

# Schallemissionsanalyse von Schadensmechanismen an Feinkornstahl

Janne WACHSMUTH, Jürgen BOHSE

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin  
Janne.Wachsmuth@bam.de

**Kurzfassung.** Im Hinblick auf die Zustandsüberwachung von Bauteilen über die Schallemissionsprüfung (SEP) ist es wichtig, Schallemissionssignale in Nutzsignale und Hintergrundgeräusche zu trennen. Auch eine Analyse der Schadensmechanismen auf Basis der SE-Signale ist wünschenswert, um einen schnellen Befund über die Art vorliegender Schädigungen zu erhalten. Diese Klassifizierung ist aufgrund der komplexen Entstehungscharakteristika von elastischen Wellen problembehaftet. Geometrie und Material des Bauteils sowie Sensoreigenschaften nehmen erheblichen Einfluss auf das detektierte SE-Signal und müssen in der Signalanalyse berücksichtigt werden. In dieser Arbeit werden geschweißte Platten aus dem Feinkornstahl P460NL1 untersucht. Korrosion und Ermüdungsrisswachstum werden als Schadensmechanismen in das Material eingebracht und auf ihre Nachweisbarkeit in Plattenversuchen geprüft. In späteren Untersuchungen sollen die entstandenen SE-Signale analysiert und klassifiziert werden.

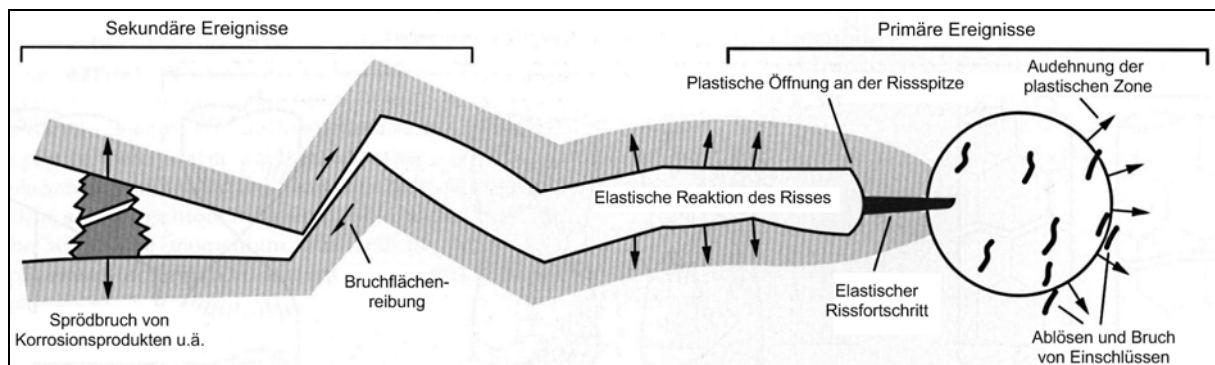
## Einführung

Im Bereich des Gefahrguttransportes im Schiffs-, Schienen- und Straßenverkehr kommt es durch Unfälle immer wieder zu Umweltschäden, Gefährdung von Menschenleben und Sachbeschädigung in Millionenhöhe. Die Hauptursache solcher Unfälle liegt neben menschlichem Versagen in strukturellen Schädigungen der Gefahrgutbehälter, ausgelöst durch Korrosion und/ oder Ermüdungsrisse. Um kritische Schäden zu erkennen, werden zeitabhängige Intervallprüfungen durchgeführt, welche als präventive Maßnahmen kostenintensiv sind und Betriebsunterbrechungen notwendig machen. Eine Alternative zu den heutigen Inspektionsverfahren bietet die Idee einer kontinuierlichen Überwachung der Transportmittel auf Basis der Schallemissionsprüfung (SEP) [1]. Fehlstellen im Bauteil würden zum Zeitpunkt ihres Auftretens erkannt und analysiert, wodurch eine erhöhte Betriebssicherheit gewährleistet würde. Ein wirtschaftlicher Vorteil für die Fahrzeugbetreiber ergibt sich daraus, dass früh erkannte Fehlstellen eine leichtere, und so auch kostengünstigere Reparatur ermöglichen würden. Ziel der kontinuierlichen Überwachung ist der Verzicht der betriebszeitbasierten Inspektionen.

