

# BAM-Projekt AGIFAMOR – Zustandsüberwachung von Rohrleitungen

Franziska BAENSCH, Maria-Teresa HUSSELS, Sebastian CHRUSCICKI,  
Wolfram BAER, Peter WOSSIDLO, Tobias HOMANN, Jens PRAGER, Dirk SCHMIDT,  
Margit WELTSCHKEV, Abdel Karim HABIB  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kontakt E-Mail: Franziska.Baensch@bam.de

**Kurzfassung.** Rohrleitungssysteme sind aufgrund ihrer Funktion und Ausdehnung für den Betrieb, die Verfügbarkeit und die Sicherheit von Industrieanlagen von besonderer Bedeutung. Die bisher in definierten Intervallen durchgeführten, wiederkehrenden Prüfungen zur Sicherstellung leckagefreier Rohrleitungen sind kostenintensiv und mit einem erhöhten Aufwand verbunden.

Mit dem interdisziplinären Forschungsprojekt AGIFAMOR (Ageing Infrastructures – Akustisches Monitoring von Rohrleitungen) arbeitet die BAM an der Entwicklung und Erprobung einer örtlich und zeitlich kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Rohrleitungen basierend auf einem faseroptischen akustischen Messsystem, welches einen vergleichsweise geringen Installationsaufwand der Sensoren erfordert. Mit diesem Verfahren sollen vor allem betriebsbedingte Schädigungen infolge von Korrosion sowie daraus entstehende Pittings und Risse erkannt und damit Leckagen verhindert werden.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zum Teilaspekt „Detektion von Risswachstum“ wurde ein 2,5 m langes, definiert vorgekerbtes Stahlrohr mit der faseroptischen Sensorik (FOS) ausgestattet und quasistatisch unter 4-Punkt-Biegung belastet. Mit fortschreitender Belastung wächst, ausgehend vom vorhandenen Außenumfangskerb, ein Riss im Stahlrohr bis zum Erreichen der Leckage – in der Praxis ein gefährliches Schadensszenario.

Parallel zur FOS erfolgten Messungen mit Schallemissionssensoren, Beschleunigungssensoren und Potentialsonden, deren Ergebnisse die Interpretation der FOS-Messergebnisse unterstützen sollen.

## Einführung

Vor dem Hintergrund eines weltweit zunehmenden Stofftransportes über Rohrleitungen und des einhergehenden, hohen Risikos für Leben und Umwelt bei auftretenden Leckagen, steht die Energie- und Versorgungsindustrie vor einer großen Herausforderung in der Überwachungsqualität. Die üblichen, turnusmäßig erfolgenden Überprüfungen von Rohrleitungen unterstützen zwar die Identifizierung von insbesondere Korrosions- und Ermüdungsrissen [1,2], jedoch werden willkürlich auftretende Schäden infolge innerer Kräfte (Druckstöße und Kavitationsschläge) [3] oder Fremdeinwirkung (Bauarbeiten, Erschütterungen und Produktdiebstahl) häufig erst anhand der geringeren Durchflussmengen erkannt. Für ein Frühwarnsystem ist die Installation einer kontinuierlichen Überwachung notwendig. Hohes Potential für diese Anforderungen hat die zerstörungsfreie Prüftechnik (ZfP) der verteilten faseroptischen Sensorik (FOS), da hierfür an weit ausgedehnten



