

# Schallemissionsanalyse von Schadensmechanismen an Feinkornstahl

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

**Kurzfassung.** 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. Die Schallemissionssignale wurden nach primären und sekundären Quellmechanismen getrennt und ihr Einfluss auf die Gesamtemission analysiert.

## 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 Schadenszustände 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. Ziel der kontinuierlichen Überwachung ist der Verzicht auf betriebszeitbasierte Inspektionen.

Der Begriff Schallemission beschreibt das spontane Auslösen einer transienten elastischen Spannungswelle (SE-Welle) in einem Festkörper bei einer plötzlichen lokalen Spannungsänderung, z.B. bei Rissfortschritt oder plastischer Deformation. Vorausgesetzt, diese elastischen Wellen besitzen eine ausreichende Amplitude, um von piezoelektrischen Sensoren an der Oberfläche detektiert zu werden, kann durch sie eine Aussage über die Schadensentwicklung in der Struktur gemacht werden [2]. Diese Schallemissionssignale können dann, mithilfe einer geeigneten Auswertungssoftware, analysiert werden. Außerdem ist es möglich, eine Ortung der Schallemissionsquellen vorzunehmen. Die SEP ist nicht in der Lage, eine Quantifizierung von Fehlstellen vorzunehmen; jedoch kann sich nach einer Lokalisierung durch die SEP die nähere Untersuchung durch andere zerstörungsfreie Prüfverfahren auf diese Bereiche 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 Gefahrgutttanks wäre die Trennung von Nutz- und Störsensoren, die Unterscheidung zwischen unterschiedlichen SE-Schadensquellen, z.B. Riss 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).

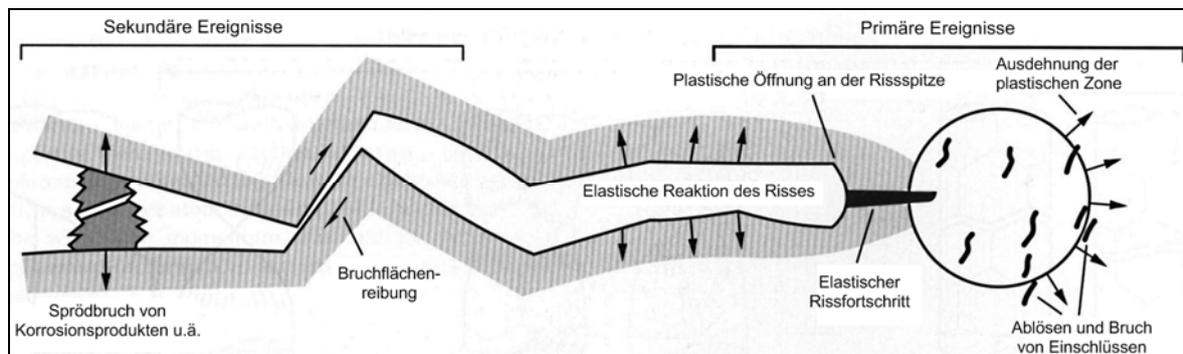
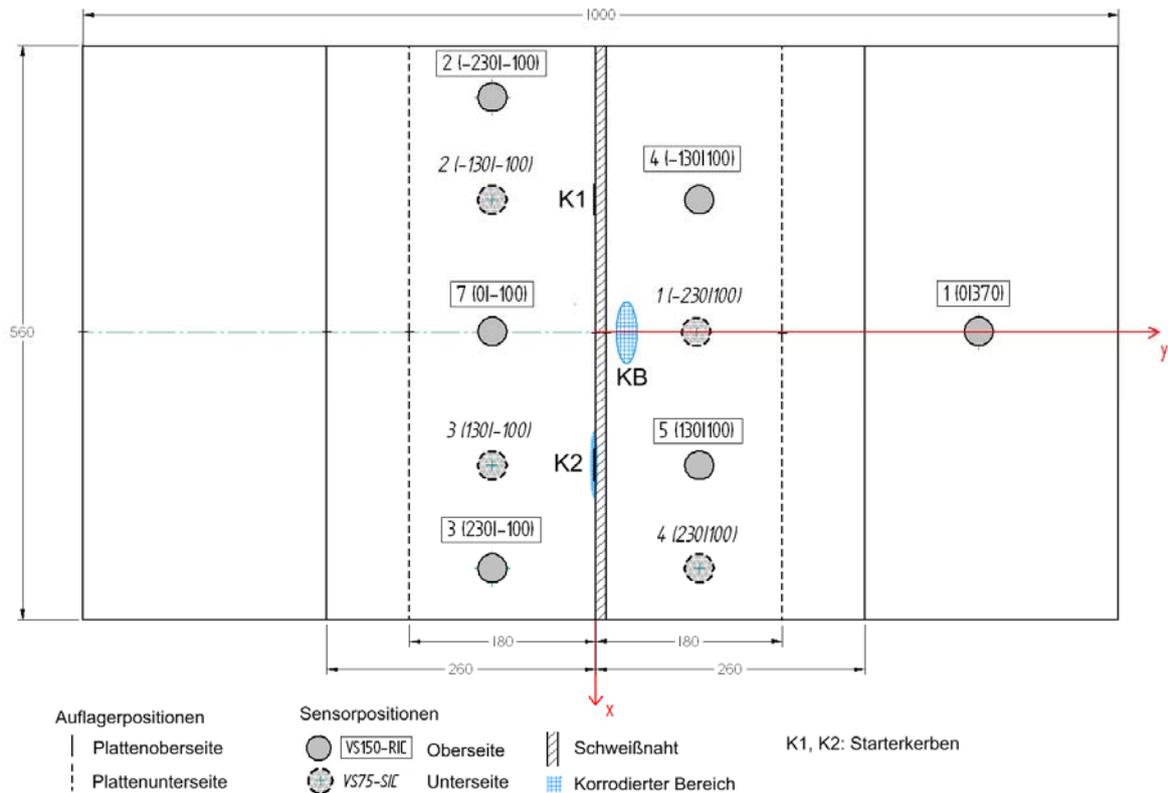


