsfreie Messmethoden zur in-situ Überwachung des Risswachstums

Als Messmethoden zur in-situ Überwachung des Risswachstums wurden der elektromagnetisch angeregte Ultraschall (EMUS) [8] in Sende-Empfangsanordnung zur Laufzeitmessung (LZM) [9], und die magnetische Streuflussmethode (MFL; **M**agnetic **F**lux **L**eakage) angewandt [10-11]. Das zu erwartende Rissfortschrittsverhalten während des Ablaufs von Bruchmechanikversuchen ist in Abbildung 1 illustriert.

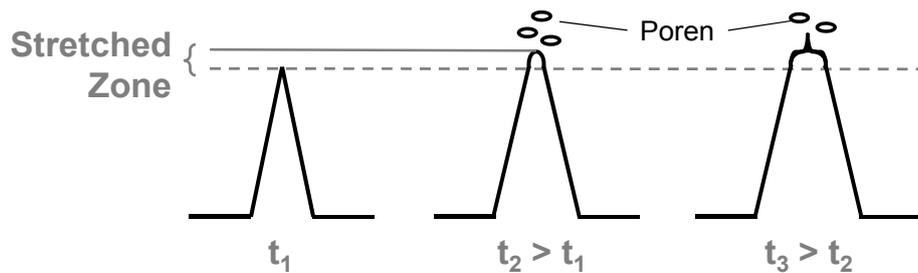


Abbildung 1. Zu erwartendes Rissfortschrittsverhalten während dem Verlauf von Bruchmechanikversuchen

Es ist zu Beginn davon auszugehen, dass der angeschwungene Riss zunächst elastisch geöffnet wird (Abbildung 1; t_1) und sich anschließend eine plastische Zone (Stretched Zone; Abbildung 1; t_2) vor der Initiierung des stabilen Risswachstums (Abbildung 1; t_3) bildet.

3.1. Elektromagnetisch angeregter Ultraschall

Mit Hilfe von EMUS-Wandlern können in leitfähigen Materialien berührungslos und koppelmittelfrei Ultraschallwellen angeregt werden, die sich entlang der Oberfläche ausbreiten, auch Rayleigh-Wellen genannt. Es besteht daher die Möglichkeit, zur in-situ Überwachung einen EMUS-Sendewandler neben der Kerbe einer SE(B)-Probe anzubringen und den entsprechenden Empfangswandler auf der gegenüberliegenden Seite neben der Kerbe zu positionieren. Somit muss die gesendete Rayleigh-Ultraschallwelle, um zum Empfänger zu gelangen, den Weg um die Kerbe, den angeschwungenen Riss und den entstehenden Riss nehmen, was bei Risswachstum zu einer längeren Signallaufzeit führen würde und somit durch eine LZM detektiert werden kann (siehe Abbildung 2).

