

Frequenzanalyse von Schallemission an einem Stahlrohr unter Biegebeanspruchung

Franziska BAENSCH¹, Wolfram BAER¹, Peter WOSSIDLO¹, Abdelkarim HABIB¹
¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, Berlin

Kontakt E-Mail: franziska.baensch@bam.de

Kurzfassung. Um ein tieferes Verständnis über die Schallemission bei der Entstehung und Ausbreitung von Rissen in Stahlrohrleitungen zu erlangen, wurde ein Stahlrohr der Güte S355J2H im Vierpunkt-Biegeversuch quasistatisch bis hin zum Wanddurchbruch (Leckage) belastet und mittels Schallemissionsmessung und Gleichstrompotentialmessung überwacht. Das Rohrsegment wurde durch einen 90°-Außenumfangskerb in der Mitte der Rohrlänge definiert vorgeschädigt, um davon ausgehend ein stabiles Risswachstum zu induzieren und die Analyse von Schallemission aus Rissereignissen, die am Kerb eintraten, sicherzustellen. Für die Schallemissionsmessung wurden vier Breitbandsensoren max. 105 mm vom Kerb entfernt montiert. Die Signalaufzeichnung erfolgte kontinuierlich und schwellwertunabhängig. Für die Gleichstrompotentialmessung wurde ein Gleichstrom von 300 A eingeleitet und der Potentialabfall über dem Kerb mit fünf Sonden entlang des Kerbs gemessen. Beide Messverfahren identifizieren die Rissinitiierung sowie Veränderungen im Risswachstum. Die detektierten Schallemissionsereignisse werden, unter Berücksichtigung spektraler Eigenschaften, mit fortschreitender Belastung und Rissentwicklung analysiert. Diese Studien wurden im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts AGIFAMOR, Aging infrastructure - Faseroptisches Monitoring von Rohrleitungen, an der BAM durchgeführt.

Einführung

Die vorgesehene Lebensdauer von Stahlrohrleitungen kann unter Umständen bis zu 50 Jahre betragen, wobei die Sicherheit und Funktionalität der Rohrleitungssysteme auch über kilometerlange Strecken und Verzweigungen gewährleistet werden müssen. Bereits kleinste Leckagen können bei großen Fördermengen zu hohen Kosten und gegebenenfalls schweren Umweltbelastungen führen. Neben Manipulation durch Dritte oder Erdbeben, ist auch der Werkstoff selbst Ursache von Leckagen [1]. In der Regel werden für Stahlrohrleitungen Feinkornstähle mit niedriger Festigkeit aber ausgeprägter Zähigkeit eingesetzt. Diese bilden gegebenenfalls ein hinreichend stabiles Risswachstum aus und weisen damit ein kontrollierbares Versagensverhalten auf. In der Praxis führen fertigungs- und betriebsbedingte Merkmale wie Fügestellen, Oberflächenrauheit oder korrosive Oberflächenmodifikation, aber auch mikrostrukturelle Eigenschaften wie Einschlüsse, Ausscheidungen, Poren und Korngrenzen zu Spannungskonzentrationen im Bauteil, die lokale plastische Verformungen nach sich ziehen [2].

Um dieses Szenario experimentell abzubilden, wurde ein Vierpunkt-Rohrbiege-Prüfstand für die mechanische Belastung von Stahlrohren im Labormaßstab [3] neu konzipiert und für eine Versuchsreihe eingesetzt. Die duktilen Schädigungs- und Versagensprozesse lassen sich grob



einteilen in einerseits die plastische Deformation, Mikrohohlraum- und Mikrorissbildung und andererseits das aus Hohlraum- und Mikrorisskoaleszenz resultierende makroskopische Risswachstum [4]. Erstere Prozesse mittels Schallemissionsmessung zu detektieren, stellt eine Herausforderung dar [5] und erfordert zumindest eine nahe Positionierung der Sensoren an der potentiellen Bauteilchwachstelle. Um im Versuch ein lokales Risswachstum zu realisieren, wurde in das Stahlrohr ein Kerb eingearbeitet. Die Rissinitiierung und das stabile Risswachstum im gekerbten Rohrquerschnitt wurde mittels Schallemissions- und Gleichstrom-Potentialsondenmessung überwacht. Die Übereinstimmung der Detektionen beider Messmethoden wurde bereits in [6] nachgewiesen. Für eine quantitative Analyse der physikalischen Mechanismen Rissbildung und -wachstum sind konventionelle Merkmale aus den Zeitsignalen nicht hinreichend [5]. Daher wird die Frequenzanalyse auf die im Belastungsversuch detektierten Schallemissionen angewendet. Um eine möglichst hohe Sensitivität in der SE-Messung zu erreichen, wird schwellwertunabhängig gemessen und digital nachbearbeitet. Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts AGIFAMOR, Aging infrastructure - Faseroptisches Monitoring von Rohrleitungen [1, 7-9].

