

Dipl.-Ing. Janne Wachsmuth

**Analyse der Schallemissionssignale aus
Ermüdungsrisswachstum und
Korrosionsprozessen**

Untersuchung der Möglichkeiten für die kontinuierliche
Zustandsüberwachung von Transportbehältern mittels
Schallemissionsprüfung

Die vorliegende Arbeit entstand an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Impressum

**Analyse der Schallemissionssignale aus
Ermüdungsrisswachstum und Korrosionsprozessen**

Untersuchung der Möglichkeiten für die kontinuierliche
Zustandsüberwachung von Transportbehältern mittels
Schallemissionsprüfung

2016

Herausgeber:
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8104-72222
E-Mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright© 2016 by
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Layout: BAM-Referat Z.8
ISSN 1613-4249
ISBN 978-3-9817502-4-9

Analyse der Schallemissionssignale aus Ermüdungsrisswachstum und Korrosionsprozessen

Untersuchung der Möglichkeiten für die kontinuierliche
Zustandsüberwachung von Transportbehältern mittels
Schallemissionsprüfung

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Janne Wachsmuth
geb. in Bremen

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. D. Peitsch
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Thorbeck
Dr.-Ing. habil. J. Bohse

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 7. August 2015

Berlin 2016

Zusammenfassung

Die Schädigung von Gefahrgutbehältern während ihres Transports durch Korrosion und Ermüdungsrisswachstum sind Ursache von Unfällen, die Menschenleben gefährden, die Umwelt schädigen und hohe Sachschäden verursachen. Um solchen Unfällen vorzubeugen, werden präventive Intervallprüfungen durchgeführt. Diese sind jedoch kostenintensiv, unter anderem durch die Standzeit der Transportmittel. Eine Alternative bietet die Idee einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung mittels Schallemissionsprüfung (SEP). So sollen Materialfehler sofort nach dem Entstehen entdeckt und repariert werden können.

Die Schallemissionsprüfung ist eine online Methode der Familie der zerstörungsfreien Prüfung. Schallemission (SE) wird durch Veränderungen im Material erzeugt und durch elastische Wellen als Körperschall transportiert. Erzeugt das Schallemissionsereignis genug Energie, damit sich eine elastische Welle bis zum Rand eines Bauteils ausbreiten kann, entsteht dort eine Oberflächenverschiebung im Pikometer-Bereich, die mithilfe von piezoelektrischen Sensoren detektiert werden kann. Der Sensor gibt ein elektrisches Signal aus. Aus diesem transienten SE-Signal lassen sich SE-Parameter wie die Maximalamplitude oder die Frequenz extrahieren. Durch Methoden der Signalanalyse können Signalgruppen in der Zeit- und Frequenzebene untersucht werden. Durch Wellenmodenanalysen lassen sich beispielsweise Aussagen über die Art der Quelle machen.

Diese Methoden werden angewendet, um aus dem SE-Signal Rückschlüsse auf die Quelle der Schallemission zu ziehen. Werden definierte Schadensmechanismen erkannt, können Hinweise auf den Schadenszustand des Bauteils gegeben werden. Durch Schallemission, die durch den Rissfortschritt erzeugt wird, kann beispielsweise ein Zusammenhang zur Rissfortschrittsrate und zum Spannungsintensitätsfaktor geschlossen werden. Eine neue Entwicklung im Bereich der Schallemissionsprüfung ist die Mustererkennung von SE-Signalen. Aus den Signalen werden spezifische Merkmale extrahiert, die sie ihren Schadensmechanismen zuordnen sollen.

Für die Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrisswachstum findet in dieser Arbeit eine vergleichende Analyse von SE-Signalen statt. Die Schadensmechanismen werden anwendungsnah auf großen Platten in der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht generiert und ihre SE-Signale definiert aufgenommen. Dafür werden Resonanzsensoren verwendet, die auf der einen Seite durch ihre Frequenzabhängigkeit sehr empfindlich die kleinste Oberflächenbewegungen reagieren und somit auch für die Anwendung in einer Zustandsüberwachung geeignet sind, jedoch andererseits frequenzbasierte Methoden der Signalanalyse erschweren.

Es werden reines Ermüdungsrisswachstum, Ermüdungsrisswachstum unter dem Einfluss von Korrosion sowie reine Oberflächenkorrosion generiert. Die Signalgruppen der Schadensmechanismen werden anhand ihrer Parameter verglichen; anhand von Wellenmodenanalysen können erste Unterschiede, trotz des starken Sensoreinflusses im Frequenzbereich, festgestellt werden. Der Schadenszustand der Proben wird durch bruchmechanische Kenngrößen in Zusammenhang mit SE-Parametern der Signalgruppen gebracht. Ferner findet eine Mustererkennung der SE-Signale statt. Dafür werden zwei Methoden des überwachten Lernens verwendet: eine automatisierte Merkmalsauswahl mithilfe eines

kommerziellen Mustererkennungssystemen, bei dem hauptsächlich frequenzabhängige Merkmale generiert werden sowie eine parameterbasierte Mustererkennung. Bei der parameterbasierten Mustererkennung wird die Einteilung in Signalklassen aufgrund der Häufigkeitsverteilung der SE-Parameter aus den Signalen der untersuchten Schadensmechanismen vorgenommen. Dabei ergeben beide Methoden, insbesondere für die Schädigung durch Korrosion, eine gute Zuordnung der SE-Signale in die richtige Schädigungs-klasse.

Abschließend findet unter Berücksichtigung der Nachweisbarkeit von SE-Ereignissen und der Klassifizierbarkeit von SE-Signalen eine Einschätzung zu Chancen und Risiken der permanenten Zustandsüberwachung mittels Schallemissionsprüfung statt. Dazu werden unter anderem eigene Messungen an Tankfahrzeugen hinzugezogen sowie Ergebnisse aus zyklischer und statischer Belastung verglichen. Es wird eine Abschätzung zur Wahl der Überwachungsmethode an Gefahrgutbehältern gegeben.

Abstract

Fatigue crack growth and active corrosion processes are the main causes of structural failures of transport products like road tankers, railway tank cars and ships. To prevent those failures, preventive, time-based maintenance is performed. However, preventive inspections are costly and include the risk of not detecting a defect, which could lead to a failure within the next service period. An alternative is the idea of continuous monitoring of the whole structure by means of acoustic emission testing (AT). With AT, defects within the material shall be detected and repaired directly after their appearance.

Acoustic emission testing is an online non-destructive testing method. Acoustic emission (AE) arises from changes within the material and is transported by elastic waves through the material. If the AE event generates enough energy, the elastic wave propagates to the boundaries of the component, produces a displacement in the picometre scale and can be detected by a piezoelectric sensor. The sensor produces an electrical signal. From this AE signal, AE features such as the maximum amplitude or the frequency can be extracted. Methods of signal analysis are used to investigate the time and frequency dependency of signal groups.

The purpose of the signal analysis is to connect the AE signal with the originating AE source. If predefined damage mechanisms are identified, referencing the damage condition of the structure is possible. Acoustic emission from events of the actual crack propagation process can for example lead to the crack growth rate or the stress intensity factor, both specific values from fracture mechanics. A new development in the domain of acoustic emission testing is the pattern recognition of AE signals. Specific features are extracted from the AE signals to assign them to their damage mechanisms.

In this thesis the AE signals from the damage mechanisms corrosion and fatigue crack growth are compared and analysed. The damage mechanisms were generated application oriented, on plates within the heat affected zone of a weld. Their AE signals were recorded with resonant sensors. On the one hand resonant sensors are very sensitive and able to detect small displacements on huge structures, which makes them applicable for condition monitoring. On the other hand, resonant sensors have a great influence on the AE signals and hinder signal analyses and pattern recognition.

Pure fatigue crack growth, fatigue crack growth in a corrosive environment and pure corrosion were applied. Signal groups of the damage mechanisms were compared by their AE features. Differences between signal groups could be made after wave mode analysis, despite the spectral influence of the AE sensors. The damage condition of the test plates is investigated with the combination of AE features of the signal groups and fracture mechanic parameters. Furthermore, two methods of unsupervised pattern recognition of the AE signals are being performed: A commercial classification system, where mainly frequency based features are generated, and an AE feature based method. In the latter, classification takes place after the frequency distributions of the AE features of the signals from the examined damage mechanisms. Both methods result in an accurate classification for the AE signals, especially originating from corrosion damage mechanisms, in the correct damage class.

Concluding, the detectability of AE events, the results of pattern recognition of AE signals in metal structures and the prospects and risks of condition monitoring by means of acoustic emission testing are discussed. Therefore, monitoring tests on a tank car and results from cyclic and static loading are consulted. An assessment for the selection of the monitoring method according to the cost effectiveness of dangerous goods transportation is made.

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 <i>Motivation und Fragestellung</i>	2
1.2 <i>Stand der Technik</i>	5
1.3 <i>Wissenschaftlicher Beitrag</i>	12
2 Das Schallemissionsprüfverfahren	15
2.1 <i>Quellen für Schallemission</i>	17
2.2 <i>Die Ausbreitung und Detektion elastischer Wellen</i>	25
2.3 <i>Signalanalyse und Mustererkennung</i>	33
3 Experimentelle Arbeit	47
3.1 <i>Verwendete Materialien, Messinstrumente und -methoden</i>	48
3.2 <i>Akustische Eigenschaften der Versuchsplatten</i>	58
3.3 <i>Erzeugung von Schallemissionsquellen und Aufzeichnung von SE-Signalen</i>	71
4 Analyse der Schallemissionssignale	81
4.1 <i>Schallemissionsereignisse durch Korrosion und Ermüdungsrisswachstum</i>	82
4.2 <i>Bruchmechanisches Verhalten im Vergleich zu Schallemissionsparametern</i>	98
4.3 <i>Mustererkennung der transienten SE-Signale</i>	105
5 Schlussfolgerungen	125
5.1 <i>Nachweisbarkeit von Schallemissionsquellen</i>	125
5.2 <i>Mustererkennung von SE-Quellmechanismen</i>	133
5.3 <i>Konsequenzen für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung</i>	137

Anhang

A Literaturverzeichnis.....	145
B Entwicklungen und Anwendungen der Schallemissionsprüfung	155
<i>B.1 Geschichte der Schallemission</i>	155
<i>B.2 Darstellung der CORFAT-Projektaufgaben</i>	157
C Theorieteil.....	161
<i>C.1 Exkurs in die Bruchmechanik</i>	161
<i>C.2 Elektrochemische Sauerstoffkorrosion und Schwingkorrosion als Schallemissionsquellen</i>	167
<i>C.3 Ausbreitungscharakteristik elastischer Wellen und Herleitung der Rayleigh-Lamb-Gleichungen</i>	169
<i>C.4 Ortung von Schallemissionsereignissen</i>	176
<i>C.5 Die Gabor-Transformation zur Erstellung von Wavelet-Diagrammen</i>	187
<i>C.6 Bewertung von Merkmalen bei der Mustererkennung</i>	188
D Messdaten und Analyse	191
<i>D.1 Versuche an Probekörpern</i>	191
<i>D.2 Analyse der Bruchflächen</i>	194
<i>D.3 Amplitudenverteilungen von SE-Ereignissen</i>	204
<i>D.4 Wavelet-Diagramme</i>	206
<i>D.5 Daten zur Mustererkennung</i>	208
<i>D.6 Die simulierte Druckprüfung</i>	222
<i>D.7 Akustische Messungen im Wasser</i>	227
<i>D.8 Messungen am Tankfahrzeug</i>	228
Danksagung.....	251

Verzeichnis der Zeichen und Abkürzungen

Zeichenerklärung

a	Risslänge
A	Bruchfläche
A_{korr}	Distanzkorrigierte Amplitude
A_{max}	Maximalamplitude im SE-Signal
A_{TH}	Nachweisschwelle
$A_{\text{TH,E}}$	Evaluationsschwelle
c_G	Gruppengeschwindigkeit
c_L	Wellengeschwindigkeit der longitudinalen Welle
c_P	Phasengeschwindigkeit
c_R	Wellengeschwindigkeit der Rayleigh-Welle
c_T	Wellengeschwindigkeit der transversalen Welle
d	Dimension des Merkmalvektors
da/dN	Risswachstumsrate
D	Sensorabstand
$e_{z,d}$	Abstand der neutralen Faser zum Rand
E	Elastizitätsmodul
E_{abs}	Energie des SE-Signals
E_{SS}	Signalstärke
f_{max}	Maximumfrequenz
f_{Sch}	Schwingfrequenz der Prüfmaschine
f_{SP}	Schwerpunktsfrequenz
F_{max}	Maximale Belastung beim Ermüdungsversuch
F_{min}	Minimale Belastung beim Ermüdungsversuch
$g(\mathbf{x})$	Diskriminantenfunktion, welche jedem Merkmalsvektor \mathbf{x} eine Klasse ω_i zuordnet
G	Schubmodul = $E/2(1 + \nu)$
G_E	Energiefreisetzungsrate
i	Imaginäre Zahl
J	äquatoriales Trägheitsmoment
k	Wellenzahl = $2\pi/\lambda_{\text{Welle}}$
K	Spannungsintensitätsfaktor
K_I	Spannungsintensitätsfaktor bei einer Modus I Rissöffnung
K_{max}	der sich aus der Oberspannung ergebende Spannungsintensitätsfaktor
K_{min}	der sich aus der Unterspannung ergebende Spannungsintensitätsfaktor

L_s	Abstand zwischen den äußeren Kraftangriffspunkten beim 4-Punkt-Biegeversuch
m	Abstand zwischen oberem und unterem Kraftangriffspunkt beim 4-Punkt-Biegeversuch
M_b	Biegespannung
n	Anzahl der Klassen
N	Lastwechsel
N_A	Anzahl der Abtastpunkte innerhalb der Abtastdauer T im Zeitsignal
N_{AS}	Anzahl der Datenpunkte im Frequenzspektrum = $N_{AZ}/2$
N_{AZ}	Anzahl der Datenpunkte im Zeitsegment bei der Merkmalsdefinition
N_C	Counts (Anzahl der Überschwingungen im SE-Signal)
N_E	Summe der SE-Ereignisse
$p(x)$	Mischverteilungsdichte
$p(\mathbf{x} \omega_i)$	Klassenbedingte Verteilungsdichte; die Wahrscheinlichkeit, dass der Merkmalsvektor \mathbf{x} auftritt, wenn zuvor die Klasse ω_i aufgetreten ist
$P(\omega_i)$	Auftretenswahrscheinlichkeit für eine Klasse ω_i
$P(\omega_i \mathbf{x})$	Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass $\mathbf{x} \in \omega_i$
r_c	Durchschnittliche Ausdehnung der Klasse
r_i	Abstand zwischen SE-Quelle und SE-Sensor des Kanals i
r_{ij}	Durchschnittlicher Abstand zwischen den Klassen
r_{iMax}	Abstand vom Klassenmittelpunkt einer Klasse ω_i zu dem Punkt, welcher am weitesten vom Klassenmittelpunkt entfernt liegt
r_{iP}	Abstand eines beliebigen Punktes P_i einer Klasse ω_i zu deren Klassenmittelpunkt
R	Lastverhältnis = F_{min}/F_{max}
R_{dis}	Abstands-Verhältnis (= r_{iP}/r_{iMax})
R_e	Streckgrenze
$R_{Fischer}$	Fischer-Ratio (= r_d/r_c)
R_i	Entscheidungsregion für die Klasse ω_i
R_m	Zugfestigkeit
t_0	Ankunftszeit des SE-Signals
t_D	Signaldauer
t_R	Anstiegszeit des SE-Signals
T	Abtastdauer im Zeitsignal
u_r	Oberflächenverschiebung nach dem Laufweg r
U	Tankumfang
\mathbf{x}	Merkmalsvektor des Signals $f(t)$
x_i	Komponenten des Merkmalsvektors \mathbf{x}
$x_{i,E}$	Entscheidungsgrenze für ein Merkmal x_i
Δa	Mikrobruchfläche (= $\Delta l \cdot \Delta w$)

ΔF	Schwingbreite der Kraft
ΔK	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
Δl	Größe der Plastischen Zone
Δt	Zeitintervall beim Abtasten des Zeitsignals
$\Delta \sigma$	Schwingbreite der Spannung
λ	erste Lamésche Konstante = $\nu E / ((1+\nu)(1-2\nu))$ (G. Lamé, 1795-1870)
λ_{Welle}	Wellenlänge
μ	Schubmodul, zweite Lamésche Konstante = $E / (2(1+\nu))$
$\underline{\mu}$	Mittelvektor mit den Komponenten μ_i ;
ν	Querkontraktionszahl, Poissonzahl; $\approx 0,3$ für metallische Werkstoffe (S.D. Poisson, 1781-1840)
σ_b	Biegespannung
σ_d	Druckspannung am Rand bei der Durchbiegung
σ_m	Membranspannung
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
σ_z	Zugspannung am Rand bei der Durchbiegung
Σ	Kovarianzmatrix
ω	Kreisfrequenz = $2\pi f$
ω_i	i-te Klasse

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BMT	Bleistiftminenbruchtest
CORFAT	Cost Effective Corrosion and Fatigue Monitoring for Transport Products (EU-Projekt)
FT	Fourier-Transformation
FFT	Schnelle Fourier-Transformation (engl.: Fast Fourier Transform)
GW	Grundwerkstoff
HN-Quelle	Hsu-Nielsen-Quelle, die durch den Bleistiftminenbruchtest (BMT) erzeugte Quelle
IP	in-plane, in der Plattenebene
LUCY	Location Uncertainty (Ortungsunsicherheit)
LW	Lastwechsel
MAG	Metall-Aktiv-Gas
OOP	out-of-plane, senkrecht zur Plattenebene
SE	Schallemission
SEP	Schallemissionsprüfung
SG	Schweißgut
SIF	Spannungsintensitätsfaktor
STFT	Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl.: Short Time Fourier Transform)
US	Ultraschall
WEZ	Wärmeeinflusszone
WT	Wavelet-Transformation
ZIP	Zerstörungsfreie Prüfung

1 Einleitung

Von C.B. Scruby wurde der Begriff „Schallemmission“ (SE) folgendermaßen definiert [ScBS85]:

„Der Begriff Schallemmission beschreibt das spontane Auslösen einer transienten elastischen Welle in einem Festkörper als eine Konsequenz einer plötzlichen lokalen Spannungsveränderung.“

Aus diesem physikalischen Ereignis wurde mit der Schallemmissionsprüfung (SEP) eine zerstörungsfreie Prüfmethode entwickelt, die in Online-Messungen aktive Materialschädigungen mit Hilfe von empfindlicher Messtechnik erfassen kann. Es besteht jedoch ein komplexer Zusammenhang von Schädigungsmechanismus, Schallemmissionsentstehung, Schallwellenausbreitung, Detektion durch den piezoelektrischen Sensor und schließlich der elektronischen Ausgabe eines sogenannten Schallemmissionssignals. Eine kausale Verbindung zwischen Materialschaden und Messergebnis herzustellen, ist seit Jahrzehnten Forschungsziel vieler Arbeitsgruppen.

Ein erweitertes Verständnis für den Zusammenhang von Materialschädigung und Schallemmissionsmessung zu gewinnen ist auch Ziel dieser Arbeit. Die theoretischen Grundlagen des Schallemmissionsprüfverfahren werden dazu in Kapitel 2 dargestellt. Die Hauptschädigungsmechanismen in Stahlbauteilen sind Ermüdungsrisswachstum und Korrosion. Diese sollen erzeugt (Kapitel 3) und, nach Messung der generierten Schallemmission, analysiert (Kapitel 4) werden. Schließlich wird ein Bezug zur Möglichkeit der kontinuierlichen Zustandüberwachung durch die Schallemmissionsprüfung diskutiert (Kapitel 5).

1.1 Motivation und Fragestellung

Strukturelle Schädigungen in Stahlbauteilen werden durch Korrosion und/ oder Ermüdungsrisse ausgelöst und können zu schweren Unfällen führen. Sind Gefahrguttransporte betroffen, bedeutet ein Unfall eine Schädigung der Umwelt, eine Gefährdung von Menschenleben und Sachbeschädigungen in Millionenhöhe. Um Schäden vorzubeugen werden zeitabhängige Intervallprüfungen durchgeführt, die als präventive Instandhaltungsmaßnahmen Betriebsunterbrechungen notwendig machen und kostenintensiv sind. Ferner besteht die Gefahr, dass ein unentdeckter Fehler in der nächsten Betriebsperiode des Bauteils zu kritischem Versagen führt.

Eine Alternative zu den heutigen Inspektionsverfahren bietet die Idee einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Gefahrgutbehältern im Straßen-, Schienen- und Schiffsverkehr auf Basis der Schallemissionsprüfung (SEP). 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. Ob so eine zustandsorientierte Instandhaltung durch die SEP möglich ist und ob diese die präventive Instandhaltung vollständig ersetzen, bzw. die Abstände ihrer Durchführung vergrößern kann, soll in dieser Arbeit diskutiert werden.

Ein großer Vorteil der SEP ist die Möglichkeit zur Ermittlung des Schädigungsortes. Dass in vielen Anwendungsfällen eine Beurteilung der Größe und Art eines Fehlers durch die SEP nicht möglich ist, ist ein Nachteil gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden. Aussagen über die Rückführbarkeit des aufgenommenen SE-Signals auf dessen Quelle zu treffen ist deshalb langjähriger Forschungsgegenstand. Ist es möglich, aufgrund eines transienten Signals, welches durch Dispersionseffekte, Material- und Sensoreigenschaften beeinflusst wurde, Rückschlüsse auf die Quelle zu ziehen? Diese Fragestellung wird in dieser Arbeit in Bezug auf die Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrischwachstum als Schallemissionsquellen bearbeitet.

Das bruchmechanische Verhalten von Materialien ist ein sehr gut erforschtes Gebiet. Aufgrund von Kennwerten wie dem Spannungsintensitätsfaktor können Bruchvorgänge vorhergesagt und Lebensdaueranalysen erstellt werden. Langfristiges Ziel ist es, hinreichend genau allein durch Schallemissionsmessungen, mit dem Weg über die Bruchmechanik, den Bauteilzustand charakterisieren zu können. Ein Großteil der Arbeiten auf diesem Gebiet bezieht sich bisher auf die Untersuchung an Probekörpern. Eine Fragestellung ist also die Anwendbarkeit von bekannten Ergebnissen auf reale Bauteile. Eine Annäherung an diese Frage soll in dieser Arbeit durch die Verwendung von praxisnaher Probengeometrie und den Vergleich mit Ergebnissen aus SE-Messungen an kleineren Probekörpern erfolgen.

Es ist bekannt, dass sich Informationen über die SE-Quelle in der Frequenz des SE-Signals wiederfinden [GrOh08, S.61 ff, Ono05, SKHT96]. Für das Frequenzspektrum der Signalform gilt nach [Ono05], dass das Ausgangssignal das Produkt aus den einzelnen Transferfunktionen ist. Die Transferfunktionen sowie das Ausgabespektrum des SE-Sensors sind beispielhaft in *Abb. 1-1* dargestellt. Für eine frequenzbasierte Signalanalyse werden Sensoren verwendet, die die detektierte Oberflächenbewegung möglichst frequenzneutral wie-

dergeben, sogenannte Breitbandsensoren. Für technische Anwendungen finden hingegen Sensoren Verwendung, die aufgrund einer für SE-Quelle und Material abgestimmten Resonanzfrequenz empfindlicher sind und somit auch weniger starke Quellen über eine größere Distanz hinweg erfassen können. In dieser Arbeit wird versucht, die beiden Elemente der Signalanalyse und Sensorempfindlichkeit zu verbinden. Mit klassischen Mitteln der Signalanalyse und frequenzbasierter Mustererkennung wird ermittelt, inwieweit frequenzabhängigen Methoden anhand von Signalen, welche mit Resonanzsensoren aufgenommen wurden, möglich sind, und inwieweit die daraus gewonnenen Informationen für eine SEP hilfreich sein können.