Der Begriff Schallemission beschreibt das spontane Auslösen einer transienten elastischen Welle in einem Festkörper als eine Konsequenz einer plötzlichen lokalen Spannungsveränderung. Größere Schadensmechanismen in Ingenieurmaterialien, wie Rissfortschritt oder plastische Deformation, werden von lokalen Veränderungen der Spannungs- und Verschiebungszustände im Körper begleitet, welche elastische Spannungswellen (Schallemissionswellen) abstrahlen. Vorausgesetzt, diese elastischen Wellen besitzen eine ausreichende Energie, um von Sensoren an der Oberfläche detektiert zu werden, kann durch sie eine Aussage über die Schadensentwicklung im Körper gemacht

werden [2]. Diese Schallemissionssignale können dann, mithilfe einer geeigneten Auswertungssoftware, analysiert werden. Außerdem ist es möglich, eine Ortung der Schallemissionsquelle vorzunehmen. Die SEP ist nicht in der Lage, eine Quantifizierung der Fehlstellen vorzunehmen; jedoch kann nach einer Lokalisierung durch die SEP eine weitere Untersuchung durch andere zerstörungsfreie Prüfverfahren erfolgen. Diese können sich anhand der SEP-Ergebnisse auf wenige lokalisierte Stellen konzentrieren, anstatt die gesamte Struktur untersuchen zu müssen.

Wichtig für die Anwendung ist nicht nur die Anzeige eines lokalisierten Ereignisses. Die Frage beantworten zu können, von welchem Quellmechanismus es stammt, wäre ein enormer Fortschritt. Auf Schiffen beispielsweise ist Korrosion ein durchaus gewöhnliches Phänomen, während der Fortschritt eines Ermüdungsrisses weitaus kritischer zu betrachten ist. Auch Störgeräusche treten auf, die es von Nutzsensoren zu trennen gilt. Dies könnte die Schallemission leisten; denn abhängig von Ort und Art des Quellmechanismus unterscheiden sich die SE-Signale in Form und Spektrum. Anhand einer Mustererkennung wurden bisher beispielsweise Schadensmechanismen in Verbundwerkstoffen voneinander getrennt [3], [4]. Ziel einer Klassifizierung von Quellmechanismen an Gefahrgut tanks wäre die Trennung von Nutz- und Störsensoren, die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen SE-Quellen, z.B. Risswachstum und Korrosion, sowie das Erkennen von aktivem Risswachstum. Durch eine Unterscheidung zwischen Quellensensoren, welche einen aktiven Anteil am Bruchgeschehen haben und solchen, die auch bei nicht wachsenden Rissen auftreten, kann unterschieden werden, ob ein Riss wächst oder aber stationär verbleibt. Man unterscheidet hier zwischen primären und sekundären SE-Ereignissen (vgl. Abbildung 1).