Versuchsaufbau und Ablauf

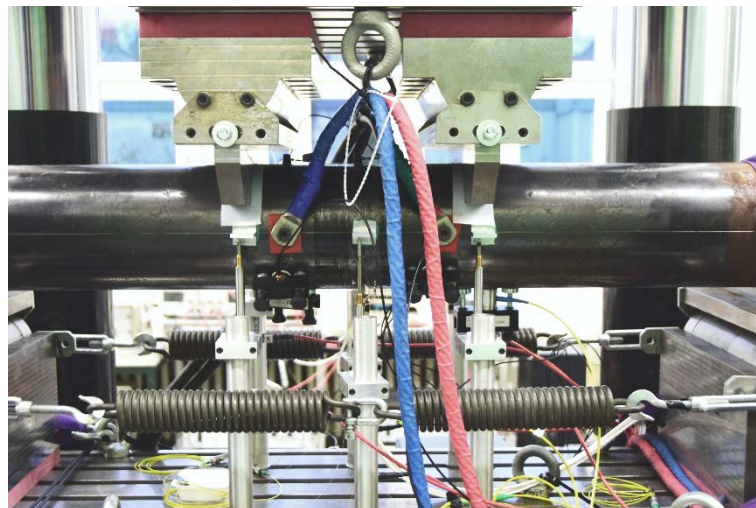


Abb. 1. Vierpunkt-Rohrbiegeprüfstand in einem 4 MN-Prüfsystem.

Die quasi-statische Vierpunkt-Biegeprüfung wurde an einem 2,5 m langen Stahlrohr der Güte S355J2N (Außendurchmesser 168 mm, Wanddicke 16 mm) durchgeführt (Abb. 1). In das Rohr wurde ein 90°-Außenumfangsfehler von 8 mm Tiefe eingebracht, um das Risswachstum zu lokalisieren und im Restquerschnitt vor der Kerbspitze (Ligament) untersuchen zu können. Die Belastung erfolgte weggeregelt (0,2 mm/min). Mittels Gleichstrom-Potentialsondenmessung wird der Zeitpunkt der Rissinitiierung aus dem Kurvenverlauf grafisch identifiziert (Direct Current Potential Drop; DCPD). Für diese Methode wurde über zwei Punkte Gleichstrom in das Rohr eingeleitet und die Potentialänderung an 5 Punkten direkt am Kerb abgegriffen (Abb. 2a, blau) [6]. Der Versuch wurde zudem mit Beschleunigungssensoren (Abb. 2a, orange) und mit der verteilten Faseroptischen Methode (Abb. 2a, grün) überwacht. Diese Methoden sind jedoch nicht Gegenstand im vorliegenden Beitrag. Die Messung der Schallemission (SE) wurde mit dem digitalen AE-Gerät AMSY-6 im kontinuierlichen, schwellwertfreien Aufzeichnungsmodus mit einer Abtastrate von 3,33 MHz durchgeführt. Für die Detektion