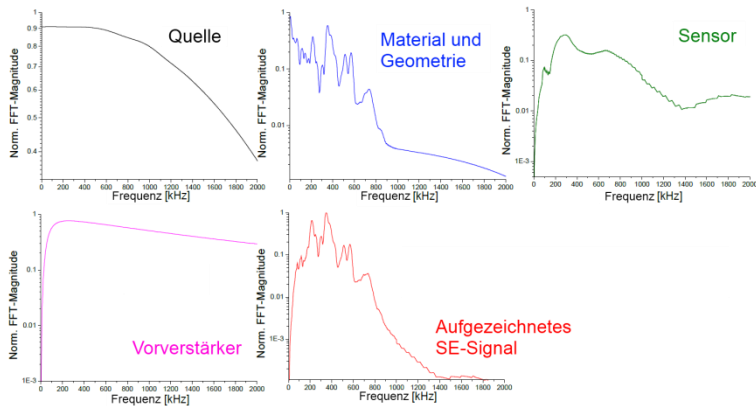


Abb. 1-1: Darstellung der Transfer-Funktionen, welche zum Ausgangssignal beitragen. FEM-Simulation von M.G.R. Sause [Bohs04, Saus10]

Eine Klassifikation der Schadensmechanismen aufgrund der von ihnen erzeugten Signalformen kann in der Zustandsüberwachung von Transportbehältern von großem Nutzen sein. Die Trennung von Nutz- und Hintergrundgeräuschen wird oft durch Frequenzfilter und Nachweisgrenze erreicht. Störgeräusche, wie beispielsweise die Auflagerreibung, ähneln in ihren Eigenschaften häufig den SE-Quellen, die von Schädigungen generiert werden, und können von ihnen durch logische Filterungen wie der Ortung getrennt werden. Bei einer Zustandsüberwachung ist jedoch von einem sehr hohen Aufkommen an Störgeräuschen zu rechnen. Die Trennung von Schädigungsquellen und Störgeräuschen wäre ein Anwendungsfeld für eine Mustererkennung. Auch die Erkennung einzelner Schadensmechanismen anhand ihrer Signalformen ist für die Überwachung von Bauteilen erstrebenswert. So ist beispielsweise im Schiffsverkehr die Korrosion unvermeidbar. Findet in einem korrodierten Gebiet aber zusätzliches Risswachstum statt, ist von einer unmittelbaren Gefährdung des Bauteils auszugehen. Ob so eine Unterscheidung mit der Aussage einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Schadensmechanismus möglich ist, ist eine weitere Fragestellung innerhalb dieser Arbeit.

In Bezug auf eine Zustandsüberwachung sollen also die Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrisswachstum auf ihre Nachweisbarkeit und Klassifizierbarkeit hin untersucht werden. Dazu soll eine vergleichende Betrachtung der Mechanismen als SE-Quellen vorgenommen werden, um Zusammenhänge und Unterschiede der Mechanismen hinsichtlich ihrer mikromechanischen Entstehung und deren Auswirkungen auf das aufgenommene SE-Signal zu erhalten. Eine praxisorientierte Herangehensweise findet hinsichtlich einer

1 Einleitung

großen, mit einer Schweißnaht versehenen Probengeometrie an einem Feinkornbaustahl, der auch für Transportbehälter genutzt wird, und empfindlicher, frequenzabhängiger Sensortechnik statt.

1.2 Stand der Technik

Als Pionier der Schallemission gilt *Joseph Kaiser*. In seiner Dissertation im Jahre 1950 an der Technischen Hochschule München untersuchte er das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch [Kais50]. Es ist die erste umfassende Erforschung von Schallemissionsphänomenen. Seine wohl bedeutungsvollste Entdeckung war das Irreversibilitätsphänomen in der Schallemission, welches heute seinen Namen trägt: der *Kaiser Effekt*. Kaiser schlug die Unterscheidung zwischen kontinuierlichem und transientem Signal vor. Die Entstehung der Schallemissionssignale sah er als Folge des Aneinanderreibens von Körnern in polykristallinen Werkstoffen und interkristalliner Rissbildung. Eine geschichtliche Exkursion zu den Anfängen der Schallemission und ihrer Entwicklung bis in die Neuzeit befindet sich in *Anhang B.1*. Im Folgenden wird auf Entwicklungen der Schallemissionsprüfung in Bezug auf ihre Verwendung in der zerstörungsfreien Materialprüfung, insbesondere der Zustandsüberwachung, die Verknüpfungen von Schallemission und Bruchmechanik sowie neueste Erkenntnisse in der Mustererkennung von SE-Signalen eingegangen.

Verwendung der Schallemission in der zerstörungsfreien Materialprüfung

Das Ziel der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ist es, Material zu charakterisieren und vorhandene Fehler zu detektieren, ohne das Material oder die Struktur in irgendeiner Weise zu beschädigen [Scru87]. Als Fehler gilt nach [GrSe11a, S.55ff] eine lokale Anhäufung von Defekten auf der Mesoskala (Hohlräume, Mikrorisse) und/ oder Defekten auf der Mikroskala (Fehler im Kristallgitter). Durch das Wirken äußerer Kräfte können aus Fehlern Risse entstehen, die sich bis zum Bauteilversagen weiterentwickeln können. Im Folgenden wird der Begriff *Fehler* für Schädigungen im Bauteil verwendet, die eine unerlaubte Abweichung der Materialcharakteristik bedeuten [Iser11, S.17ff]. Darunter werden im Besonderen Materialfehler durch Risse und Korrosionsschäden verstanden.

Bereits in den frühen 60er Jahren wurde die Schallemission als zerstörungsfreies Prüfverfahren erkannt. Eine der ersten Veröffentlichungen bezüglich der Anwendung von SE war die Prüfung der Ummantelung eines Raketenmotors [GrLS63]. In den 70er Jahren wurden vermehrt Verbindungen von SE-Parametern zu bruchmechanischen Kennwerten gesucht; die Aufnahme von Schallemission bei geringen Risswachstumsraten trotz hoher Hintergrundgeräusche gelang *D.O. Harris* und *H.L. Dunegan*. Sie konnten Risse mit Risswachstumsraten von $1,52 \cdot 10^{-4}$ mm/Lastzyklus nachweisen und resümierten über Verfahren der Schallemission: „Die Ergebnisse zeigen, dass Schallemissionsverfahren zur Betriebsüberwachung (in-service monitoring) für eine Vielfalt von zyklisch belasteten Strukturen in Frage kommen, sogar in Anwesenheit hoher Hintergrundgeräusche“ [HaDu74].

Bis heute werden jedoch immer wieder Fragen bezüglich Schadensvorhersage und Fehlercharakterisierung gestellt: Wie genau kann die SEP Schäden vorhersagen? Ist die minimale durch die SEP nachweisbare Fehlergröße kleiner als die minimal akzeptable Fehlergröße? Sind für die SEP schadenstolerante Strukturen notwendig? Ein Anwendungsfeld, in welchem sich die Schallemission etabliert hat, ist die Absicherung von Druckprüfungen von Gasdruckbehältern [Raus06, ScTs00], wie sie in *Abb. 1-2* zu sehen sind, sowie der Nachweis von Korrosion an Böden von Flachbodenlagertanks [LaTs02, MOKY07].



Abb. 1-2: Kugelgasbehälter in Karlsruhe (links, Bild: ikar.us) und 3D-Lokalisierung mit Sensorpositionen und SE-Indikationen (rechts, Bild: pirisndt.ca)

Die Schallemissionsprüfung kann als globale Testmethode bezeichnet werden. Sie ist in der Lage, eine Struktur vollständig zu überwachen, während viele andere zerstörungsfreie Prüfmethoden wie Radiografie, Ultraschallprüfung, Magnetpulverprüfung oder Farbeindringprüfung lokale Methoden sind, welche für die Untersuchung spezifischer Gebiete des Bauteils genutzt werden [Fowl92]. Eines der größten Probleme der Schallemissionstechnik als Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung ist die Ungewissheit über mögliches, nichtdetektiertes Risswachstum, wenn die Rate der Rissgrößenveränderung unter der Nachweisbarkeitsgrenze liegt [ScBS85]. Auch quantitative Aussagen, beispielsweise zur Rissgröße, sind durch die SEP nicht oder nur schwer zu treffen, da sich mit unterschiedlicher Messtechnik die Absolutwerte einer SE-Messung ändern. Es ist somit schwierig, mithilfe der SEP eine Charakterisierung oder Größenbestimmung von detektierten Fehlstellen durchzuführen. Ferner beinhaltet die Erzeugung und Ausbreitung von Schallwellen sowie der Nachweis von Schallemissionssignalen eine Serie an hochkomplexen Vorgängen. Die theoretischen Beziehungen zwischen Fehler (Art und Größe der Quelle) und erhaltenem Signal sind bei der SEP viel komplizierter als bei anderen ZfP-Methoden.

Die angeführten Vergleiche zwischen der Schallemissionsprüfung und anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden lassen nicht nur den Ausschluss der einen Methode bei Nutzung der anderen zu, sondern eröffnen Raum für eine komplementäre Nutzung der Methoden. Durch die Globalität und die Möglichkeit der Fehlerortung mittels Schallemissionsprüfung ist diese eine gute Methode, Vorarbeit zu leisten und Fehler örtlich zu identifizieren, um anderen ZfP-Methoden zu ermöglichen, gezielter und somit effektiver mögliche Fehlstellen zu quantifizieren. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 1-3 dargestellt und wurde u.a. von K. Ono diskutiert [Ono07].



Abb. 1-3: Aufgaben der Schallemissionsprüfung (SEP) bei einer zerstörungsfreien Prüfung

Allerdings benötigt eine globale Überwachung, abhängig von Bauteilgröße und Hintergrundgeräuschen, eine hohe Anzahl von Schallemissionssensoren. Diese ziehen eine entsprechend hohe Anzahl von Aufnahmekanälen, von Datenaufkommen und eine große Auswertungsmenge nach sich.

Schallemission in der kontinuierliche Zustandsüberwachung

Eine kontinuierliche Zustandsüberwachung, auch Online-Condition-Monitoring, bedeutet eine permanente Überwachung des Bauteils und somit ein schnelles Reaktionsvermögen auf Materialschäden. Eine so erreichte zustandsorientierte Instandhaltung ist nach [Dine10] eine Instandhaltung vor Ort während des Betriebes ohne die Beeinflussung der Funktion des Bauteils. Eine auf SE-Technik basierende Zustandsüberwachung bedeutet zunächst die räumlich deckende Ausstattung eines Bauteils mit Schallemissionssensoren, die die von Materialfehlern ausgehende Oberflächenbewegung aufnehmen sollen. Aus der Vernetzung der Sensoren kann ein Nachweis über mögliche Fehler und deren Ort erbracht werden.

Die Forschung an einer Zustandsüberwachung mittels Schallemission hatte einen ersten Höhepunkt im Amerika der 70er Jahre, als es um die Entwicklungen der Raumfahrttechniken ging. Die SE-Teststrategie bestand in der Beaufschlagung einer Überlast, um dann über global detektierte SE-Signale aufgrund von Gruppierungen (Clustern) und Signalparametern wie der Energie eine Aussage über die Materialschädigung machen zu können [Ono07]. Diese Strategie wird bis heute in den oben erwähnten Druckprüfungen durchgeführt und ist als Norm verankert [Dine05], jedoch nicht als *kontinuierliche* Zustandsüberwachung zu betrachten, da sie nicht für den Bauteilbetrieb geeignet ist.

Das erste kommerzielle SE-System für die kontinuierliche Zustandsüberwachung von geschweißten Rohren unter Wasser wurde 1989 an einer Ölplattform in der Nordsee installiert [MiRo92]. Ziel der Zustandsüberwachung via Schallemission war es, zu beurteilen, ob Fehleranzeigen an Schweißnähten aus radiographischen und Ultraschalluntersuchungen fortlaufende Risse darstellten. Bei der Überwachung der Tragfläche eines Flugzeuges war es bereits mehreren Arbeitsgruppen möglich, in Ermüdungsversuchen das Risswachstum an künstlich erzeugten Fehlern mithilfe von Schallemission zu überwachen [O'br96, Roge05]. Sogar die Rissspitzen konnten durch Clusterbildung der SE-Ereignisse mit guter Genauigkeit im Vergleich zu optischen Messmethoden geortet werden.

Kontinuierliche Zustandsüberwachung mittels SEP wurde in praktischen Anwendungen bis auf wenige Beispiele kaum durchgeführt. Hingegen gibt es viele Ansätze, die auf eine Anwendung in der kontinuierlichen Zustandsüberwachung zielen, sich jedoch mit der Signalanalyse und -interpretation beschäftigen. So beispielsweise der Ansatz einer Kombination aus SEP und Infrarot-Thermographie (IR) [KoAM12]. Hier wird versucht, einen Zusammenhang zwischen SE-, IR- und bruchmechanischen Parametern beim Ermüdungsrisswachstum zu gewinnen und daraus eine Lebensdaueranalyse für die kontinuierliche Zustandsüberüberwachung zu erstellen. Ein weiterer Ansatz ist eine Normalisierung der SE-Signale, um Interferenzen mit Störgeräuschen zu verringern [WuLT15].

Zusammenhänge von Schallemissionsparametern und bruchmechanischen Kenngrößen

Im Laufe der wissenschaftlichen Weiterentwicklung der Schallemissionstechnik wurde immer wieder versucht, Risse nicht nur zu detektieren, sondern auch zu charakterisieren. Risseigenschaften wie die Risswachstumsrate allein über Schallemissionsmessdaten zu ermitteln ist für viele Arbeitsgruppen zum Forschungsthema geworden [HaDu74, Ono00, SiCF77, TeEv74]. Da bewiesen war, dass die Schallemissionsquellen beim Ermüdungsrisswachstum hauptsächlich die mikroskopischen Bruchvorgänge selbst sind, ist es nahe-

liegend, Zusammenhänge von Parametern aus Schallemissionssignalen und bruchmechanischen Kennwerten zu suchen (vgl. *Abb. 1-4*).

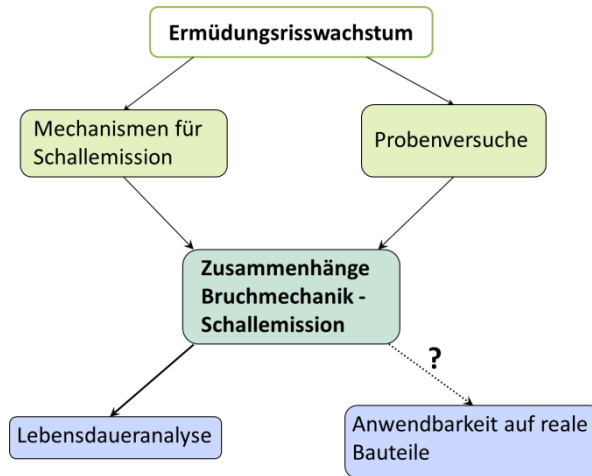


Abb. 1-4: Zusammenhang zwischen bruchmechanischen Kennwerten und Schallemissionsparametern

Das bruchmechanische Verhalten von Materialien ist ein sehr gut erforschtes Gebiet. Aufgrund von Kennwerten wie dem Spannungsintensitätsfaktor können Bruchvorgänge vorhergesagt und Lebensdaueranalysen erstellt werden. Langfristiges Ziel ist es, hinreichend genau allein durch Schallemissionsmessungen, mit dem Weg über die Bruchmechanik, den Bauteilzustand charakterisieren zu können. Ein Großteil der Arbeiten auf diesem Gebiet bezieht sich bisher auf die Untersuchung an Probekörpern. Eine weitere Fragestellung ist also die Anwendbarkeit von bekannten Ergebnissen auf reale Bauteile. Einen Einblick in das Gebiet der Bruchmechanik und die Definition wichtiger bruchmechanischer Kenngrößen und ihr Zusammenhang zu SE-Parametern wird in *Anhang C.1* gegeben. Im Folgenden wird auf den Forschungsstand der Zusammenhänge von Bruchmechanik und Schallemission zusammenfassend eingegangen.

Eine Proportionalität zwischen der Bruchflächenzunahme bzw. der erzeugten Fläche eines Ermüdungsrisses zu der Anzahl der SE-Ereignisse wurde erstmals von *Gerberich und Hartbower* 1967 und später in verschiedenen Varianten auch von mehreren Arbeitsgruppen festgestellt [GeHa67, MoHB73, SiCF77]. Eine frühe und sehr umfangreiche Arbeit von *Dunegan, Harris und Tatro* fokussiert das Verhältnis zwischen Schallemissionsparametern und Spannungsintensitätsfaktor im Rissöffnungsmodus I und der plastische Zone. Das in dieser Studie vorgestellte Modell kann angewendet werden, um Risse zu beschreiben, bei denen sprödes oder duktiler Risswachstum vorliegt [DuHT68]. Das Modell basiert darauf, dass in einer rissbehafteten Probe die plastische Deformation des Materials vor der Risspitze Schallemission auslöst. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die Mechanik im Mikrometerbereich, welche das Risswachstum auslöst, auch zum Auftreten von Schallemission im Material führt [Bass87]. Demnach sollte es einen Zusammenhang geben zwischen Parametern, die den Bruchvorgang und jenen, welche das Phänomen der Schallemission beschreiben. Während des subkritischen Risswachstums wurde für spröde Bruchvorgänge folgender Zusammenhang zum Spannungsintensitätsfaktor K_I festgestellt [Ono00, TeEv74]:

$$N_E = C(K_I)^m \quad (1)$$

wobei N_E die kumulative Anzahl an SE-Ereignissen und C und m konstant sind.

Auch bei Ermüdungsversuchen wurde ein ähnlicher Zusammenhang mit dem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK beobachtet [SiCF77]:

$$N_C = C(\Delta K)^m. \quad (2)$$

N_C ist dabei die Anzahl der Überschwingungen (Counts) im SE-Signal pro Lastzyklus. Dieser Zusammenhang in der Schallemission sieht ganz ähnlich aus wie die Paris-Erdogan-Gleichung aus der Bruchmechanik:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n. \quad (3)$$

Auf der linken Seite von Gleichung (2) steht statt der Risswachstumsrate die Countrate, also die Anzahl der Counts pro Lastwechsel. Der Zusammenhang liegt nahe: die Mechanismen für das Risswachstum sind Mechanismen für die risswachstumsbedingten Effekte der Schallemission. Es wurden in verschiedenen Arbeiten Daten zum Zusammenhang zwischen diesen beiden Gleichungen gesucht. Abhängig von Materialien und Messgeräten ergab sich ein Zusammenhang zwischen den Exponenten n und m [HaBB81, LiPR78, MoHB73]. Die SE-Quellen, die für eine vergleichende Betrachtung in Frage kommen, geben entweder Energie durch die Risserweiterung oder durch Deformations- und Bruchvorgänge innerhalb der plastischen Zone vor der Rissspitze ab [Bass87]. *Scruby et al.* zeigten, dass die Energiefreisetzungsrates, z.B. die Risswachstumsrate, und nicht die bloße Energie des Quellereignisses für die Amplitude des SE-Signals verantwortlich ist [ScBS85]. Weitere Zusammenhänge zwischen den Counts und dem Spannungsintensitätsfaktor bei der Betrachtung des Überlasteffektes auf den Versuchsverlauf wurden festgestellt [Oh-Ha06, OJYH04].

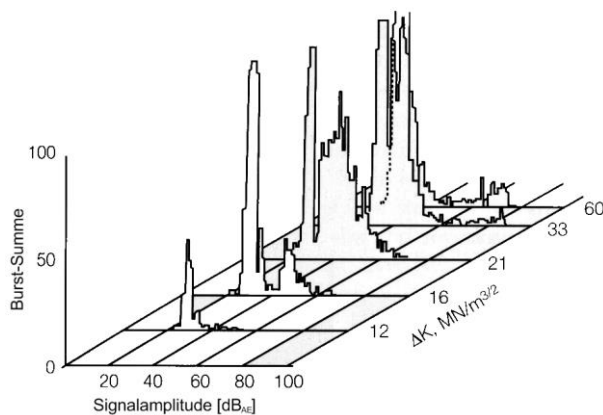


Abb. 1-5: Amplitudenverteilung der Schallemission eines Ermüdungsrisse in einer Rohrschweißverbindung aus St 52-3 U zu verschiedenen Stadien des Risswachstums [Roge01]

Rogers führte Ermüdungsversuche an dem Stahlwerkstoff St 52-3 U durch. Dabei stieß er auf Amplitudenverteilungen, welche er wie folgt kategorisierte (vgl. Abb. 1-5): Geringe Amplituden von 26 bis 40 dB_{AE} ordnete er Prozessen der plastischen Deformation mit

geringem Energiegehalt bzw. Hintergrundgeräuschen zu und maß ihnen eine geringe praktische Bedeutung bei. Amplituden im Bereich von 40 bis 70 dB_{AE} dagegen seien von besonderem Interesse; sie seien mit Mikrobruchereignissen in der plastischen Zone in Verbindung zu bringen. Amplituden um 90 dB_{AE} werden Ereignissen zugeordnet, die bei hohen zyklischen Spannungsintensitätsfaktoren ($33\text{-}60 \text{ MN/m}^{3/2}$) auftreten [Roge01] und aus Risswachstumsprozessen mit höherer Risswachstumsrate stammen.

Die Abschätzung der Lebensdauer eines Bauteils mittels Schallemissionsprüfung wäre von großem anwendungstechnischem Interesse. Die Arbeitsgruppe um *Mohammad* untersuchte Stahlproben und verglich statistisch analysierte SE-Signale mit Lebensdauerberechnungen dehnungsbasierter Modelle. Die Korrelationswerte zeigten, dass die Lebensdauer vorhersage metallischer Proben auf Basis der Schallemissionsanalyse möglich ist [MAJ13]. Jedoch müsste dafür stets die Art des bruchmechanischen Versagens und die resultierenden SE-Parameter proben-, geometrie- und materialspezifisch korreliert werden. In unterschiedlichen Bruchstadien technischer Bauteile treten zum Beispiel wechselnde und meist gemischte Rissöffnungsarten auf. Auch die Umgebungsbedingungen haben einen großen Einfluss auf das SE-Verhalten. Daraus ergibt sich praktisch eine Vielzahl von Überlagerungsmöglichkeiten.

Charakterisierung und Klassifizierung von Schallemissionssignalen

Die Charakterisierung von SE-Signalen wurde bis in die 80er Jahre beinahe ausschließlich aufgrund von SE-Parametern erzielt, die bei einer Messung aus dem Signal extrahiert werden. Aufgrund von Fortschritten in der Mess- und Speichertechnik kann heute jedes detektierte SE-Signal aufgenommen und gespeichert werden. Dies ermöglichte vollkommen neue Arten der Signalanalyse, mit denen auch Wellenmoden und Dispersionseffekte erforscht werden konnten. Mitte der 1980er Jahre begannen erste Arbeitsgruppen, Schallemissionssignale quantitativ Quellereignissen zuzuordnen. Aufgrund von Fortschritten in deterministischen und statistischen Analysemethoden konnten nun die SE-Daten detaillierter separiert und interpretiert werden. Waren mithilfe der Schallemission zuvor allein qualitative Aussagen über Mechanismen wie das Ermüdungsrisswachstum möglich, so wurden diese nun durch Zuordnungen von Größe, Ausrichtung und Typus des Mikroereignisses erweitert. *C.B. Scruby et al.* untersuchten SE-Signale eines Ermüdungsrisses an CT-Proben aus Aluminium [ScBS85]. Anhand ihrer Studie konnten sie belegen, dass der Hauptanteil an Schallemission durch Mikrobruchereignisse an der Rissspitze generiert wird und nicht durch Versetzungsbewegungen in der plastischen Zone vor der Rissspitze. Dies wurde in vorhergehenden Arbeiten zwar vermutet, konnte aber bis zu diesem Zeitpunkt nicht quantitativ belegt werden. *Gorman und Prosser* zeigten, dass die Moden der Plattenwellen sich dazu eignen, sowohl die Art der Anregung (in-plane und out-of-plane) als auch die Orientierung der Quelle zu charakterisieren [GoPr90]. Die Forschungsergebnisse bezüglich der Quelleneigenschaften wurden unter anderem durch umfangreiche FE-Modellierung durch die Arbeitsgruppe um *M. Hamstad* erweitert [Hams09, HaOG01, HaOG02a].

Die Einteilung von aufgenommenen SE-Signalen in Musterklassen ist eine der neuesten Entwicklungen in der Schallemissionstechnik und geht einher mit den Möglichkeiten der Leistungsfähigkeit, die moderne Computersysteme bieten. Abhängig vom Werkstoff sind auf diesem Gebiet hauptsächlich zwei Entwicklungen zu beobachten: Auf der einen Seite

stehen Faserverbundwerkstoffe, bei denen auf dem Gebiet der Mustererkennung im letzten Jahrzehnt sehr große Fortschritte erzielt wurden; auf der anderen Seite stehen die Metalle. Hier gab es Forschungsarbeiten zu unterschiedlichen Themengebieten innerhalb des Bereiches der Mustererkennung. Deutliche Fortschritte, wie im Bereich der Faserverbundwerkstoffe, konnten jedoch nicht erzielt werden. Die Hauptursache für das Ungleichgewicht des Entwicklungsstandes dieser beiden Werkstoffgebiete liegt in der Entstehung der Schallemissionsquellen beim Bruchvorgang und den damit verbundenen Zielvorgaben für eine Mustererkennung. Bei den Faserverbundwerkstoffen gibt es drei Schadensmechanismen, welche das Material und somit auch die Struktur in ihrem Schadenszustand charakterisieren: Matrixrisse, Faser-Matrix Grenzflächenversagen und Faserbruch. Erste Arbeiten stellten dar, dass diese Schadensprozesse anhand von Frequenzparametern der SE-Signale voneinander unterschieden werden können [Bohs00, GrWJ95, RPRG04]. In weiterführenden Arbeiten um *M.R.S. Sause* gelang die Mustererkennung der unterschiedlichen Signale [SaHo10, Saus10], eine Klassifizierung nach weitestgehend automatisierter Clusterbildung [SGUH12] und die Quantifizierung ihrer Zuverlässigkeit [SaHo13].