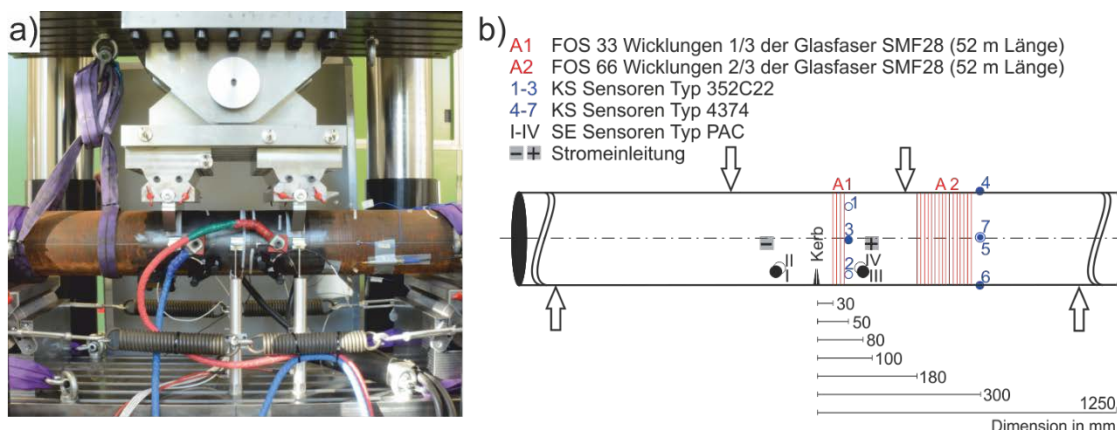
Strukturen lediglich eine einzige optische Faser appliziert werden muss, die gleichzeitig als örtlich kontinuierlicher Sensor sowie der Signalübertragung dient [4, 5]. Die verteilte faseroptische akustische Sensorik ermöglicht u.a. die Erfassung mechanischer Einwirkungen Dritter auf Rohrleitungen (Annäherung, Erdarbeiten und Manipulation) [6].

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes AGIFAMOR (Ageing Infrastructures – Akustisches Monitoring von Rohrleitungen) an der BAM wird untersucht, inwiefern Materialschädigungen anhand detektierter und lokalisierter Schallereignisse mit der FOS Technik identifiziert werden können. Es werden erste Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie zum Teilaspekt „Detektion von Risswachstum“ vorgestellt.

## Material und Methodik

### Versuchsaufbau und Ablauf

Es wird eine quasistatische 4-Punkt-Biegeprüfung an einem 2,5 m langen Stahlrohr (S355J2N, Außendurchmesser 168,3 mm, Wanddicke 16 mm) durchgeführt. Um ein gezieltes Risswachstum zu initiieren, wird in das Rohr ein 90°-Außenumfangsfehler von 8 mm Tiefe eingebracht. Die Belastung erfolgt weggeregelt (0,2 mm/min). Mittels Potentialsondenmessung wird der Zeitpunkt der Rissinitiation grafisch identifiziert (Direct Current Potential Drop; DCPD). Für diese Methode wird über zwei Punkte Strom auf das Rohr geleitet (Abb. 1) und die Potentialänderung an 5 Punkten direkt am Kerb abgegriffen.



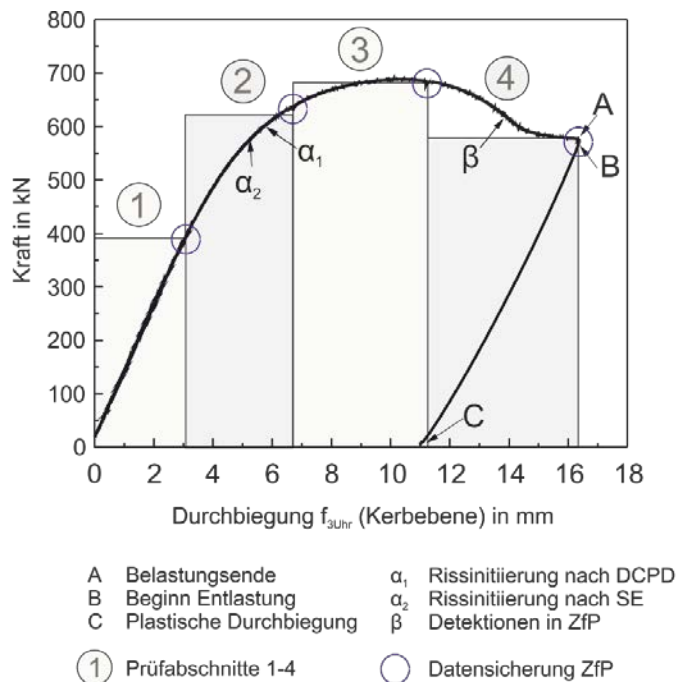
**Abb. 1.** Der 4-Punktbiegeprüfstand a) Fotografie des Versuches. b) Versuchsanordnung der verwendeten Messtechniken Faseroptische Sensorik (FOS), Körperschallmessung (KS), Schallemissionsmessung (SE) und Potentialsondenmessung (+/- Stromeinleitung, 5 Potentialabgriffspunkte direkt am Kerb) auf dem Rohr.