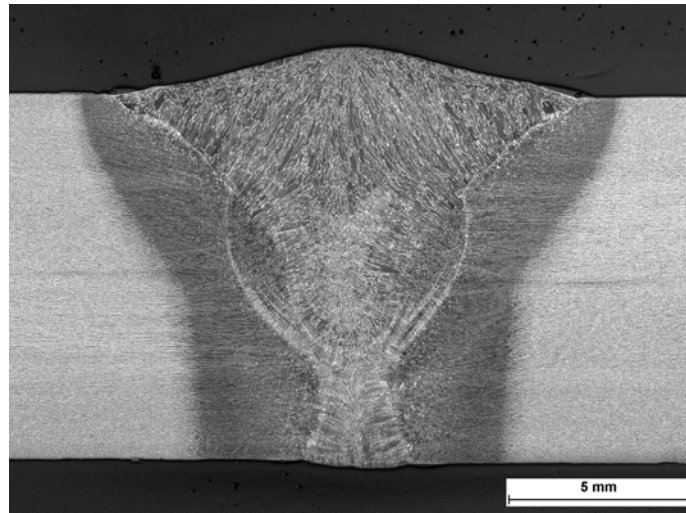


**Abbildung 1.** Schematische Darstellung einer Risspitze mit möglichen SE-Quellmechanismen [5]

## Experimenteller Teil

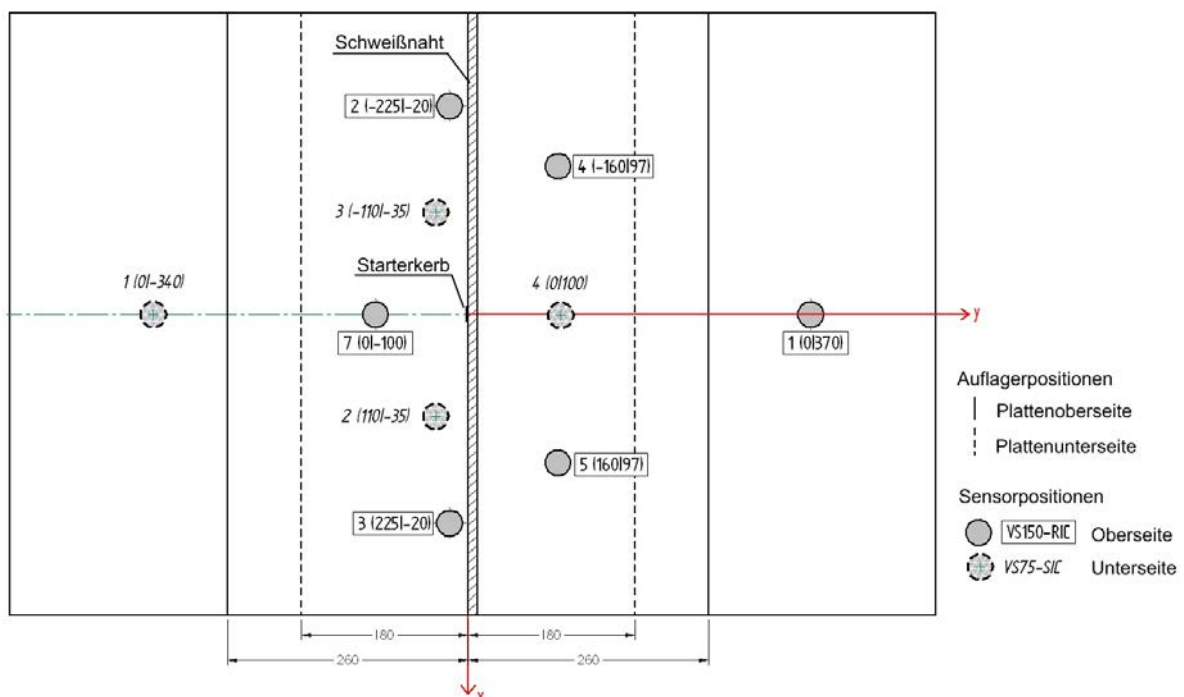
### *Materialien und Methoden*

Mit dem Feinkornbaustahl P 460 NL1 wurde ein Material gewählt, welches auch in Drucktanks Verwendung findet. Um lange Laufwege für die Schallwellen zu gewährleisten und Reflexionen der Schallwellen von den Rändern im SE-Signal zu vermeiden, wurden Probelplatten mit den Abmessungen 1000 x 650 x 10 mm verwendet. Die Platten enthielten eine Schweißnaht, an der das Risswachstum starten sollte und welche einen Bezug zu den kritischen Punkten, den „hot spots“, der Tankbehälter darstellte. Abbildung 2 zeigt ein Schlibbild der Schweißnaht, welche durch das MAG (Metall-Aktiv-Gas) – Fülldrahtschweißverfahren erstellt wurde.



**Abbildung 2.** Schliffbild der Schweißnaht

Als Schadensmechanismen wurden an unterschiedlichen Platten reine Korrosion, sowie Ermüdungsrisswachstum ohne und mit korrosivem Einfluss aufgebracht. Als Korrosionsmittel wurde eine NaCl-Lösung mit 50g NaCl pro Liter deionisierten Wassers verwendet. Beansprucht wurden die Testplatten über Vier-Punkt-Biegung mit einer Schwingfrequenz von 2,4 Hz, einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,5$  und maximalen Spannungen von bis zu 1.000 MPa. Die Schallemission wurde mit 75 und 150 kHz Resonanzsensoren vom Typ VS75-SIC, bzw. VS150-RIC, gemessen. Die Positionen der Sensoren sowie der Auflager sind in Abbildung 3 zu sehen.