Im Gegensatz dazu sind die wissenschaftlichen Betrachtungen zur Mustererkennung von SE-Signalen aus Quellen metallischer Werkstoffe weniger zielgerichtet. Es gibt Arbeiten zu unterschiedlichen Werkstoffen und Mechanismen. In ihrer Dissertation ist es beispielsweise *R. Timmers* gelungen, Mikro- und Makrorisswachstum in Baustahl St-52 anhand der entstehenden SE-Signale zu unterscheiden [Timm01]. Dabei nutzte sie das auch in dieser Arbeit verwendete kommerzielle Programm *VisualClass* [Vall12c]. Ähnlich wie in den Arbeiten über Verbundwerkstoffe ging es ihr darum, an kleinen Proben exakte Quellereignisse zu erzeugen, um diese dann zu klassieren. Die Arbeitsgruppe um *D.G. Aggelis* zeigte in Versuchen an Aluminiumproben, dass Parameter wie Anstiegszeit, Signaldauer und RA-Wert (=Anstiegszeit/Amplitude) eine starke Abhängigkeit zur Rissfortschrittsrate besitzen. Diese Parameter wurden benutzt, um den Übergang vom Zug zum Scherbruch in CT-Proben unter Ermüdungsbelastung zu charakterisieren [AgKM11]. Von *Aggelis und Matikas* wurde weiterhin eine Distanzkorrektur für parameterbasierte Klassifikationssysteme vorgeschlagen [AgMa12]. Dies ist Standard für die Signalamplitude, wurde bisher jedoch nicht für andere SE-Parameter verwendet und ist sinnvoll, wenn Dispersionseffekte ausgeschlossen werden sollen. Dass in bestimmten Fällen eine Unterscheidung durch Mustererkennung von Korrosionsquellen und Hintergrundgeräuschen möglich ist, zeigte [Tsch07].

Eine Klassifikation der SE-Signale aufgrund von SE-Parametern ist also in einigen Fällen möglich. Die Parameter sind jedoch in hohem Maße von dem spezifischen Versuchsaufbau und der Geometrie abhängig. Vergleiche sind also, ohne Distanzkorrektur, nur für Objekte unter genau gleichen Versuchsbedingungen möglich. *Sause* führte zudem an, dass aufgrund der unbekanntenen örtlichen Position bei natürlichen SE-Quellen die Parameter nicht eindeutig sein könnten und darum „mehrdimensionale Analysetechniken“ vonnöten seien [SGUH12].

1.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Schallemissionsprüfung ist eine Methode der zerstörungsfreien Prüfung, die aufgrund ihrer komplexen Zusammenhänge von Schaden und Signalausgabe vielfältige Forschungsthemen bietet. Auch die in dieser Arbeit besprochenen Schädigungen durch Korrosion und Ermüdungsrisswachstum, ihr Auffinden mittels Schallemissionsprüfung sowie die analytischen Betrachtungen der entstehenden SE-Quellen wurden bereits besprochen [KAMG10, LaRu07, MLMP90, MOKY07, Ono05, SiCF77]. Jedoch besitzt die in dieser Arbeit vorgenommene vergleichende Analyse der Schadensmechanismen nach Ansicht der Autorin Neuheitswert (vgl. *Abb. 1-6*). Die vorgenommenen Betrachtungen beinhalten eine Signal- und Modalanalyse, die Einordnung der Versuchsergebnisse in den wissenschaftlichen Diskurs zu bruchmechanischen Zusammenhängen sowie die Analyse von Ansätzen zur Mustererkennung der Schadensmechanismen anhand von SE-Signalen. Ferner wird aus den gewonnen Ergebnissen zur Nachweisbarkeit und Klassifizierung der betrachteten Schadensmechanismen ein allgemeines Vorgehen zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung mittels Schallemissionsprüfung entwickelt.



Abb. 1-6: Wissenschaftlicher Beitrag: Vergleichende Analyse und Klassifikation der Schadensmechanismen Korrosion im Ruhezustand, Schwingkorrosion sowie Ermüdungsrisswachstum mit und ohne Einfluss von Korrosion

Die beiden Elemente der Signalanalyse und Sensitivität werden in der vorliegenden Arbeit verbunden. Mit klassischen Mitteln der Signalanalyse (FFT, Wavelets) und frequenzbasierter Mustererkennung wird ermittelt, inwieweit diese Methoden anhand von Signalen, die mit Resonanzsensoren aufgenommen wurden, anwendbar sind und in welchen Bereichen die aus der SEP gewonnen Informationen für eine Schädigungsanalyse von Bauteilen hilfreich sein können. Parallel wird der Ansatz der parametrischen Mustererkennung [Saus10] auf das hier untersuchte Material sowie die ausgesuchten Schadensmechanismen übertragen

und selbständig ein Klassifikationsschema aufgrund von Verteilungsfunktionen der SE-Parameter entworfen.

Ein Teil der in dieser Arbeit diskutierten Versuche wurde im Rahmen des EU-Projektes „CORFAT – Cost Effective Corrosion and Fatigue Monitoring for Transport Products“ durchgeführt. Der Inhalt der Projektarbeit und eine Abgrenzung zu den Arbeiten der Projektpartner werden in *Anhang B.2* dargestellt.

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

Schadensmechanismen, wie Rissfortschritt oder plastische Deformation in Konstruktionswerkstoffen, werden von plötzlichen lokalen Veränderungen der Spannungs- bzw. Verschiebungszustände des Körpers begleitet, so dass sie elastische Wellen im Körper erzeugen. Vorausgesetzt, diese elastischen Wellen besitzen eine ausreichende Energie, um von Sensoren an der Oberfläche detektiert zu werden, kann damit eine Aussage über die Schadensentwicklung im Körper gemacht werden. *Tab. 2-1* liefert Definitionen für wichtige Begriffe der Schallemission, welche innerhalb dieser Arbeit immer wieder Verwendung finden werden. Für die Verknüpfung des detektierten Signals mit einer Schädigung des Bauteils werden neben der Analyse der SE-Signale Grundlagen der Bruchmechanik benötigt. Diese werden in *Anhang C. 1: Exkurs in die Bruchmechanik* vermittelt.

Tab. 2-1: Grundbegriffe in der Schallemissionsprüfung nach [Dine09]

SE-Ereignis	Physikalisches Ereignis, welches zur Schallemission führt
SE-Quelle	Räumliches Element, von dem ein oder mehrere SE-Ereignisse ausgehen
SE-Sensor	Vorrichtung, in der durch elastische Wellen erzeugt Teilchenbewegungen in elektrische Signale umgewandelt werden
SE-Signal	Elektrisches Signal eines SE-Sensors, welches durch eine transiente Welle erzeugt wird
SE-Kanal	Einzelner SE-Sensor mit dazugehörigen Instrumenten für die Messung und Weiterverarbeitung
Transientes Signal	Auch Burst; SE-Signal mit erkennbarem Anfang und Ende
Kontinuierliches Signal	SE-Signal ohne erkennbaren Anfang und Ende
Nachweisschwelle	Spannungsniveau, dessen Überschreitung ein transientes Signal nachweist
Hit	Detektiertes transientes Signal an einem SE-Kanal

Die Vorgänge bei einer Schallemissionsprüfung (SEP) sind in *Abb. 2-1* dargestellt. Die SE-Quelle ist ein transientes SE-Ereignis mit spezifischen Eigenschaften und löst eine elastische Welle aus, die von Bauteilgeometrie und –material modifiziert wird und sich ausbreitet, bis das SE-Ereignis von einem geeigneten Aufnehmer, dem SE-Sensor, detektiert wird. Ferner treten Schallemissionsgeräusche auf, unter denen alle Signale zusammengefasst werden, welche für die Prüfung nicht relevant sind. Dies können quasikontinuierliche akustische Quellen, regellose akustische sowie elektrische Störsignale und Reflexionen des SE-Signals sein. Die Phänomene der Schallwellenentstehung, ihre Ausbreitung und Detektion werden in den Kapiteln 2.1: *Quellen für Schallemission* und 2.2: *Die Ausbreitung und Detektion elastischer Wellen* behandelt.

Mithilfe geeigneter Auswertungsverfahren können die Nutzsignale von den Schallemissionsgeräuschen getrennt werden. Das aufgenommene SE-Signal kann analysiert und Merkmale können der Signalf orm extrahiert werden. Außerdem ist es möglich, eine Ortung der Schallemissionsquelle vorzunehmen. In einem SE-Signal finden sich mehrere Einflussfaktoren wieder: Die Charakteristika des Quellmechanismus, der Wellenausbreitung, welche wiederum von Material- und Geometrie des Prüfkörpers geprägt ist, des Sensors und des elektronischen Systems. Eine direkte Verbindung zwischen SE-Signal und Schadensmechanismus herzustellen, ist deshalb nicht trivial. Die Möglichkeiten, welche die Signalanalyse für eine Auswertung der aufgenommenen SE-Signale bietet und Ansatzmög-

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

lichkeiten für eine Mustererkennung werden in Kapitel 2.3: *Signalanalyse und Mustererkennung* erörtert.

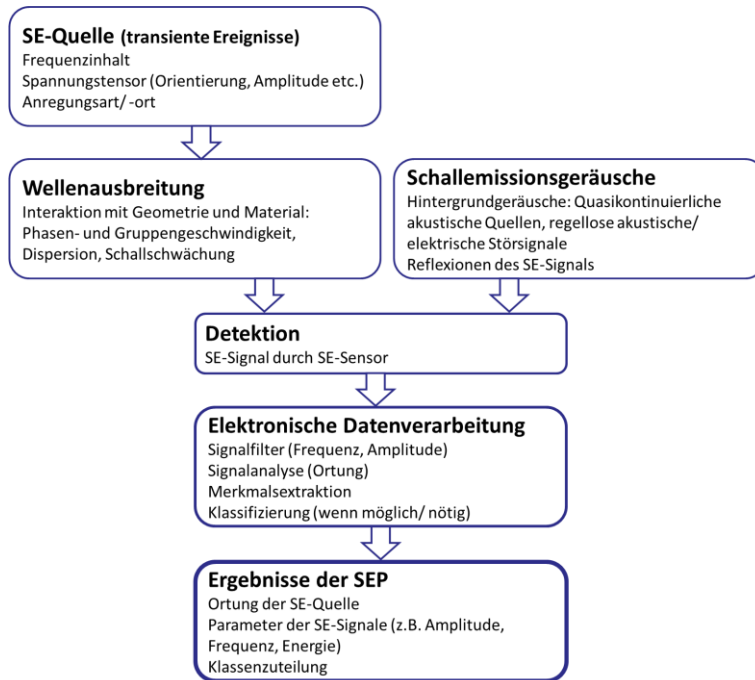


Abb. 2-1: Flussdiagramm einer Schallemissionsprüfung (SEP)

2.1 Quellen für Schallemission

Eine Schallemissionsquelle ist definiert als räumliches Element, von dem ein oder mehrere Schallemissionsereignisse ausgehen [Dine09]. Dieses kann nur als solches erkannt werden, sofern es genug Energiegehalt besitzt, um im umgebenden Material eine elastische Welle auszulösen, die sich bis zur Oberfläche fortsetzt.

Es gibt eine Vielzahl an Schallemissionsquellen. Im Folgenden wird sich auf die Quellen beschränkt, welche Schwingungen in einem Frequenzbereich über 20 kHz erzeugen und somit im Ultraschallbereich liegen. Es gibt viele natürlich auftretenden SE-Quellen, die in Stahlwerkstoffen für die Schadensanalyse durch die SEP relevant sind. Dies sind vor allem Quellen, welche bei Risswachstums- oder Korrosionsprozessen entstehen. Einige SE-Quellen sind in *Tab. 2-2* zusammengestellt.

Tab. 2-2: Natürliche Schallemissionsquellen nach Rauscher [Raus04]

Mechanismus	Art	Intensität
Spröde Bruchvorgänge	Burst	stark
Plastische Deformation	kontinuierlich	schwach
Zähes Risswachstum	Burst	schwach
Reibungsvorgänge (z.B. an Rissufern/ Auflagern)	kontinuierlich	quellenabhängig
Strömungsgeräusche	kontinuierlich	k.A.
Aktive Korrosion	Burst/ kontinuierlich	quellenabhängig

In diesem Kapitel werden der Korrosionsprozess sowie die mikroskopische Rissentwicklung im Hinblick auf ihr Auftreten als Schallemissionsquellen beschrieben. Neben den natürlichen SE-Quellen gibt es die künstlichen Quellen. Diese werden in der Regel verwendet, um Material und Messsystem zu prüfen oder Parameter für die Ortung zu bestimmen. Auch die gebräuchlichen künstlichen Quellen werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Korrosion

Die Korrosion ist definiert als „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann. Diese Wechselwirkung ist oft elektrochemischer Natur“ [Enis99]. Für die Schallemission gibt es jedoch nicht bloß „die Korrosion“. Vielmehr muss der Fokus auf einer Vielzahl von Einzelmechanismen gerichtet werden, um die Phänomene, welche mithilfe der SEP detektiert werden können, zu beschreiben.

Einige Teilprozesse und ihre Nachweisbarkeit durch die Schallemissionsprüfung sind in *Tab. 2-3* dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Wasserstoffwanderung, Wasserstoffversprödung und die Spannungsrissskorrosion wichtige Quellen darstellen. Diese mit Wasserstoff in Verbindung stehenden Quellen sind für den praktischen Teil dieser Arbeit jedoch nicht relevant und nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Der Fokus hier liegt in der Sauerstoffkorrosion. Deren chemischer Prozess wird in *Anhang C.2* beschrieben.

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

Tab. 2-3: Prinzipielle Prozesse der Korrosion und ihre Nachweisbarkeit mittels SEP [MCFG05, MLMP90, Poll86, Schu05]

Prozess	Intensität des SE-Signals
Durchgang von elektrischem Strom	nicht nachweisbar
Auflösung des Metalls	schwach
Schichtbruch	schwach bis stark (dickenabhängig)
Gasentwicklung	schwach
Kristallisation von Salzkristallen	k.A.
Bildung von Korrosionsprodukten	k.A.
Mikrorissbildung	schwach
Wasserstoffwanderung	schwach
Wasserstoffversprödung	stark
Spannungsrissskorrosion - kontinuierliche Risse	schwach
Spannungsrissskorrosion - diskontinuierliche Risse	stark
Pitting	schwach

Die elektrochemischen Prozesse, welche innerhalb eines Wassertropfens auf einem Stahlbauteil stattfinden sowie die in diesem Prozess erzeugten und zu Schallemission führenden Mechanismen, sind in Abb. 2-2 dargestellt. Schallemissionsquellen bei der Sauerstoffkorrosion sind

- die Bildung von Luftbläschen im Korrosionsmedium,
- die Auflösung des Metalls,
- die Ablagerung der Korrosionsprodukte auf dem Stahlbauteil und die damit verbundenen lokalen plastischen Verformungen und
- das Aufbrechen der Korrosionsprodukte.

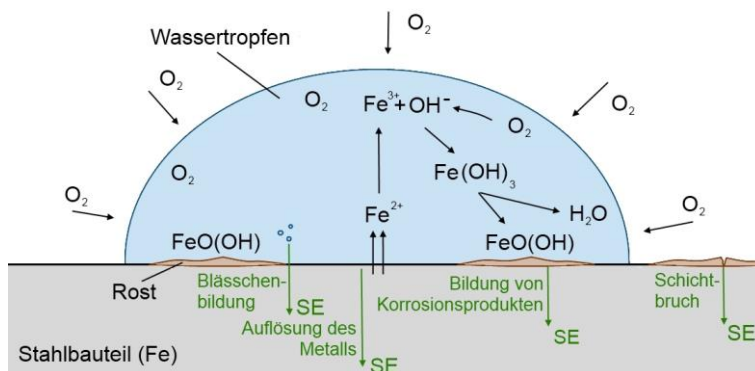


Abb. 2-2: Vorgänge bei der elektrochemischen Sauerstoffkorrosion und resultierende SE-Quellen (grün)

Die Leitfähigkeit in der Elektrolytlösung (hier Wasser) ist wichtig für den Korrosionsprozess, da nur sie den elektrochemischen Stromkreis aufrechterhält. Salze in der Elektrolytlösung erhöhen deren Leitfähigkeit und beschleunigen so den Korrosionsvorgang. Liegt eine salzige Elektrolytlösung vor, wie beispielsweise Meerwasser, so kommt noch eine weitere SE-Quelle hinzu: durch Trocknungsprozesse bilden sich Salzkristalle. Hydratisierte Natrium- und Chlorid-Ionen verbinden sich in einem Ionengitter und lagern sich auf der Metalloberfläche ab. Dies verursacht SE auslösende, lokale Spannungen.

In mehreren Arbeiten konnte die Auflösung des Metalls durch Schallemission nachgewiesen werden [ALSS91, MLMP90, NeSi83]. Die Amplituden bei der Schallemission, welche bei diesem elektrochemischen Prozess entsteht, sind sehr klein und das Signal ist häufig kontinuierlich. Die dominierenden SE-Signale hatten eine Frequenz von 250 bis 300 kHz. Der Gasblasenentwicklung und -bewegung wurde eine Frequenz von 150 kHz zugeordnet, gemessen mit Breitbandsensoren des Typs PAC-WD [AsSi03].

Schallemissionsquellen am Riss

Beim Risswachstum gibt es eine Vielzahl von Mechanismen, die Schallemission im Material erzeugen. Es wird zwischen sogenannten primären SE-Ereignissen, welche direkt mit dem Risswachstum verbunden sind, und sekundären SE-Ereignissen, die sich hauptsächlich aus Reibeffekten ergeben, unterschieden. Die Schallemission verursachenden Mechanismen bei der Rissbildung und -ausbreitung sind in *Tab. 2-4* dargestellt.

Tab. 2-4: Mechanismen beim Risswachstum, welche Schallemission auslösen [Raus04, ScBS85]

Mechanismus	Intensität des SE-Signals	Quellenart
Plastische Deformation	gering	primär
Brechen und Ablösen spröder Einschlüsse/ Aufbrechen von Bindefehlern	stark	primär
Plastische Verformung am Ende eines Binde- fehlers bzw. an der Rissspitze	gering	primär
Rissinitiation und stabiles Risswachstum	gering	primär
Instabile Rissausbreitung	stark	primär
Reibung an den Rissflanken/ Verkeilen der Rissflanken bzw. der Einschlüsse	stark	sekundär
Brechen und Ablösen von Korrosionsschichten und anderer betriebsbedingter spröder Oberflä- chenschichten	stark	sekundär

Die plastische Verformung von Kristallen ist ein nicht-elastisches Phänomen. Sie ist ein irreversibler Effekt, bei dem einzelne atomare Defekte (Versetzungen) durch den Festkörper getrieben werden. Ist ein kristalliner Festkörper äußeren Spannungen ausgesetzt, entsteht eine Spannungsrelaxation durch die gleichzeitige Bewegung vieler Versetzungen in einer Versetzungslinie in einen weniger verformten Teil des Kristalls. Nach *Gillis und Hamstad* breiten sich durch diese Spannungsrelaxation ein Paar elastische Longitudinalwellen im Material aus und verursachen SE-Signale geringer Intensität [GiHa74].

Die höchste SE-Aktivität liegt bei einem Zugversuch vor und bei Erreichen der Streckgrenze [DuHT68]. Beim Risswachstum wird an der Rissspitze eine plastische Zone aufgebaut. Wenn ein kritischer Spannungsintensitätswert erreicht ist, findet ein Rissfortschritt in Korngrößendimension (10-100 µm) statt. Dieser Zyklus wiederholt sich; der Rissfortschritt ist also ein diskontinuierlicher Prozess.

Abb. 2-3 zeigt die schematische Darstellung einer wachsenden Rissspitze, der plastischen Zone und die Abstrahlrichtung der Longitudinal- und Transversalwelle. Die Geschwindigkeit eines Mikrobruchereignisses ist viel geringer, als die dazugehörige Spannungswellengeschwindigkeit. Darum ist die Wellenlänge der Longitudinalwelle und der Transversalwelle

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

proportional größer als die lineare Dimension des Quellereignisses, welches typischerweise der Korngröße des Materials entspricht [Roge01].

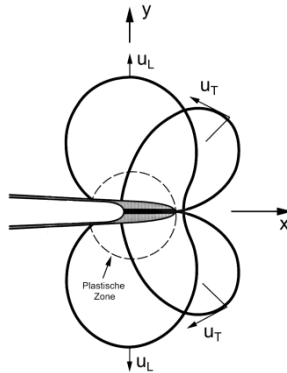


Abb. 2-3: Richtungswinkel der longitudinalen und transversalen Wellenabstrahlung an einem Mikroriss [Roge01]

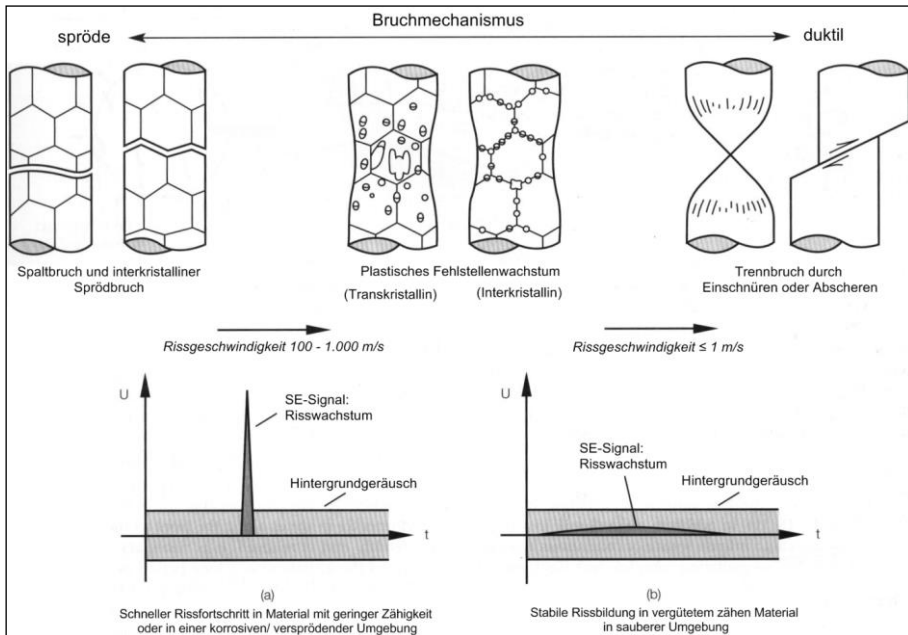


Abb. 2-4: Schematische Darstellung von gegensätzlichem Bruchverhalten. a) Sehr schneller Rissfortschritt in einem spröden Material geringer Zähigkeit oder Ermüdungsrisswachstum in einer korrosiven/versprödernden Umgebung und b) langsame duktile Rissbildung eines zähen Materials in einer reinen Umgebung nach [Roge01, Scru87]

Scruby, Baldwin und Stacey zeigten, dass die Energiefreisetzungsrates, die beispielsweise durch die Risswachstumsrate ausgedrückt werden kann, und nicht die bloße Energie des Quellereignisses für die Amplitude des SE-Signals verantwortlich ist [ScBS85]. Spröde Bruchvorgänge sollten also leicht über die Schallemission zu detektieren sein (Abb. 2-4a),

während duktiler Rissfortschritt kaum nachweisbar ist (Abb. 2-4b); es sei denn andere Faktoren sind im Prozess involviert, wie z.B. eine Verstärkung durch einen bereits vorhandenen Makroriss oder eine hohe Rissfortschrittsrate.

Bereits in frühen Arbeiten, beispielsweise von *Dunegan et al.* und *Morton et al.*, wurde beobachtet, dass große, sich am meisten wiederholende Emissionen bei nahezu geringster Belastung stattfinden. Ungleich den Emissionen nahe der Maximalbelastung besitzen diese Minimum-Belastungs-Emissionen eine geringe Anstiegszeit. Diese Spannungswellen wurden den sich aneinander reibenden Flächen zugeordnet [DuHT68, MoHB73] und später als sekundäre SE-Quellen definiert.