Für die faseroptische Sensorik (FOS) wird eine Standard singlemode Glasfaser SMF28 (9/125/250  $\mu\text{m}$ , Acrylat Coating, Corning) von 52 m Länge in engen Umwicklungen von außen auf das Rohr appliziert (1/3 der Umwicklungen nah am Kerb, 2/3 der Umwicklungen 180 mm entfernt vom Kerb). Bei dem eingesetzten faseroptischen Messgerät handelt es sich um ein Helios DAS System (Fotech Solutions), welches das Prinzip der kohärenten OTDR (C-OTDR, coherent optical time domain reflectometry) nutzt. Die Messgröße basiert hierbei auf sich kohärent überlagernden Rückstreuungssignalen von in die Faser geleiteten Lichtpulsen. Es wird kontinuierlich mit einer gewählten Pulswiederholrate von 80 kHz aufgezeichnet. Im vorliegenden Versuch wird der Schwerpunkt auf die Sensitivität der Messtechnik gelegt, was zu einer relativ geringen Ortsauflösung führt: Aufgrund der gewählten Pulslänge von 200 ns (hohe Empfindlichkeit) liegt die Ortsauflösung bei 20 m und bleibt unberücksichtigt. Prinzipiell ist das verwendete System in der Lage, Ortsauflösungen von etwa 1 m (bei einer Pulslänge von 10 ns) zu erreichen.

Zusätzlich wird ein Körperschall-Messsystem (KS), bestehend aus sieben Beschleunigungssensoren installiert. Vier Beschleunigungssensoren vom Typ 352C22 (PCB Piezotronics) werden um jeweils  $90^\circ$  rotiert 300 mm entfernt vom Kerb und drei Sensoren vom Typ 4374 (Brüel & Kjær) um je  $120^\circ$  verdreht 50 mm vom Kerb entfernt adhäsiv auf das Rohr montiert (Klebstoff HBM 1-X60). Als Ladungsverstärker werden drei PCB 422E12 verwendet. Der Aufbau besteht aus dem USB Modul 66366 (National Instruments) und der ICP-Versorgung M978 (Sinus Messtechnik). Die aufgezeichneten Messdaten dienen als Referenz für spätere Simulationen der Wellenausbreitung im Rohr.

Zu weiteren Vergleichszwecken wird der Versuch mittels der Schallemissions-Messtechnik (SE) überwacht. Es wird das Messsystem MISTRAS Physical Acoustic (DiSP) mit 6 Kanälen eingesetzt. Zur Detektion und Ortung von SE-Ereignissen werden vier Breitbandsensoren (PAC-WD 100-2000 kHz) in einem gleichseitigen Rechteck mit einem Abstand von 80 mm um den Kerb an das Rohr montiert. Die SE-Signale werden über einen Vorverstärker (40 dB, Typ PAC 2/4/6) mit Frequenzfilter (20 kHz bis 1 MHz) erfasst. Die Aufzeichnungsrate beträgt 5 MHz. Jedes Zeitfenster eines detektierten Signals mit 3k Speichertiefe enthält somit 3072 Abtastpunkte und die aufgezeichnete maximale Signallänge beträgt  $614,2 \mu\text{s}$  inklusive  $50,0 \mu\text{s}$  pre-trigger.

Die Synchronisation der verschiedenen Monitoring-Systeme erfolgte über einen Hammerschlag gegen das Rohr. Der Belastungsversuch dauerte ca. zwei Stunden. Aus Gründen der Datensicherung wurde der Versuch in Abständen von 30 Minuten angehalten (Abb. 2).



**Abb. 2.** Die 4-Punktbiegeprüfung wird in 4 Prüfabschnitten (1-4) durchgeführt, um zwischenzeitlich die Daten in den ZfP-Messungen zu sichern. Die Rissinitiation wird mittels DCPD-Auswertung identifiziert ( $\alpha_1$ ), zeitnah wird in der SE-Messung ein erstes SE-Ereignis lokalisiert ( $\alpha_2$ ). Während des 4. Prüfabschnittes detektieren alle ZfP-Methoden zeitnah akustische Ereignisse ( $\beta$ ).