**Abbildung 3.** Auflager- und Sensorpositionen bei Vier-Punkt-Biegeversuchen an geschweißten Platten. Alle Angaben in mm.

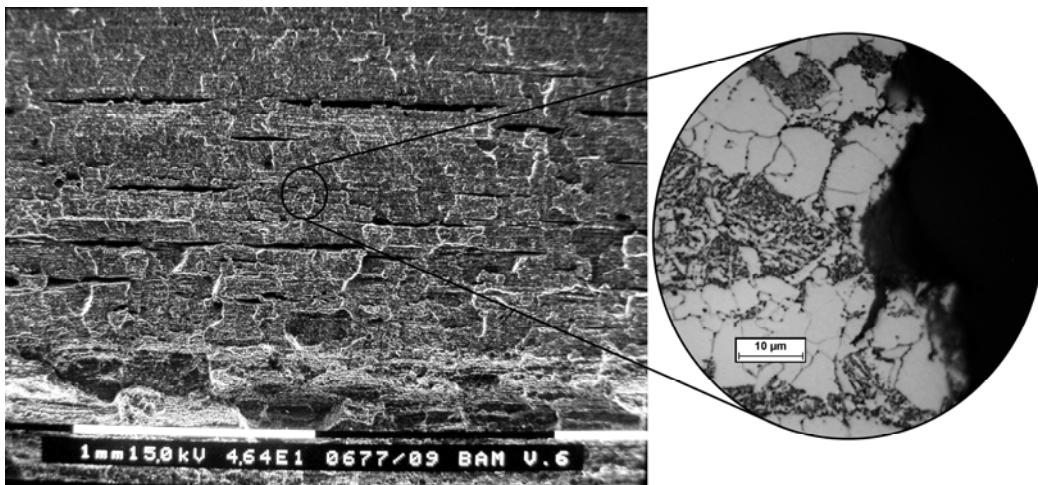
Für die hier dargestellte SE-Analyse wurden ausschließlich Daten des Sensortypus VS150-RIC verwendet. Die Nachweischwelle für die Aufnahme von SE-Signalen dieser Sensoren lag bei 50 dB<sub>AE</sub>; als Schallgeschwindigkeit zur Ermittlung der Ereignisorte wurde die effektive Geschwindigkeit der antisymmetrischen Plattenwelle mit 3.300 m/s gewählt.

## *Aufnahmen der Bruchfläche*

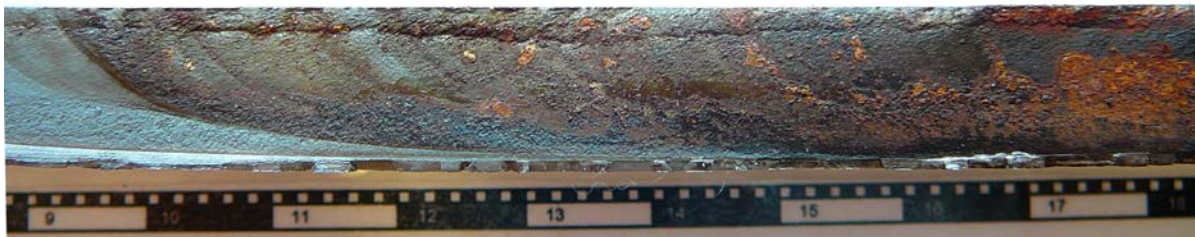
Nach Beendigung der Ermüdungsversuche wurden die Bruchflächen geöffnet. Es wurden licht- und rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der Bruchfläche sowie Schliffbilder der Rissflanken erstellt (vgl. Abbildung 4/Abbildung 6).



