

Instrumentierung des Dreipunktbiegeversuchs zur in situ Rissverfolgung

Ralf TSCHUNCKY *, Klaus SZIELASKO *, Fabian WEBER *, Gerhard HÜBSCHEN *

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Kurzfassung. Bei der Auslegung kerntechnischer Anlagen erfordert das Basissicherheitskonzept eine Absicherung der Werkstoffqualität hinsichtlich Zähigkeit und Sprödbuchanfälligkeit. Deshalb wird beispielsweise im Rahmen von Dreipunktbiegeversuchen an Single Edge Bending (SE(B))-Proben das Wachstum eines zuvor definiert eingebrachten Schwingrisses unter definierten Lastbedingungen aufgenommen und analysiert. Derartig standardisierte bruchmechanische Versuche sind der vorgeschriebene Weg um das Werkstoffverhalten zu beschreiben und zu bewerten. Die daraus erhaltenen Werkstoffkenngrößen unterliegen jedoch einer hohen Streuung, was dazu führt, dass hohe Sicherheitsmargen bei der Komponentenauslegung erforderlich werden. Die sich dem Versuch anschließenden aufwändigen Ermittlungen der Werkstoffkennwerte wie z.B. die Rissinitiierung oder das Risswachstum bedingen eine Versuchsdurchführung mit zeitaufwändigen Teilentlastungen.

Im Rahmen zweier vom BMWi geförderten Vorhaben konnte gezeigt werden, dass eine zusätzliche Instrumentierung von SE(B)-Versuchen mit elektromagnetischen Ultraschallwandlern (EMUS-Wandlern) und Giant Magnetoresistance- (GMR-) Streufluss-Sensoren in situ Informationen z.B. über den Zeitpunkt der Rissinitiierung und den Rissfortschritt liefern kann. In dem ersten Vorhaben wurde die prinzipielle Machbarkeit der Instrumentierung aufgezeigt. Im Folgevorhaben wurden die Verfahrensansätze weiterentwickelt und an einer größeren Probenzahl statistisch abgesichert.

Zu den Weiterentwicklungen in dem zweiten Vorhaben zählen die Entwicklung und der aktive Einsatz von fokussierenden EMUS-Sende-Wandlern, der zusätzliche passive Einsatz von EMUS-Wandlern als Schallemissions-Empfänger sowie der Betrieb aller EMUS-Wandler (aktiv und passiv) mit einem Prüfsystem im zeitlichen Multiplex und die Verwendung eines 32-Kanal-Streufluss-Linien-Arrays aus GMR-Magnetometern anstatt eines vierkanaligen Arrays aus GMR-Gradiometern.

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Bei der Auslegung kerntechnischer Anlagen erfordert das Basissicherheitskonzept eine Absicherung der Werkstoffqualität hinsichtlich Zähigkeit und Sprödbuchanfälligkeit. Deshalb wird beispielsweise im Rahmen von Dreipunktbiegeversuchen an Single Edge Bending (SE(B))-Proben das Wachstum eines zuvor definiert eingebrachten Schwingrisses unter definierten Lastbedingungen aufgenommen und analysiert. Das dabei zu erwartende Rissfortschrittsverhalten ist in Abb. 1 illustriert.



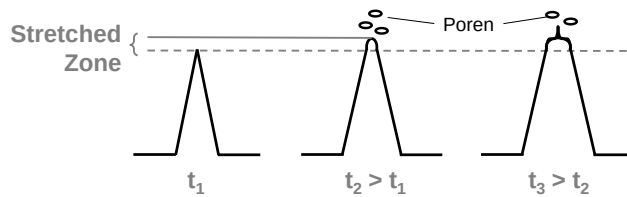


Abb. 1. Zu erwartendes Rissfortschrittsverhalten während des Verlaufs von Bruchmechanikversuchen.

Es ist zu Beginn davon auszugehen, dass der angeschwungene Riss zunächst elastisch geöffnet wird (Abb. 1; t_1) und sich anschließend eine plastische Zone (Stretched Zone; Abb. 1; t_2) vor der Initiierung des stabilen Risswachstums (Abb. 1; t_3) bildet. Damit Werkstoffkennwerte aus Dreipunktbiegeversuchen ermittelt werden können, werden diese nach der Methode der periodischen Teilentlastungen durchgeführt und die Daten von Kraft und Rissöffnung (COD: Crack Opening Displacement) mit einer hochgenauen Messtechnik erfasst [1]. Diese Methode bedingt, dass während eines Dreipunktbiegeversuchs in regelmäßigen Abständen Teilentlastungen der Probe um 20% der aktuellen Last und somit elastische Rückfederungen der Biegeprobe stattfinden müssen. Diese Teilentlastungen benötigen ca. 60-70% der Versuchsdauer von zwei bis drei Stunden. Nach Versuchsende folgen aufwändige Ermittlungen der Werkstoffkennwerte wie z.B. der Zeitpunkt der Rissinitiierung oder das Risswachstum zu den Teilentlastungszeitpunkten. Das Risswachstum kann bei Dreipunktbiegeversuchen nach der Methode der periodischen Teilentlastungen lediglich an diesen Versuchszeitpunkten bestimmt werden.