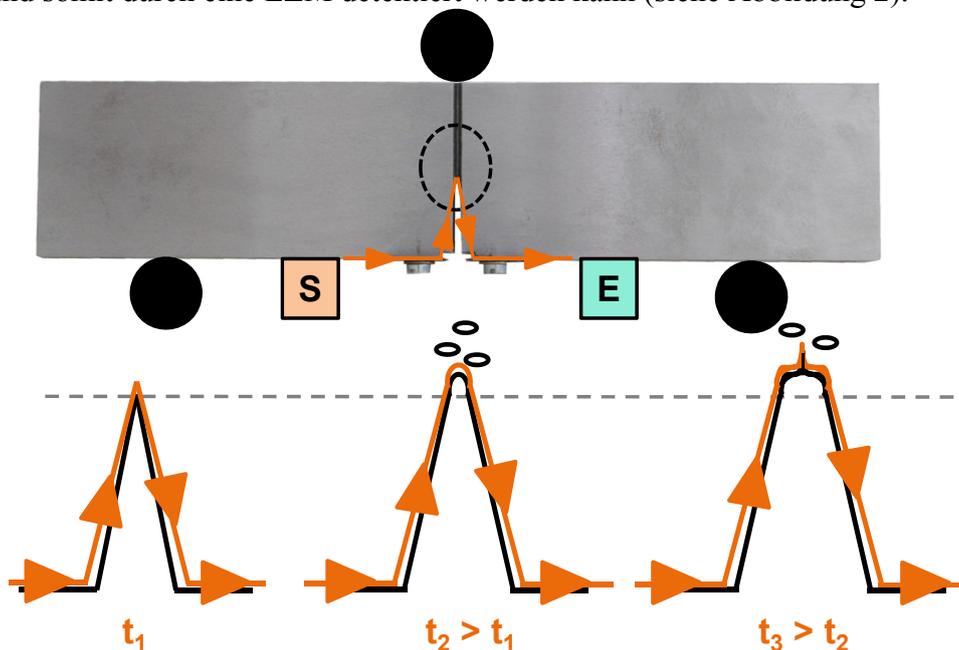


Abbildung 2. Anordnung der EMUS-Wandler und der systematische Verlauf der angeregten Oberflächenwelle während der Dreipunkt-Biegeversuche (oben) und erwartetes Verhalten der Rissausbreitung sowie der in-situ gemessenen Ultraschalllaufzeit während eines Dreipunkt-Biegeversuches (unten)

Diese Anordnung der Sensoren wurde nur in den Dreipunkt-Biegeversuchen verwendet. Bei den Fallversuchen kam diese Messmethode nicht zum Einsatz, da die zur Zeit realisierbare Senderate und Messgeschwindigkeit nicht ausreicht, um das schnelle Risswachstum während des Fallversuchs zu erfassen.

3.2. Magnetische Streuflussmethode

Bei der MFL-Methode werden die Proben im Bereich der Rissentstehung mit einem magnetischen Gleichfeld aufmagnetisiert, und ein mehrkanaliges Streuflusssondenarray, bestehend aus vier GMR-Sensoren (GMR: **G**iant **M**agneto**R**esistance), im Bereich der Spitze des angeschwungenen Risses angebracht (siehe Abbildung 3). Bei Vergrößerung der Rissöffnung bzw. beim Wachstum des Risses ändert sich das magnetische Streufeld, was von den vier Magnetfeldsensoren positionssensitiv detektiert werden kann.

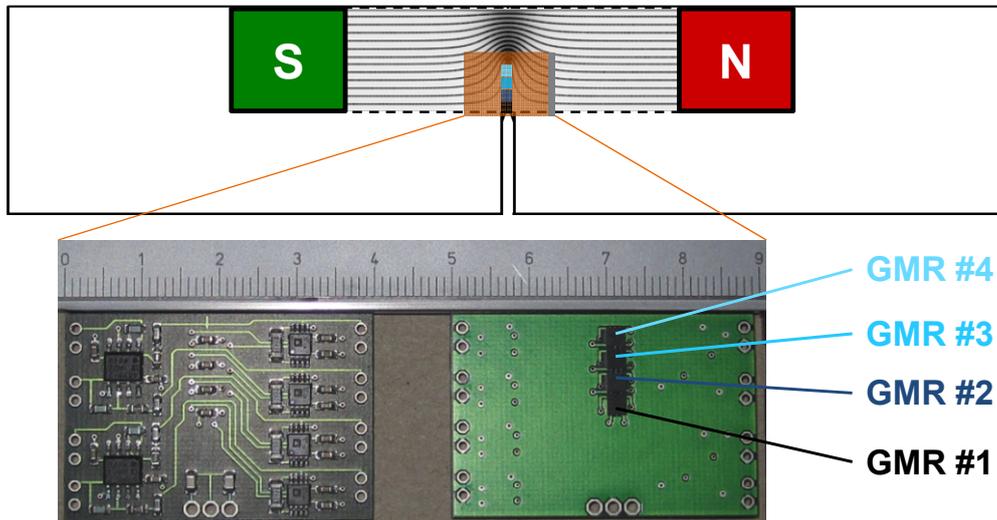


Abbildung 3. Anordnung der Gleichfeldmagnetisierung mittels Permanentmagnetjoch und des GMR-Linienarrays im Bereich des angeschwungenen Risses (oben) und ein Foto des vierkanaligen Linienarrays (Vor- und Rückseite) mit einem Größenvergleich (unten)