breitbandiger Signale wie sie durch Schädigungsprozesse generiert werden, wurden vier SE-Sensoren vom Typ VS900-M eingesetzt, die im Bereich von 100 kHz bis 900 kHz empfindlich sind. Das Ansprechverhalten der Sensoren ist durch zwei Frequenz-Peaks bei 190 kHz und 350 kHz sowie durch zwei Antiresonanzen bei 200 kHz und 400 kHz gekennzeichnet. Um eine gute Kopplung aller Sensoren zu ermöglichen, wurden die Korrosionsschichten an den entsprechenden Stellen entlang des Rohrs durch Schleifen der Oberfläche entfernt. Die SE-Sensoren wurden mit wiederverwendbarem Koppelmittel (Bostik, Prestik) an die Rohrwand angekoppelt und mit Magnethaltern fixiert. Die vier Sensoren waren im Lot zur Einkerbung mit einem Abstand zwischen 85 mm und 105 mm in einem Quadrat angeordnet (Abb. 2a, S1-S4). Um Reibung an der Rohrwand zu vermeiden, wurde zwischen dem Rohr und den Auf- bzw. Widerlagern Teflonfolie eingelegt. Um die Übertragung von Störgeräuschen aus der hydraulischen Prüfmaschine auf das Rohr zu verringern, wurden ferner PVC-Dämpfungsplatten in die Lagerelemente eingebaut. Dadurch wurde das Hintergrundgeräusch um ca. 10 dB reduziert. Für die SE-Analyse muss das Nahfeldverhalten der Sensoren mit einer (in-plane) gemessenen Dämpfung von ca. 9 dB berücksichtigt werden.

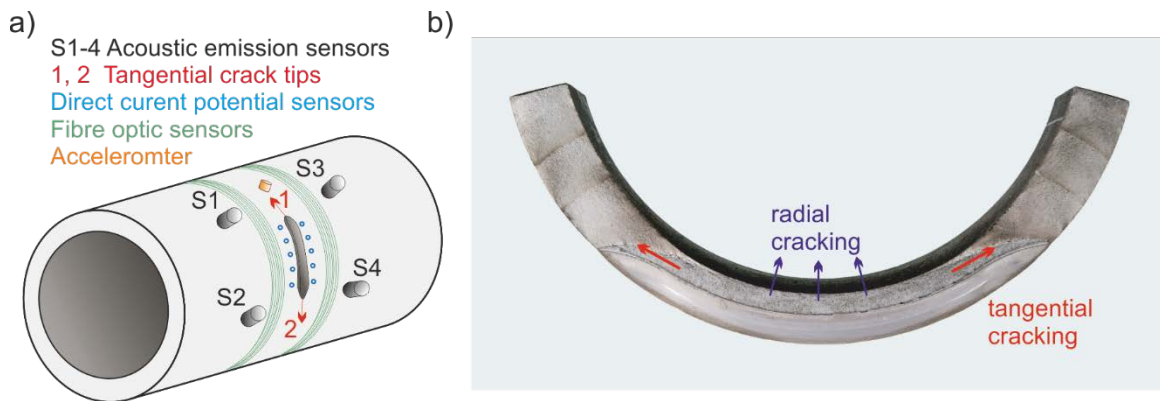


Abb. 2. a) Schematische Darstellung der Sensorenanordnung nahe dem Kerb im Rohrsegment für die Vierpunkt-Biegeprüfung und b) Rohrquerschnitt mit Ausgangskerb und Bruchfläche.

SE-Datenauswertung

Durch Anwendung eines Hochpassfilters bei 150 kHz wird das Hintergrundrauschen in den kontinuierlich aufgezeichneten Daten reduziert. Da die gleitende Standardabweichung sehr sensitiv auf Ausreißer reagiert, ist diese besonders geeignet, um SE-Hits anhand der Amplitudenwerte (mV) zu identifizieren. Dafür wird ein gleitendes Fenster von 256 Samples vor und 256 Samples nach dem aktuellen Auswertepunkt gewählt. Um SE-Ereignisse unterschiedlicher Magnitude zu erfassen, wird die gleitende Standardabweichung zudem logarithmiert zur Basis zehn [10]. Für die SE-Hit-Detektion wird auf die logarithmierte, gleitende Standardabweichung ein gleitender Schwellwert angewendet. Für diesen wird der Maximalwert der gleitenden Standardabweichung aus den vorangegangenen 578 Samples ermittelt und dieser mit einem empirischen Faktor $\{\log_{10}6\}$ beaufschlagt.