Derartig standardisierte bruchmechanische Versuche sind der vorgeschriebene Weg um das Werkstoffverhalten zu beschreiben und zu bewerten. Die daraus erhaltenen Werkstoffkenngrößen unterliegen jedoch einer hohen Streuung, was dazu führt, dass hohe Sicherheitsmargen z.B. bei der Komponentenauslegung erforderlich werden.

Durch eine Instrumentierung von Dreipunktbiegeversuchen unter Verwendung von ergänzenden zerstörungsfreien Messmethoden, um die Rissinitiierung sowie das stabile und das dynamische Risswachstum während des Versuchsablaufs in situ aufzuzeichnen, sollten zusätzliche Informationen über das Werkstoffverhalten gewonnen werden können. Durch derartige Instrumentierung ist darüber hinaus eine wesentliche Zeit- und Aufwandsminderung möglich, denn durch die in situ Rissverfolgung würden die Teilentlastungen hinfällig.

Um dies zu erreichen, wurde in einem ersten Schritt die grundsätzliche Machbarkeit aufgezeigt [2-4]. In dem Folgevorhaben wurden die Verfahrensansätze weiterentwickelt und an einer größeren Probenzahl statistisch abgesichert [5]. In beiden Forschungsvorhaben wurden für die Dreipunktbiegeversuche SE(B)-Proben mit einer Querschnittsfläche von $25 \times 50 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 240 mm des Werkstoffs 22NiMoCr3-7 (Biblis C) verwendet.

2. Zerstörungsfreie Messmethoden zur in situ Verfolgung des Risswachstums

Als Messmethoden zur Überwachung des Risswachstums eignen sich prinzipiell elektromagnetisch angeregter Ultraschall (EMUS) [6] in Sende-Empfangsanordnung zur Laufzeitmessung (LZM) [7] und die Schallemissionsanalyse (SEA) sowie die magnetische Streuflussmethode (MFL) [8, 9]. Im Rahmen dieser Publikation wird auf die beiden Methoden LZM und MFL eingegangen.

Mittels EMUS-Prüfköpfen kann berührungslos und koppelmittelfrei eine Ultraschallwelle angeregt werden, die sich entlang der Oberfläche ausbreitet. Bei dieser sogenannten Rayleigh-Welle handelt es sich um eine geführte Welle, die sich bei der gewählten Wandleranordnung oberflächennah, ausgehend vom Sende-Wandler, entlang der

Kerb- und Rissflanken in Richtung des Empfangs-Wandlers ausbreitet. Mit zunehmender Rissöffnung ist, bedingt durch den zunehmenden Laufweg, auch eine zunehmende Laufzeit (TOF: time of flight) zu erwarten (siehe Abb. 2).

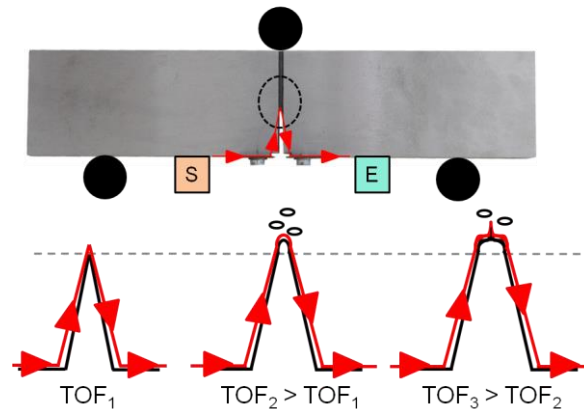


Abb. 2. Anordnung der EMUS-Wandler und der systematische Verlauf der angeregten Oberflächenwelle während der Dreipunktbiegeversuche (oben) und erwartetes Verhalten der Rissausbreitung sowie der in situ gemessenen Ultraschalllaufzeit (TOF: time of flight) während eines Dreipunktbiegeversuches (unten).

Bei der MFL-Methode wurden die Proben im Bereich der Rissentstehung mit einem magnetischen Gleichfeld aufmagnetisiert und Magnetfeldsonden im Bereich der Spitze des angeschwungenen Risses angebracht. Bei Vergrößerung der Rissöffnung bzw. beim Wachstum des Risses ändert sich das magnetische Streufeld, was von den Magnetfeldsensoren detektiert werden kann.

2.1 EMUS-Rayleigh-Wellen-Wandler

Um zu verhindern, dass Störungen bedingt durch die Probenränder und deren Veränderung während Dreipunktbiegeversuchen die Rissverfolgung beeinflussen, wurden in der zweiten Projektphase spezielle Sende-Wandler entwickelt und aufgebaut, die eine Fokussierung der angeregten Rayleigh-Welle auf den Rissspitzenbereich der SE(B)-Proben gewährleisten [5, 10, 11]. In Abb. 3 ist die Schallfeldcharakteristik der fokussierenden 1 MHz-Sende-Wandler mit nicht fokussierenden Sende-Wandlern gleichen Typs im Vergleich dargestellt.