Unterscheidung in primäre und sekundäre Schallemissionsereignisse am Riss

An einem bestehenden Riss befinden sich Quellenmechanismen unterschiedlicher Art. Hier wird in zwei Kategorien unterschieden: den primären und den sekundären Quellereignissen. Eine schematische Darstellung von Quellmechanismen am Riss bietet Abb. 2-5.

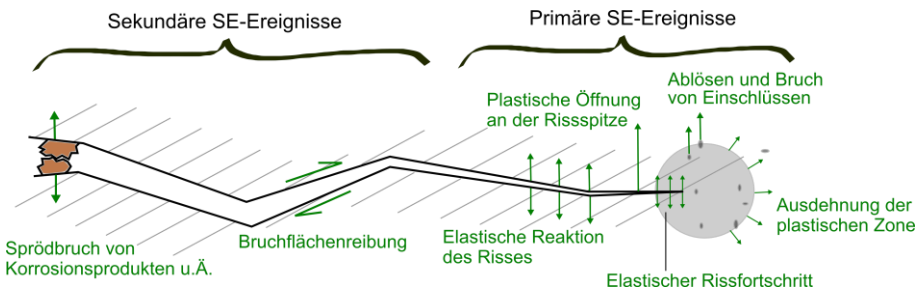


Abb. 2-5: Schematische Darstellung einer Risspitze mit möglichen SE-Quellmechanismen (grün) nach [Scru87]

Primäre Quellereignisse sind direkt mit dem Risswachstum verbunden und entstehen direkt an der Risspitze sowie in der plastischen Zone, welche kurz vor der Risspitze liegt. Quellereignisse von praktischer Bedeutung besitzen eine Größe von ca. 1 μm in feinkörnigen Aluminiumlegierungen bis hin zu Rissprüngen in Größe der plastischen Zone, ca. 100 μm in mittelfesten Stählen. Die größte Bedeutung für die Bauteilprüfung haben unter den primären SE-Quellen der Sprödbbruch und andere schnell vor sich gehende Bruchvorgänge. Plastische Deformation emittiert häufig kontinuierliche SE von geringer Intensität, ist damit schwer zu detektieren und spielt für die Überwachung von Fehlstellen eine untergeordnete Rolle [Ono07].

Sekundäre Quellereignisse sind nicht direkt mit dem Risswachstum verbunden, entstehen jedoch aus dem Vorhandensein des Risses. Die Reibung an Kontaktpunkten freier Bruchflächen nahe der Risspitze ist ein sekundäres Quellereignis. Dies ist für die Schallemissionsprüfung die wichtigste Quelle in dieser Kategorie: Sie erhöht die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen. Weitere Sekundärquellen sind der Bruch von Korrosionsprodukten und Mikrobruchereignisse in Zusammenhang mit Schlackeneinschlüssen, die bei der Herstellung entstanden sein mögen. Sekundäre Schallemission macht in der Praxis einen Hauptanteil der aufgenommenen Schallemission aus. Sie ist stark von der Umgebung abhängig

[Holf00]. Sekundäre Ereignisse können verwendet werden, um Risse zu detektieren, die keine primären SE-Ereignisse erzeugen [Ono07] oder deren primäre SE-Ereignisse, z.B. aufgrund einer umgebungsbedingt erforderlichen hohen Nachweisschwelle nicht detektiert werden können.

Künstliche Schallemissionsquellen

Jegliche quantitative wissenschaftliche Messung benötigt eine Kalibrierung; jeder Vergleich solcher Messungen in unterschiedlichen Institutionen benötigt eine Standardisierung. Deshalb ist es wichtig, eine SE-Quelle zu finden, welche reproduzierbar angewendet werden kann und gleichzeitig mit realen SE-Quellen vergleichbar ist. In der SEP hat sich die Simulation einer natürlichen SE-Bruchquelle mithilfe eines Bleistiftminenbruchs (\varnothing 0,5 mm, Härte 2H) etabliert [Dine09]. Die durch den Bleistiftminenbruchtest (BMT) erzeugte Quelle wird auch als Hsu-Nielsen-Quelle oder HN-Quelle nach ihren Entwicklern bezeichnet (vgl. Abb. 2-6).

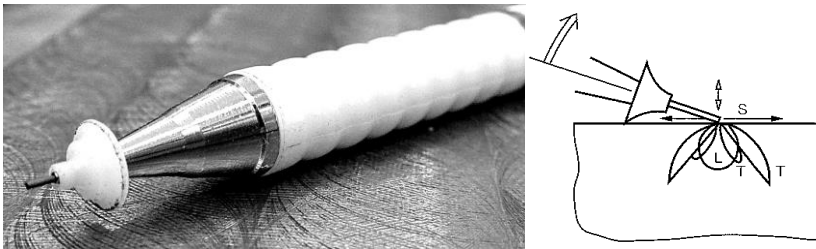


Abb. 2-6: Links: Hsu-Nielsen-Quelle, Werkzeug für den Bleistiftminenbruchtest (BMT); Rechts: Richtungsorientierung der Longitudinal- (L) und Transversalwellenausbreitung (T) nach Anregung durch eine Hsu-Nielsen-Quelle [Roge01]

Wenn die Bleistiftmine auf der Materialoberfläche zerbricht, wird die Verzerrungsenergie, welche durch die Druckkraft der Mine auf die Oberfläche aufgebracht wird, ruckartig freigegeben. Dadurch wird eine breitbandige Spannungswelle erzeugt, die ähnliche Eigenschaften wie ein Mikrobruchereignis besitzt [Roge01].

Eine weitere künstliche Schallemissionsquelle ist der Ultraschallpulsler. Dieser ist, im Gegensatz zum Bleistiftminenbruch, besser reproduzierbar und kann in unterschiedlichen Energiestufen erfolgen. Er simuliert in seiner Signalform jedoch kein klares Bruchereignis wie der BMT.

Schallemissionsgeräusche

Schallemissionsgeräusche sind jene Signale, die für die Schallemissionsprüfung nicht relevant sind [Dine09]. Sie können elektromagnetischen, thermischen oder mechanischen Ursprungs sein. Beispiele sind

- Leckagen
- Reversible Prozesse, wie kristalline Phasenumwandlungen, Schmelzen oder Verfestigung sowie thermoelastische, ferromagnetische und ferroelektrische Effekte

- Fertigungsprozesse, d.h. Geräusche, welche beim Schweißen, Bohren oder Rollen entstehen
- Reibung von Strukturteilen oder Auflagern während dynamischer Belastung

Schallemissionsgeräusche lassen sich weiter in Hintergrund- und Störgeräusche unterteilen. Dabei ist das **Hintergrundgeräusch** die Schallemission, die durch Erhöhung der Nachweisschwelle oder Setzen von Frequenzfiltern ausgesondert werden können. Hintergrundgeräusche besitzen oft bekannte statistische Eigenschaften und können das zu detektierende Signal additiv überlagern. **Störgeräusche** können nicht durch oben genannte Maßnahmen beseitigt werden. Sie haben unbekannte statistische Eigenschaften und müssen mit Hilfe von logischen Filtern, wie z.B. der Ortung, von den Nutzsignalen getrennt werden.

Nachweisbarkeit von Schallemissionsquellen

In einem vorhandenen System aus Bauteil, Schallemissionsmesssystem und Umgebung ist die Möglichkeit, eine SE-Quelle zu detektieren, stets von vielen Faktoren abhängig. Es stellt sich zunächst die Frage nach dem Fehler, welcher zu detektieren ist und in welchem Material er auftritt. Aus dem Niveau des Hintergrundgeräusches ergibt sich eine Nachweisschwelle, daraus wiederum können maximale Sensorabstände und die Anzahl der benötigten Sensoren ermittelt werden. Die Zusammenhänge von Rissgeschwindigkeit, Rissfläche und die Nachweisbarkeit verschiedener Defekte sind in *Abb. 2-7* dargestellt. Für die planare Ortung einer Spannungswelle ist eine Mindestanzahl von drei sinnvoll gesetzten Sensoren notwendig. Diese Betrachtungen sind für die Kostenberechnung einer SEP unumgänglich. Es gilt außerdem zu beachten, welche Auswirkungen eine fälschliche Detektion eines Fehlers oder seine Nicht-Detektion haben.

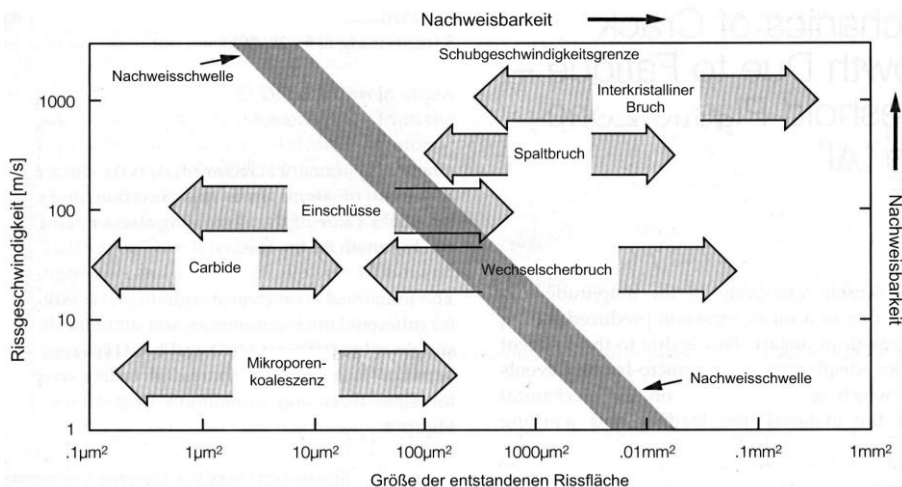


Abb. 2-7: Nachweisbarkeit von Bruchereignissen in Stahlwerkstoffen. Die Nachweisschwelle (diagonaler Bereich) bezieht sich auf eine Longitudinalwelle mit einer Verschiebungsamplitude von 10^{-13} m bei einem Quelle-Sensor-Abstand von 0,1 m [Roge01, ScWa83]

Eine Methode, um die Nachweisbarkeit zu quantifizieren ist die Bestimmung der sogenannten **Probability of Detection (POD)**. Die POD ist die Wahrscheinlichkeit, durch ein spezifi-

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

sches zerstörungsfreies Prüfverfahren einen vorhandenen Defekt zu detektieren. A. *Pollock* zeigte, dass diese Methode auch auf die Schallemission angewendet werden kann. Als SE-Quelle bezieht sich *Pollock* in seiner Arbeit allerdings ausschließlich auf den Trennbruch, also eine primäre SE-Quelle. Aus spezifischen Bedingungen, wie Werkstoffkennwerten, Rissgröße und Last, werden die erwartete Trennbruchanzahl und ihre Größe ermittelt. Nach Einbeziehung der vorhandenen SE-Ausrüstung und einer vorgegebenen Entfernung wird nun ein POD-Wert errechnet [Poll07].

2.2 Die Ausbreitung und Detektion elastischer Wellen

Während sich akustische Wellen in schubspannungsfreien Medien, also in Gasen und Flüssigkeiten, nur durch Druckwellen fortbewegen, können die als Teilchen bezeichneten Atome oder Moleküle in festen Medien Wellenbewegungen auch in andere Richtungen übertragen. In finiten Festkörpern kann durch Wechselwirkungen mit den Rändern eine Vielzahl an Wellentypen entstehen. Die Lamb-Wellen, welche für die Schallemissionsmessungen in Platten besonders relevant sind, aber auch die Ausbreitung der Longitudinal- und Transversalwellen in infiniten Festkörpern, werden im ersten Teil dieses Kapitels vorgestellt.

Trifft eine elastische Welle auf eine freie Oberfläche entstehen Teilchenbewegungen in der Größenordnung von einigen Pikometern. Um diese zu detektieren, erfordert es einen sehr empfindlichen Sensor, welcher diese Oberflächenverschiebungen in ein elektrisches Signal umwandelt. Die aufgenommene Signalform dient in der weiteren Analyse der Ortung sowie der Charakterisierung und Bewertung des Quellereignisses und wird stark von den Eigenschaften des Sensors beeinflusst. Deshalb ist es wichtig, die Sensoren und ihre Charakteristika zu kennen, um eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen. In der SEP haben sich piezoelektrische Sensoren aufgrund ihrer Empfindlichkeit etabliert. Auch optische und kapazitive Sensoren fanden in der Vergangenheit Verwendung, wenn es um spezielle Studien, die Sensorkalibrierung oder Prüfungen bei hohen Temperaturen ging. In der vorliegenden Arbeit werden, mit Ausnahme einer Studie mit dem Laser-Doppler-Interferometer, piezoelektrische Sensoren verwendet. Diese werden im zweiten Teil dieses Kapitels vorgestellt.

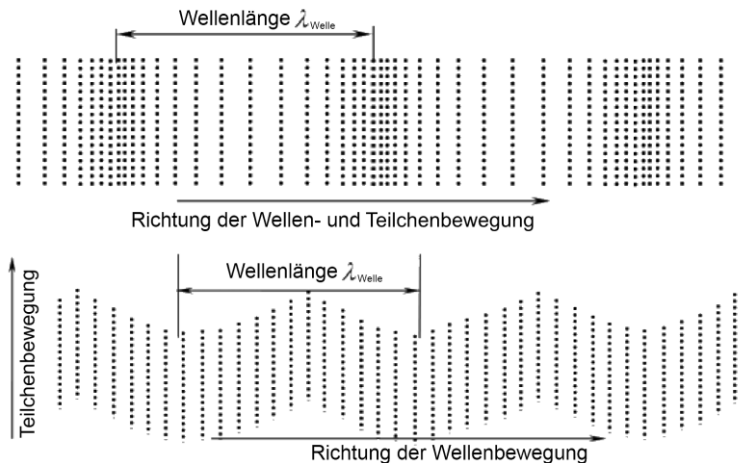


Abb. 2-8: Teilchenbewegung beim Durchgang einer Longitudinalwelle (oben) und einer Transversalwelle (unten) mit der Wellenlänge λ_{Welle} nach [SuYe09]

Elastische Wellen im Festkörper

In unendlich ausgedehnten Festkörpern können sich zwei Wellenarten ausbilden: die Longitudinal- und die Transversalwellen. Bei Longitudinalwellen erfolgt die Schwingung in Ausbreitungsrichtung. Sie kann Schwingungen in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern übertragen. Die Transversalwelle tritt allein in Festkörpern auf. Bei ihrer Fortpflanzung

bewegen sich die Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Teilchenbewegung in einem Festkörper für die Longitudinal- und Transversalwelle sind in *Abb. 2-8* dargestellt.

Die Ausbreitung von elastischen Wellen in Platten ist für diese Arbeit besonders interessant. Die hier entstehenden Lamb-Wellen oder auch Plattenwellen spielen, auch aufgrund ihrer Frequenzen, für die Schallemissionsprüfung eine tragende Rolle. 1917 veröffentlichte *Horace Lamb* die erste Beschreibung dieser Art elastischer Wellen in Platten [Lamb17], welche sich als sehr komplex herausstellten. Abhängig vom Verhältnis von Plattendicke zur Wellenlänge treten unterschiedliche Wellenmoden mit ihren spezifischen, frequenzabhängigen Geschwindigkeiten auf. Die mathematische Beschreibung der dispersiven Eigenschaften der Lamb-Wellen erfolgte erst 1967 durch *I.A. Viktorov* [Vikt67]. Sie werden auch als *guided waves*, geführte Wellen, bezeichnet, da sie von den beiden freien Oberflächen der Platte geführt werden.

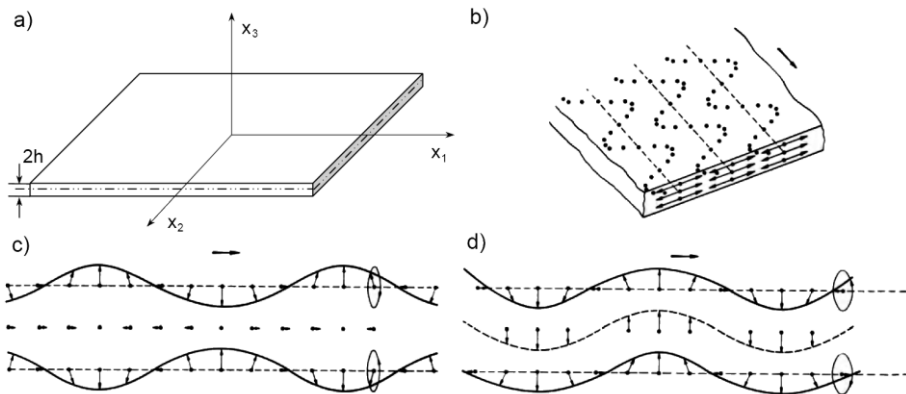


Abb. 2-9: Wellen in Platten mit der Dicke $2h$ und dem Koordinatensystem x_i : (a): Transversalwelle parallel zur Oberfläche (b), symmetrische (c) und antisymmetrische (d) Grundmoden der Lamb-Wellen [KrKr80, SuYe09]

Bei der Beschreibung der Bewegung elastischer Wellen bedient sich die Akustik der Kontinuumsmechanik. Der Festkörper wird als Kontinuum betrachtet, in dem sein mikroskopischer Aufbau keinen Einfluss nimmt. Aus den Grundgleichungen der linearen Elastizitätstheorie lassen sich die Verschiebungen u_i in einem linear elastischen, homogenen und isotropen Festkörper für den dreidimensionalen Fall und die Richtungen x_1 , x_2 und x_3 in folgenden Gleichungen ausdrücken [Egle87]:

$$(\lambda + \mu)u_{j,jj} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (4)$$

mit:

$i = 1, 2, 3$

u_i Kartesische Komponenten des Verschiebungsvektors \mathbf{u} für Partikelbewegung

ρ Materialdichte

ρf_i Kraftkomponente in Richtung x_i

λ, μ Lamésche Konstanten, repräsentieren elastische Eigenschaften des Materials.

Die Beschreibung dieses Gleichungssystems und eine sich daraus ableitende Entwicklung für die Bewegungsgeschwindigkeiten und ihr Aufbrechen in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Teil entsprechend der symmetrischen und antisymmetrischen Lamb-Wellenmoden finden sich im *Anhang C.3*. Die in Platten entstehenden Grundmoden der Lambwellen sind in *Abb. 2-9* dargestellt. Abhängig von Plattendicke und auftretenden Frequenzen treten unterschiedliche Moden der symmetrischen und antisymmetrischen Lamb-Wellen auf, die die Charakterisierung der Wellenbewegung umso komplexer werden lassen.

Im Folgenden werden die symmetrischen Moden der Lamb-Wellen mit S_i und die antisymmetrischen Moden mit A_i bezeichnet ($i=0, 1, \dots$), wobei S_0 und A_0 jeweils die Moden der niedrigsten Ordnung darstellen. S_i -Moden besitzen überwiegend eine radiale Partikelbewegung in der Ebene (in-plane, IP), während A_i -Moden oft eine Verschiebung senkrecht zur Plattenebene besitzen (out-of-plane, OOP). Ist die Wellenlänge größer als die Dicke der Platte, treten quasi-longitudinale Wellen und Biegewellen auf, deren Verschiebungen in *Abb. C-7 (Anhang C.3)* dargestellt sind. Für kürzere Wellenlängen, entsprechend höheren Frequenzen, treten die verschiedenen symmetrischen und antisymmetrischen Wellenmoden auf. Bei höheren Moden treten dabei in Dickenrichtung der Platte mehrere gegeneinander schwingende Bereiche auf. Die Amplitude der S_i -Moden ist bei gleicher Anregung in der Regel kleiner als diejenige der A_i -Moden [SuYe09, S.20].

Dispersion

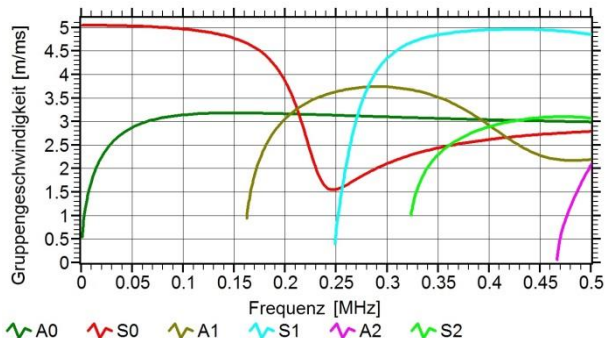


Abb. 2-10: Dispersionsdiagramm für die Gruppengeschwindigkeit einer 10 mm dicken Stahlplatte (P460NL1), erstellt mit Vallen Dispersion [Vall12b]

Elastische Wellen in festen Medien, welche aus mehreren Frequenzen zusammengesetzt sind, werden in ihren Bestandteilen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten transportiert. Dieses Phänomen wird als Dispersion bezeichnet und führt zu dem Auseinanderlaufen der Signalgestalt [Möse12, S.146]. Wie die meisten geführten Wellen verhalten sich die Lamb-Wellen dispersiv: ihre Wellengeschwindigkeiten sind von der Anregungsfrequenz und der Plattendicke abhängig. *Abb. 2-10* zeigt ein Dispersionsdiagramm für Stahl mit einer Longitudinalwellengeschwindigkeit von 5.000 m/s, einer Transversalwellengeschwindigkeit von 3.200 m/s und einer Plattendicke von 10 mm. Je höher die Frequenz, desto mehr Wellenmoden sind in der Platte vorhanden.

Die Bewegung von Lamb-Wellen können anhand von **Phasengeschwindigkeiten (c_P)** und **Gruppengeschwindigkeiten (c_G)** charakterisiert werden. Die Phasengeschwindigkeit ist

die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleicher Phasen einer monochromatischen Welle, definiert als

$$c_P = \frac{\omega(k)}{k} \quad (5)$$

mit der Wellennummer $k_i = \omega/c_i$ und der Winkelfrequenz $\omega = 2\pi f$. Die Gruppengeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Hüllkurve des gesamten Wellenpaketes, also das Wellenpaket als Ganzes, fortbewegt. Sie ist die Geschwindigkeit, die bei Experimenten gemessen wird. Die Gruppengeschwindigkeit in x-Richtung beschreibt insbesondere die Geschwindigkeit des Energietransportes [CrHP05, S.101]. Sie ist abhängig von der Frequenz und der Plattendicke [Rose04]:

$$c_G = \frac{\partial \omega(k)}{\partial k}. \quad (6)$$

Wenn sich die Gruppengeschwindigkeit von der Phasengeschwindigkeit unterscheidet ($c_G \neq c_P$) ist die Wellenbewegung dispersiv [Saus10].

Schallschwächung

Die Schallschwächung ist die Reduzierung der Schallemissionsamplitude mit dem Laufweg der Schallwelle und wird beeinflusst durch vier prinzipielle Mechanismen [Holf00]:

- Divergenz (geometrische Streuung der Wellenfront),
- Absorption (Verluste durch Reibung der Teilchen),
- Streuung an Mikrogrenzflächen und
- Energieverlust der Welle an angrenzende Medien.

Bei der Schallemissionsmessung wird zwischen **Nah- und Fernfelddämpfung** unterschieden. Im quellennahen Umfeld, dem Nahfeld, ist der dominierende Dämpfungsmechanismus die Divergenz. Hier findet eine relativ hohe Schallschwächung statt. Im Fernfeld, in dem ein Großteil der praxisrelevanten SE-Messungen durchgeführt wird, wird die Schallschwächung durch Absorption dominiert. Die Schwächung zeigt gewöhnlich einen exponentiellen Zusammenhang zum Laufweg. Dissipative Schallschwächung kann auch durch Materialinhomogenitäten im Festkörper, wie Schweißnähte, verursacht werden. Der Energieverlust der Welle an angrenzende Medien ist vorherrschend in Komponenten zu finden, welche an eine Flüssigkeit grenzen. Hier kann die Energie leicht in das Umgebungsmedium übertragen werden. Beispiele hierfür sind Rohre oder Druckbehälter.

Dispersionseffekte bei Plattenwellen erzeugen einen zusätzlichen Amplitudenverlust dadurch, dass die verschiedenen Frequenzanteile einer breitbandigen Lamb-Welle sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten und in eine zeitliche Auffächerung der Welle resultieren. Hier wird die Stärke des Amplitudenverlustes durch den Verlauf der Dispersionskurven und der Bandbreite des Signals beeinflusst.

Bei der **Schallschwächung von Lamb-Wellen** wurde festgestellt, dass die A_0 -Mode stärker als die S_0 -Mode geschwächt wird. Dies kann auf die dominierende out-of-plane Bewegung der Partikel bei einem Durchlauf der A_0 -Mode zurückgeführt werden. So wird Energie an die Umgebung abgeführt, während diese bei in-plane-Verschiebungen innerhalb

der Platte bleibt. Grenzt ein flüssiges Medium an die Platte, gewinnt die stärkere Schallschwächung der A_0 -Mode an Signifikanz [SuYe09, S.42].