Erste Bedingung für eine SE-Ortung im Kerb ist, dass alle vier Sensoren den SE-Hit detektiert haben. Zweite Bedingung ist, dass eine maximale Ankunftszeitdifferenz von 0,019 ms (63 Samples) nicht überschritten wird. Diese errechnet sich aus der effektiven Schallgeschwindigkeit von etwa 4000 ms^{-1} für einen maximal möglichen Laufwegunterschied von den Kerbkanten zu den Sensoren von 75 mm. Die Ankunftszeitdifferenz der Signale an den vier Sensoren wird über Kreuzkorrelation der jeweils vier zugeschnittenen Zeitfenster (mit 600 Samples vor und 1400 Samples nach Schwellwert-Überschreitung) ermittelt. Die vorangehenden Bedingungen gelten, bis die

Kerbe zu einer Leckage aufgerissen ist ($t=3460$ s). Anschließend sind Ortungen an den zwei entstandenen Risspitzen, basierend auf Detektionen an allen vier Sensoren, nicht mehr möglich. Dann werden SE-Ereignisse identifiziert, insofern SE-Hits an den Sensoren S1 und S3 (Risspitze 1) bzw. an den Sensoren S2 und S4 (Risspitze 2) (Abb. 2a, rot) erkannt werden und diese, bedingt durch einen maximalen Laufwegunterschied von 12 mm, eine maximale Ankunftszeitdifferenz von 0,003 ms (10 Samples) aufweisen.

Für die Berechnung des Spektrums werden die Erstankunft-Signale („first hit“) auf eine Fensterlänge von 800 Samples (inklusive 400 Pre-Trigger-Samples) zugeschnitten und normiert. Die gewichtete Peak-Frequenz im Bereich 150 kHz - 800 kHz sowie die spektrale Intensität zwischen 190 kHz - 800 kHz werden ermittelt und analysiert.

Ergebnisse und Diskussion

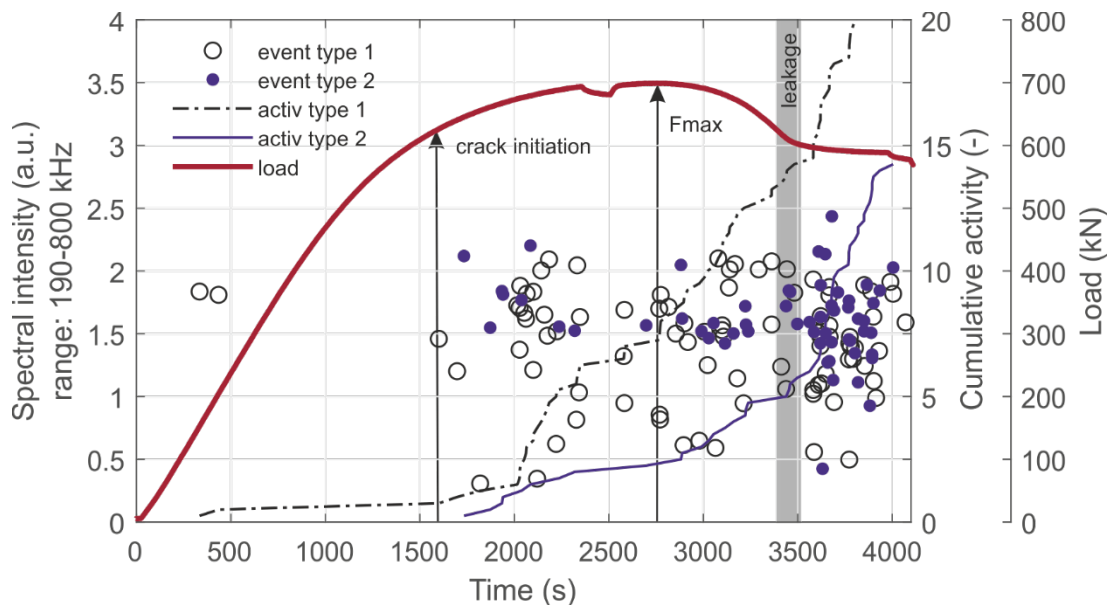


Abb. 3. Spektrale Intensität (in a.u., *arbitrary unit*) zwischen 190-800 kHz der detektierten SE-Ereignisse, akkumulierte SE-Aktivität und Lastkurve versus Dauer des Rohrbiegeversuches. SE-Ereignisse treten bei radialem Risswachstum bis zur Kerböffnung (*leakage*) sowie bei sich anschließendem tangentialen Rissfortschritt an den Risspitzen 1 und 2 auf. Unterschieden werden Signale von Typ 1 mit WPF ≤ 290 kHz und von Typ 2 mit WPF > 290 kHz.