Aus Abbildung 3 wird deutlich, dass sich die Flussdichte auf den verbleibenden Probenquerschnitt konzentriert und somit nur im Bereich der Risspitze die höchste Flussdichte vorliegt. Dies konnte durch eine Finite-Elemente-Simulation, wie in Abbildung 3 (oben) dargestellt, dokumentiert werden.

4. Erzielte Ergebnisse

4.1. Dreipunkt-Biegeversuche

Im Laufe der Biegeversuche wurden die von den applizierten Sensoren erfassten Signale aufgezeichnet und mit den von der Prüfmaschine gleichzeitig mitprotokollierten Kraft-, Durchbiegungs-, Rissöffnungs- (COD-) und Zeit-Informationen direkt verglichen. Durch die Teilentlastungsmethode konnten im Nachhinein Referenzwerte für die tatsächliche Risslänge zum jeweiligen betrachteten Teilentlastungszeitpunkt durchgeführt werden.

4.1.1. Laufzeitmessungen

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die während eines Biegeversuches an einer Probe aufgenommenen Maschinendaten Kraft, COD und das Risswachstum, abgeleitet aus den Teilentlastungen, sowie die Laufzeit des elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignals als Funktion der Versuchszeit. Die Laufzeit ist ein Maß für die Wegstrecke, die der Ultraschall auf dem Weg vom Sender zum Empfänger zurücklegen muss. Bei der gewählten Sende-/Empfangsanordnung ist diese Laufzeit durch die Kerbtiefe und die aktuelle Risstiefe bestimmt (vgl. Abbildung 2).