### Methoden der Datenaufbereitung und -auswertung

Die FOS Signalermittlung basiert auf der zeitlich-räumlichen Entwicklung der spektralen Zusammensetzung. Die Fourier Transformation erfolgt in Blöcken aus 64 Zeitspuren, die je um  $12,5 \mu\text{s}$  versetzt sind. Ein Zeitblock weist eine Dauer von  $64 \times 1/80000 \text{ Hz} = 800 \mu\text{s}$  auf. Die spektrale Gesamtleistung berücksichtigt den Flächeninhalt der FFT im Frequenzbereich zwischen 1,25 kHz und 40 kHz und wird als Intensität mit willkürlicher Einheit (*Engl.*

„Arbitrary Unit“, a.u.) geführt. Die gesamte beobachtete Faserlänge wird mit den Ortparametern 0-120 Bin abgebildet und geht hier auch etwas über den, auf das Rohr applizierten Anteil hinaus. Dabei entspricht 1 Bin 0,68 m entlang der Faser. Abb. 3a und 4a zeigen die mit der Messtechnik aufgenommenen Rohdaten im Zeitbereich. Der Bereich mit der ersten Wicklung nahe dem Kerbbereich (Abb. 1. A1) wird als der aussagekräftigere Abschnitt befunden, daher erfolgt die weitere Datenanalyse ausschließlich für die erste Hälfte der Faser, 0-60 Bin (Aufbereitete Daten, Abb. 3b-c, Abb. 4b-c). Die spektralen Gesamtintensitäten werden für Position auf der Faser (Bin) und Versuchszeit (Abb. 3b, Abb. 4b) sowie als über den relevanten Ortsbereich (0-60 Bin) aufsummierte Intensität über der Versuchszeit abgebildet (Abb. 3c, Abb. 4c).

Bei der KS-Messung werden die Zeitsignale der 7 Sensoren mit einer Samplingrate von 100 kHz aufgezeichnet. Die Signale werden sowohl im Zeitbereich als auch mittels Kurzzeit-Fourier-Transformationen ( $\Delta t=0,01$  s) im Frequenzbereich von 1 kHz bis 25kHz ausgewertet (Abb. 5, Abb. 6).

Während des Versuches trat ein mit steigender Belastung zunehmendes Hintergrundgeräusch im Frequenzbereich  $f \leq 150$  kHz auf, sodass in der SE-Messung die Nachweisschwelle für die PAC-WD Sensoren auf bis zu 65 dB<sub>AE</sub> angehoben werden musste. Die Ortung zwischen den PAC-WD Sensoren garantiert die Identifizierung jener SE-Signale, deren Quelle in Kerbnähe lokalisiert sein muss. Für die georteten SE-Ereignisse wird das Zeitsignal sowie Frequenzspektrum analysiert. Die Signalparameter in Zeit- und Frequenzbereich werden für das Fenster -20  $\mu$ s (pre-trigger) bis 60  $\mu$ s ausgewertet (Abb. 7, Abb. 8). Die FFT wird unter Anwendung des Hanning-Fensters ermittelt.

## Ergebnisse und Diskussion

### Rissinitiierung

Anhand der Potentialänderung bei Rissstart (DCPD Auswertung) wird die Rissinitiierung am Kerb (Abb.2,  $\alpha_1$ ) für die 6 Uhr- und 7 Uhr-Positionen zeitlich und damit bezogen auf die Durchbiegung leicht versetzt für eine Last von 610 kN bis 613 kN ermittelt (Tab. 1).

**Tabelle 1.** Ermittlung der Rissinitiierung basierend auf der Potentialänderung nach dem DCPD Verfahren.

Position	Durchbiegung [mm]	Kraft [kN]
6 Uhr	5,93	609,6
7 Uhr	6,00	612,6

Bei den mittels FOS und KS detektierten Signalen während des Versuchsabschnittes 2 ist eine eindeutige Identifizierung bedeutender Ereignisse zeitnah zur Rissinitiierung mit den bisherigen Auswertungskonzepten nicht gelungen. In der SE-Messung wurde zeitnah, bei einer Last von 588 kN, ein Schallereignis detektiert und nahe dem Kerb geortet (Abb. 2,  $\alpha_2$ ). Es handelt sich um ein breitbandiges Ereignis mit Frequenzen bis ca. 600 kHz. Da zu diesem Zeitpunkt der Rissstart am Kerb angenommen werden kann, zeigt sich hier die Signal-Charakteristik einer Rissentwicklung mit radialer Ausrichtung.