Die quasi-statische, weggeregelterte Biegebelastung des Rohrsegments dauerte etwa 75 Minuten (Abb. 3). Nach ca. 2500 s Versuchsdauer wurde die Kolbenbewegung gestoppt, um Korrekturmaßnahmen und Überprüfungen des Versuchsaufbaus durchzuführen. Die SE-Aufzeichnung wurde hier ausgesetzt. Es wurde eine maximale Belastung von 696 kN bei einer Durchbiegung von 11,43 mm erreicht. Das Verformungs- und Bruchverhalten des Rohrsegments wird in vier Stadien unterteilt:

- I) Elastische Verformung führt zur Durchbiegung des Rohres und Ovalisierung des Rohrquerschnittes.
- II) Nach dem Einsetzen der plastischen Verformung kommt es zur Rissinitiierung und zu stabilem Risswachstum, zunächst in Richtung der Rohrwanddicke (radial). Diese Prozesse zeichnen sich durch anfängliches Abstumpfen der Kerbe und Einschnürung des Ligamentes, eine Erhöhung der Versetzungsdichte sowie die Akkumulation von Ergebnissen der duktilen Werkstoffschädigung wie Poren und Mikrorissen in der Metallmikrostruktur aus.

- III) Nach Erreichen eines Maximums nimmt die Last ab, während der Riss schließlich den Leakage-Zustand (Wanddurchbruch) erreicht.
- IV) Mit weiter fortschreitender Belastung öffnet sich die Leakage stabil und der Riss wächst an beiden Rissspitzen (in Richtung der 3-Uhr bzw. 9 Uhr-Positionen) in Umfangsrichtung der Rohrwand (tangential) weiter. In diesem Stadium stagniert die Lastkurve aufgrund des Gleichgewichts der Verfestigung und des Risswachstums; die Durchbiegung nimmt weiter zu.

Über die Methode der DCPD wurde das Einsetzen eines stabilen, makroskopischen Risswachstums (Rissinitiation) bei 90% der maximalen Last (630 kN) und 56% der maximalen Durchbiegung (6,5 mm) nachgewiesen. In [6] wurde bereits dargestellt, dass dies in guter Übereinstimmung mit dem Einsetzen erster sich akkumulierender, im Kerb georteter SE-Ereignisse ist. Quantitative, über die Detektion der Rissinitiation hinausgehende Aussagen zum Verlauf des stabilen Risswachstums unter quasi-statischer Belastung sind hier anhand der DCPD-Methode mangels einer geeigneten Kalibrierkurve für die vorliegende, geometrisch komplizierte Situation einer gekrümmten Fläche in einem gekerbten Rohrquerschnitt nicht möglich.

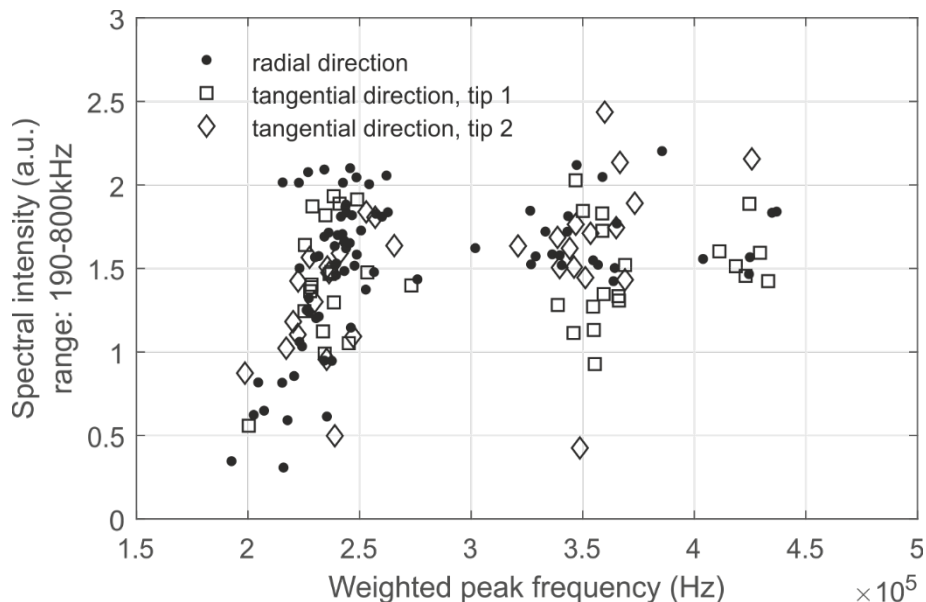


Abb. 4. Spektrale Eigenschaften der Schallemissionssignale aus dem radialen Rissfortschritt bei Kerböffnung und dem sich anschließenden tangentialen Rissfortschritt an den zwei Rissspitzen. (a.u., arbitrary unit)