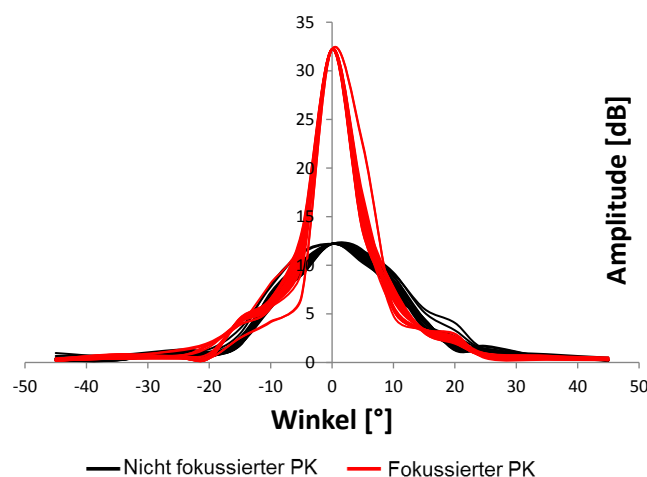


Abb. 3. Vergleich der auf ihr jeweiliges Amplitudenmaximum normierten Amplitudenwerte für einen 1 MHz-Rayleigh-Sende-Wandler mit Fokussierung (rot) und ohne Fokussierung (schwarz)

Es konnte eine deutliche Fokussierung der Schallkeule und eine deutliche Steigerung des Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht werden (siehe Abb. 3). Diese Wandler

wurden mit einem speziell entwickelten Prüfsystem betrieben, das in der Lage ist, aktive LZM und passive SEA im zeitlichen Multiplex durchzuführen (siehe Abb. 4).

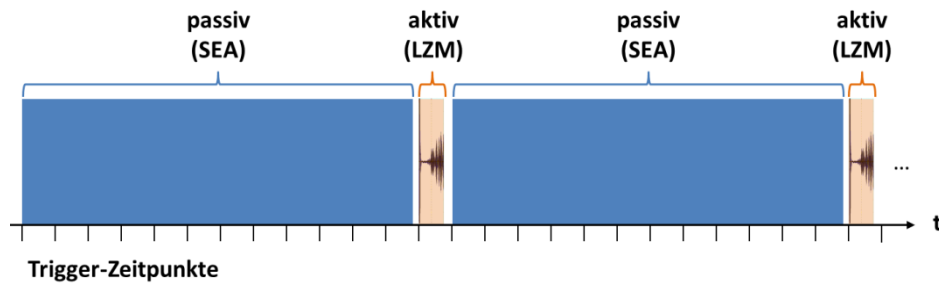


Abb. 4. Prinzip-Skizze zum Ablauf des zeitlichen Multiplex zur aktiven und passiven Schallauswertung und -aufzeichnung.

So konnte sichergestellt werden, dass die passiven Ultraschallmessungen von den aktiven Messungen nicht gestört werden.

2.2 32-kanaliges GMR-Magnetfeldsondenarray

Zur Durchführung der Streuflussmessungen wurden in der ersten Projektphase ein vierkanaliges GMR-Sensorarray sowie eine Labor-Datenerfassungskarte eingesetzt [2-4]. Zur besseren Auflösung des Rissverlaufes wurde in der zweiten Projektphase ein 32-kanaliges GMR-Magnetfeldsondenarray mit rauscharmer Vorverstärkerelektronik, integrierter Analog/Digital-Wandlung und kabelloser Bluetooth-Datenübertragung aufgebaut und eingesetzt (siehe Abb. 5).