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Risspitze mit möglichen SE-Quellmechanismen [5]

## Experimenteller Teil

### Materialien und Methoden

Mit dem Feinkornbaustahl P 460 NL1 wurde ein Material gewählt, welches auch in Druckbehältern zum Gastransport Verwendung findet. Um Reflexionen der Schallwellen von den Rändern im SE-Signal möglichst zu vermeiden, wurden größere Testplatten mit den Abmessungen 1000 x 650 x 10 mm, bzw. 1000 x 500 x 10 mm, verwendet. Die Platten enthielten eine Schweißnaht, an der das Risswachstum starten sollte und welche einen Bezug zu kritischen Bereichen für Ermüdungsrissbildung, den „hot spots“, der Tanks darstellte. 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 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 2 zu sehen.



**Abbildung 2:** Auflager- und Sensorpositionen bei Vier-Punkt-Biegeversuchen an geschweißten Platten (alle Angaben in mm). Beispiel für die gleichzeitige Induzierung von drei Schadensmechanismen auf einer Testplatte

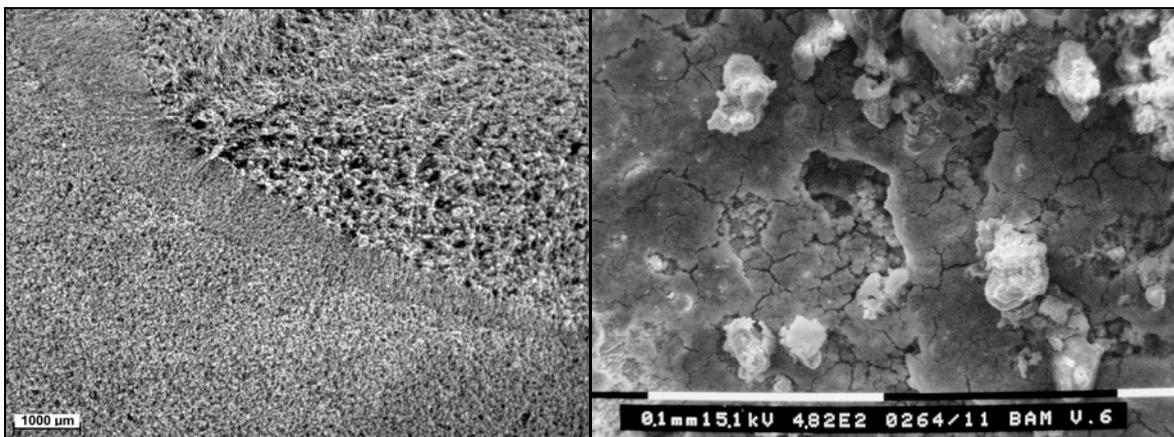
Für die hier dargestellte SE-Analyse wurden ausschließlich Daten des Sensortypus VS150-RIC verwendet. Für die Auswertung von SE-Signalen wurde aufgrund der hohen Hintergrundgeräusche durch Prüfmaschine und Auflagerreibung ein Schwellwert von 50 dB<sub>AE</sub> und als Schallgeschwindigkeit die effektive Geschwindigkeit der antisymmetrischen Plattenwelle zur Ermittlung der Ereignisorte