Tabelle 1. Unterscheidung von zwei Signaltypen

Signal Typ	Eigenschaft
1	WPF \leq 290 kHz
2	290 kHz < WPF

Für die Beanspruchungsstadien I bis III wurden 80 SE-Ereignisse aus dem Kerbbereich identifiziert. Während des Beanspruchungsstadiums IV wurden an den zwei Rissspitzen des bereits geöffneten Kerbs insgesamt 69 SE-Ereignisse detektiert. Die Auswertung der einzelnen Spektren lässt auf mindestens zwei Signaltypen schließen, die sich insbesondere in ihrer gewichteten Peak-Frequenz (Weighted peak frequency, WPF) unterscheiden (Abb. 4): Signaltyp 1 hat eine WPF \leq 290 kHz und Signaltyp 2 hat eine WPF > 290 kHz (Tab. 1). Dabei zeichnet sich Signaltyp 1 durch einen ausgeprägten Peak bei 190 kHz, d.h. den für den

Sensor typischen, ersten Frequenzpeak, aus (Abb. 5). Im Vergleich dazu hat Signaltyp 2 deutlich geringere spektrale Anteile < 200 kHz und weist ausgeprägtere Peak-Frequenzen bei 350 kHz und 450 kHz auf (Abb. 5). Eine weitere Unterteilung von Typ 2 in Signale mit WPF zwischen 290 kHz und 400 kHz, und Signale mit WPF > 400 kHz, bleibt zu diskutieren.

Die spektrale Intensität (190-800 kHz) von SE-Typ 1 liegt mit $1,43 \pm 0,43$ a.u. (arbitrary unit) etwas niedriger als die $1,62 \pm 0,32$ a.u. von Typ 2. Insbesondere für die Detektionen bei radialem Risswachstum bis zur Kerböffnung (II/III) zeigt sich, dass Typ 2 (WPF > 290 kHz) weniger in spektralen Intensitäten streut als Typ 1 (Abb. 4). Grundsätzlich sind die SE-Spektren aus dem stabilem, radialem Risswachstum (II/III) sehr ähnlich zu jenen aus dem (tangentialen) Umfangsrisswachstum (IV) (Abb. 5).