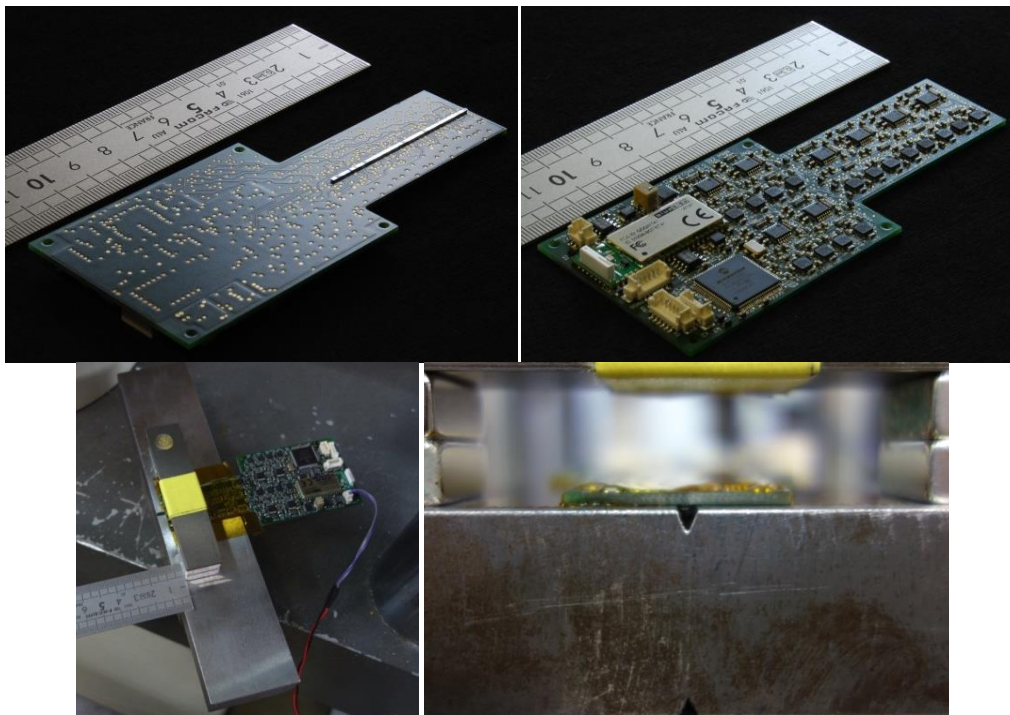


Abb. 5. Oben links: Sensorseite des 32-kanaligen GMR-Magnetfeldsondenarrays; oben rechts: Rückseite des 32-kanaligen GMR-Magnetfeldsondenarrays; unten links: 32-kanaliges GMR-Magnetfeldsondenarray positioniert an einer SE(B)-Probe zur Erfassung des Rissverhaltens; unten rechts: Sensorzeile taucht in die Seitenkerbe der SE(B)-Probe ein.

Die eingesetzten Magnetfeldsensoren sind GMR-Magnetometer, deren Ausgangssignal proportional zum Betrag der Tangentialkomponente des Magnetfeldes ist. Die Magnetometer konnten vollständig in die Seitenkerbe eintauchen (Abb. 5 rechts unten) und waren somit in unmittelbarer Nähe zum Riss.

3. Dreipunktbiegeversuche mit in situ Instrumentierung

In der zweiten Projektphase wurden insgesamt 15 Biegeversuche durchgeführt, in deren Verlauf die von den applizierten Sensoren und der Prüfmaschine erfassten Signale aufgezeichnet wurden. Die von der Prüfmaschine mitprotokollierten Kraft-, Durchbiegungs-, COD- und Zeit-Informationen konnten so direkt mit den Sensorsignalen verglichen werden. Alle 15 Versuche wurden über die zeitliche Veränderung des COD-Signals geregelt. Durch die Teilentlastungsmethode konnten Referenzmessungen für die tatsächliche aktuelle Risstiefe durchgeführt werden. Da bereits Risswiderstandskurven des Versuchswerkstoffs zum Vergleich vorlagen, konnte die Anzahl der Teilentlastungen während der Versuche verringert werden. Darüber hinaus wurde auch die Versuchsgeschwindigkeit bei einzelnen Versuchen variiert. In Tabelle 1 sind die Versuchsvarianten dargestellt.

Tabelle 1. Varianten der Versuchsparameter für die Dreipunktbiegeversuche

Versuchs- variante	Bemerkung	Versuchsgeschwindigkeit [mm/min]	Probenbezeichnung
1	J _R -Versuch	0.10	CM308, CM318, CM330
2	J _R -Versuch, wenige Teilentlastungen	0.10	CM319, CM322, CM327
3	J _R -Versuch, noch weniger Teilentlastungen	0.10	CM326, CM331
4	keine Teilentlastungen	0.10	CM321
5	keine Teilentlastungen	0.15	CM328, CM329
6	keine Teilentlastungen	0.30	CM317, CM320, CM323, CM325

Allgemein haben alle Varianten zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende Gemeinsamkeiten. Zu Beginn jedes Biegeversuchs wird die SE(B)-Probe im elastischen Bereich mit geringer Biegewechsellast beaufschlagt, den sogenannten Setzzyklen. Am Ende jedes Versuchs werden die SE(B)-Proben mit vier definierten Biegelastwechseln (20% der zu diesem Versuchszeitpunkt herrschenden Kraft) beaufschlagt. Im Anschluss an die Setzzyklen folgt je nach Versuchsvariante eine unterschiedliche Anzahl von Teilentlastungen, die ebenfalls jeweils mit 20% der zu diesem Versuchszeitpunkt herrschenden Kraft ausgeführt werden.

3.1 Erzielte Ergebnisse - Laufzeitmessung

Im Folgenden werden beispielhaft anhand der Versuchsvariante 2 und 5 die an SE(B)-Proben aufgenommenen Maschinendaten (Kraft, COD, Durchbiegung) und das Risswachstum, abgeleitet aus Teilentlastungen, sowie die Laufzeit des elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignals als Funktion der Versuchszeit vorgestellt.

Die Laufzeit ist ein Maß für die Wegstrecke, die der Ultraschall auf dem Weg vom Sende- zum Empfangs-Wandler zurücklegen muss. Bei der gewählten Sende-/Empfangsanordnung ist diese Laufzeit durch die Kerbtiefe und die aktuelle Risstiefe bestimmt.

Abb. 6 zeigt die während des Biegeversuches an der Probe CM327 aufgenommenen Maschinendaten, das Risswachstum, abgeleitet aus Teilentlastungen und die Laufzeit des elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignals als Funktion der Versuchszeit.