Während des Versuchsabschnittes 3 wird die maximale Belastung des Rohres erreicht; die ZfP-Systeme detektieren in diesem Abschnitt nur wenige Ereignisse, die hier nicht analysiert werden.

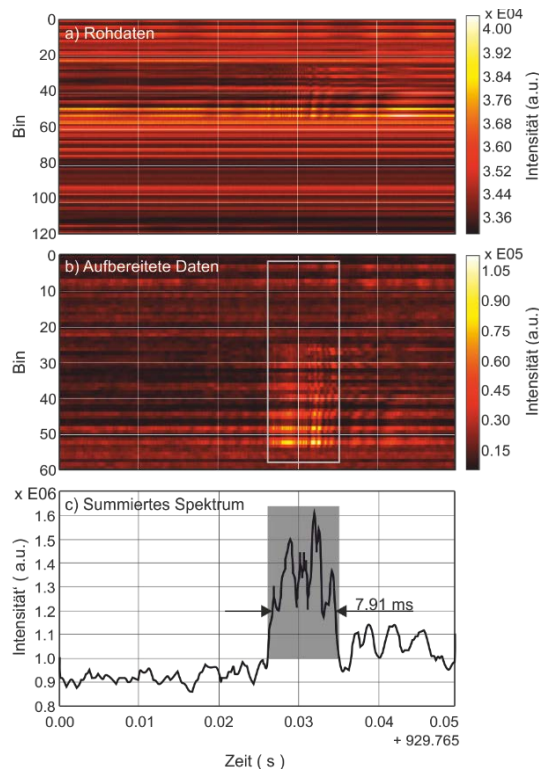
## Schädigung in Versuchsabschnitt 4

Im Versuchsabschnitt 4 tritt bereits der Lastabfall mit fortschreitender Durchbiegung auf (Abb. 2). Im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchsabschnitten detektieren hier alle drei akustischen ZfP-Systeme beinahe zeitgleich erhöhte akustische Aktivität. Für einen ersten Vergleich zwischen FOS, KS und SE werden jeweils die Detektionen zum Zeitpunkt 930 s (Ereignis E1) und 945 s (Ereignis E2) ausgewertet (Tab. 2, Abb. 3-8).

**Tabelle 2.** Zeitpunkt der Signaldetektion für die akustischen Ereignisse E1 und E2 (Versuchsabschnitt 4) in der faseroptischen Sensorik (FOS), Körperschallmessung (KS) und Schallemissionsmessung (SE).

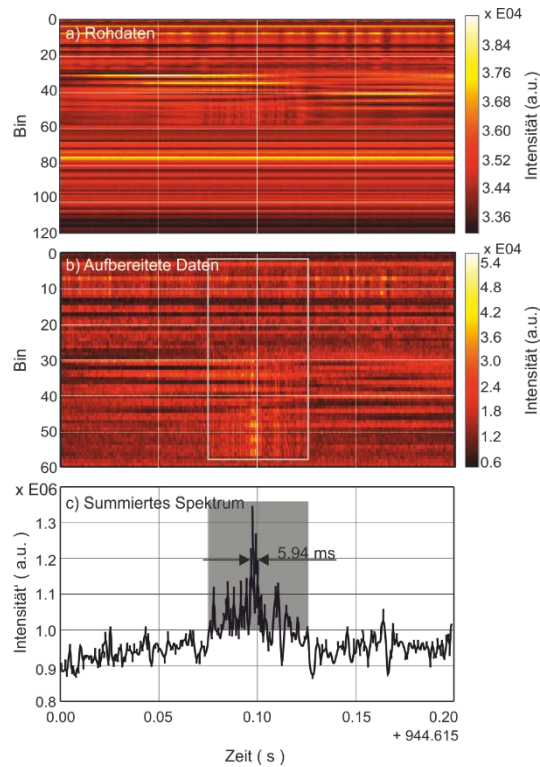
Ereignis		FOS	KS	SE
E1	[s]	929,791	929,979	929,968
E2	[s]	944,690	944,253	944,240