mit 3.300 m/s gewählt. Die Risslängen wurden anhand von Farbeindringprüfungen ermittelt. Die SE-Signale wurden aufgrund der Ortungsergebnisse den jeweiligen Bereichen ihrer Quellenmechanismen zugeordnet. Es wurde jeweils ein elliptischer Bereich, dessen Größe an die aktuelle Risslänge angepasst wurde, für die Zugehörigkeit definiert. Primäre und Sekundäre SE-Signale beim Risswachstum wurden getrennt, indem SE-Ereignisse, welche bei ansteigenden Lasten der oberen 30% der Schwingbreite in Bereichen nahe der Rissspitze aufgenommen wurden primären Quellen zugeordnet wurden, während niedrigere, sinkende Lasten als Indikator für sekundäre Effekte angenommen wurden. Ähnliche Werte für primäre SE-Ereignisse aus dem Risswachstum wurden u.a. von Rabiei et al. angenommen [6].

### *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 3 und Abbildung 4). Die Aufnahmen der Bruchflächen zeigen Rastlinien, an denen eine Änderung der Belastung stattgefunden hat. Auch an dem Grad der Korrosion lassen sich die unterschiedlichen Versuchsstadien ablesen.



**Abbildung 3:** Oben: Teilstück der Bruchfläche des nicht korrodierten Risses; unten: der Bruchfläche des korrodierten Risses



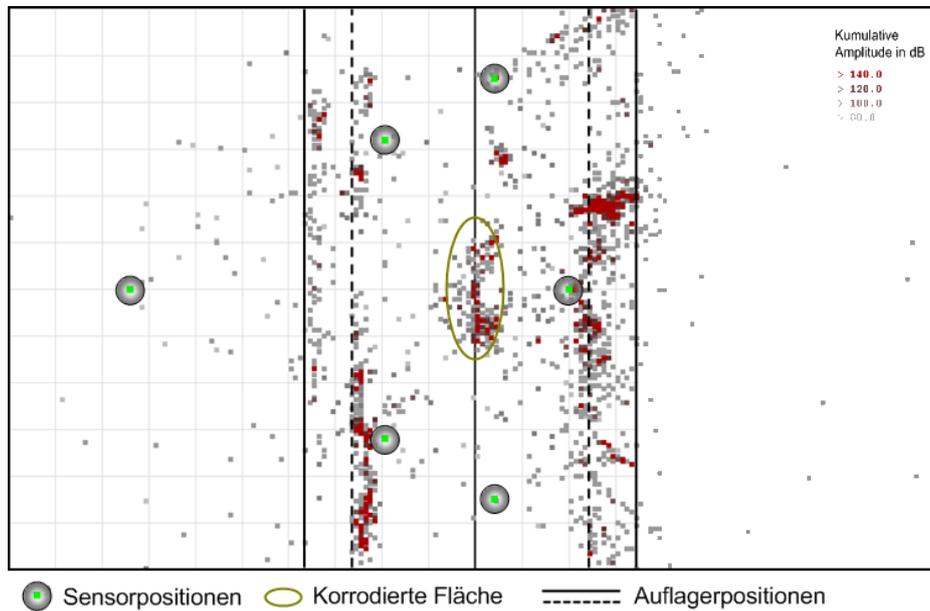
**Abbildung 4:** Links: Lichtmikroskopische Aufnahme der nicht korrodierten Bruchfläche; der Übergang von schneller zu langsamer Risswachstumsrate ist erkennbar. Rechts: REM-Aufnahme der Korrosionsschicht