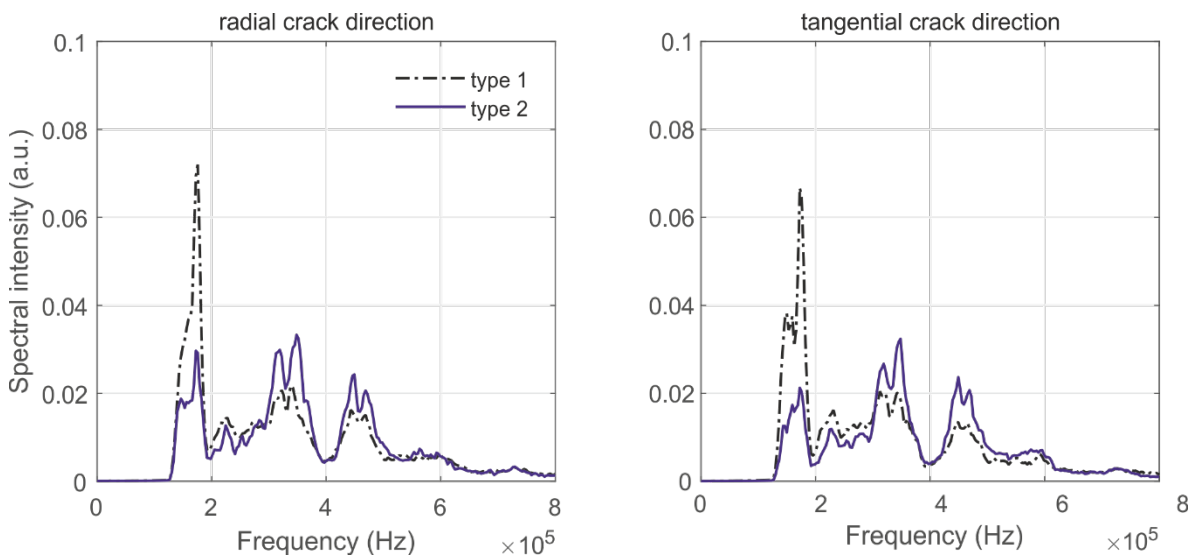


Abb. 5. Gemittelte Frequenzspektren der Signale Typ 1 mit WPF ≤ 290 kHz und Typ 2 mit WPF > 290 kHz aus radialem Risswachstum bei Kerböffnung (l) und aus tangentialem Risswachstums an den Risspitzen der ausgebildeten Leckage (r).

Tabelle 2. Anzahl der Signaltypen, unterschieden nach Sensor der Erstankunft unter Berücksichtigung des Schädigungszustandes

	Signal Typ	Sensor				Anteil
		1	2	3	4	
Anzahl geortete SE, radialer Kerböffnungsriss	1	15	16	14	12	0,71
	2	4	10	4	5	0,29
Anzahl quasi geortete SE, tangentialer Riss an Leckage*	1	7	9	12	7	0,51
	2	10	7	9	8	0,49

* Betrachtungen jeweils für die Sensoren-Kombination S1 mit S3 und Sensoren-Kombination S2 mit S4

Erste SE-Aktivität wurde bereits bei der elastischen Verformung (II) detektiert (Abb. 3). Mit dem einsetzenden Risswachstum wurde überwiegend SE-Typ 1 detektiert. Das fortschreitende Risswachstum generierte, bei etwa 97% der maximalen Last (Abb. 3 nach ca. 2000 s Prüfdauer), eine signifikante Anhäufung von SE-Ereignissen, wobei beide Signaltypen zufällig auftraten. Dabei erfuhr die SE-Aktivität für Typ 1 einen ausgeprägteren Anstieg als für Typ 2. Mit Erreichen der maximalen Last wurde ausschließlich SE-Typ 1 detektiert (Abb. 3). Bei der Ausbildung der Leckage (geöffneter Kerb) wurden beide SE-

Typen detektiert. Vom Belastungsstart bis zur Ausbildung der Leckage (I-III) entsprechen 71% der SE-Signale Typ 1 und 29% dem Typ 2 (Tab. 2).

Beim tangentialen Umfangrisswachstum an den zwei Rissspitzen des geöffneten Kerbs (IV) traten SE-Typ 1 und 2 zufällig auf. Beide SE-Typen wurden hier im Verhältnis 51:49 detektiert (Tab. 2) und weisen ähnliche Anstiege in SE-Aktivität auf (Abb. 3).

Bis zur Ausbildung der Leckage (I-III) wurde ein deutlich niedrigerer Anteil an SE-Typ 2 detektiert als beim Umfangrisswachstum (IV). Zudem weisen die Signale von Typ 2 aus der Beanspruchung I-III spektrale Intensitäten $> 1,4$ a.u. auf, während für das Umfangrisswachstum SE-Typ 2 auch mit geringeren Intensitäten detektiert wurde.

Beide Aspekte sind weniger mit der Dominanz und der Magnitude eines auftretenden Mechanismus zu begründen, sondern v.a. auf die größere Distanz zwischen Schallquelle und Sensor bei Risswachstum im Kerb zurück zu führen [5]. Die Detektion des tangentialen Risswachstums (IV) erfolgte in geringeren Distanzen zu den Rissspitzen, zwischen den Sensoren 1 und 3 bzw. den Sensoren 2 und 4, und unter vereinfachten Bedingungen (siehe Abschnitt SE-Datenauswertung).