In der Detektion der FOS dauern beide Ereignisse, E1 und E2, ca. 10 ms an. In den Rohdaten sind beide Ereignisse identifizierbar (Abb. 3a, Abb. 4a). In den aufbereiteten Daten deuten sich erste Unterschiede an: Das E1, mit der maximalen Intensität von ca.  $1,05 \text{ E}5$  a.u. ist deutlich ausgeprägter als das E2 mit einer maximalen Intensität von ca.  $4,20 \text{ E}4$  a.u. (Abb. 3b, Abb. 4b). Im summierten Spektrum (Intensitäten summiert für 0 Bin bis 60 Bin) erreicht E1 für eine Dauer von etwa 7,91 ms Intensitäten von  $\geq 1,2 \text{ E}6$  a.u. (Abb. 3c). Im Falle von E2 werden nur für ein Zeitfenster von 5,94 ms derartige Intensitäten erreicht (Abb. 4c).

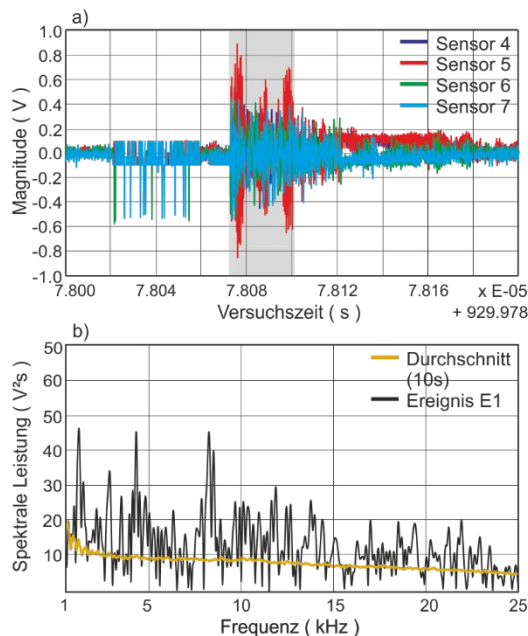


**Abb. 3.** Mittels faseroptischer Sensorik (FOS) detektiertes Ereignis E1 nach ca. 930 s Versuchsdauer im 4. Abschnitt. a) Der Rohdatensatz bildet die aufgenommenen Rückstreuintensitäten im Zeitbereich für die gesamte Faserlänge (0-120 Bin) und Versuchszeit ab. b) Der aufbereitete Datensatz bildet die spektralen Gesamtintensitäten örtlich für die erste Hälfte der Faser (0-60 Bin) und über die Versuchszeit ab. c) Die spektralen Gesamtintensitäten werden für 0-60 Bin aufsummiert. Für eine Dauer von 7,91 ms werden summierte Intensitäten  $\geq 1,2 \text{ E}6$  a.u. erzielt.