**Abbildung 4.** Bruchfläche eines Ermüdungsrisses ohne korrosiven Einfluss



**Abbildung 5.** REM-Aufnahme der Bruchfläche im Bereich des kritischen Ermüdungsrisswachstums (links) und Schliffbild der Bruchfläche (rechts)



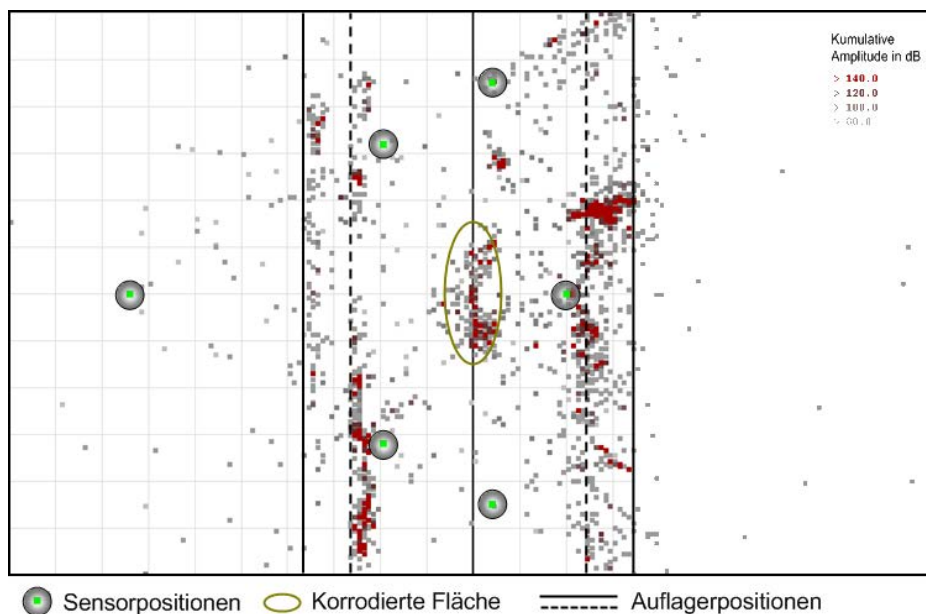
**Abbildung 6.** Abschnitt einer Bruchfläche nach Ermüdungsriss unter korrosivem Einfluss

## **Resultate**

### *Detektion von Korrosion*

Ortsgebundene Korrosion kann mit Hilfe der Schallemission auf zwei Arten detektiert werden. So können zum Einen primäre Mechanismen aus dem aktiven Korrosionsprozess selbst erfasst werden. Dies ermöglicht eine grundlegende Analyse der Korrosionsmechanismen über die Schallemission, erfordert jedoch eine sehr ruhige Aufnahmesituation und ist oft nur in Studien im Labor möglich [6]. Der zweite, für unsere Zielstellung zutreffende Ansatz, ist die Detektion und Lokalisierung von korrosiven Bereichen an Strukturen, welche sich im Betrieb befinden [7], [8]. Hier sind das größte