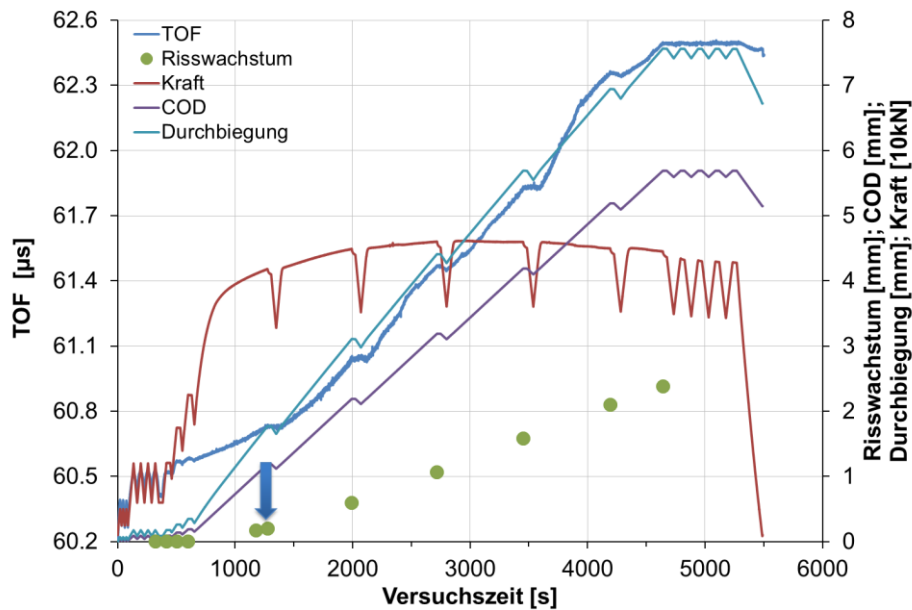


Abb. 6. Verlauf der Ultraschalllaufzeit, der Maschinendaten sowie des aus den Teilentlastungen bestimmten Risswachstums in Abhängigkeit von der Versuchszeit für Probe CM327. Der blaue Pfeil zeigt auf den Zeitpunkt der Rissinitiiierung.

Die Ultraschalllaufzeit zeigt für alle Versuchsvarianten zu Versuchsbeginn die periodische Überlagerung der elastischen Setzzyklen. In diesem Zeitraum wird unabhängig von der Versuchsvariante der angeschwungene Riss durch die geringe Biegebelastung der Setzzyklen mehr oder weniger weit geöffnet und geschlossen. Bei jeder Teilentlastung der Setzzyklen nähern sich die Rissflanken einander an, so dass ein Teil der Schallwellen den kürzeren Weg über die Rissflanken nimmt. Im Anschluss an die Setzzyklen wird die Biegelast unabhängig von der Versuchsvariante erhöht. Während dieser Erhöhung der Biegelast beobachtet man einen signifikanten fast stetigen Anstieg der Laufzeit, was auf ein fortschreitendes Öffnen des angeschwungenen Risses hindeutet. Während dieser Zeit zeigt die Laufzeit periodische Signalschwankungen synchron zu den Teilentlastungen, was darauf schließen lässt, dass aufgrund der Teilentlastungen Teilberührungen der Rissflanken des angeschwungenen Risses stattfinden. Im weiteren Verlauf zeigt die Laufzeit einen Anstieg. Der Anstieg der Laufzeit spiegelt das fortschreitende Risswachstum wider, was durch die Risswachstumskurve bestätigt wird, welche sich zum Laufzeit-Signalverlauf konform verhält. Gleichzeitig wird 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 Teilentlastungen der Ultraschall den kürzeren Weg nimmt. Abb. 6 zeigt schwach, dass ab dem Zeitpunkt der Rissinitiiierung die Steigung des Laufzeitverlaufes zunimmt. Dies lässt sich aufgrund der Teilentlastung zum Zeitpunkt der Rissinitiiierung, die sich ebenfalls im Laufzeitverhalten widerspiegeln, anhand dieses Versuches nicht eindeutig absichern. Im Anschluss an die Öffnung des angeschwungenen Risses stellt sich das fortschreitende Risswachstum ein (siehe Abb. 6; Risswachstum: grüne Punkte). Das Laufzeitsignal verhält sich konform zu dem Risswachstum (siehe Abb. 6; Vergleich TOF mit Risswachstum). Wird aus dem Ultraschalllaufzeitsignal das Risswachstum abgeleitet, zeigt sich in Korrelation mit dem aus den Teilentlastungen abgeleiteten Risswachstum eine Abweichung (siehe Abb. 7 rechts).