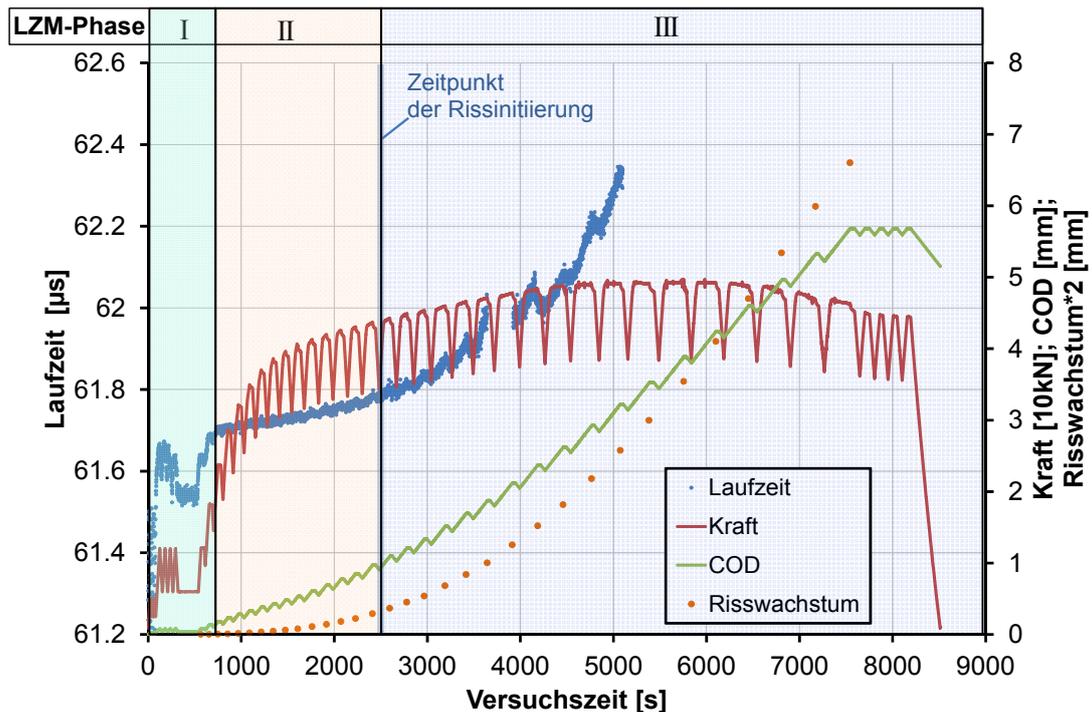


Abbildung 4. Verlauf der Laufzeit des elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignals, der COD, der Kraft während eines Dreipunkt-Biegeversuchs sowie des nach Versuchsende aus den Teillastungen bestimmten Risswachstums in Abhängigkeit von der Versuchszeit

Zu Beginn des Biegeversuchs (LHM-Phase I) wurde die Biegeprobe im elastischen Bereich mit geringer Biegebelastung beaufschlagt (Setzzyklen; bis ca. 500 s) anschließend wird die Biegelast erhöht (500 s bis ca. 700 s). Die Laufzeit des elektromagnetisch angeregten Ultraschalls zeigt in dieser Phase die periodische Überlagerung der elastischen Teillastungen, und man beobachtet im Bereich der steigenden Biegelast einen signifikanten Anstieg der Laufzeit von 61,55 μs auf 61,7 μs , was auf ein fortschreitendes Öffnen des angeschwungenen Risses hindeutet. In dieser Phase wird der angeschwungene Riss durch die Biegebelastung mehr oder weniger weit geöffnet und geschlossen. Während dieser Zeit zeigt die Laufzeit periodische Signalschwankungen synchron zu den Teillastungen, was darauf schließen lässt, dass aufgrund der Teillastungen Teilberührungen der Rissflanken des angeschwungenen Risses stattfinden. Im weiteren Verlauf (LHM-Phase II; bis ca. 2500 s) zeigt die Laufzeit einen geringen stetigen Anstieg bis auf 61,8 μs . In diesem Zeitabschnitt sind kaum mehr Einflüsse der Teillastung sichtbar, da der angeschwungene Riss offenbar eine so hohe Öffnung erreicht hat, dass bei Teillastungen keine Rissflankenkontakte mehr stattfinden. Vermutlich bildet sich in diesem Zeitbereich die Stretched Zone aus. In der darauffolgenden LHM-Phase III zeigt die Laufzeit einen deutlichen Anstieg. Der Beginn dieses Anstiegs in der Laufzeit korreliert mit dem Zeitpunkt der Rissinitiierung. Der steilere Anstieg der Laufzeit nach dem Zeitpunkt der Rissinitiierung spiegelt somit möglicherweise das fortschreitende Risswachstum wider, was durch die Risswachstumskurve bestätigt wird, welche sich zum Laufzeit-Signalverlauf konform verhält. Gleichzeitig wird ab diesem Zeitpunkt wieder eine periodische Änderung der Laufzeit erkennbar, die sich mit fortschreitender Versuchsdauer etwas verstärkt. Dies deutet darauf hin, dass während der Zeit des stabilen Risswachstums die Rissflanken relativ eng zusammen liegen und somit bei Teillastungen wieder Ultraschallbrücken bilden können.