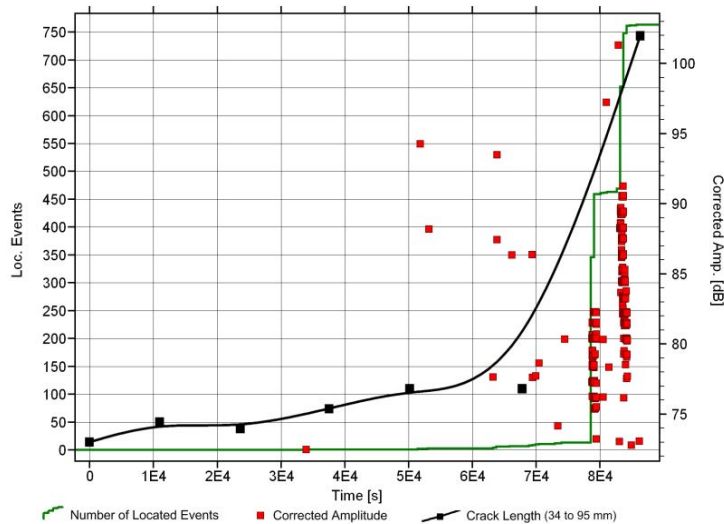
Problem die oft sehr hohen Hintergrundgeräusche, von denen die Nutzsignale aus den meist sekundären Ereignissen in Korrosionsbereichen bei der Zustandsüberwachung separiert werden müssen. Eine solche Prüfsituation wurde mit Hilfe einer Testplatte nachgestellt, auf welcher sich eine korrodierte Fläche definierter Größe befand, ohne dass ein Ermüdungsrisswachstum eingesetzt hätte. Diese Platte wurde zyklisch belastet. Ziel des Versuches war es, trotz der hohen Hintergrundgeräusche, verursacht durch die servohydraulische Testmaschine und die Reibung der Auflager auf der Testplatte, Schallemissionssignale aus Ereignissen im korrodierten Bereich zu detektieren und deren Quellenposition zu orten. Abbildung 7 zeigt eine SE-Ortungsgrafik nach einem solchen Versuch. Dargestellt sind die SE-Ereignisse, welche durch die Gruppe der 150 kHz Resonanzsensoren geortet wurden. Die Ortungsergebnisse zeigen, dass, wie erwartet, ein hohes Maß an Schallemissionsereignissen der Auflagerreibung zuzuordnen ist. Deutlich durch an hohes Maß an Schallemissionsereignissen erkennbar ist auch der korrodierte Bereich. Dort wurden Signalamplituden von 75 bis 85 dB<sub>AE</sub> erreicht.



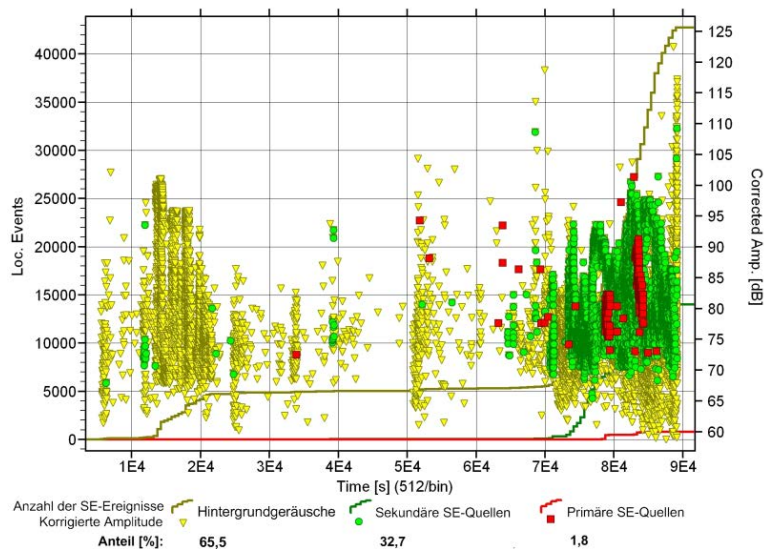
**Abbildung 7.** SE-Ortungsgrafik einer Platte unter zyklischer Vier-Punkt-Biegebelastung mit korrodiertem Bereich unter Verwendung des Sensortypus VS150-RIC

### *Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss*

Ergebnisse eines Ermüdungsversuches sind in Abbildung 8 dargestellt. In schwarz ist die Risswachstumskurve des Versuches zu sehen. Der Versuch lässt sich grob in einen Bereich mit geringer und einen mit sehr hoher Risswachstumsrate ( $da/dN = 5,7 \cdot 10^{-5}$  bzw.  $1,4 \cdot 10^{-3}$  mm) unterteilen. In grün dargestellt sind die Anzahl der primären SE-Ereignisse, welche an den Rissspitzen auftraten, und in rot deren Amplitude am Ort der Quelle (distance corrected amplitude). Während im Versuchsteil mit geringer Wachstumsrate wenig bis keine primären SE-Quellen detektiert wurden, kann bei einer hohen Risswachstumsgeschwindigkeit auch ein hoher Anteil an SE vermerkt werden. Ein Blick auf Abbildung 9 zeigt, dass dies auch für die sekundären SE-Ereignisse gilt. Der Anteil der sekundären Quellen ist zwar insgesamt höher als jener der primären, doch auch hier konnten kaum Ereignisse bei geringer Risswachstumsrate detektiert werden.