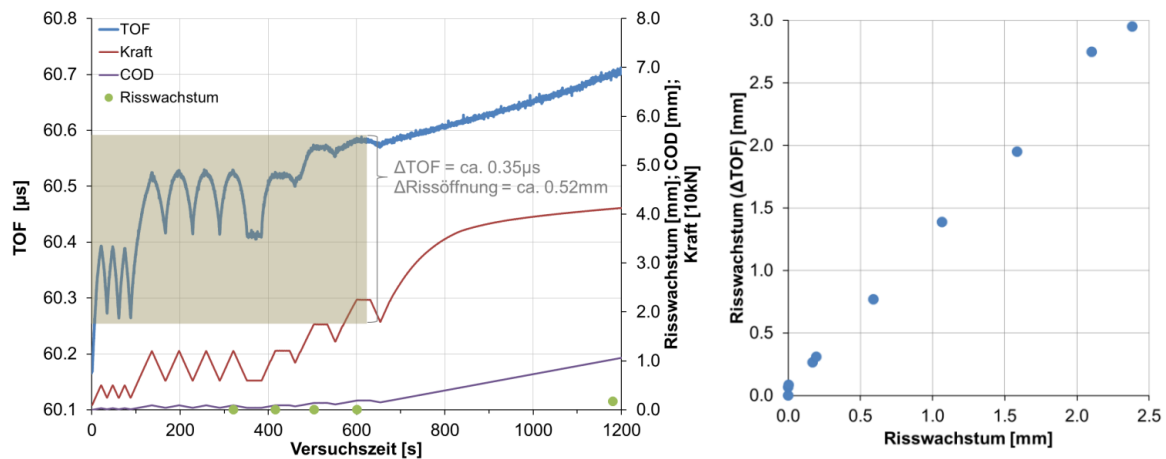


Abb. 7. Links: Verlauf der TOF, der Maschinendaten und des mittels Teilentlastungen bestimmten Risswachstums in Abhängigkeit von der Versuchszeit von 0 bis 1200 s für Probe CM327; Rechts: Korrelation zwischen dem mittels Teilentlastungen bestimmten und dem mittels der relativen Laufzeit bestimmten Risswachstum für Probe CM327.

Diese Abweichung kann durch die zusätzliche Wegstrecke bedingt durch das fortschreitende Öffnen des angeschwungenen Rissen zu Versuchsbeginn erklärt werden, wie die Detailbetrachtung des Laufzeitverhaltens während des Versuchsbeginn in Abb. 7 links verdeutlicht. Das aus dem Anfangshub des Laufzeitsignals ermittelte Risswachstum entspricht dieser Abweichung aus Abb. 7 rechts und kann somit zur Kompensation verwendet werden.

Abb. 8 links zeigt in Analogie zu Abb. 6 die während eines Biegeversuches der Versuchsvarianten 5 an der Probe CM329 aufgenommenen Maschinendaten und TOF als Funktion der Versuchszeit.

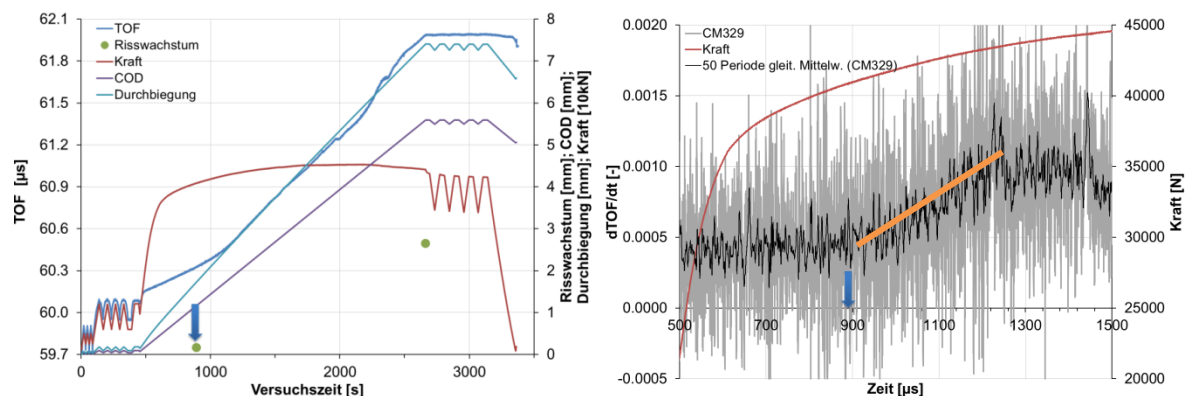


Abb. 8. Links: Verlauf der TOF, der Maschinendaten und des mittels Teilentlastungen bestimmten Risswachstums in Abhängigkeit von der Versuchszeit für Probe CM329; Rechts: Verlauf der TOF-Ableitung im Zeitbereich der Rissinitiation (500 – 1500 s) für Probe CM329. Der blaue Pfeil zeigt auf den angenommenen Zeitpunkt der Rissinitiation.

Abb. 8 links zeigt, dass auch in dieser Versuchsvariante das Ultraschalllaufzeit-signal in der Anfangsphase des Versuches einen starken Anstieg inklusive Reaktionen auf die Setzzyklen und Entlastungen aufweist und im weiteren Versuchsverlauf weiter aber schwächer ansteigt. Darüber hinaus lässt sich aus Abb. 8 links deuten, dass sich ab dem Zeitpunkt der Rissinitiation die Steigung des Laufzeitverlaufs erhöht. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 8 rechts die zeitliche Ableitung des TOF-Verlaufs im Zeitbereich der Rissinitiation dargestellt. Der Verlauf der Ableitung zeigt zum Zeitpunkt der Rissinitiation eine Steigungsänderung, die in dieser Versuchsvariante von keiner Teilentlastung überlagert wird. Dieser Steigungsanstieg im Laufzeitverlauf kann als Merkmal für den Zeitpunkt der Rissinitiation interpretiert werden, da der Zeitpunkt des

Steigungsanstiegs mit dem Zeitpunkt der Rissinitiierung übereinstimmt und eine beschleunigte Änderung der TOF ab diesem Zeitpunkt physikalisch nachvollziehbar ist.