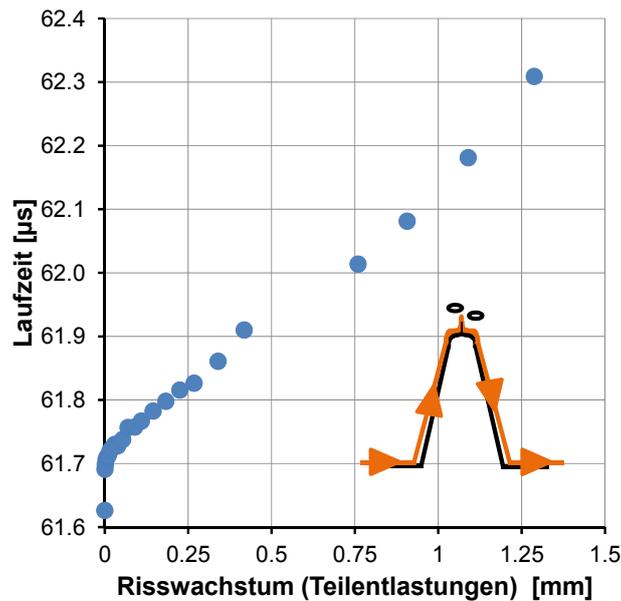


Abbildung 5. Linearer Zusammenhang zwischen Ultraschall-Laufzeit und Risswachstum ermittelt aus den Teilentlastungen

Abbildung 5 zeigt die Ultraschall-Laufzeit als Funktion des Risswachstums, ermittelt aus den Teilentlastungen. Es zeichnet sich ein nahezu linearer Zusammenhang ab, was das Potential der Ultraschalllaufzeitmessung zur in-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens aufzeigt. Dieser Zusammenhang muss durch weitere Untersuchungen statistisch abgesichert werden.

4.1.2. Streuflussmessungen

Abbildung 6 zeigt in Analogie zu Abbildung 4 beispielhaft die während eines Biegeversuches an einer Probe aufgenommenen Maschinendaten in Abhängigkeit von der Versuchszeit. Gleichzeitig wird in dieser Darstellung der Verlauf eines der vier aufgezeichneten magnetischen Streuflusssignale gezeigt (vgl. Abbildung 3).