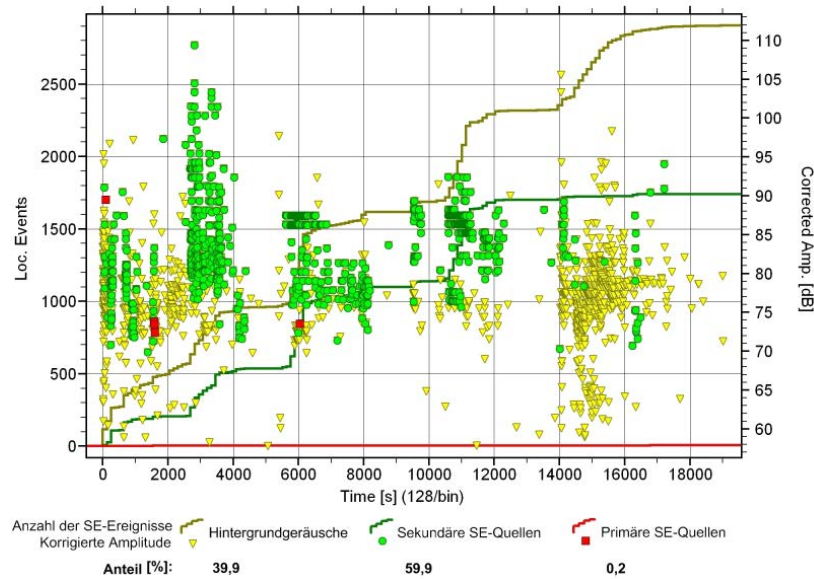
**Abbildung 8.** Primäre Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss und Risswachstumskurve des Versuches



**Abbildung 9.** Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss in Abhängigkeit ihrer Quelle

### *Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss*

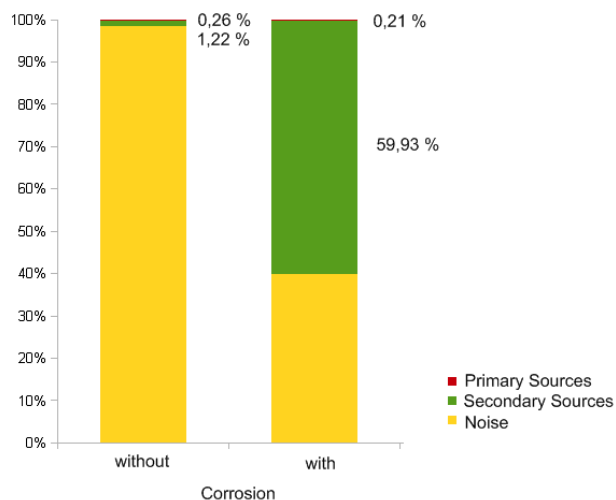
Abbildung 10 zeigt einen Versuchsabschnitt, in welchem ein Ermüdungsriss in einem korrosiven Bereich mit einer Risswachstumsrate von  $da/dN = 5,6 \cdot 10^{-5}$  mm vorangeschritten ist. Aufgrund der geringen Risswachstumsgeschwindigkeit ist der Anteil an primären SE-Ereignissen mit 0,2 % an der Gesamtemission sehr gering. Der Anteil der sekundären SE-Quellen ist mit beinahe 60 % sehr hoch. Dies bedeutet, dass der vorliegende Riss trotz geringer Risswachstumsrate aufgrund des hohen Anteils an sekundären SE-Quellen durch die Schallemission detektiert werden kann.