Für die Schallemissionsprüfung spielt die Schallschwächung eine wichtige Rolle. Sie entscheidet darüber, wie hoch bei festgelegter Nachweisschwelle und Amplitude der SE-Quelle der Abstand der Sensoren maximal sein darf, um die Schallwellen, die diese Quellen aussenden, zu detektieren. Der maximale Sensorabstand entscheidet über die Anzahl der Sensoren bei einer SE-Prüfung und ist somit ein wichtiger Kostenfaktor. In Abb. 2-11 ist eine experimentell ermittelte Schwächungskurve zu sehen. Der Bereich der Nahfeldschwächung wird standartmäßig als 20-faches der Plattendicke e angenommen. Bei einer Quelle von etwa 95 dB_{AE} kann in diesem Beispiel eine Strecke von 2,3 m abgedeckt werden. Die Evaluationsschwelle wird für Druckprüfungen nach [Dine05] verwendet. Bei Messungen mit hohen Hintergrundgeräuschen wie der Zustandsüberwachung kann allein mit der Nachweisschwelle gearbeitet werden.

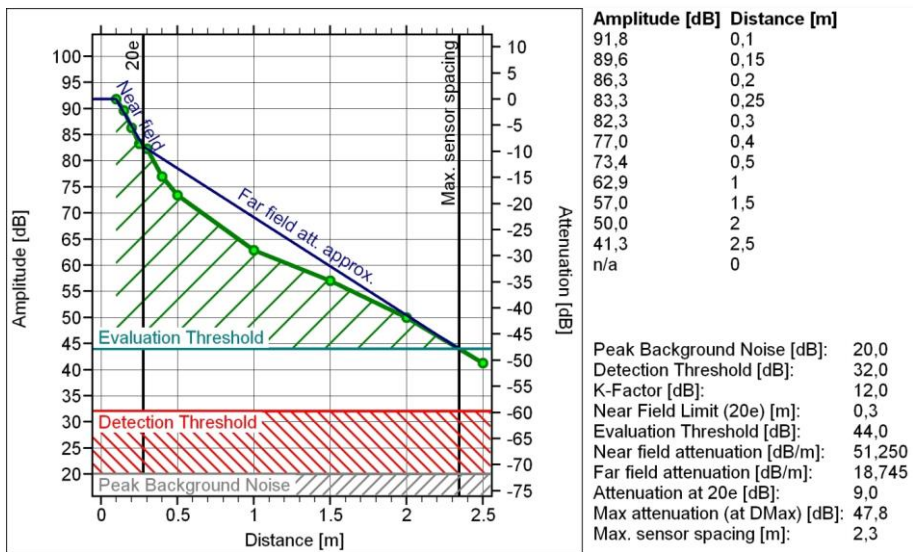


Abb. 2-11: Experimentell ermittelte Schwächungskurve für einen mit Wasser gefüllten Stahltank mit einer Wanddicke von 15 mm nach Anregung durch einen Bleistiftminenbruch. Eine lineare Annäherung für die Nah- und Fernfeldschwächung ist in blau eingezeichnet. Die gemessenen, bzw. gewählten Werte für Maxima des Hintergrundgeräusches (peak background noise), die Nachweisschwelle (detection threshold) und die Evaluationsschwelle (evaluation threshold) sind in grau, rot und türkis dargestellt

Sollen die Amplituden der elastischen Wellen, welche von unterschiedlichen Quellen und Orten stammen können, verglichen werden, so müssen sie einer schwächungsbedingten Distanzkorrektur unterzogen werden. Nach [Dine05] ist die **abstandskorrigierte Maximalamplitude** einer Quelle im Fernfeld ($D > 20e$) gleich der gemessenen Maximalamplitude zuzüglich der Nahfeldschwächung und der Fernfeldschwächung:

$$A_{korr} = A_{\max} + \alpha_F \Delta d + \Delta A_N \quad (7)$$

mit	
A_{\max}	gemessene Maximalamplitude [dB _{AE}]
α_F	Schwächungskoeffizient im Fernfeld (zwischen 20e und maximalen Nachweisabstand) [dB/m]
Δd	Abstand von SE-Quelle zum Sensor minus 20e [m]
ΔA_N	die gemessene Schwächung der Hsu-Nielsen-Quelle zwischen dem Abstand von 0,02 m und 20e [dB]
e	Wanddicke [m].

Die Schwächungskoeffizienten im Nah- und Fernfeld werden dabei experimentell ermittelt. Für das Beispiel aus *Abb. 2-11* beträgt der Nahfeldschwächungskoeffizient $\alpha_N = 51,3$ dB/m. Der Fernfeldschwächungskoeffizient ist mit einem Wert von $\alpha_F = 18,7$ dB/m weniger als halb so groß.

Detektion von elastischen Wellen mithilfe piezoelektrischer Schallemissionssensoren

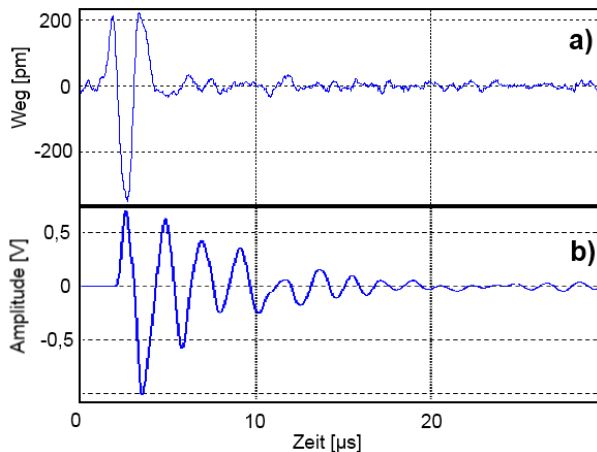


Abb. 2-12: Ausschlag eines Ultraschallprüfkopfes, Messungen in der Mitte der Prüfkopfoberfläche. a) Wegmessung mit einem Laser-Doppler-Interferometer, b) Ausgabesignal eines SE-Sensors (PAC-Pico)

Als Beispiel sind in *Abb. 2-12* zwei Oberflächenmessungen auf einer Stahlplatte zu sehen. SE-Quelle ist der Impuls eines Ultraschallprüfkopfes. Gemessen wurde parallel mit einem Laser-Doppler-Interferometer (*Abb. 2-12a*) und einem Schallemissionssensor (*Abb. 2-12b*). Mithilfe des Laser-Doppler-Interferometers können Verschiebungen an der Oberfläche im Pikometer-Bereich berührungsfrei gemessen werden; die dynamische Bewegung kann, außerhalb des Rauschens, exakt dargestellt werden [Shar08, S.384f]. Der Ausschlag des Prüfkopfes in den ersten 5 μ s und ein Nachschwingen seiner Oberfläche sind gut sichtbar. Der SE-Sensor nimmt diesen Impuls auf und schwingt in seiner Eigenfrequenz nach. Die Ausgabe (*Abb. 2-12b*) besitzt wenig Ähnlichkeit mit den Verschiebungen der Probenoberfläche (*Abb. 2-12a*). Der Grund dafür liegt in der Konstruktion des SE-Sensors als Resonator.

Die meisten, für die Schallemissionsmessungen gebräuchlichen, piezoelektrischen Sensoren besitzen ein scheibenförmiges Element aus piezoelektrischem Material, zumeist aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Ist diese Scheibe frei und unbedämpft, verhält sie sich wie ein Resonator für einfallende elastische Wellen, so dass sich das resultierende elektrische Signal als abklingende Sinuskurve darstellt, welche ihre Hauptfrequenz aus der Resonanz der Piezoplatte erhält. Durch eine Dämpfung der Piezoplatte kann deren Resonanzverhalten reduziert und das Frequenzspektrum erweitert werden [Scru87]. Als Dämpfungsmaterial kann beispielsweise Epoxidharz verwendet werden. In *Abb. 2-13* ist eine schematische Darstellung eines typischen piezoelektrischen SE-Sensors zusehen. Um eine bessere Übertragung der Schallwellen vom Testobjekt auf den Sensor zu gewährleisten, werden beide mit einem Koppelmittel verbunden.

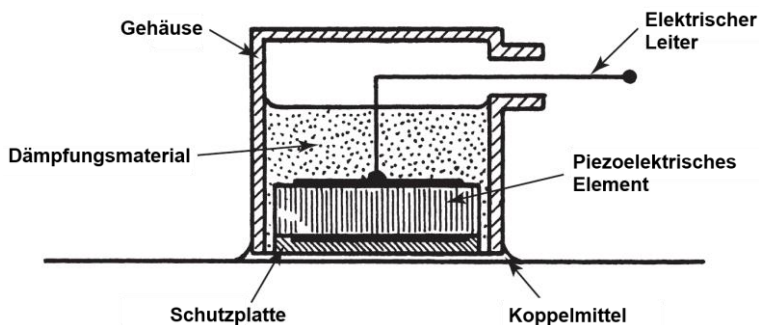


Abb. 2-13: Schematische Darstellung eines piezoelektrischen Schallemissionssensors [EiBr87]

Ein Nachteil der Sensoren, deren Basis das Piezoplättchen darstellt, ist die Richtungsabhängigkeit (Dicken- und Radialschwingung): Nur Wellen, die senkrecht auf die Stirnfläche des Sensors treffen, können in ihrer ganzen Bandbreite verarbeitet werden. Interferenzen verfälschen die Sensorantwort und reduzieren die Bandbreite, sobald eine andere Orientierung der Welle vorliegt. Dieser Effekt betrifft insbesondere niedere Frequenzen, es sei denn der Sensor ist sehr groß. Trotzdem hat sich bis heute der Resonanzsensor durchgesetzt, da er auf geringste Verschiebungen reagiert. Um eine möglichst hohe Messempfindlichkeit zu erhalten, kann die Resonanzfrequenz des Sensors auf die Wellenmoden des Prüfobjektes und die Frequenzen des zu erwartenden Schallemissionsereignisses abgestimmt werden.

Bandbreite von Schallemissionssensoren und ihre Eignung in der SEP

SE-Sensoren können durch die Wahl der Größe des Piezoelements so konstruiert werden, dass sie eine bestimmte Bandbreite abdecken. Für diese sind sie besonders sensitiv und können sie durch ihr Resonanzverhalten sogar noch verstärken.

Die Bandbreite von SE-Sensoren beträgt in der Regel 30 kHz bis 1 MHz [EiBr87]. Auch in Bezug auf seine Resonanzfrequenz gibt es zwei gegenläufige physikalische Eigenschaften, die bei der Auswahl eines geeigneten Sensors in Betracht gezogen werden müssen. Auf der einen Seite steigt die Schallschwächung rapide mit der Frequenz. Je höher also die Schallschwächung des Materials und der Sensorabstand zur Quelle, desto wichtiger ist es, auch niedrige Frequenzen zu erfassen, um SE-Ereignisse detektieren zu können. Andererseits dienen Sensoren mit höheren Resonanzfrequenzen als natürliche Filter gegen Hinter-

grundgeräusche, welche meist in einem niedrigeren Frequenzbereich liegen, als die SE-Ereignisse. Gerade in Materialien mit geringer Schallschwächung können SE-Ereignisse oft leichter durch die Messung höherer Frequenzen erfasst werden. Bei der Wahl des geeigneten Sensors ist also sowohl das Material und die Geometrie des Prüfkörpers, die Art der Quelle und vorhandene Quelle-Sensorabstände, als auch das Umgebungsmedium und die Hintergrundgeräusche zu berücksichtigen.

Des Weiteren soll hier die, für die Sensorauswahl wichtige, frequenzbasierte Signalanalyse diskutiert werden. Ziel der frequenzbasierten Signalanalyse ist es, Aussagen über die SE-Quelle machen zu können. Es gibt sogenannte Breitbandsensoren, welche in der Lage sind, die elektrische Signalumwandlung der dynamischen Verschiebung in einem breiten Frequenzspektrum abzubilden. Die Frequenzabbildung mittels Breitbandsensoren, welche als Produkt aus den einzelnen Transferfunktionen (Quelle, Material und Geometrie, Sensor) entsteht (vgl. *Abb. 1-1*), verringert somit den Einfluss des Sensors und ist bei Weitem besser für die frequenzabhängige Analyse, zu der in weiten Teilen auch die Mustererkennung zählt, geeignet als durch Resonanzsensoren. Allerdings besitzen die Breitbandsensoren im Gegensatz zu den Resonanzsensoren eine geringere Empfindlichkeit. Die besonders hohe Empfindlichkeit der Resonanzsensoren ist jedoch für die Detektion und Lokalisierung von Schädigungsquellen in Praxisanwendungen unerlässlich. Deshalb wurden in der Vergangenheit in Laboruntersuchen, wenn es um die Signalanalyse ging, Breitbandsensoren verwendet [Agge11, SDLC98]; für die Praxisanwendung, wenn es vor allem darum geht, überhaupt Fehler zu detektieren, jedoch Resonanzsensoren, welche auf die Wellenmoden im Prüfobjekt abgestimmt waren [HaDu74, OJYH04]. Die Vorteile und Anwendungsgebiete der jeweiligen Sensortypen ist in *Tab. 2-5* dargestellt.

Tab. 2-5: Vergleich von SE-Sensoren aufgrund ihrer Bandbreite. Resonanzsensoren, welche Resonanzfrequenzen unter bzw. über 100 kHz besitzen und Breitbandsensoren

Sensortyp	Einflussfaktor	Auswirkung	Anwendung
Resonanzsensoren < 100 kHz	Tiefe Frequenzen erfahren geringere Schallschwächung	Detektion von SE-Quellen über große Abstände möglich	Korrosionsüberwachung an Flachbodentanks, Detektion von Leckagen, Überwachung von Beton
Resonanzsensoren > 100 kHz	Hintergrundgeräusche oft tieffrequent; Sensor wirkt als natürlicher Filter	Durch weniger Hintergrundgeräusche kann Detektionsschwelle herabgesetzt werden: Sensitive Messung	Detektion von Rissen, Überwachung von metallischen und keramische Strukturen, Verbundwerkstoffen und Holz
Resonanzsensoren	Hohe Empfindlichkeit	Sehr gute Detektion von SE-Quellen	Praxisanwendungen
Breitbandsensoren	Wenig Einfluss des Sensors auf den Frequenzinhalt des Signals	Aussagekräftige Frequenzanalyse/ Mustererkennung möglich	Analyse von Quellmechanismen

In dieser Arbeit werden natürliche SE-Quellen mit Resonanzsensoren (150 kHz) detektiert. Aus den Signalformen wird trotz der starken Einflussnahme des Sensors versucht, durch Signalanalyse und Mustererkennung Rückschlüsse auf die Quellmechanismen zu ziehen.

2.3 Signalanalyse und Mustererkennung

In dieser Arbeit wird die These vertreten, dass aufgrund einer aufgenommenen Signalform Aussagen über die Schädigung des Bauteils gemacht werden können. Genauer: Aussagen über Grad, Art und Ort der Schädigung. Wie die Signalform weiterverarbeitet werden muss, um eine derartige Schädigungsanalyse aufstellen zu können, ist Inhalt dieses Kapitels. Dabei können einige Verfahren der Analyse von SE-Signalen durchaus als Standardmethoden bezeichnet werden; einige von ihnen werden seit Jahrzehnten verwendet. Andere dagegen konnten erst in den letzten Jahren durch die rasche Leistungsverbesserung der digitalen Datenverarbeitung entwickelt werden.

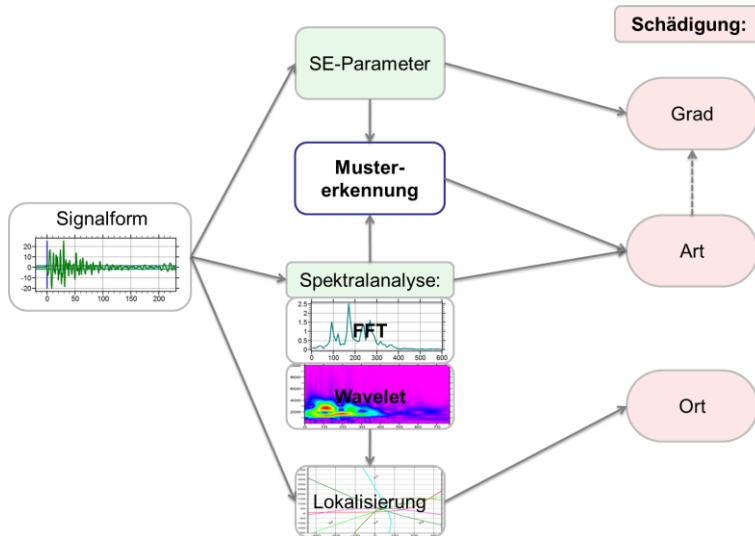


Abb. 2-14: Von der Signalform zu Grad, Art und Ort der Schädigung durch Methoden der Signalanalyse

Einen Überblick über die verwendeten Methoden gibt Abb. 2-14. Die Erfassung der SE-Parameter sowie die Lokalisierung des Quellortes gehören zu den Standardmethoden einer Schallemissionsprüfung. Das hier verwendete Verfahren der Laufzeitdifferenzmessung basiert auf der Messung der Ankunftszeiten der transienten SE-Signale an den Sensoren. Dieses Verfahren wird ausführlich in *Anhang C.4* vorgestellt. Ferner werden dort die Ungenauigkeiten dieses Verfahrens besprochen sowie ein Verfahren zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit durch Bandbreitenanpassung des Signals vorgeschlagen.

Den Quellmechanismus aufgrund der Signalform zu ermitteln, ist aufgrund der vielen Einflüsse auf das SE-Signal kaum auf direktem Wege möglich. Gibt es klar definierte Unterschiede in den Mechanismen können die extrahierten SE-Parameter zur Unterscheidung der Quellen ausreichen. Dies ist beispielsweise bei der Unterscheidung zwischen Quell- und Störgeräuschen der Fall. Hier kann aufgrund der SE-Parameter in Stör- und Nutzgeräusche klassifiziert werden. Ähneln sich die Quellmechanismen, ist diese Unterscheidung schwieriger. Hier gibt es Ansätze, über die spektrale Zusammensetzung des Signals eine Mustererkennung zu erreichen. Durch die Mustererkennung soll der Typ der Schädigung erfasst werden. Dieses Wissen ermöglicht wiederum Erkenntnisse über den

Grad der Schädigung: zum Beispiel ist ein wachsender Ermüdungsriss für ein Bauteil kritischer als Oberflächenkorrosion. Die Mustererkennung von Schallemissionssignalen bildet den Schwerpunkt dieses Kapitels.

Signalerfassung

Bei einer Schallemissionsmessung wird nur in Ausnahmefällen eine kontinuierliche Signalaufzeichnung durchgeführt. Häufiger verbleibt das Messsystem in Wartestellung, bis es durch ein, die Nachweisschwelle überschreitendes Signal (Hit) aktiviert wird. Das System wird „getriggert“. Über einen definierten Zeitraum wird nun die Signalform aufgezeichnet. Eine Totzeit, in welcher keine Triggerung erfolgen soll, wird definiert, so dass ein SE-Ereignis durch ein weiteres Überschreiten der Nachweisschwelle, beispielsweise durch Reflexionen, nicht zweimal erfasst wird. Danach befindet sich das System erneut im Wartezustand; eine neue Signalform kann aufgezeichnet werden.

Bereits bei der Aufzeichnung des Schallemissionssignals wird in den meisten Fällen ein spektraler Filter eingesetzt. Frequenzen von Hintergrundgeräuschen sollen damit ausgeschlossen werden. Andernfalls wäre eine Erfassung von Nutzsignalen oft nicht möglich. Wird das System ständig durch Hintergrundgeräusche getriggert, verringert sich die Anzahl der aufgenommenen Nutzsignale. Um einen solchen Filter zu nutzen, muss bekannt sein, welches Frequenzspektrum das Hintergrundgeräusch und welches das Nutzsignal besitzen. Ein Bandpass kann dann genutzt werden, um das Signal-Störgeräusch-Verhältnis zu reduzieren. Dabei führt eine Beschneidung hoher Frequenzen zu einer Reduzierung von elektrischen Störsignalen. Die Beschneidung niederer Frequenzen besitzt das Ziel, Vibrationen, welche oft von hoher Intensität sind und an vielen Versuchsanlagen vorkommen können, so zu reduzieren, dass sie sich nicht störend auf die Testergebnisse auswirken. Hier gilt allerdings Ähnliches in Bezug auf die Weiterverarbeitung der Signale, wie bei der Sensorauswahl (s. S.31) beschrieben: je höher die Bandbreite bei der Signalaufnahme, desto differenzierter und zuverlässiger kann eine frequenzbasierte Signalanalyse durchgeführt werden.

Parameter der Schallemission

Die Merkmale transienter SE-Signale werden als Schallemissionsparameter bezeichnet. Sie besitzen historisch gesehen eine sehr große Bedeutung für die Schallemissionsprüfung. Aufgrund begrenzter Speicherkapazitäten musste lange auf die Aufzeichnung der Signalformen verzichtet und nur einzelne Merkmale der jeweiligen Signalform eines SE-Ereignisses konnten bestimmt und abgespeichert werden. Aufgrund dieser Parameter kann dann eine Bewertung der SE-Ereignisse vorgenommen werden. Dies ist bis heute eine sehr effektive Methode, lässt sie doch sowohl eine parameterbasierte Mustererkennung als auch eine Ortung aufgrund von Laufzeitdifferenzen der Spannungswellen zu. *Abb. 2-15* kennzeichnet einige der wichtigsten Parameter aus Signalform und Frequenzspektrum. In *Tab. 2-6* werden alle in dieser Arbeit verwendeten SE-Parameter aufgeführt und beschrieben.

Tab. 2-6: In dieser Arbeit verwendete Parameter der Schallemissionssignale [Dine09]

Kürzel	Einheit	Name	Beschreibung
A_{TH}	dB_{AE}	Nachweisschwelle	Spannungsniveau, dessen Überschreitung ein transientes Signal (Burst) nachweist
A_{max}	dB_{AE}	Maximalamplitude	Maximum des Spannungsausschlags innerhalb der Signaldauer eines transienten Schallemissionssignals in der dB_{AE} -Skala
A_{korr}	dB_{AE}	Distanzkorrigierte Amplitude	Auf den Ort der SE-Quelle nach einer Lokalisierung unter Berücksichtigung der Schallschwächung rückgerechnete Maximalamplitude
A_{S_0}	dB_{AE}	Maximalamplitude der S_0 -Welle	Maximalamplitude der Grundmode der symmetrischen Lamb-Welle
A_{A_0}	dB_{AE}	Maximalamplitude der A_0 -Welle	Maximalamplitude der Grundmode der antisymmetrischen Lamb-Welle
A_{Ratio}	-	Amplitudenverhältnis	Verhältnis der Maximalamplituden von symmetrischen und antisymmetrischen Grundmoden
t_0	s	Ankunftszeit	Zeit, bei der ein transientes Signal das erste Mal die Nachweisschwelle überschreitet
t_D	μs	Signaldauer	Zeitdifferenz zwischen der ersten und der letzten Überschreitung der Nachweisschwelle durch ein SE-Signal
t_R	μs	Anstiegszeit	Zeitdifferenz zwischen der ersten Überschreitung der Nachweisschwelle und der Maximalamplitude eines transienten Signals
t_{S_0}	μs	Ankunftszeit der S_0 -Welle	Zeitpunkt, an welchem die symmetrische Grundmode eintrifft
t_{A_0}	μs	Ankunftszeit der A_0 -Welle	Zeitpunkt, an welchem die antisymmetrische Grundmode eintrifft
N_E	-	Anzahl der SE-Ereignisse	SE-Ereignis: Physikalisches Ereignis, welches zur Schallemission führt
N_C	-	Counts/ Anzahl der Überschwingungen	Anzahl der Überschreitungen der Nachweisschwelle durch ein transientes Signal in einer Polarität
E_{abs}	aJ	SE-Energie	Integral der quadrierten Spannung des Schallemissionssignals während der Signaldauer
E_{ss}	nVs	Signalstärke	Integral der gleichgerichteten Spannung des Schallemissionssignals während der Signaldauer
f_{max}	kHz	Maximumfrequenz	Frequenz mit maximalem Spannungswert
f_{SP}	kHz	Schwerpunktfrequenz	Frequenzwert, bei welchem das Integral höherer und niedrigerer Frequenzen gleich ist

Amplituden werden in der Parameterbetrachtung in Dezibel (AE) angegeben. Die Spannung U des Schallemissionssignals wird in der dB_{AE} -Skala auf den Vorverstärkereingang bezogen. Definiert wird dieser Zusammenhang nach [Dine09] durch:

$$dB_{AE} = 20 \log \frac{U}{U_r} \quad (8)$$

mit der Referenzspannung $U_r = 1 \mu V$.