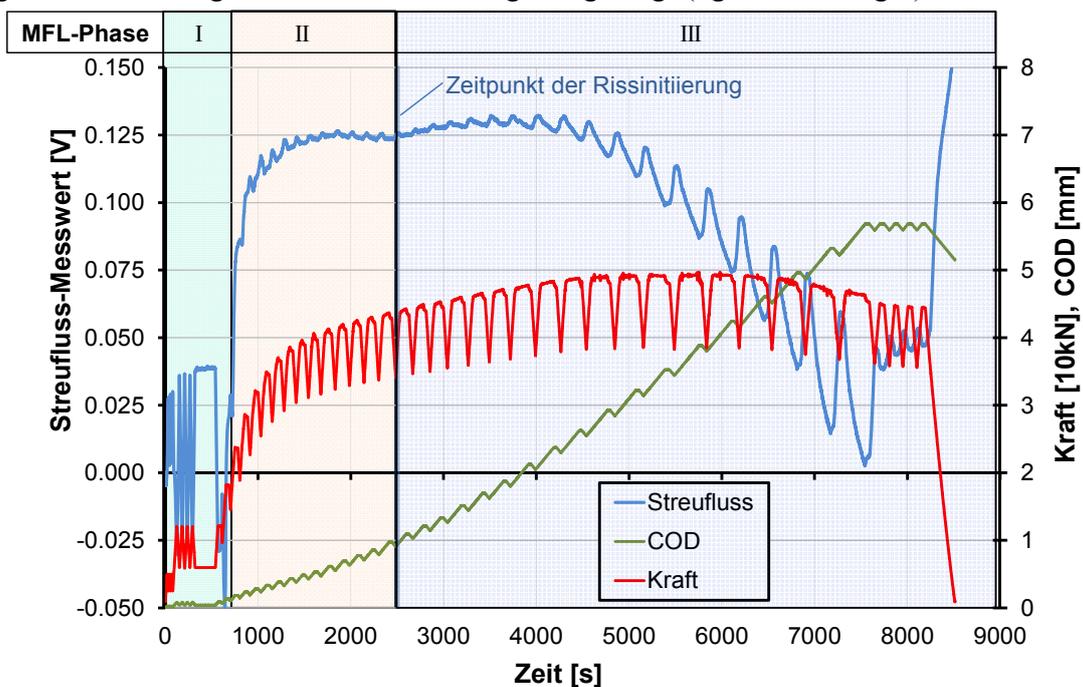


Abbildung 6. Verlauf eines Streuflusssignales, der COD und der Kraft während eines Dreipunkt-Biegeversuchs in Abhängigkeit von der Versuchszeit

Zu Beginn des Biegeversuchs (MFL-Phase I) wurde nach den anfänglichen Setzzyklen (bis ca. 500 s) die Gesamtbiegelast bei überlagerten periodischen Teilentlastungen erhöht (bis ca. 1000 s). Die Teilentlastungen zeigen sich im Streuflussignalverlauf durch periodische Veränderung im Wertebereich des Streuflussesignales, was auf eine Abstandsänderung der Rissflanken aufgrund der aufgetragenen Biegewechsellaast hindeutet. Das Signalniveau des Streuflussesignales steigt steil während der Laststeigerung an, was auf eine Öffnung des angeschwungenen Risses hindeutet. Bei Entlastung schließt sich der Riss jedoch jeweils aufgrund des elastischen Rückfederns der Probe. In der folgenden MFL-Phase II sind weiterhin periodische Änderung des Streuflussesignalsignalniveaus erkennbar, die jedoch in ihrer Amplitude abnehmen, was darauf zurückführbar ist, dass die Rissufer des Schwingrisses vollständig voneinander abheben, und dass sich durch die Plastifizierung der Risspitze die Stretched Zone zu bilden beginnt. Dadurch gehen die Rissufer immer weiter auseinander, und die Risspitze stumpft ab. Zum Rissinitiierungszeitpunkt (ca. 2500 s) hat das Streuflussignal die geringste Periodizität und zeigt ein lokales Minimum. Die MFL-Phase III ist hauptsächlich durch einen Abfall des Streufluss-Signalniveaus gekennzeichnet, was sich mit der zunehmenden Verbreiterung des Risses an der Position des Streuflusssensors sowie dem Risswachstum und der damit verbundenen Verdrängung der magnetischen Flussdichte in den verbleibenden Probenquerschnitt erklären lässt. In dieser Phase zeigt das Streuflussignal wiederum zunehmende periodische Signaländerungen, was damit zu erklären ist, dass eben dieser Verdrängungseffekt durch den sich mit der Kraft ändernden Abstand der Rissufer des neu entstandenen Risses moduliert wird und der verbleibende Querschnitt immer kleiner wird, so dass die Amplitude dieser Modulation steigt.

7.2. *Fallversuche*

Bei den Fallversuchen wurden keine EMUS-Wandler zur Ultraschalllaufzeitmessung appliziert, da die zurzeit realisierbare Senderate und Messgeschwindigkeit nicht ausreicht, das schnelle Risswachstum während des Fallversuches zu erfassen. In Abbildung 7 sind exemplarisch die Maschinendaten (Kraft und Weg) sowie die gemessenen Streuflussesignale als Funktion der Versuchszeit dargestellt.