3.2 Erzielte Ergebnisse – Streuflussmessungen

Im Folgenden werden beispielhaft anhand der Versuchsvariante 2 und 5 die an SE(B)-Proben aufgenommenen Maschinendaten Kraft und COD sowie MFL-Signale als Funktion der Versuchszeit vorgestellt.

In Abb. 9 sind in Analogie zu Abb. 6 exemplarisch die im Dreipunktbiegeversuch an der Probe CM327 aufgenommenen Maschinendaten und MFL-Signale (CH 0 – CH 31) dargestellt.

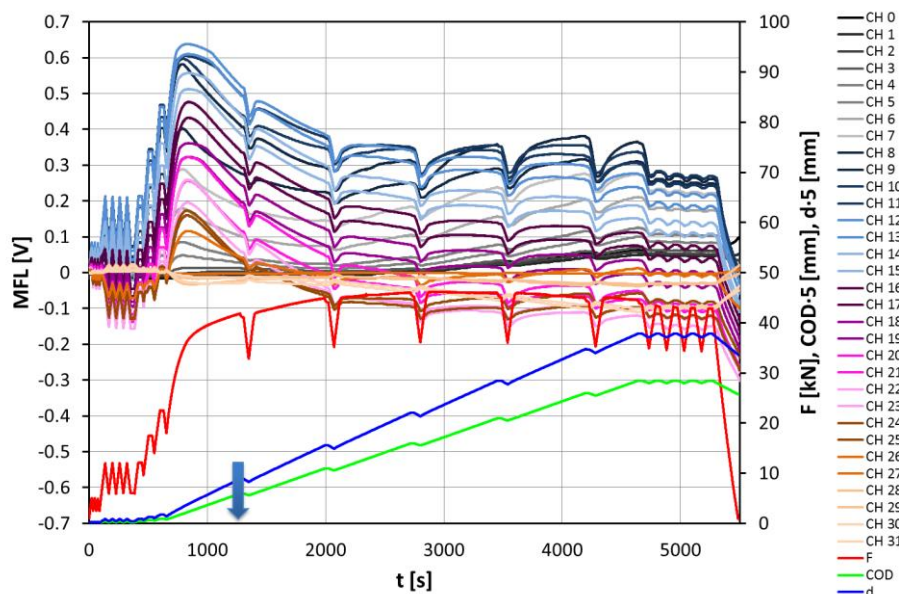


Abb. 9. Überblick aller MFL-Signale und Maschinendaten des Versuchs an Probe CM327. Der blaue Pfeil zeigt auf den Zeitpunkt der Rissinitiierung.

Die MFL-Signale durchliefen makroskopisch in allen Biegeversuchen den gleichen Kurvenverlauf. Welcher Kanal das absolut höchste Maximum zeigt, ist zweitrangig, da dies auch vom Signalverlauf zu Beginn des Versuchs abhängt.

Die Rissinitiierung fällt bei diesem Versuch nahezu mit dem Anfang einer Teilentlastung zusammen, weshalb die Interpretation möglicher Signalanomalien in der Nähe dieses Zeitpunkts schwierig ist. Die Teilentlastungen zeigen sich im Streuflusssignalverlauf durch periodische Veränderungen, was auf eine Abstandsänderung der Rissflanken aufgrund der aufgetragenen Biegewechselast hindeutet. Das Signalniveau der MFL-Signale steigt 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. Im weiteren Versuchsverlauf sind weiterhin periodische Änderungen des MFL-Signalsignalniveaus 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 Versuchsende hin folgt ein Abfall des MFL-Signalsignalniveaus, was sich mit der zunehmenden Verbreiterung des Risses an der Position des Streuflusssensors sowie dem Risswachstum und der damit verbundenen Verdrängung des magnetischen Flusses in dem verbleibenden Probenquerschnitt erklären lässt.

Abb. 10 links zeigt in Analogie zu Abb. 9 die während eines Biegeversuches der Versuchsvarianten 5 an der Probe CM329 aufgenommenen Maschinendaten und MFL-Signale als Funktion der Versuchszeit.