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

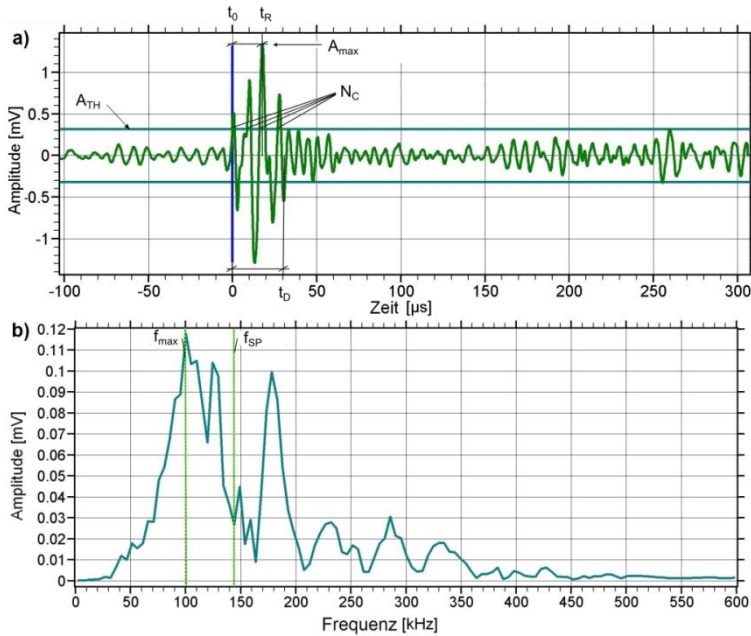


Abb. 2-15: Darstellung einer Signalf orm (a) und ihres Frequenzspektrums (b) mit Kennzeichnung einiger SE-Parameter

In der Schallemissionsanalyse sind zwei verschiedene Definitionen der Energie geläufig: die Signalstärke (Signal Strength) und die absolute Energie, auch als echte Energie (True Energy) bezeichnet. Die Signalstärke ist als Fläche unter der Einhüllenden des gleichgerichteten SE-Signals nach (9) definiert und wird in nVs angegeben. Die absolute Energie wird gemäß (10) als Fläche unter den quadrierten Spannungswerten des SE-Signals definiert und in attojoule oder, mit einem Referenzwiderstand von $R = 10 \text{ k}\Omega$, in $10^{-14} \text{ V}^2 \text{ s}$ angegeben.

$$E_{SS} = \int_{t=t_0}^{t=t_D} |U(t)| dt \quad (9)$$

$$E_{abs} = \frac{1}{R} \int_{t=t_0}^{t=t_D} U(t)^2 dt \quad (10)$$

Dabei ist U die Spannung in mV, R der Referenzwiderstand und t_D der Zeitpunkt des Signalendes. Aus mathematischer Sicht hat die absolute Energie eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Änderungen oder Singularitäten im Signal als die Signalstärke [SuYe09]

Die Nachweisschwelle (A_{TH}) spielt bei einer SE-Messung eine besonders wichtige Rolle. Sie ist die Triggerschwelle für alle eintreffenden transienten Wellenanregungen. Ist eine Anregung so intensiv, dass die Signalamplitude die Nachweisschwelle überschreitet, werden die Signalf orm bzw. die Parameter dieses Hits aufgezeichnet. Dies trifft für Nutzs signale sowie Hintergrundgeräusche zu. Die Nachweisschwelle sollte also so gesetzt werden, dass wenige Hintergrundgeräusche, jedoch möglichst alle Nutzs signale, aufgezeichnet werden. Wird die Nachweisschwelle zu hoch gesetzt, werden möglicherweise relevante

Signale nicht detektiert. Wird sie zu niedrig eingestellt, erzeugen Hintergrundgeräusche ungewünschte Hits. Dadurch können relevante Signale verdeckt werden: kommt die akustische Welle eines relevanten Ereignisses gerade dann an, wenn ein Hit bereits vom Hintergrundgeräusch ausgelöst wurde, kann dieses nicht separat aufgenommen werden, bis die Totzeit beendet ist. Es kann allerdings eine Überlagerung im SE-Signal zustande kommen, wenn sich die akustischen Wellen von Stör- und Nutzgeräusch überlagern.

$$\begin{aligned} t_D &< 3\mu s \\ t_R &< 1\mu s \\ N_C &< 3 \end{aligned} \quad (11)$$

Einige SE-Parameter werden zur Vorfilterung der Daten verwendet. Schallemissionsgeräusche sollen so frühzeitig herausgefiltert werden. Ein Parameter für eine solche Unterscheidung ist die Signaldauer t_D . Beträgt diese bei einem Riss-Signal etwa 10-100 μs , so ist z.B. ein elektrisches Störsignal mit weniger als 3 μs deutlich kürzer. Weitere Parameter, welche sich zur Unterscheidung von Nutz- und Störsignalen eignen, sind die Anzahl der Überschwingungen (Counts) N_C und die Anstiegszeit t_R des SE-Signals. Eine Möglichkeit der Vorfilterung zeigen die Bedingungen (11). Genügt ein Parameter eines SE-Signals einer dieser Bedingungen, wird es als Schallemissionsgeräusch klassifiziert [Vall01].

Spektralanalyse

Die Spektralanalyse eines SE-Signals bietet im Vergleich zur reinen Parameterbetrachtung ein großes Feld an erweiterten Analysemöglichkeiten, um spezifische Merkmale herauszustellen, die dazu dienen, eine Quellenzuordnung (z.B. Art des Schadensmechanismus) aufgrund des Signals durchführen zu können. Durch eine Fourier-Transformation kann ein Zeitsignal im Frequenzraum dargestellt werden, welchem die frequenzbasierten SE-Parameter entnommen werden können. Sie dient aber auch dazu, Merkmale für die Mustererkennung zu generieren. Ferner kann der Frequenzinhalt in Zusammenhang mit dem Zeitverlauf des Signals gebracht werden. Dadurch ist es beispielsweise möglich, Aussagen zu angeregten Wellenmoden zu treffen. Das grundlegende Zustandekommen der Fourier-Transformation sowie der in dieser Arbeit verwendeten Wavelet-Transformation werden in diesem Kapitel behandelt.

Die Fourier-Transformation (FT)

Mithilfe einer Fourier-Transformation (*J. Fourier*, 1768-1830) lässt sich eine Schwingungsfunktion $f(t)$ aus der Zeitebene in eine Funktion $F(\omega)$ des Frequenzraumes transformieren. Sie ist eine Integraltransformation und besteht aus einer Summation aneinandergereihter Sinus- und Kosinusfunktionen mit den Amplituden $|F(\omega)|$ und den Frequenzen ω :

$$F_{FT}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (12)$$

Das Fourier-Spektrum einer transienten Funktion ist ein kontinuierliches Spektrum [Din00]. Die Summationsgrenzen von $-\infty$ bis $+\infty$ sind jedoch für die Anwendung auf transiente SE-Signale nicht geeignet. Ein SE-Signal $f(t)$ besitzt N_A diskrete Abtastpunkte in der Zeitdomä-

ne. Deshalb wird Gleichung (12) oft in einer diskreten Form durch die *Diskrete Fourier-Transformation (DFT)* dargestellt:

$$F_{DFT}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=1}^{N_A} f_n \cdot \Delta t \cdot e^{-i\omega\Delta t} . \quad (13)$$

f_n sind dabei diskrete Werte, welche in den äquidistanten Zeitintervallen Δt innerhalb der Abtastdauer $T = N_A \cdot \Delta t$ aufgenommen wurden. *Abb. 2-16* zeigt die diskrete Einteilung der Zeitfunktion und das aus einer diskreten Fourier-Transformation entstehende Fourier-Spektrum. Die Abtastdauer wird durch eine sogenannte Fensterfunktion definiert. Die Fensterfunktion muss so gewählt werden, dass möglichst wenige Abweichungen durch das „Abschneiden“ von Teilen harmonischer Schwingungen entstehen. Eine oft verwendete Fensterfunktion ist beispielsweise das Hamming-Fenster [Din00]. Für die hier verwendeten transienten Signale ist ein Rechteckfenster hinreichend genau.

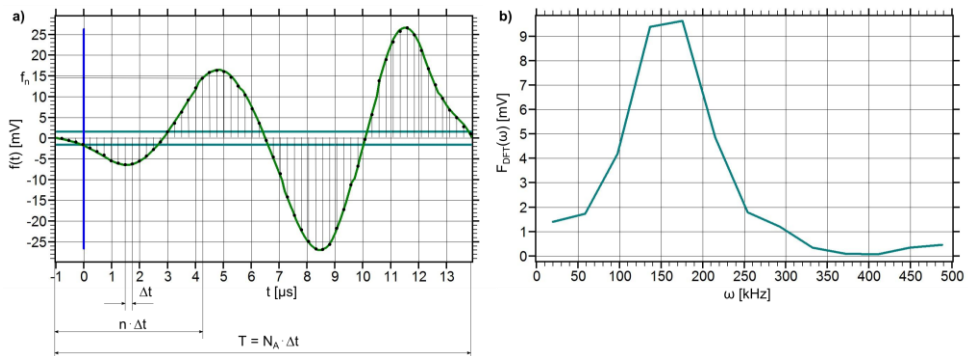


Abb. 2-16: a) Zeitsignal $f(t)$ mit N_A Abtastpunkten in den Zeitintervallen Δt , der Abtastdauer T und b) daraus resultierendes Fourier-Spektrum

Die in dieser Arbeit verwendete schnelle Fourier-Transformation (FFT) ist ein mathematisches Werkzeug zur schnellen Berechnung der DFT. Zu seiner Berechnung stehen mehrere Algorithmen zur Verfügung, wobei der Bekannteste von *Cooley und Tukey* aus dem Jahre 1965 stammt [CoTu65].

Eine Fourier-Transformation liefert qualitativ sehr gute Analysemöglichkeiten. Maximum- und Schwerpunktfrequenzen werden aus dem Fourier-Spektrum ermittelt. Für stationäre Signale, d.h. Signale, deren statistische Eigenschaften sich nicht signifikant mit der Zeit verändern, ist die FT eine sehr gute Analyseverfahren. Allerdings bietet sie keine Informationen über die zeitliche Entwicklung der Frequenzen innerhalb des Signals.

Zeit-Frequenz-Analyse

Um eine Auflösung im Zeit- und Frequenzbereich zu erreichen, werden gefensterte Funktionen verwendet. Diese ermöglichen eine detaillierte Analyse von nicht-stationären und transienten Signalen. Gerade bei der Analyse von Lamb-Wellen ergeben sich daraus wichtige Informationen. So kann gezeigt werden, welche Lamb-Mode zu einer bestimmten Zeit im Signal auftritt und was für einen Energiegehalt sie besitzt. So lassen sich beispielsweise in-plane- und out-of-plane-Quellen unterscheiden [HaOG02b]. Verwendet werden im Wesentlichen die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) und die Wavelet-Transformation

(WT). Ihre prinzipielle Arbeitsweise ist in *Abb. 2-17* dargestellt. Im Gegensatz zur Fourier-Transformation werden bei diesen Transformationen zeitlich bestimmte Signaldaten benutzt. Dies ermöglicht eine Auflösung im Zeit- und Frequenzbereich. Ein wesentlicher Unterschied zwischen STFT und WT besteht darin, dass anstelle einer konstanten Fenstergröße bei der WT die Auflösung der Fenster nach Frequenzen skaliert wird. Dies ermöglicht eine höhere Auflösung. Es existieren eine Reihe von Algorithmen zur Erstellung von Wavelets (vgl. hierzu [SuYe09, S.158ff]).

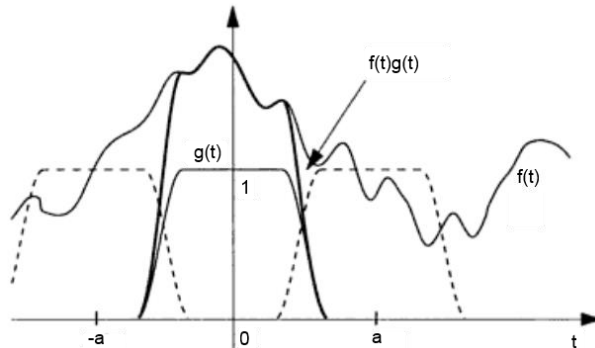


Abb. 2-17: Für einen festen Zeitpunkt τ beschreibt die Kurzzeit-Fourier-Transformation einer Funktion $f(t)$ den lokalen Frequenzinhalt von $f(t)$ in der Nähe von τ als eine Funktion von ω . Dieses Spektrum ist als Fourier-Transformation von $f(t)g(t-\tau)$ definiert, wobei $g(t)$ eine Fensterfunktion ist. Wird der Mittelpunkt der Fensterfunktion $g(t)$ entlang der Abszisse verschoben, entstehen Momentaufnahmen des Zeit-Frequenz-Verhaltens von f . Hier beträgt die Verschiebung $\tau = -a, 0, a$ [FeSt98, S.7]

In dieser Arbeit wird die Gabor-Transformation verwendet (*D. Gábor*, 1900-1979). Sie stellt einen Spezialfall der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) dar und ist eng mit der Wavelet-Transformation verwandt, basiert jedoch auf einer Gaußschen Fensterfunktion [FeSt98]. Ihre mathematische Beschreibung findet sich in *Anhang 0*. Das Ergebnis einer Wavelet-Transformation ist eine Verteilung des Wavelet-Koeffizienten, auch WT-Magnitude genannt, über Frequenz und Zeit. Wie in *Abb. 2-18* wird dieser oft in einer Farbskala angezeigt. Der Vergleich zum Dispersionsdiagramm zeigt, welche Lamb-Moden im jeweiligen Signal dominant sind.

2 Das Schallemissionsprüfverfahren

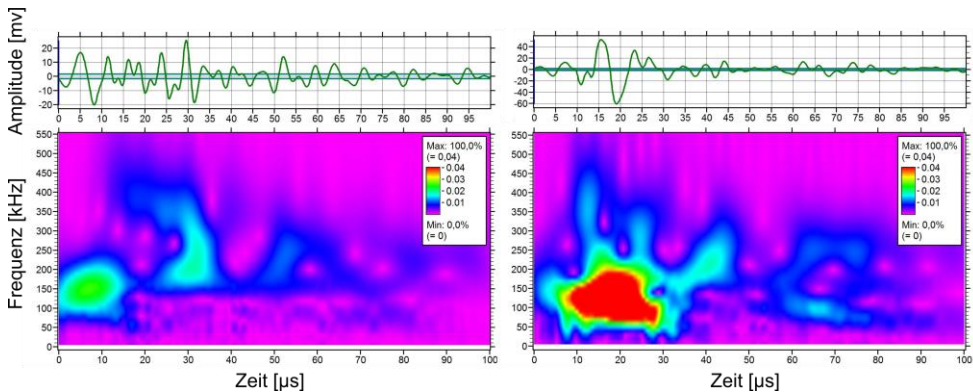


Abb. 2-18: Signalform (oben) und Wavelet-Diagramm (unten) einer Anregung durch einen Bleistiftminenbruch an einer 10 mm dicken Stahlplatte in der Plattenebene (IP, links) und senkrecht zur Plattenebene (OOP, rechts)

Mustererkennung von Schallemissionssignalen

Transiente SE-Signale haben einen physikalischen Ursprung, der ihre Form mitbestimmt. Einfluss haben auch der Sensor, Geometrie und Laufweg sowie das Material des Prüfobjekts, in dem sich die Schallwelle fortbewegt. Liegt jedoch, bei einer großen Anzahl aufgenommener SE-Signale, der einzige Unterschied in der Schallemissionsquelle, besteht die Wahrscheinlichkeit, dass sich ihr Einfluss dazu nutzen lässt, die SE-Signale einem bestimmten Quellmechanismus zuzuordnen. Dies soll anhand einer Mustererkennung geschehen. Der Begriff Mustererkennung beschreibt den Prozess, in einer Anzahl von Rohdaten Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, aufgrund derer sich eine Klassifizierung der Daten vornehmen lassen.

Eine Klassifizierung kann aufgrund von Unterschieden in den SE-Parametern der transienten SE-Signale vorgenommen werden. Dies sind beispielsweise die Maximalamplitude, die Signalenergie oder die Durchschnittsfrequenz. Dann werden diese Parameter, sofern sie klassenspezifisch sind, Merkmale für die Klassifizierung. Ferner gibt es abstraktere Methoden, Merkmale für ein SE-Signal zu erstellen, welche sowohl die zeitlichen, als auch die Eigenschaften im Frequenzraum widerspiegeln. Diese können mithilfe eines kommerziellen Klassifikationsprogrammes gewonnen werden. Beide Möglichkeiten sollen hier besprochen werden.

Methodik einer Mustererkennung

Die Vorgehensweise einer typischen Mustererkennung ist in *Abb. 2-19* dargestellt. Diese soll anhand des Beispiels der Mustererkennung von Schallemissionssignalen erläutert werden. Die Signalerfassung und -digitalisierung erfolgt dabei durch den SE-Sensor sowie das SE-System. Letzteres übernimmt auch einen Teil der Vorverarbeitung. Vorverarbeitung bedeutet beispielsweise die Trennung von Nutz- und Störsignalen, die Filterung von Signalen mit bestimmten Frequenzen oder von Signalen, welche bei bestimmten Lasten auftreten. Diese Signale, welchen spezifischen Eigenschaften zugeordnet werden können, sind nun Muster. Die Merkmalsextraktion betrachtet ein Muster, im vorliegenden Fall eine SE-Signalförmigkeit, und produziert Merkmale, die die Eigenschaften des Musters darstellen. Bei der

Merkmalsreduktion wird durch Kombination von elementaren Merkmalen eine möglichst geringe Zahl trennfähiger nichtelementarer Merkmale gebildet.



Abb. 2-19: Vorgehensweise bei einer Mustererkennung

Die Anzahl der Merkmale wird nahezu immer geringer sein, als die Anzahl, die benötigt würde, um eine vollständige Beschreibung des Musters zu erhalten. Es findet also ein Verlust an Information statt. Die Merkmalsreduktion und anschließende Klassifikation stellt einen noch größeren Verlust an Information dar. Es werden, am Beispiel der Schallemissionsanalyse, mehrere tausende Bit an Information, die komplexe Signalfornen darstellen, umgewandelt in einige wenige Bit an Daten mit der Ausgabe 1, 2 oder 3, welche die Klassenkategorie repräsentieren. Die Mustererkennung ist im Wesentlichen ein Prozess der Informationsreduktion [DuHS12, S.13].

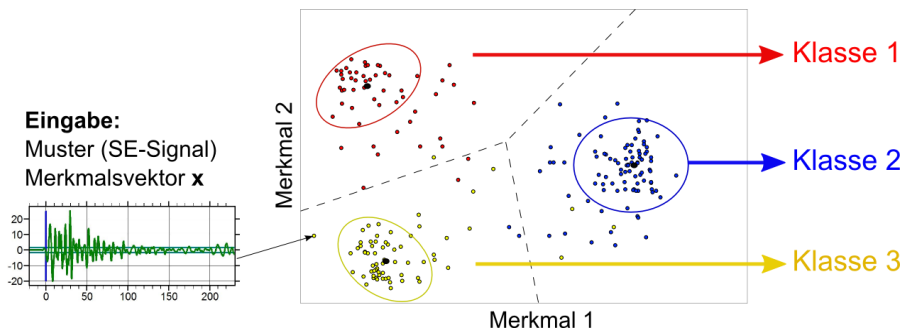


Abb. 2-20: Zweidimensionaler Merkmalsraum, in welchem sich drei Cluster/ Klassen befinden; jeder Punkt im Merkmalsraum repräsentiert eine Signalforn. Die Klassengrenzen sind durch gestrichelte Linien dargestellt, die Klassenmittelpunkte anhand schwarzer Punkte

Jedem Muster können d Merkmale x_i , mit $i = 1, 2, \dots, d$ zugeteilt werden. Diese werden in dem Merkmalsvektor \mathbf{x} ausgedrückt:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

und befinden sich in einem d -dimensionalen Merkmalsraum. Ein Signal gehört zu einer Klasse, wenn es aufgrund seiner Merkmalkombination innerhalb der Klassengrenzen liegt. Sind diese nicht eindeutig, erfolgt die Zuordnung über statistische Abstandswerte zum Klassenmittelpunkt. In Abb. 2-20 ist ein zweidimensionaler Merkmalsraum dargestellt. Zwei Merkmale werden gegeneinander projiziert. Jeder Punkt im Merkmalsraum repräsentiert ein Muster, hier also ein SE-Signal. Bilden sich im Merkmalsraum Cluster aus, so kann davon ausgegangen werden, dass die Signale anhand der gewählten Merkmale unterschieden werden können; Klassengrenzen können definiert werden. Sind die SE-Signale einheitlich im Merkmalsraum verteilt, kann anhand der gewählten Merkmale keine Klassifikation vorgenommen werden.

Weiterhin kann bei der Erstellung eines Klassifikators zwischen **überwachtem und unüberwachtem Lernen** unterschieden werden. Während beim überwachten Lernen zu jedem Signal die Klassenzugehörigkeit bekannt ist, müssen die Klassen beim unüberwachten Lernen über natürliche Gruppenbildung, die Cluster, gefunden werden. Beide Ansätze sind in *Abb. 2-21* schematisch dargestellt. In dieser Arbeit wird der Ansatz des überwachten Lernens verwendet. Hierbei wird wie folgt verfahren:

1. Klassen vorgeben
2. Merkmale auswählen
3. Klassengrenzen ziehen.

Der so erstellte Klassifikator ist nun in der Lage, einen unbekanntem Datensatz in die erlernten Klassen einzuteilen.

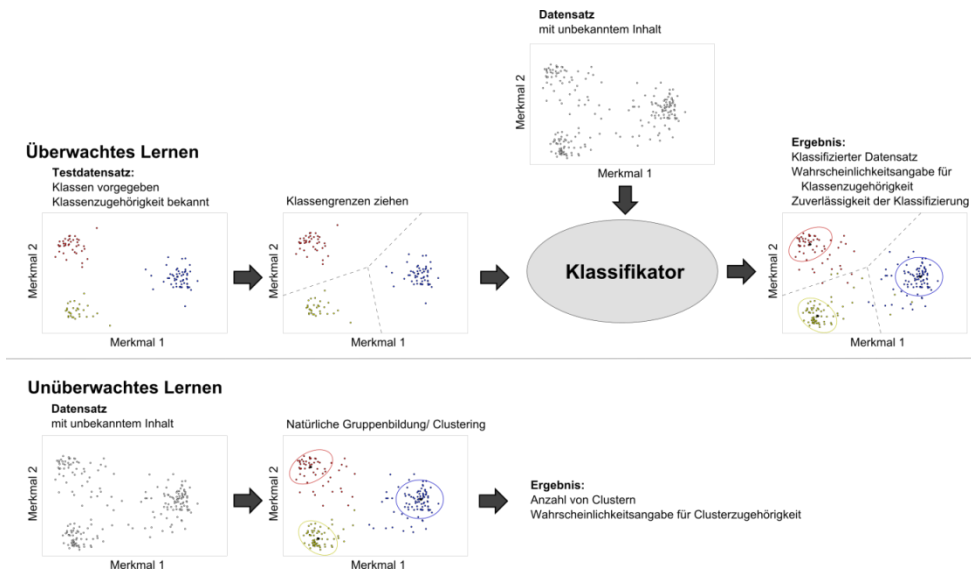


Abb. 2-21: Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim überwachten und unüberwachten Lernen in einer Klassifikation

Merkmalsextraktion und Merkmalsbewertung

Eine wesentliche Aufgabe der Mustererkennung besteht darin, aus dem gemessenen Signal Merkmale zu extrahieren, die klassentrennend sind. Dazu gibt es keinen formalen Weg (Kroschel et al. 2011: 110–114). In dieser Arbeit werden im Wesentlichen zwei Ansätze zur Merkmalserschaffung verwendet: eine manuelle Merkmalsauswahl, welche auf den SE-Parametern basiert und eine automatische Merkmalsextraktion unter Nutzung der Klassifizierungssoftware *VisualClass* [Vall12c].