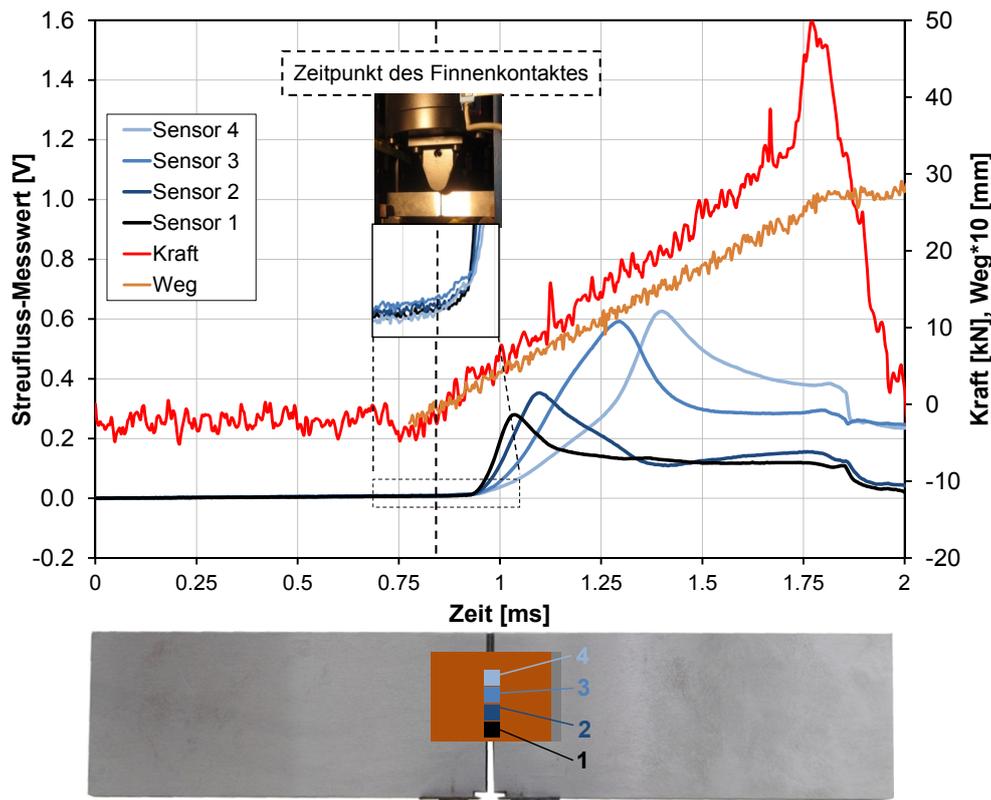


Abbildung 7. Oben: Verlauf der Kraft, des Weges und der vier Streuflussmessungen als Funktion der Versuchszeit und Detailvergrößerung der Streuflussmessungen zum Zeitpunkt des Finnenkontaktes, unten: Anordnung der vier GMR-Sensoren während der Fallversuche an den SE(B)-Proben

Die zeitlich versetzten Streuflussmessungen wurden von vier GMR-Sensoren (Linienarray, vgl. Abbildung 3) gemessen. Während seiner Ausbreitung passiert der Riss die GMR-Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten, was durch die unterschiedliche Lage der Maxima deutlich wird. Der Anstieg der zeitlich versetzten Maxima mit der Versuchszeit lässt sich mit zunehmender Flussdichtekonzentration im Ligament der Probe erklären, da der tragende Probenquerschnitt mit wachsender Risstiefe immer geringer wird und somit die Flussdichte steigt.

5. Zusammenfassung

Es wurden Dreipunkt-Biegeversuche an SE(B)-Proben des Werkstoffs 22NiMoCr3-7 (Biblis C) durchgeführt, in deren Verlauf die von den applizierten Sensoren (GMR-Sensoren und EMUS-Wandler) erfassten Signale (Streuflusssignale und Ultraschalllaufzeiten) aufgezeichnet und mit den von der Prüfmaschine protokollierten Kraft- und Rissöffnungs-(COD)-Informationen korreliert wurden. Durch die Verwendung der Teillastungsmethode bei den Biegeversuchen konnte nach Versuchsende das Risswachstum zum jeweiligen Zeitpunkt der Teillastung zeitintensiv ermittelt werden, da nur zu diesen Zeitpunkten des Versuches Risswachstumsinformationen vorliegen. Darüber hinaus wurden Fallversuche an Proben des gleichen Werkstoffes durchgeführt, in deren Verlauf die von den applizierten GMR-Sensoren erfassten Streuflusssignale aufgezeichnet und mit den von der Prüfmaschine protokollierten Kraft- und Weginformationen korreliert wurden.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die gemessene Ultraschalllaufzeit als auch die Streuflusssignale Informationen über das Rissgeschehen während des Biegeversuches liefern. Insbesondere die Ultraschalllaufzeit kann das Risswachstum kontinuierlich in-situ nachweisen ohne Teillastungskurven messen und diese zeitaufwändig nach