**Abbildung 10.** Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss in Abhängigkeit ihrer Quellenart

## Diskussion

Für den Nachweis von Materialschäden durch Korrosion oder Ermüdungsrisswachstum mittels Schallemissionsanalyse ist eine Anhäufung von SE-Ereignissen notwendig, welche eine statistisch abgesicherte Aussage über einen möglichen Materialfehler zulässt. Ermüdungsrisswachstum mit einer sehr hohen Wachstumsrate kann sehr gut nachgewiesen werden. Bei geringen Risswachstumsgeschwindigkeiten ist deren Nachweis jedoch schwierig, da zum einen der Anteil an primären SE-Quellen sehr gering ist, zum anderen wenig neue Bruchfläche entsteht, welche den Ausgangspunkt für sekundäre Quellen, z.B. bei der Rissuferreibung, darstellt. Hier kommt der Korrosion eine große Bedeutung zu. Sie erhöht den Anteil an sekundären SE-Quellen und damit die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen ähnlicher Geometrie und Risswachstumsrate bei der Zustandsüberwachung und bei hohem Hintergrundgeräusch erheblich (vgl. Abbildung 11). Von Bedeutung ist dabei vor allem der Bruch von Korrosionsprodukten im Riss und in rissnahen Bereichen.



**Abbildung 11.** Einfluss der Korrosion beim Ermüdungsrisswachstum. Anteile primärer und sekundärer Schallemissionsquellen/ Störungen beim Nachweis von Ermüdungsrissen bei geringen Risswachstumsraten ( $da/dN = 5,7 \cdot 10^{-5}$  bzw.  $5,6 \cdot 10^{-5}$  mm)

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Vier-Punkt-Biegeversuche an Testplatten durchgeführt, wobei die Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrisswachstum ohne und mit korrosivem Einfluss auf ihre Nachweisbarkeit unter hohen Hintergrundgeräuschen untersucht wurden. Dabei konnte sowohl reine Korrosion unter zyklischer Belastung als auch Ermüdungsrisswachstum im korrosiven Bereich nachgewiesen werden. Bei dem Nachweis von reinem Ermüdungsrisswachstum ist die Nachweisbarkeit auf Bereiche kritischen Risswachstums beschränkt. SE-Signale aus verschiedenen Quellmechanismen wurden aufgenommen und separiert. Der nächste Schritt ist die Nutzung dieser Daten für die Erstellung eines Klassifikators, welcher in nachfolgenden Versuchen genutzt werden kann, um die unterschiedlichen SE-Quellen zu erkennen. Unter anderem werden Versuche an großen Strukturen durchgeführt. Tankwagen werden mittels Schallemissionsprüfung überwacht, wobei die Hintergrundgeräusche aus dem Betrieb sowie existierende Fehlstellen oder künstlich erzeugte SE-Quellen detektiert werden sollen. Untersucht werden soll dabei sowohl die Nachweisbarkeit als auch die Klassifizierbarkeit von unterschiedlichen SE-Quellen unter punktueller Berücksichtigung folgender Einflussgrößen: Beschaffenheit der Quelle, Material- und Tankeigenschaften, Transportmedium sowie Betriebs- und Umweltbedingungen.

## Referenzen

- [1] L.M. Rogers, Structural Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods - Fundamentals and Applications, Lloyd's Register, Technical Investigation Department, London, 2001.
- [2] C.B. Scruby, G.R. Baldwin, and K.A. Stacey, Characterization of Fatigue Crack Extension by Quantitative Acoustic-Emission. International Journal of Fracture 28 (1985) 201-222.
- [3] M. Sause, and S. Horn, Influence of Specimen Geometry on Acoustic Emission Signals in Fiber Reinforced Composites: FEM-Simulations and Experiments, EWGAE 2010, European Working Group on Acoustic Emission, Vienna, 2010.
- [4] M. Sause, Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals, Mathematisch- Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Augsburg, Augsburg, 2010, pp. 305.
- [5] C.B. Scruby, An Introduction to Acoustic-Emission. Journal of Physics E-Scientific Instruments 20 (1987) 947-953.
- [6] M. Schulz, Beitrag zur Untersuchung der Spannungsrisskorrosion von CuZn-Knetlegierungen in NaCO<sub>2</sub>-Lösungen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock, Rostock, 2005, pp. 119.
- [7] S. Yuyama, Fundamental Aspects of Acoustic Emission Applications to the Problems Caused by Corrosion. in: G.C. Moran, and P. Labine, (Eds.), Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods, ASTM STP 908, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 43-74.
- [8] A. Proust, J.-C. Lenain, and S. Yuyama, Use of Acoustic Emission Technique to detect localised corrosion in the industrial field. Progress in Acoustic Emission X (2000) 147-152.