Abb. 2-22 zeigt die Merkmalsextraktion in *VisualClass* anhand eines Beispiels. Aus den SE-Signalen werden Segmente geschnitten, welche mit dem Energiefaktor $E_{SS} = \int U(t)^2 dt$ normiert werden. E_{SS} wird dabei über die Anzahl der Abtastpunkte, welche innerhalb der ausgewählten Zeitsegmente liegen, integriert. Die Segmente überlappen sich jeweils zu 50%. Jedes Segment wird mit einer Hamming-Funktion multipliziert (vgl. *Abb. 2-22 mittlere*

Zeile) und aus einer FFT das Frequenzspektrum der Segmente entnommen (vgl. Abb. 2-22 unten). Die Anzahl der Abtastpunkte je Zeitsegment soll mit N_{AZ} bezeichnet werden; die Anzahl der Abtastpunkte im Spektrum ist $N_{AF} = N_{AZ}/2$. Es wird vom Nutzer außerdem eine Bandbreite vorgegeben, innerhalb derer die Merkmaldefinition stattfindet. Jeder Abtastpunkt im Spektrum innerhalb der definierten Bandbreite wird als Merkmal verwendet. Der Größenwert des Merkmals entspricht dem Wert der FFT-Amplitude der jeweiligen Frequenz. Jedes dieser Merkmale beinhaltet also eine Frequenz- und eine Zeitkoordinate.

Für eine Abtastrate von 10MHz, $N_{AZ} = 256$ Abtastpunkte und ein Frequenzband von 0 bis 400 kHz ergibt sich beispielsweise eine Merkmalsanzahl von 11 Merkmalen pro Frequenzfenster. Bei drei Segmenten, wie sie in Abb. 2-22 zu sehen sind, ergäben sich 33 Merkmale für ein SE-Signal. Jedes der drei Frequenzfenster wird dabei von 11 Merkmalen beschrieben. Als weiteres Merkmal wird der Energiefaktor E_{SS} hinzugefügt. Für das gewählte Beispiel ergäben sich demnach 34 Merkmale [Vall12c].

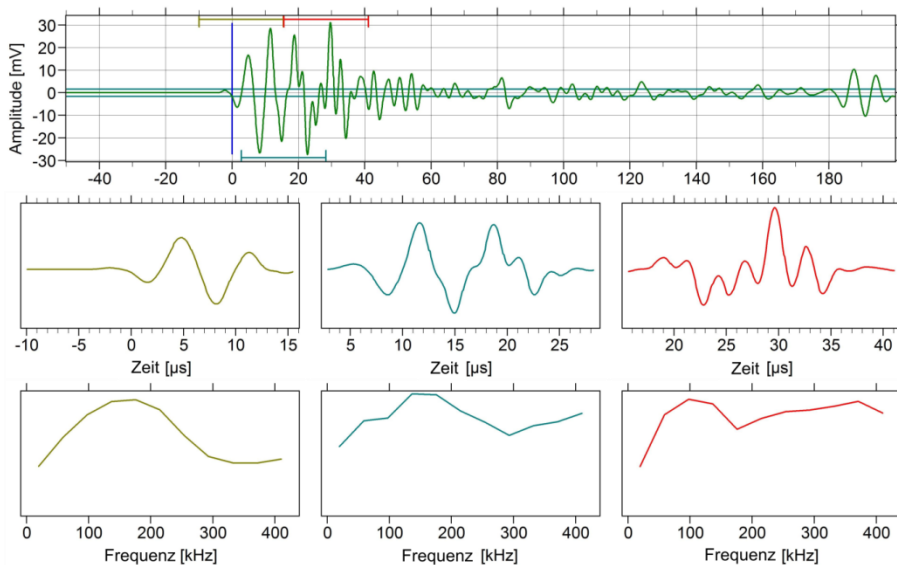


Abb. 2-22: SE-Signal (oben) mit drei gekennzeichneten Zeitsegmenten; Darstellung der Segmente im Zeitbereich (mitte) und im Frequenzbereich (unten)

Es gibt Verteilungen im Merkmalsraum, die gut geeignet sind, um eine Trennbarkeit der Klassen zu gewährleisten. Dies lässt sich für einzelne Merkmale aufgrund von Häufigkeitsverteilungen beurteilen (vgl. Abb. 2-23). Oft liegt jedoch eine Korrelation zwischen den Merkmalen vor oder die Klassen liegen eng zusammen. In solchen Fällen kann eine **Transformation der Merkmale** durchgeführt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Transformation ist die Karhunen-Loève-Transformation, auch als Hauptachsentransformation oder, im Englischen, als Principal Component Analysis (PCA) bekannt. Sie bewirkt eine Transformation der statistischen Merkmale in eine geringere Anzahl möglichst aussagekräftiger Linearkombinationen, den Hauptkomponenten. Informationen zu dieser und weiteren Transformationen im Merkmalsraum können hier entnommen werden: [DuHS12, S.655–660, KrRS11, S.136–141].

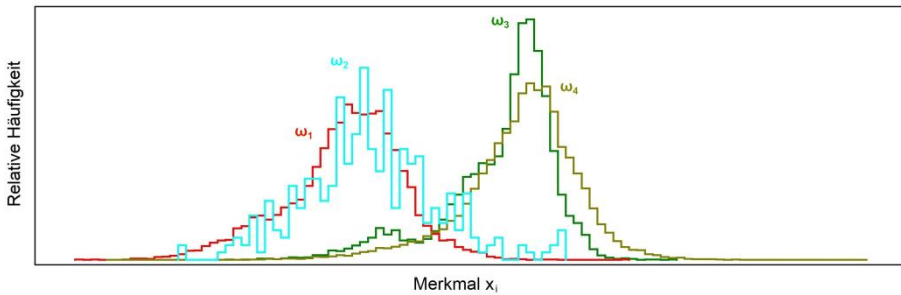


Abb. 2-23: Häufigkeitsverteilung $p(x)$ des Merkmals x_i für vier Klassen ω_{1-4} ; das ausgewählte Merkmal hat für jeweils 2 Klassen keine trennende Eigenschaft, die Klassen ω_1 und ω_2 sowie ω_3 und ω_4

Es gibt neben der Darstellung im Merkmalsraum einige Werkzeuge, mithilfe derer die Merkmale bewertet werden können. Zu diesen gehören die Häufigkeitsverteilung der Merkmale, die Betrachtung des Fisher-Ratio, des Abstands-Verhältnisses und das *Class Couple Ranking*. Diese Methoden werden in *Anhang C.6* beschrieben und dienen dazu, ein Merkmal innerhalb seiner Klasse einzustufen oder die klassentrennenden Eigenschaften zu bewerten.

Klassenzuordnung mittels statistischer Klassifikatoren

Statistische Klassifikatoren ordnen Objekte in Kategorien mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu. Mehrere Merkmale werden zu Merkmalsvektoren zusammengefasst. Eine mathematische Funktion ordnet jeden Merkmalsvektor \mathbf{x} eindeutig einer Klasse ω_i zu. Diese Funktion wird als Diskriminantenfunktion $g_i(\mathbf{x})$ bezeichnet. Der schematische Aufbau eines statistischen Klassifikators ist in *Abb. 2-24* zu sehen. Der hier vorgestellte Klassifikatortyp ist der häufig verwendete Bayes-Klassifikator.

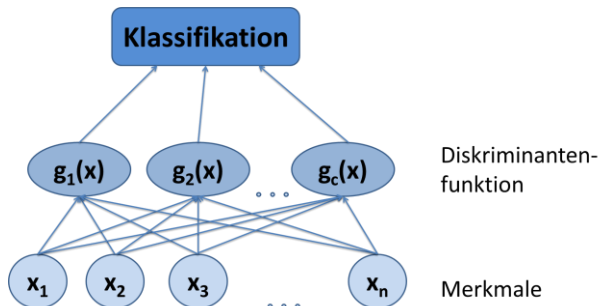


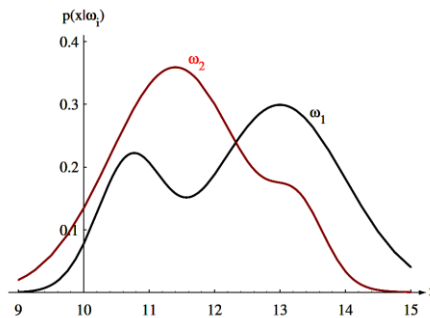
Abb. 2-24: Struktur eines statistischen Klassifikators, welcher d Merkmale x_i und c Diskriminantenfunktionen $g_i(x)$ beinhaltet, nach [DuHS12]

Einen Überblick über die in diesem Kapitel auftretenden statistischen Bezeichnungen soll *Tab. 2-7* vermitteln. Allgemein bezeichnet der Ausdruck $P(x|y)$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit, die ausdrückt, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Ereignis x auftritt, wenn das Ereignis y bereits aufgetreten ist [KrRS11, S.17]. Ein großgeschriebenen $P()$ kennzeichnet eine Wahrscheinlichkeitsfunktion, ein kleingeschriebenen $p()$ eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.

Tab. 2-7: Bezeichnungserklärung für verwendete statistische Begriffe nach [DuHS12, Timm01]

\mathbf{x}	Merkmalvektor des Signals $f(t)$
d	Anzahl der Merkmale in \mathbf{x}
$P(\omega_i)$	Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Klasse ω_i
$p(\mathbf{x} \omega_i)$	Klassenbedingte Verteilungsdichte; die Wahrscheinlichkeit, dass der Merkmalsvektor \mathbf{x} auftritt, wenn zuvor die Klasse ω_i aufgetreten ist
$P(\omega_i \mathbf{x})$	Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass $\mathbf{x} \in \omega_i$
$p(x)$	Mischverteilungsdichte
$g_i(\mathbf{x})$	Diskriminantenfunktion, welche jedem Merkmalsvektor \mathbf{x} eine Klasse ω_i zuordnet
R_i	Entscheidungsregion für die Klasse ω_i

Anhand einer Häufigkeitsverteilung der Merkmale kann beurteilt werden, inwiefern diese klassentrennend sind. In einer solchen Verteilung ist die Wahrscheinlichkeit $p(x|\omega_i)$, mit welcher Merkmal x der Klasse ω_i zugehörig ist, dargestellt. Eine Verteilung für die Klassen ω_1 und ω_2 ist in Abb. 2-25 dargestellt. In der Entscheidungstheorie wird von zwei möglichen Zuständen ω_1 und ω_2 gesprochen. ω ist nicht vorhersagbar und damit eine Zufallsvariable [DuHS12].

Abb. 2-25: Hypothetische Wahrscheinlichkeitsverteilungen eines Merkmals x [DuHS12]

Repräsentiert x in Abb. 2-25 beispielsweise das Merkmal *Maximumfrequenz des SE-Signals*, so stellt das Diagramm die Frequenzverteilung zweier Klassen ω_1 und ω_2 dar; ω_1 könnte dabei *Korrosion*, ω_2 *Ermüdungsrischwachstum* sein. Es wird die Annahme gemacht, dass es eine A-priori-Wahrscheinlichkeit $P(\omega_1)$ für Korrosion und $P(\omega_2)$ für Ermüdungsrischwachstum gibt. Bei zwei Zuständen gilt:

$$P(\omega_1) + P(\omega_2) = 1. \quad (15)$$

Die gemeinsame Verteilung von ω_i und x wird durch den **Satz von Bayes** beschrieben:

$$P(\omega_i | x) = \frac{p(x | \omega_i)P(\omega_i)}{p(x)} \quad (16)$$

mit der Mischverteilungsdichte

$$p(x) = \sum_{i=1}^n p(x | \omega_i)P(\omega_i). \quad (17)$$

Um aufgrund einer Wahrscheinlichkeitsfunktion eine Klassenzuordnung durchführen zu können, muss es eine Entscheidungsregel geben. Eine häufig verwendete Regel ist die **Bayes'sche Entscheidungsregel**. Für zwei Klassen lautet sie [DuHS12, S.2\5ff]:

$$\text{Entscheide für } \omega_1, \text{ wenn } p(\omega_1|x) > p(\omega_2|x); \text{ sonst für } \omega_2. \quad (18)$$

Verallgemeinert lässt sich die Bayes'sche Entscheidungsregel ausdrücken durch

$$\mathbf{x} \in \omega_i, \text{ wenn } p(\omega_i|\mathbf{x}) > p(\omega_j|\mathbf{x}) \text{ für } i = 1, \dots, n; i \neq j. \quad (19)$$

Häufig überschneiden sich die Wahrscheinlichkeitsfunktionen zweier Klassen. Um zu entscheiden, welcher Bereich der Merkmalachse einer Klasse ω_i zugeteilt werden soll, werden **Entscheidungsregionen R_i** eingeführt. In welchen Bereich die Entscheidungsregionen fallen, entscheidet eine **Entscheidungsgrenze**. Diese sollte so gewählt werden, dass sie Fehlentscheidungen des Klassifikators minimiert. Zwei sich überschneidende Klassen mit normalverteilten Daten sind in *Abb. 2-26* dargestellt. Je nachdem, wie weit die Entscheidungsgrenze nach rechts verschoben wird, verschieben sich auch die Wahrscheinlichkeiten $P(\omega_i)$ für die Klassenzugehörigkeit in der Entscheidungsregion R_i .

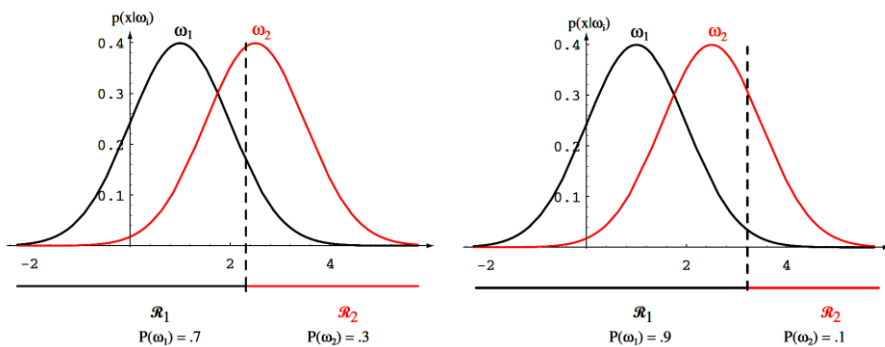


Abb. 2-26: Gaußverteilte Daten mit Überschneidung der Merkmale und verschobener Entscheidungsgrenze [DuHS12]

Die Rolle der Entscheidungsfindung für die Festlegung der Entscheidungsregionen übernimmt die oben vorgestellte Diskriminantenfunktion $g_i(\mathbf{x})$. Ihre Aufgabe ist die Teilung des Merkmalraums in c Entscheidungsregionen R_1, \dots, R_c . Ist $g_i(\mathbf{x}) > g_j(\mathbf{x})$ für alle $i \neq j$, so ist $\mathbf{x} \in R_i$; \mathbf{x} wird ω_j zugeordnet. Je nach Klassifikatortyp kann eine bestimmte Diskriminantenfunktion gewählt werden. Für die sogenannte *minimum-error-rate-Klassifikation* wird beispielsweise folgende Funktion verwendet:

$$g_i(\mathbf{x}) = \ln p(\mathbf{x}|\omega_i) + \ln P(\omega_i). \quad (20)$$

3 Experimentelle Arbeit

Es wurden Experimente durchgeführt, die sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen lassen:

1. Versuche, die das grundlegende Verständnis bezüglich Schallemissionsquellen, Wellenausbreitung und Sensorreaktion erweitern sollen und
2. Versuche, bei denen SE-Signale definierter Quellmechanismen (Korrosion, Ermüdungsrissswachstum) aufgenommen werden sollen. Diese werden abschließend auf ihre Klassifizierbarkeit hin untersucht.

Die Beschreibung der durchgeführten Experimente sowie die Ergebnisdarstellung von Grundlagenversuchen ist Inhalt dieses Kapitels. Kapitel 3.1: *Verwendete Materialien, Messinstrumente und -methoden* dient der Definition der durchgeführten Experimente. In Kapitel 3.2: *Akustische Eigenschaften der Versuchsplatten* werden die Experimente der Kategorie 1 besprochen, also jene Experimente, welche das akustische Grundlagenwissen erweitern sollen. Hier werden grundsätzliche Zusammenhänge dargestellt und bereits geschlossene Ergebnisdarstellungen eigener Messungen geboten. Diese können als Analyse für sich stehen, dienen jedoch auch dazu, die in Kapitel 4 folgenden Ergebnisse als Grundlagenversuche zu stützen. Kapitel 3.3: *Erzeugung von Schallemissionsquellen und Aufzeichnung von SE-Signalen* widmet sich mit der Aufnahme der SE-Signale aus den Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrissswachstum den Versuchen der Kategorie 2. Im Anschluss wird in Kapitel 4 angestrebt, eine vergleichende Analyse der SE-Signale aus den in diesem Kapitel vorgestellten Schadensmechanismen zu gewinnen und anhand der zugeordneten Signalformen aus Versuchen der Kategorie 2 ein Mustererkennungsverfahren zu entwickeln, nach dem sie sich in definierte Schädigungsklassen einordnen lassen. Insgesamt soll dieses Kapitel durch Vorstellung von Materialien und Analysemethoden alle Grundlagen für die Datenanalyse im Kapitel 4 stellen.

3.1 Verwendete Materialien, Messinstrumente und -methoden

Probendesign

Die Proben, welche für die Versuche in dieser Arbeit Verwendung finden, sollen Vorgaben in zweierlei Hinsicht erfüllen: Sie sollen den Vergleich mit realen Bauteilen genügen und für Schallemissionsmessungen geeignet sein. Beide Faktoren lassen sich durch die Probengröße zusammenführen. In realen Bauteilen mit plattenähnlichen Strukturen haben die von aktiven Fehlstellen ausgehenden Schallwellen oft lange Laufwege. Für die Signalverarbeitung ist es außerdem wichtig, dass der Hauptteil des SE-Signals aufgezeichnet werden kann, ohne dass es von Reflexionen überlagert wird. Diese Überlagerung ist bei kleinen Proben und randnahen Sensorpositionen jedoch der Fall.

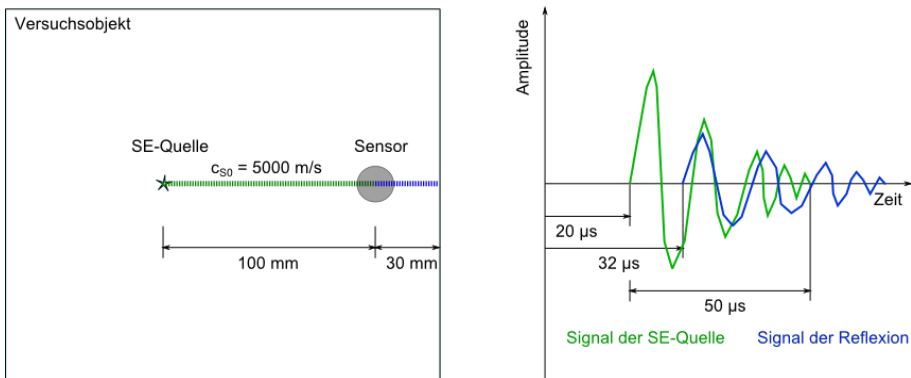


Abb. 3-1: Überlagerung des SE-Signals durch Reflexion am Probenrand. Links: Versuchssubjekt mit SE-Quelle und Sensor in einem Abstand von 100 mm. Die Geschwindigkeit der S_0 -Welle beträgt $c_{S_0} = 5000 \text{ m/s}$; Rechts: Darstellung des Signals der SE-Quelle (grün) und des überlagerten Signals der Reflexion am Rand (blau)

Ein Beispiel ist in *Abb. 3-1* schematisch dargestellt. Auf einem Versuchssubjekt befinden sich eine SE-Quelle und ein SE-Sensor. Die Schallwelle braucht auf direktem Wege von der Quelle, bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 5.000 m/s, eine Zeit von $100 \text{ mm} / 5000 \text{ m/s} = 20 \text{ µs}$, um den Sensor zu erreichen. Der Probenrand, welcher sich 30 mm hinter dem Sensor befindet, reflektiert das Signal. Nach $160 \text{ mm} / 5000 \text{ m/s} = 32 \text{ µs}$ erreicht die reflektierte Welle den Sensor. Das Quellsignal, welches eine Dauer von 50 µs besitzt, wird bereits 12 µs nach seinem Beginn von dem Reflexionssignal überlagert. Um dies zu verhindern, müssen die Reflexionswege, also der Abstand von Quelle und Sensoren zu den Probenrändern, möglichst groß sein. Dies soll durch eine Plattenstruktur gewährleistet werden, deren Abmessung von mindestens $1000 \times 500 \times 10 \text{ mm}^3$ diesen Vorgaben genügt. Durch die Nutzung einer großen Platte können Sensor und Riss Spitze in einer guten Entfernung positioniert werden, so dass es möglich ist, auch Wellenmoden mit geringer Frequenz zeitlich voneinander getrennt aufzunehmen.

Des Weiteren wurde aufgrund der Vorgabe eines bauteilnahen Probendesigns eine Schweißnaht in die Versuchsplatten eingebracht. Schweißverbindungen besitzen besondere Rissanfälligkeit. Die Ursache dafür liegt im Fertigungsprozess, bei dem hohe thermische Belastungen sowie inhomogene und instationäre Temperaturfelder zustande kommen. Die

Folge ist ein inhomogener Gefügeaufbau, Schweißspannungen infolge lokaler Schrumpfbinderung und damit ein sprödes Materialverhalten in der Wärmeinflusszone. Dies begünstigt das Ermüdungsrisswachstum und ist der Grund, warum das Versagen von größeren Bauteilen häufig von Rissen in der Schweißnaht oder der Wärmeinflusszone ausgehen [Merk04, S.9]. Um einen definierten Riss an einer für die Sensorpositionen optimierten Position zu erreichen, wurde ein Starterkerb mechanisch im Bereich der Wärmeinflusszone eingebracht (vgl. Abb. 3-2). Dieser wurde mithilfe eines V-Nut Fräasers, mit einem Öffnungswinkel von 60° , einer Länge von 30 mm und einer Tiefe von 2,5 mm gefertigt.

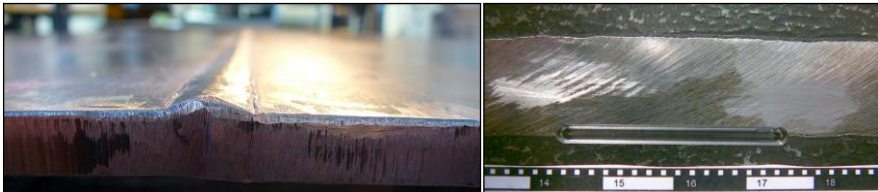


Abb. 3-2: Seitenansicht einer Versuchsplatte (links): ihre Dicke beträgt 10 mm, in ihrer Mitte befindet sich eine Schweißnaht. Darstellung des Starterkerbes (rechts, Draufsicht) in der Wärmeinflusszone der Schweißnaht einer Versuchsplatte

Materialeigenschaften der Versuchsplatten: Festigkeitskennwerte und Morphologie

Mit der Stahlsorte P460NL1 (1.8915) wurde ein nach DIN EN 10028-3 normalgeglühter Feinkornbaustahl gewählt, welcher unter anderem in Druckbehältern zum Gastransport Verwendung findet. Er gilt mit einer Streckgrenze $\geq 355 \text{ N/mm}^2$ als hochfest [Schu04, S.184]. Die Festigkeitskennwerte des Materials sind in Tab. 3-1 dargestellt.

Tab. 3-1: Festigkeitskennwerte des verwendeten Probenmaterials

Stahlsorte (DIN EN 10028-3)	Materialnummer	Elastizitätsmodul E [kN/mm ²]	Streckgrenze R _e [N/mm ²]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
P460NL1	1.8915	206	460	570-720

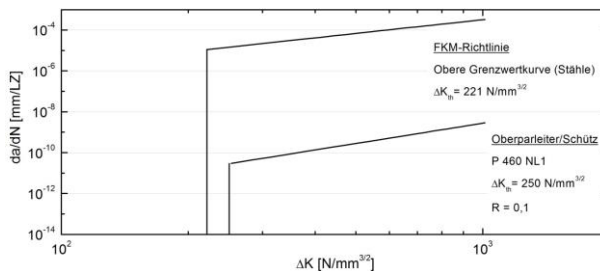


Abb. 3-3: Abschätzung der Risswachstumskurve nach [Fkmr06, ObSc88]

Für die zyklische Beanspruchung des Probenmaterials sind in Abb. 3-3 zwei aus der Literatur entnommene schematische Darstellungen der Risswachstumskurve zu sehen. Hieraus lässt sich abschätzen, bei welchen ΔK -Werten das Risswachstum einsetzt.