Versuchsende auswerten zu müssen. Dies belegt ein linearer Zusammenhang zwischen der Ultraschalllaufzeit und dem aus den Teilentlastungen ermittelten Risswachstum. Darüber hinaus konnte auch der Zeitpunkt der Rissinitiierung sowohl im Ultraschalllaufzeitsignal als auch im Streuflusssignal detektiert werden. Im Fallversuch, wo keine Teilentlastungen möglich sind, konnten die Streuflusssignale Informationen zum Risswachstum liefern [12].

Die genauen Zusammenhänge müssen allerdings noch in weiterführenden Vorhaben analysiert und statistisch abgesichert werden.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem GRS-Förderkennzeichen 1501408 gefördert. Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Der im Unterauftrag eingebundenen MPA Stuttgart danken die Autoren für die Bereitstellung des Probenmaterials und der Prüfmaschinen sowie Herrn Dr.-Ing. H. Silcher für die Betreuung der Versuche seitens der MPA und für die gute Zusammenarbeit.

Referenzen

- [1] E. Roos, U. Eisele, Determination of the Material Characteristic Values in the Elastic-Plastic Fracture Mechanics by Means of J-Integral Crack Resistance Curves, ASTM Journal of Testing and Evaluation JTEVA 16, No. 1, 1988.
- [2] G. Bernauer, W. Brocks, U. Mühlich, D. Steglich, M. Werwer, Hinweise zur Anwendung des Gurson-Tvergaard-Needleman-Modells, Technical Note GKSS/WNG/99/10, GKSS Research Centre Geesthacht, 1999.
- [3] ESIS P2-92, Procedure for determining the fracture toughness of materials, European Structural Integrity Society, 1992.
- [4] ESIS P6-98, Procedure to measure and calculate material parameters for the local approach to fracture using notched tensile specimens, European Structural Integrity Society. Ed. K.-H. Schwalbe, GKSS Research Centre Geesthacht, 1998.
- [5] ASTM E 399-90, Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, 1997.
- [6] ASTM E 1737-96, Standard test method for J-integral characterization of fracture toughness, Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, 1997.
- [7] ASTM E 1820-96, Standard test method for measurement of fracture toughness, Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, 1997.
- [8] H.-J. Salzburger, A New Design of the RF-part of Electromagnetic-Ultrasonic- (EMUS-) Transducers, Non-Destructive Testing (4), Vol. 4. Oxford, Pergamon Press, pp. 2321-2327, 1988.
- [9] R.J. Hudgell, L.L. Morgan, R.F. Lumb, Non-Destructive Measurement of the Depth of Surface- breaking Cracks using Ultrasonic Rayleigh Waves, British Journal NDT, pp. 144-149, 1974.
- [10] G. Dobmann, G. Walle, P. Höller, Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application, NDT International Vol. 30, Number 2, 1987.
- [11] A. Kloster, Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren; Saarbrücken, Universität, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Dissertation, 2008.
- [12] I. Altpeter, K. Szielasko, R. Tschuncky, J. Kurz, G. Dobmann, C. Sklarczyk, M. Kopp, H. Silcher, In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens während des Kerbschlagbiege- und Compact Tension-Versuches mit zerstörungsfreien Messmethoden; Phase 1, Abschlussbericht - Reaktorsicherheitsforschung - Vorhabens-Nr.: 1501408 des deutschen Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (2012), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.