## Resultate

### *Detektion von Korrosion*

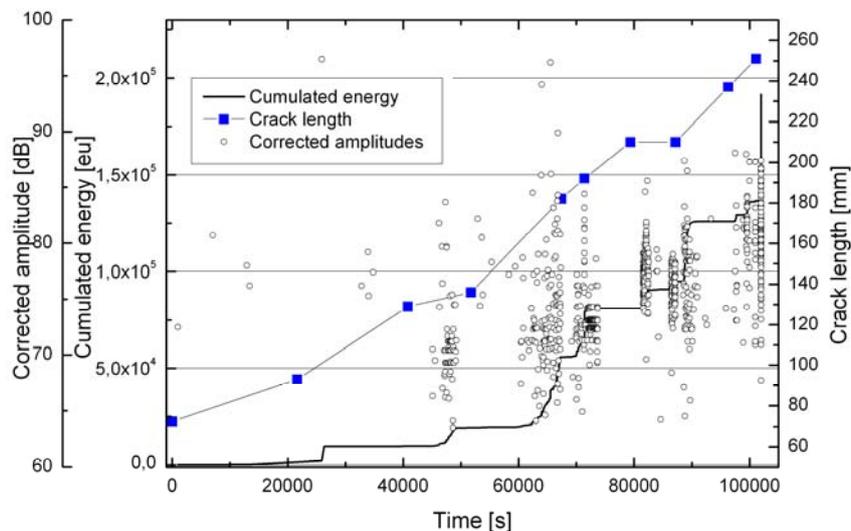
Ortsgebundene Korrosion kann mit Hilfe der Schallemission auf zwei Arten detektiert werden. So können zum Einen primäre Mechanismen aus dem aktiven Korrosionsprozess selbst erfasst werden. Dies ermöglicht eine grundlegende Analyse der Korrosionsmechanismen über die Schallemission, erfordert jedoch eine sehr ruhige Aufnahmesituation und ist oft nur in Studien im Labor möglich [7]. Der zweite, für unsere Zielstellung zutreffende Ansatz, ist die Detektion und Lokalisierung von korrosiven Bereichen an Strukturen, welche sich im Betrieb befinden [8], [9]. 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 5 zeigt eine SE-Ortungsgrafik aus 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 ein hohes Maß an Schallemissionsereignissen erkennbar ist auch der korrodierte Bereich. Dort wurden Signalamplituden von 75 bis 85 dB<sub>AE</sub> erreicht.



**Abbildung 5:** SE-Ortungsgrafik einer Platte unter zyklischer Vier-Punkt-Biegebelastung mit korrodiertem Bereich unter Verwendung des Sensortypus VS150-RIC

### *Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss*



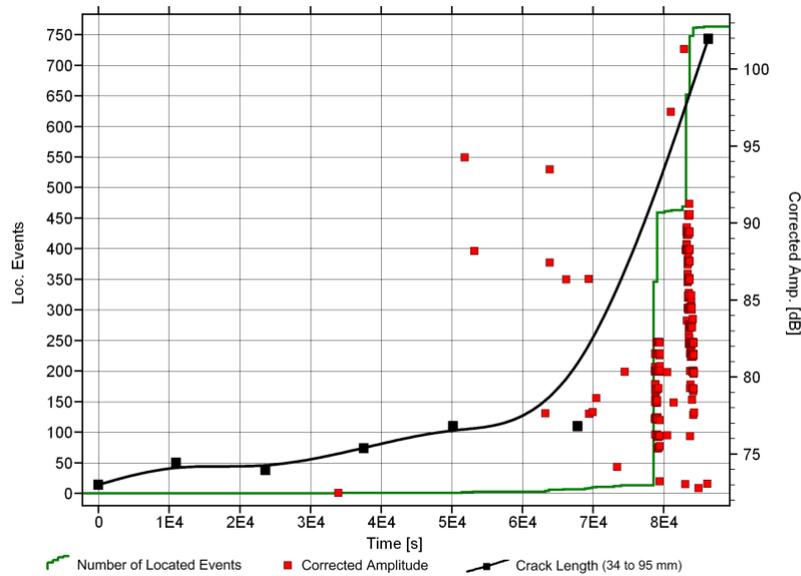
**Abbildung 6:** Versuchsergebnisse des nicht korrodierten Risses: Risswachstumskurve, kumulative Energie der SE-Signale und ihre abstandskorrigierten Amplituden