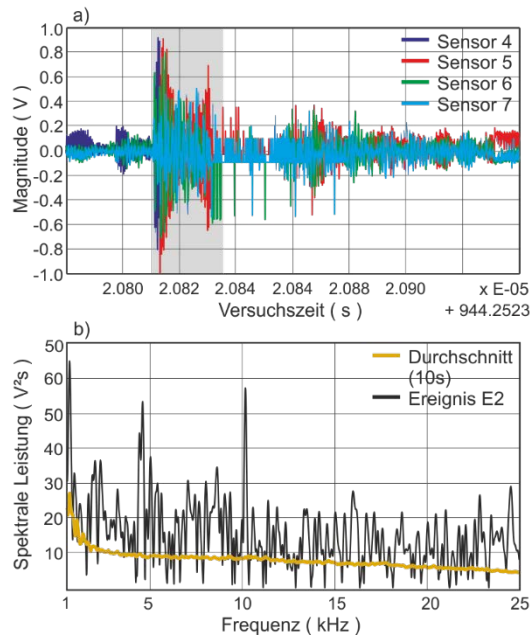




**Abb. 4.** Mittels faseroptischer Sensorik (FOS) detektiertes Ereignis E2 nach ca. 945 s Versuchsdauer im 4. Abschnitt. a) Der Rohdatensatz bildet die aufgenommenen Rückstreuintensitäten im Zeitbereich für die gesamte Faserlänge (0-120 Bin) und Versuchszeit ab. b) Der aufbereitete Datensatz bildet die spektralen Gesamtintensitäten örtlich für die erste Hälfte der Faser (0-60 Bin) und über die Versuchszeit ab. c) Die spektralen Gesamtintensitäten werden für 0-60 Bin aufsummiert. Für eine Dauer von 5,94 ms werden summierte Intensitäten  $\geq 1,2 E06$  a.u. erzielt.

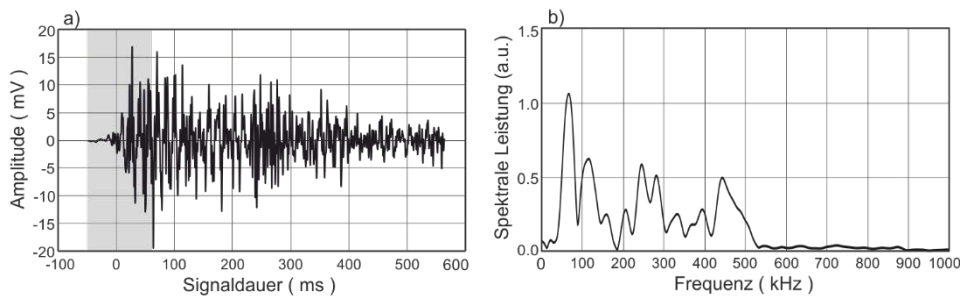


**Abb. 5.** Mittels Körperschall(KS)-Messsystem detektiertes Ereignis E1 nach ca. 930 s Versuchsdauer im 4. Abschnitt.

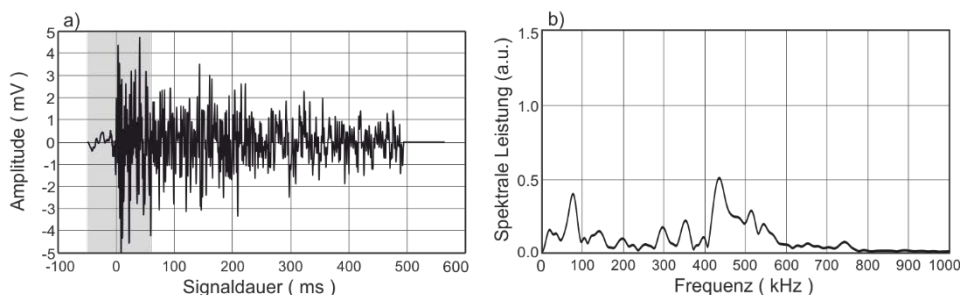


**Abb. 6.** Mittels Körperschall(KS)-Messsystem detektiertes Ereignis E2 nach ca. 945 s Versuchsdauer im 4. Abschnitt.

In den Detektionen der Beschleunigungssensoren des KS-Systems dauern die Signalburssts beider Ereignisse E1 und E2 etwa 3 ms; nach etwa 10 ms hat das System den Ausgangszustand wieder erreicht (Abb. 5a, Abb. 6a). Im Zeitsignal wird für E1 eine niedrigere Maximalamplitude als für E2 ermittelt, die Magnituden in der spektralen Leistung sind bei E1 niedriger als bei E2. Es sind grundsätzlich nur sehr geringe Abweichungen in den KS-Signaturen von E1 und E2 zu beobachten, wobei E2 die vergleichsweise höhere Signalstärke aufweist.



**Abb. 7.** Das lokalisierte Schallemissions(SE)-Ereignis E1 wurde im Prüfabschnitt 4 (Abb. 4) bei ca. 930 s gemessen. a) Das gemessene Signal mit dem analysierten Ausschnitt ist im Zeitbereich dargestellt. b) Die Darstellung im Frequenzbereich basiert auf Anwendung des Hanning-Fensters.