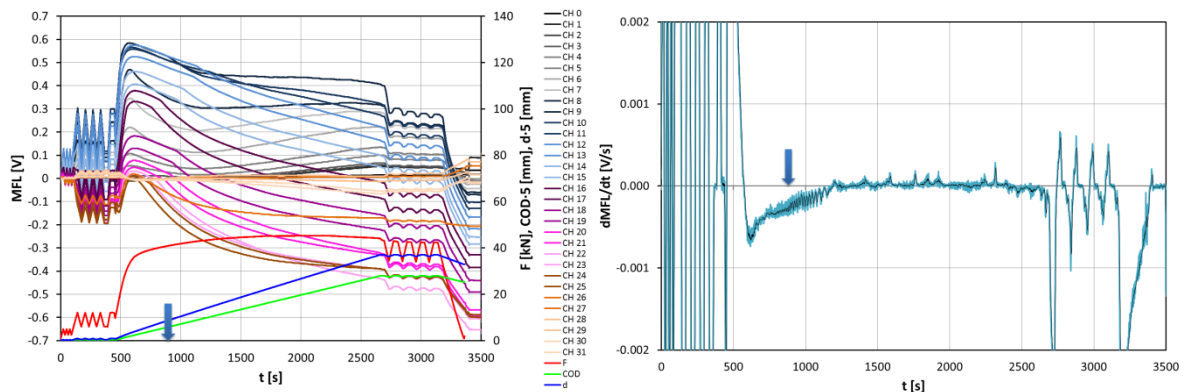


Abb. 10. Links: Überblick aller MFL-Signale und Maschinendaten des Versuchs an Probe CM329. Der blaue Pfeil zeigt auf den Zeitpunkt der Rissinitiierung; Rechts: Zeitliche Ableitung des Streuflusssignals von Sensor CH 8 an Probe CM329 (türkis = ungeglättet, schwarz = geglättet). Der Pfeil zeigt auf den angenommenen Zeitpunkt der Rissinitiierung.

Abb. 10 links zeigt, dass auch in dieser Versuchsvariante die MFL-Signale makroskopisch vergleichbare Verläufe zu Abb. 9 aufweisen. Es zeigt sich ebenfalls, dass zum Zeitpunkt der Rissinitiierung keine Teilentlastung den MFL-Signalverlauf stört. Analog zum Vorgehen bei der LZM wurde der Verlauf der von Sensoren im Bereich der Risspitze aufgezeichneten Signale numerisch nach der Zeit abgeleitet, um Unregelmäßigkeiten im Signalverlauf hervorzuheben (Abb. 10 rechts). Wie Abb. 10 rechts verdeutlicht, ist zum Zeitpunkt der Rissinitiierung kein singuläres, plötzliches Ereignis in der Ableitung erkennbar, aber es war doch feststellbar, dass das geglättete Ableitungssignal (schwarze Kurve) nach Rissinitiierung tendenziell stärker ansteigt und dass es zunehmend unstetiger verläuft als davor. Dies kann zur Bestimmung des Rissinitiierungszeitpunktes verwendet werden.

4. Zusammenfassung

Es wurden insgesamt 15 Bruchmechanikversuche an Biegeproben SE(B)25x50 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 COD-Informationen korreliert wurden. Durch die Verwendung der Teilentlastungsmethode bei den Dreipunktbiegeversuchen konnte nach Versuchsende das Risswachstum zum jeweiligen Zeitpunkt der Teilentlastung zeitintensiv ermittelt werden, da nur zu diesen Zeitpunkten des Versuches Risswachstumsinformationen vorliegen.

Es konnte gezeigt und statistisch abgesichert 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 Teilentlastungskurven zu 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 konnten auch Hinweise auf den Zeitpunkt der Rissinitiierung sowohl im Ultraschalllaufzeitsignal als auch im Streuflusssignal detektiert werden.

Danksagung

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsvorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem BMWi-Förderkennzeichen 1501408 und 1501440 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages 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.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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] I. Altpeter; K. Szielasko; R. Tschuncky; J. Kurz; C. Sklarczyk; M. Kopp; H. Silcher: In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens während des Kerbschlagbiege- und Compact Tension-Versuches mit zerstörungsfreien Messmethoden; Phase 1, BMWi-Förderkennzeichen: 1501408, IZFP-Berichts-Nr.: 120101-TW, Saarbrücken, 2012.
- [3] R. Tschuncky; K. Szielasko; I. Altpeter; H.-G. Herrmann; G. Dobmann; C. Boller: In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens mit zerstörungsfreien Messmethoden; In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2012. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung : DACH-Jahrestagung 2012. Berlin : Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2012, Di.1.C.3. (DGZfP-Berichtsbände 136-CD).
- [4] K. Szielasko; R. Tschuncky; I. Altpeter; G. Dobmann; C. Boller: Real-Time Monitoring of Crack Growth Behaviour During Impact and Compact Tension Test with Non-Destructive Testing; In: Rebello, Joao M.A. (Ed.) ; Kojima, Fumio (Ed.) ; Chady, Tomasz (Ed.): Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVI). Amsterdam, Washington, Tokyo : IOS Press, 2014, 238-246 Seiten. (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 38).
- [5] K. Szielasko; R. Tschuncky; J. Kurz; H. Silcher.: In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens während des Kerb-schlagbiege- und Compact Tension-Versuches – Phase 2: Optimierung der zerstörungsfreien Prüfmethode, BMWi-Förderkennzeichen: 1501440, IZFP-Berichts-Nr.: 140110-TW, Saarbrücken, 2014.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. Kloster, Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren; Saarbrücken, Universität, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Dissertation, 2008.
- [10] Weber, F.: „Entwicklung, Aufbau und Erprobung von elektromagnetischen Ultraschallwandlern zur zerstörungsfreien Bestimmung des Rissfortschrittsverhaltens während Bruchmechanikversuchen“, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Bachelorarbeit, Saarbrücken, 2013.
- [11] Tschuncky, R., Hübschen, G., Weber, F.: „Verfahren zur Herstellung einer ferromagnetischen Material aufweisenden, kammartig ausgebildeten Tragstruktur für eine HF-Spulenordnung“, amtliches Kennzeichen: 10 2013 003 498.1, beim deutschen Patent- und Markenamt zum Patent angemeldet, 2013.