Ergebnisse eines Ermüdungsversuches mit nahezu gleich bleibender Risswachstumsrate ( $da/dN = 7,4 \cdot 10^{-4}$  mm/LW) sind in Abbildung 6 dargestellt. In blau ist die Risswachstumskurve des unkorrodierten Risses zu sehen. Die Energie der SE-Ereignisse wird

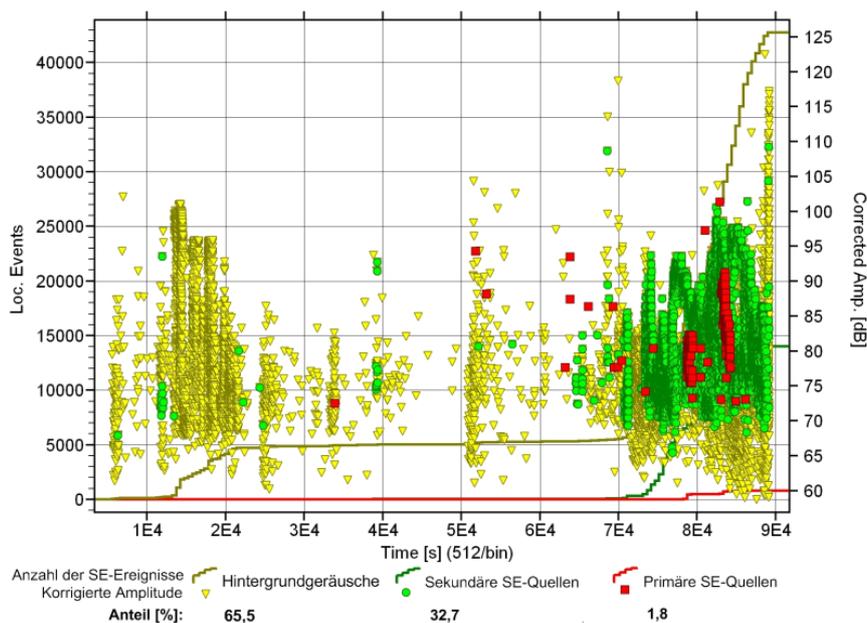
nach  $E = \int_{t=0}^{t=T} |U| dt$  mit U: Eingangsspannung vor Verstärkung, t: Signaldauer und der Energieeinheit (Signalstärkeneinheit): 1 eu = 1 nVs berechnet [10]. Die kumulierte Energie nimmt zu mit steigendem Risswachstum. Es werden abstandskorrigierte Signalamplituden (Amplituden, die nach Berücksichtigung der Signaldämpfung am Ort der Quelle zu erwart-

ten sind) von 65 bis 90 dB<sub>AE</sub> erreicht. Es wurden sowohl primäre (Risswachstum) als auch sekundäre (Reibung) Schallemissionsquellen einbezogen.

Ergebnisse eines weiteren Ermüdungsversuches sind in Abbildung 7 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/LW) unterteilen. In grün dargestellt sind die kumulative Anzahl der primären SE-Ereignisse, welche an den Rissspitzen auftraten, und in rot deren abstandskorrigierte 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 primären SE-Ereignissen vermerkt werden. Ein Blick auf Abbildung 8 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.



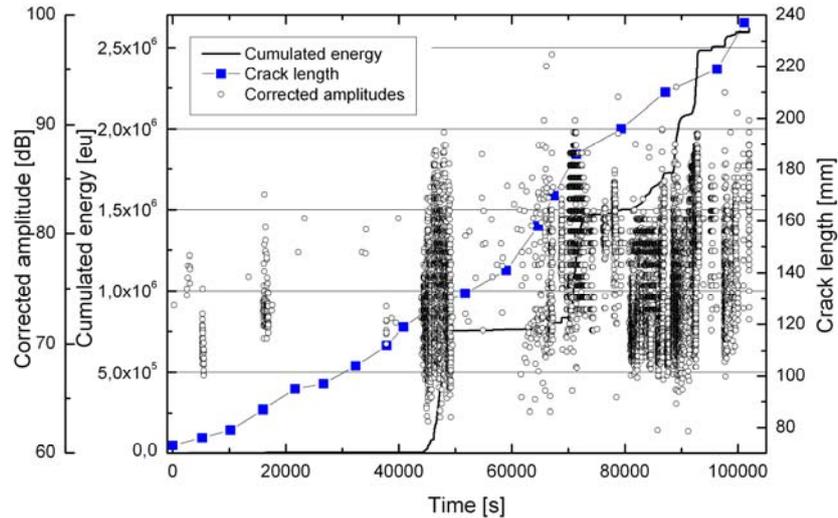
**Abbildung 7:** Primäre Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss und Risswachstumskurve des Versuches