**Abb. 8.** Das lokalisierte Schallemissions(SE)-Ereignis E2 wurde im Prüfabschnitt 4 (Abb. 4) bei ca. 945 s gemessen. a) Das gemessene Signal mit dem analysierten Ausschnitt ist im Zeitbereich dargestellt. b) Die Darstellung im Frequenzbereich basiert auf Anwendung des Hanning-Fensters.

**Tabelle 3.** Schallemissionsanalyse (SE): Signalparameter für die akustischen Ereignisse E1 bei ca. 930 s und E2 bei ca. 945 s Prüfdauer im Versuchsabschnitt 4.

Ereignis	Zeit (Abschnitt 4) [s]	Max. Amplitude (Quelle) [dB <sub>AE</sub> ]	Signalenergie [E07 x V <sup>2</sup> s]
E1	930	103,3	171
E2	945	89,4	22

In der SE-Messung weisen die detektierten Ereignisse E1 und E2 eine, über das vordefinierte Aufnahmezeitfenster von 550  $\mu$ s hinausreichende Signaldauer auf (Abb. 7a, Abb. 8a). Anhand der Signalparameter abstandskorrigierte Maximal-Amplitude und Signalenergie wird E1 in der SE-Analyse als das intensivere Ereignis identifiziert (Tab. 3). Grundsätzlich zeigen beide Ereignisse die breitbandige Signalcharakteristik eines Mikrorissereignisses.

### Zusammenfassung und Ausblick

Bei dem verwendeten Stahl S355J2N handelt es sich um einen feinkörnigen Stahl, welcher ein ausgeprägt duktileres Verhalten aufweist. Es werden nur wenige akustische Signale mit den charakteristischen Bursts generiert und detektiert. Zudem erschweren Störgeräusche der Prüfeinrichtung die Detektion insbesondere von Mikrorissereignissen mit geringer Intensität.

Die verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP), faseroptische Sensorik (FOS), Körperschall(KS)- und Schallemissions(SE)- Messsystem, detektieren akustische Ereignisse in unterschiedlichen Frequenzbereichen. FOS ist sensitiv im Bereich bis 40 kHz, die KS bis 25 kHz und die SE deckt den Bereich zwischen 20 kHz und 1 MHz ab. Dementsprechend sind für die verschiedenen Systeme abweichende Ergebnisse zu erwarten gewesen. Es wurden vor allem relativ starke Mikrorissereignisse in allen drei Systemen detektiert. Auch die wesentliche akustische Aktivität während des Lastabfalls (nach Erreichen maximaler Belastung) wurde in den drei verwendeten ZfP-Verfahren beobachtet. Eine erste Analyse erfolgte an zwei akustischen Ereignissen, die in den drei Messsystemen jeweils in einem engen Zeitfenster zeitnah detektiert wurden.

Für eine Bewertung der Sensitivität des FOS Systems selbst sowie für den Vergleich mit KS und SE sollen in weiterführenden Untersuchungen umfangreichere Datensets generiert und analysiert werden. Dabei sind u.a. Maßnahmen zur Minderung der Störgeräusche vorgesehen.

### Referenzen

- [1] H. Willems, O. Barbian, W. Bähr, Moderne Konzepte der automatisierten Ultraschallprüfung am Beispiel der Inspektion von Fernrohrleitungen, 2003, DGZfP, Modernisierung in der ZfP mit Ultraschall zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Prüfaussagen. ISBN: 3-931381-52-8, S.43-51.
- [2] P. Seliger, A. Reuter, Zeitstandbedingte Schäden | Erscheinungsformen und Werkstoffspezifika, 34. VDI-Tagung Schadensanalyse in Kraftwerken, Wuerzburg 2008.
- [3] C. Rehborn, A. Dudlik, G. Kipp, Schadensfälle an Rohrleitungssystemen, Technische Überwachung, Bd. 51, Nr. 4, pp. 42 - 45, 2010.
- [4] J. Frings, Enhanced Pipeline Monitoring with Fiber Optic Sensors, 6th Pipeline Technology Conference 2011.
- [5] F. Tanimola, D. Hill, Distributed fibre optic sensors for pipeline protection, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Volume 1, Issues 4–5, November 2009, Pages 134-143.
- [6] T. Walk, J. Frings, Fiber optic sensing can help reduce third-party threats, Oil & Gas Journal, Sept. 6 2010.