Zusammenfassung

Ein 2,5 m langes Rohrsegment aus Feinkornbaustahl der Güte S355J2N wurde einer wegeregulierten Vierpunkt-Biegebeanspruchung ausgesetzt (Abb. 1), um das duktile Verformungs- und Versagensverhalten mittels Schallemissionsmessung zu detektieren und zu analysieren (Abb. 2, Abb. 3). Für eine quantitative Analyse der physikalischen Mechanismen aus Rissbildung und -wachstum sind Kriterien aus den Frequenzspektren der Signale erforderlich. Einen ersten Schritt dahin stellen die hier präsentierten Ergebnisse dar. Basierend auf der Auswertung von spektraler Intensität zwischen 190-800 kHz sowie gewichteter Peak-Frequenz (Abb. 4) wurden zwei SE-Typen identifiziert (Tab. 1): ein eher niederfrequenter Typ 1 mit einer WPF < 290 kHz und ein höherfrequenter Typ 2 mit WPF > 290 kHz (Abb. 5). Beide Signaltypen treten zufällig verteilt auf (Abb. 3). Bei Erreichen der maximalen Last wurden ausschließlich Typ 1 Signale detektiert. Der niedrigere Anteil an detektierten Signalen vom Typ 2 während des Verformungs- und Bruchverhaltens des Rohrsegments von Lastbeginn (I) bis Kerböffnung (III) ist vermutlich einer, bedingt durch weite Distanzen, verringerten Sensitivität der SE-Sensoren gegenüber den höherfrequenten Signalen anzulasten. Die, unter geringeren Distanzen erfolgten Detektionen aus dem Umfangrisswachstum deuten an, dass bei Risswachstum im Feinkornstahl beide SE-Typen eher in gleichem Maße auftreten. Basierend auf den hier präsentierten Ergebnissen sind weiterführende Studien und Analysen beabsichtigt, mit dem Ziel, die SE-Typen ihren Quellmechanismen zuzuordnen.

Referenzen

- [1] Baensch, F. et al., AGIFAMOR: Anwendung der verteilten akustischen und faseroptischen Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung von Rohrleitungen - Teil 2: Technische Hintergründe - Schadensursachen und Prüfeinrichtungen, Technische Sicherheit, 8(3), 24-29, Springer VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, Deutschland.
- [2] Dörr, T. und Wagner, L. (1997): Mechanische Oberflächenbehandlung von Titanlegierungen: Grundsätzliche Mechanismen, Forum der Forschung, 5.2 (1997) 138, Wissenschaftsmagazin der BTU Cottbus, Deutschland.
- [3] Aurich, D. et al (1999): Methoden zur Extrapolation von JR-Kurven für die Vorhersage der Rissöffnungsgeometrie unter postulierten Belastungen, Teilprojekt 2 des BMFT-Vorhabens Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte Schwerpunkt: Anwendung fortgeschrittener zähbruchmechanischer Konzepte; Bruchübergang,

- Förderkennzeichen 1500 970, BAM-Forschungsbericht 232, ISBN 0938-5533, Berlin, Deutschland.
- [4] Krupp, U. (2004): Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen, Habilitationsschrift, Universität Siegen, Deutschland.
 - [5] Wadley et al. (1980) Acoustic emission for physical examination of metals, International Metals Reviews, No.2, Review 249.
 - [6] Baensch et al. (2018): Non-threshold acoustic emission analysis of damage evolution in pipe segments of steel S355J2H under bending load, 33rd European Conference on Acoustic Emission Testing, September 12-14, 2018, Senlis, Frankreich.
 - [7] Baensch et al. (2017): AGIFAMOR: Anwendung der verteilten akustischen und faseroptischen Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung von Rohrleitungen - Teil 1: Projektvorstellung und erste Vorversuche, Technische Sicherheit, 7(3), 10-16, Springer VDI-Verlag GmbH &Co. KG, Düsseldorf, Deutschland.
 - [8] Baensch et al. (2018): AGIFAMOR: Anwendung der akustischen und faseroptischen Sensorik zur Überwachung von Rohrleitungen; Teil 3: Technische Hintergründe - Messmethoden, Technische Sicherheit, 8(5), 29-35, Springer VDI-Verlag GmbH &Co. KG, Düsseldorf, Deutschland.
 - [9] Baensch et al. (2017): BAM-Projekt AGIFAMOR – Zustandsüberwachung von Rohrleitungen, 21. Kolloquium Schallemission, Vortrag 17, März 2017, Fulda, Deutschland.
 - [10] Krietsch, T. und Bohse, J. (1998): Selection of acoustic emission and classification of damage mechanisms in fibre composite materials, 14th International Acoustic Emission Symposium & 5th Acoustic Emission World Meeting Big Island, Hawaii, USA.