**Abbildung 8:** Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss aus unterschiedlichen Quellmechanismen (gleicher Versuch wie in Abbildung 7)

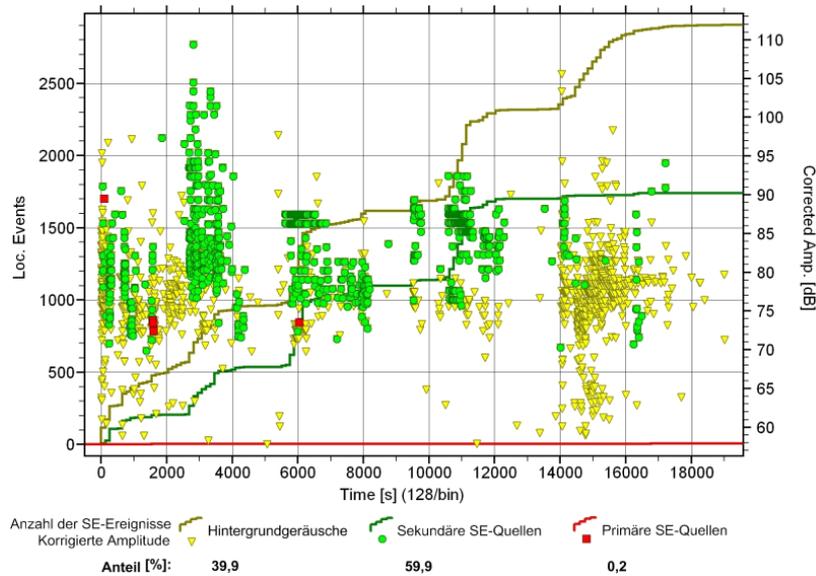
## Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss

Abbildung 9 zeigt ein Versuchsergebnis aus dem Wachstum eines korrodierten Risses. Signifikant ist eine sehr hohe Anzahl von SE-Ereignissen, gerade bei steigender Rissgröße ( $da/dN = 6,8 \cdot 10^{-4}$  mm/LW). Die Energiewerte der Signale steigen auch hier mit wachsendem Riss, sind jedoch um ein Zehnfaches höher als beim nicht korrodierten Riss. Die abstandskorrigierten Signalamplituden besitzen auch hier Werte von 65 bis 90 dB<sub>AE</sub>.



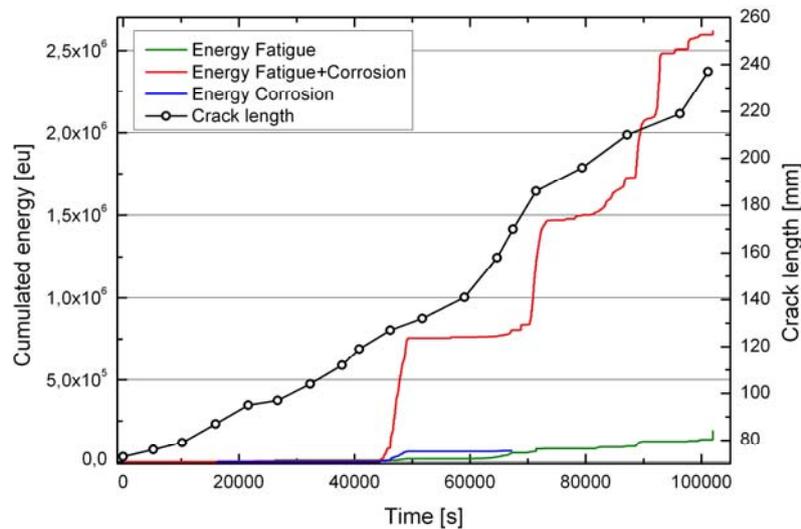
**Abbildung 9:** Versuchsergebnisse des korrodierten Risses: Risswachstumskurve, kumulative Energie der SE-Signale und ihre abstandskorrigierten Amplituden

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.



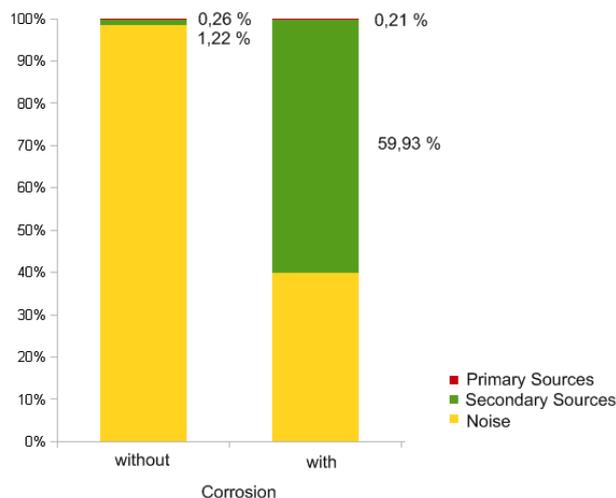
**Abbildung 10:** Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss in Abhängigkeit ihrer Quellenart

## Diskussion



**Abbildung 11:** Vergleichende Darstellung der Energiesumme von SE-Signalen eines korrodierten Risses (rot), eines unkorrodierten Risses (grün) und der reinen Korrosion (blau). Die Schadensmechanismen wurden auf derselben Platte aufgebracht

Für den Nachweis von Materialschäden durch Korrosion oder Ermüdungsrisswachstum mittels Schallemissionsprüfung ist eine Anhäufung (Clusterbildung) von SE-Ereignissen vorteilhaft, welche eine statistisch abgesicherte Aussage über eine mögliche Fehlstelle zulässt. Ermüdungsrisswachstum mit einer hohen Wachstumsrate kann sehr gut nachgewiesen werden. Bei geringen Risswachstumsgeschwindigkeiten ist deren Nachweis jedoch schwierig, da zum einen der Anteil an primären SE-Quellen, welche durch Rissfortschritt ausgelöst werden, sehr gering ist und zum anderen wenig neue Bruchfläche entsteht, welche den Ausgangspunkt für sekundäre Quellen, z.B. die Rissuferreibung, darstellt. Hier kommt der Korrosion eine große Bedeutung zu. Sie erhöht den Anteil an sekundären SE-Quellen und verbessert damit die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen ähnlicher Geometrie und Risswachstumsrate bei der Zustandsüberwachung und bei hohem Hintergrundgeräusch erheblich. Von Bedeutung ist dabei vor allem der Bruch von Korrosionsprodukten im Riss und in rissnahen Bereichen. Die Energieentwicklung der drei Schadensmechanismen ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Anteile primärer und sekundärer SE-Quellen beim Ermüdungsrisswachstum zeigt Abbildung 12. Von Bedeutung ist hier vor allem der Bruch von Korrosionsprodukten im Riss und in rissnahen Bereichen.



**Abbildung 12:** 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/LW)

## 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 bei 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 höherer Risswachstumsraten beschränkt. SE-Signale aus verschiedenen Quellmechanismen wurden aufgenommen und anhand der Ortung und lastabhängigen Filterkriterien separiert. Der nächste Schritt ist die Nutzung der aufgezeichneten Wellenformen für die Erstellung eines Signalklassifikators, um unterschiedliche SE-Quellen über die Mustererkennung zu identifizieren.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des von der EU im FP7 geförderten Projekts SCP7-GA-2008-218637 „Cost Effective Corrosion and Fatigue Monitoring for Transport Products (CORFAT)“ durchgeführt.

## 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, Research Techniques in Nondestructive Testing. in: R.S. Sharp, (Ed.), London: Academic, 1985, pp. 141.
- [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. Rabiei, M. Modarres, and P. Hoffmann, Probabilistic Structural Health Monitoring Using Acoustic Emission, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, San Diego, CA, 2009.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] AEwin Software - Installation, Operation and User's Reference Manual, Physical Acoustic Cooperation, Princeton Jct., New Jersey, 2004.