3 Experimentelle Arbeit

Es wurde eine Funkenspektralanalyse an einer Materialprobe durchgeführt. Diese Methode der optischen Emissionsspektrometrie ist in der Lage, die chemische Zusammensetzung des Materials zu charakterisieren. Das Ergebnis ist in *Tab. 3-2* zu sehen: die chemische Zusammensetzung entspricht derjenigen des Werkstoffes 1.8915. Mit einem Kohlenstoffgehalt von $< 0,2\%$ besitzt er eine gute Schweißeignung. Durch den geringen Schwefel- und Phosphorgehalt werden die Zähigkeitswerte in Längs- und Querrichtung im Vergleich zu anderen Stahlsorten erheblich verbessert.

Tab. 3-2: Ergebnisse einer Funkenspektralanalyse des verwendeten Materials. Die erste bzw. letzte Spalte zeigen die erlaubten Grenzwerte für das Material 1.8915. Die zweite Spalte enthält die gemessenen Werte für die Materialprobe

%	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Ni	Ti	V	Nb
Minimum			1,00			0,02							
P460NL1	0,19	0,33	1,67	0,006	$<0,001$	0,02	0,05	0,02	0,02	0,57	0,004	0,15	$<0,01$
Maximum	0,20	0,60	1,70	0,025	0,015		0,30	0,70	0,10	0,80	0,030	0,20	0,05

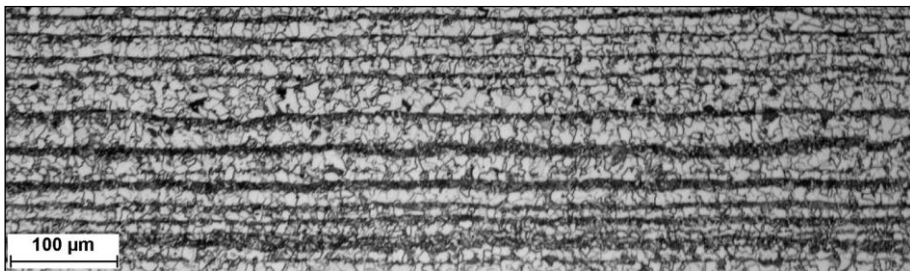


Abb. 3-4: Schliffbilder des Querschnitts einer Versuchsplatte längs zur Walzrichtung

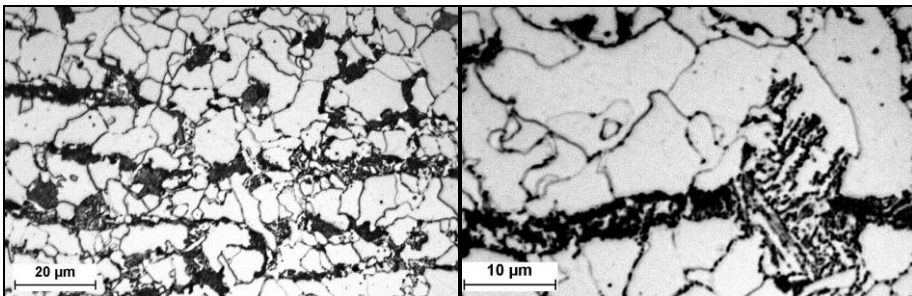


Abb. 3-5: Schliffbilder des Querschnitts einer Versuchsplatte quer zur Walzrichtung. Weiße Körner bestehen aus α -Ferrit, die schwarzen aus Perlit. Rechts ist die lamellenförmige Anordnung von Ferrit und Zementit zu sehen

Der thermomechanische Walzprozess generiert eine linienförmige Mikrostruktur, wie sie in *Abb. 3-4* zu sehen ist. Die Proben bestehen aus einem ferritisch-perlitischem Gefüge. Die dunklen Bereiche in der Abbildung bestehen aus Perlit, die hellen Bereiche aus α -Ferrit. Im Perlit sind Ferrit und Zementit in einer charakteristischen Lamellenform angeordnet (vgl. *Abb. 3-5*). Zementit ist eine Verbindung von Eisen und Kohlenstoff (Fe_3C) und besteht aus einer orthorhombischen Elementarzelle. Es ist sehr hart ($\text{HV} \approx 800$) und spröde. α -Ferrit

dagegen besitzt eine kubisch-raumzentrierte Elementarzelle. Es ist sehr weich ($HV \approx 60$) und gut verformbar. Der ferritische Gefügebestandteil ist korrosionsanfällig [Barg12, S.178ff]. Die Körner besitzen eine Größenverteilung von ca. 2 bis 20 μm . Die Kombination aus harten und weichen Bestandteilen machen Werkstoff P460NL1 kaltzäh: er kann bei tiefen Temperaturen eingesetzt werden. So wird er als Druckbehälter für Flüssiggas verwendet. Das spätere Risswachstum findet quer zur Walzrichtung statt.

Die Schweißnaht

Die nahezu punktförmige, konzentrierte Wärmequelle beim Schweißen beeinflusst und verändert das Schweißgut und einen, nur höchstens einige Millimeter breiten Bereich des Grundwerkstoffes unmittelbar neben der Schmelzgrenze, der als Wärmeeinflusszone bezeichnet wird. Die Schweißnaht wurde in zwei bzw. drei Schichten durch das Metall-Aktiv-Gas (MAG) – Fülldrahtschweißen aufgebaut. Die Prozessdaten sind Tab. 3-3 zu entnehmen.

Tab. 3-3: Prozessdaten des MAG-Fülldrahtschweißens. Zusatzwerkstoff gemäß EN ISO 17632-A:2008: T 46 4 M M 2 H5; Draht \varnothing : 1,2 mm; Schutzgas: 18% CO_2 Rest Argon

Platten-Nr.	Lage	Nahtform	Nahtöffnungs-winkel [°]	Nahtlänge [mm]	Blechdicke [mm]	Schweißparameter		Messwerte		Strecken-energie [kJ/cm]
						V_s [cm/min]	V_{Draht} [m/min]	Strom [A]	Spannung [V]	
1	1	V	60	250	10	50	7,5	250	28,5	8,6
	2					50	8,0	248	29,6	8,8
	3					50	10,0	285	30,6	10,5
2-5	1	V	40	250	10	40	7	241	29,8	10,8
	2					40	11	308	31,2	14,4

Im Schweißprozess erfährt der Werkstoff extreme Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten (jeweils einige hundert K/s). Das Entstehen von Gleichgewichtsgefügen ist aufgrund der kurzen Reaktionszeiten nicht möglich; für die Wärmeeinflusszone sind deshalb grobkörnige sowie oft harte und spröde Gefügebestandteile typisch. Für das Schweißgut ist dendritisches Gefüge kennzeichnend. Die Wärmeeinflusszone und das Schweißgut besitzen nahezu immer schlechtere mechanische Güterwerte sowie ein geringeres Verformungsvermögen als der Grundwerkstoff [Schu04, S.236ff].

Der Härteverlauf, dessen Verlauf im Schlibbild der Schweißnaht in Abb. 3-6 dargestellt ist, ist ein mechanischer Güterwert, der im Bereich der Schweißnaht zunimmt. Zu erkennen an den unterschiedlichen Schattierungen sind der Grundwerkstoff (GW), die Wärmeeinflusszone (WEZ) und das Schweißgut (SG). Es wurden Härteprüfungen nach Vickers gemäß [Dine06a] an Decklage und Wurzellage der Schweißnaht durchgeführt. Die Messpunkte sind auf dem Schlibbild in schwarz gekennzeichnet. Die Vickers-Härte besitzt vor allem in der Decklage (blaue Datenpunkte) in der WEZ einen sehr hohen Wert; der Unterschied zum Grundwerkstoff beträgt bis zu 100 HV. Im Schweißgut selbst nähert sich der Härteverlauf dem Grundwerkstoff an.

3 Experimentelle Arbeit

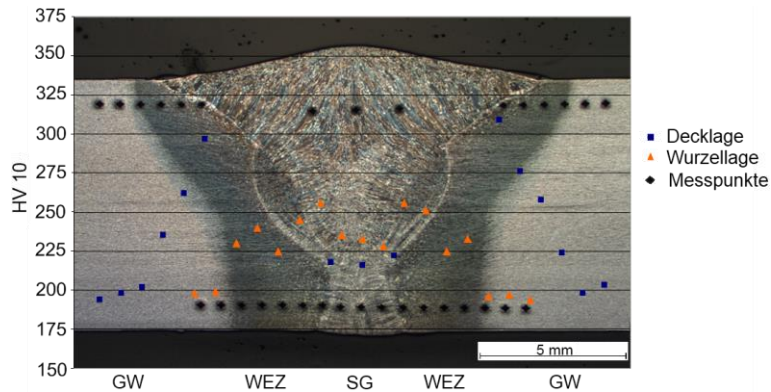


Abb. 3-6: Härtemessung an der Schweißnaht an Platte 2; Härteprüfung nach Vickers, Prüfkraft $F = 10$ Kilopond (HV 10) nach [Dine06a]. GW: Grundwerkstoff, WEZ: Wärmeeinflusszone, SG: Schweißgut

Mechanische Prüfvorrichtung

Bei der Durchführung einer Schallemissionsprüfung ist es essentiell, Hintergrundgeräusche zu vermeiden oder zu minimieren und Störgeräusche, sofern sie nicht zu vermeiden sind, so zu setzen, dass sie durch logische Filter von den Nutzsignalen getrennt werden können (zur Definition von Schallemissionsgeräuschen vgl. S.22). Im Folgenden soll auf diese Überlegungen zur Auslegung des Versuchsaufbaus eingegangen werden.

Störgeräusche, das sind jene Schallemissionsgeräusche, welche nicht durch eine Anhebung der Nachweisschwelle eliminiert werden können, entstehen bei einer mechanischen Prüfung unter anderem durch die Reibung der Auflager am Testobjekt. Störgeräusche können nur durch eine logische Filterung von den Nutzsignalen getrennt werden. Im Falle der Auflagerreibung muss also darauf geachtet werden, dass sich die Auflager in geeigneter Entfernung von der Schadensquelle befinden. So können sie durch eine Ortung von den Nutzsignalen getrennt werden. Deshalb wurde der Vierpunkt-Biegeversuch als Prüfmethode gewählt: durch die Einwirkung der Kräfte im Randbereich des Testobjektes verbleibt in dessen Mitte genügend Raum für eine Schadensquelle und eine Sensoranordnung innerhalb der Auflager.

Die Krafteinwirkung beim **Vierpunkt-Biegeversuch** ist in Abb. 3-7a dargestellt. Es wirken zwei Kräftepaare, welche in der Probe sowohl Zug- als auch Druckspannungen erzeugen. Die neutrale Faser bezeichnet denjenigen Längsschnitt, welcher spannungsfrei ist und an dem eine Umkehr in der Spannungsrichtung erfolgt. Die neutrale Faser liegt bei symmetrischen Querschnitten in der Mitte. Die Spannungen am Bauteilquerschnitt sind in Abb. 3-7b dargestellt; sie sind an der Randfaser am höchsten. Bei rein elastischer Verformung kann ein linearer Spannungsverlauf angenommen werden. Das maximale Biegemoment M_{bmax} ist bei der Vierpunkt-Biegung im Bereich der inneren Kraftangriffsstellen konstant. Die Spannungen am Rand ergeben sich zu [RiSi09, S.142]:

$$\sigma_z = M_b \cdot \frac{e_z}{J} \quad (21)$$

$$\sigma_d = M_b \cdot \frac{e_d}{J} \quad (22)$$

mit

σ_z Zugspannung am Rand
 σ_d Druckspannung am Rand
 M_b Biegemoment
 $e_{z,d}$ Abstand der neutralen Faser zum Rand
 J äquatoriales Trägheitsmoment.

Die größte Durchbiegung der Probe tritt in der Mitte zwischen den Kraftangriffspunkten auf:

$$f_{d,\max} = \frac{F \cdot m(3L_S^2 - 4m^2)}{14EJ} \quad (23)$$

Dabei ist F die Kraft an den Kraftangriffspunkten, L_S der Abstand zwischen den äußeren Kraftangriffspunkten, m der Abstand zwischen oberem und unterem Kraftangriffspunkt und E der Elastizitätsmodul des Materials [RiSi09, S.142].

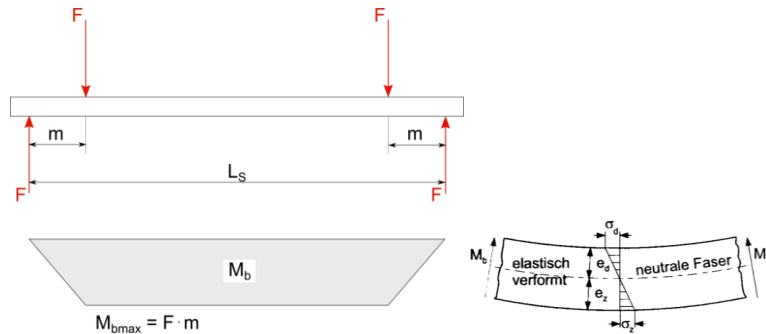


Abb. 3-7: a) Krafteinwirkung und Verlauf des resultierenden Biegemoments M_b bei der Vierpunktbiegung und b) Spannungen im Bauteilquerschnitt beim Biegeversuch bei rein elastischer Verformung [RiSi09]

Quelle für **Hintergrundgeräusche** bei einer mechanischen Materialprüfung sind besonders die mechanischen und hydraulischen Schwingungen der Prüfmaschine. Die Nachweischwelle für die Triggerung auf Hits an den SE-Sensoren muss so gesetzt werden, dass sie über den Amplitudenmaxima des Hintergrundgeräusches liegt. Bei einem hohen Niveau der Hintergrundgeräusche verliert die gesamte Messung an Empfindlichkeit, da auch Nutzsignale mit Amplituden, die damit unter der Nachweischwelle liegen, nicht mehr erfasst werden. Um die Übertragung der Schwingungen von der Prüfmaschine auf die Probe zu verringern, wurden Dämpfungsmatten zwischen Auflagern und Aufspannplatte angebracht. Die Dämpfungsmatte von der Firma *ISOLOC* des Typs IPL 30 besteht aus einem synthetischen faservernetzten Elastomer und hat eine Stärke von 15 mm. Abb. 3-8 zeigt die Seitenansicht eines Auflagers.

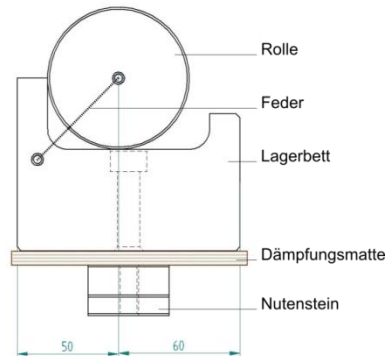


Abb. 3-8: Auflager für den Vierpunkt-Biegeversuch; die Rolle wird mit Hilfe von Federn am Lagerbett fixiert; die Vorrichtung wird durch Nutensteine an der Aufspannplatte der Prüfmaschine angebracht; zwischen Lagerbett und Aufspannplatte befindet sich eine Dämpfungsmatte

Der Aufbau der verwendeten Prüfvorrichtung ist in Abb. 3-9 dargestellt. Es wurde eine servohydraulische Prüfmaschine mit einer Maximallast von 250 kN der Firma Schenck verwendet. Auch die Belastungsparameter für den Ermüdungsversuch wurden so gewählt, dass sowohl Hintergrund- als auch Störgeräusche gering bleiben. Dazu wurde eine geringe Schwingfrequenz von $f_{\text{Sch}} = 2,4 \text{ Hz}$ und ein Lastverhältnis $R = F_{\text{min}}/F_{\text{max}} = 0,5$ gewählt.

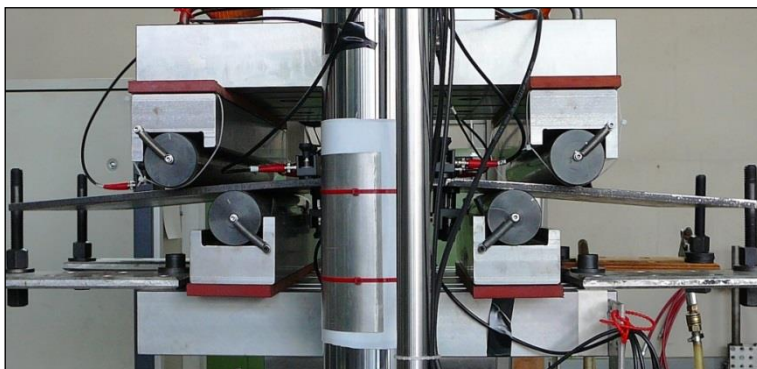


Abb. 3-9: Prüfaufbau des Vierpunkt-Biegeversuchs - servohydraulische Prüfmaschine mit eingespannter Testplatte; rot zu sehen sind die Dämpfungsmatten zwischen Auflagern und Aufspannplatte

Mess- und Sensortechnik für die Schallemissionsprüfung

Die frequenzabhängige Sensitivität der SE-Sensoren sowie die Frequenz limitierende Soft- und Hardwarefilter des SE-Messsystems müssen so eingesetzt werden, dass Nutzsignale unterstützt und gleichzeitig Hintergrund- und Störgeräusche möglichst gering gehalten werden. Auch die frequenzabhängige Schallschwächung sollte bei der Sensorauswahl Beachtung finden; denn höhere Frequenzen werden stärker geschwächt als niedrigere. Dies hat Einfluss auf die Amplitude der SE-Signale und somit auch auf die Nachweisbarkeit der Plattenwellen aber ebenso auf die Unterscheidbarkeit von Quellenmechanismen auf Grundlage von Frequenzanalysen.

SE-Messsystem

Für die Schallemissionsmessungen wurde ein Schallemissionsmesssystem des Herstellers Physical Acoustics Corporation (PAC) verwendet. Es standen sechs Messkanäle zur Verfügung. Die Systemeinstellungen des Messsystems sind in *Tab. 3-4* dargestellt.

Zur Signalanalyse wurde die Software *VisualAE* [Vall12a] verwendet. Die Definitionen von Hit-Trennungs- und Reaktivierungszeit sind in *Abb. 3-10* dargestellt. Die **Hit-Trennungs-Zeit** definiert das Ende eines Hits. Werden keine Überschreitungen der Nachweisschwelle nach Ablauf der Hit-Trennungs-Zeit detektiert, so ist der Hit beendet. Die Hit-Trennungs-Zeit beginnt, sobald das Signal unter die Nachweisschwelle fällt; es wird bei jeder weiteren Schwellenüberschreitung zurückgesetzt. Die **Reaktivierungszeit** definiert, wann ein Kanal nach aufgezeichnetem Hit bereit für eine neue Aufzeichnung eines Hits ist. Die Reaktivierungszeit beginnt, wenn das Signal unter die Nachweisschwelle sinkt. Sie läuft aus, wenn es während ihrer Dauer keine weiteren Schwellenüberschreitungen gibt. Daraufhin wird der Hit geschlossen, ein neuer Hit kann gestartet werden. Die Reaktivierungszeit wird zurückgesetzt, sobald eine Schwellenüberschreitung innerhalb der Reaktivierungszeit stattfindet [Vall12a]. Der **Pre-Trigger** bestimmt den Zeitabschnitt, in welchem das Signal auch vor dem ersten Überschreiten der Nachweisschwelle aufgezeichnet wird.

Tab. 3-4: Systemeinstellungen bei der Durchführung der Schallemissionsprüfungen für den Sensortyp VS150-RIC

Bezeichnung	Systemeinstellungen
SE-Messsystem	PAC – DiSP
SE-Sensoren	VS150-RIC
Vorverstärkung	34 dB
Nachweisschwelle	testbedingt
Frequenzfilter	20...400 kHz
Hit Definition:	
Reaktivierungszeit	2 μ s
Hit-Trennungs-Zeit	400 μ s
Wellenformaufzeichnung:	
Abtastrate	5 MHz
Abtastungen pro TR-Set	2048 \equiv alle 409.6 μ s
Pre-Trigger	102.4 μ s
Ortungsspezifikationen:	
Evaluationsschwelle	50 dB _{AE}
Wellengeschwindigkeit	3300 m/s

3 Experimentelle Arbeit

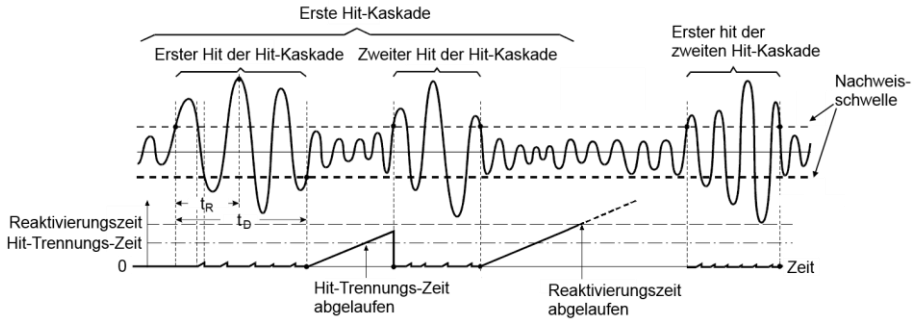


Abb. 3-10: Definition von Reaktivierungs- und Hit-Trennungszeit nach [Vall12a]; mit t_R = Anstiegszeit und t_D = Signaldauer

Verwendete Schallemissionssensoren

Die Auswahl geeigneter SE-Sensoren erfolgt nach Beachtung der zu detektierenden Quellenart und der gewünschten Analysemethodik. Die Argumentation für und wider Resonanzsensoren und breitbandige Sensortypen ist auf S.32 nachzulesen. Aufgrund ihrer Sensitivität und Praxistauglichkeit wurden Resonanzsensoren mit integriertem Vorverstärker der Firma *Vallen Systeme* verwendet [Vall12d]. Deren Spektren haben Spitzen im Bereich ihrer Resonanzfrequenz, weshalb sie auf diese Frequenzen besonders sensibel reagieren. Die Sensorantwort der verwendeten Sensortypen VS150-RIC ist in Abb. 3-11 dargestellt. Der Sensor vom Typ VS150-RIC hat seine Hauptresonanzfrequenz bei ca. 150 kHz und eine Bandbreite von ca. 100 bis 450 kHz. Damit ist er auf Frequenzen empfindlich, welche sowohl von Risswachstum [HaOG02b] als auch Korrosionsquellen [AsSI03] angeregt werden.

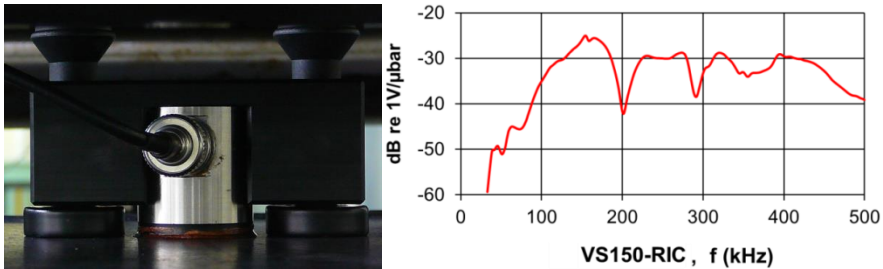


Abb. 3-11: Ein SE-Sensor Typ VS150-RIC, angebracht mit Magnethaltern (links) und Frequenzantwort der verwendeten SE-Sensoren, Herstellerdaten [Vall12d] (rechts)

Der im Sensor eingebaute Vorverstärker (34 dB) verringert Signalverluste durch Vermeidung von zusätzlichen elektronischen Verbindungswegen (Kabel zwischen Sensor und Vorverstärker). Die Sensoren sind größer und somit leichter zu handhaben. Für die akustische Ankopplung des Sensors an das Prüfobjekt wurde die *Hochtemperatur Schmier- und Montagepaste Typ AKS 2000 COPA* verwendet. Die SE-Sensoren wurden mithilfe von Magnethaltern an den Prüfobjekten fixiert.

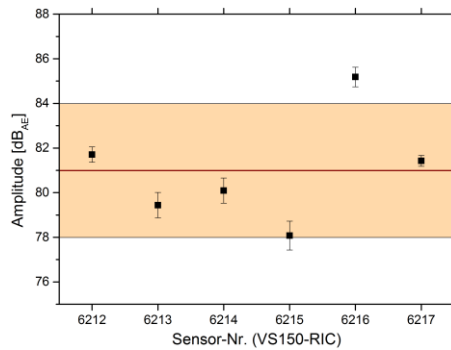


Abb. 3-12: Empfindlichkeit (Mittelwert und Standardabweichung) der verwendeten SE-Sensoren.
Gekennzeichnet ist der Mittelwert aller Sensoren mit einem Bereich von ± 3 dB

Die Empfindlichkeit der verwendeten SE-Sensoren wurde getestet. Auf einem Stahlblech mit den Maßen $1000 \times 1000 \times 1 \text{ mm}^3$ wurden mit einem Quelle-Sensor-Abstand von 200 mm Bleistiftminenbruchtests ($2H/ \varnothing 0,3 \text{ mm}$) durchgeführt. Es wurde für jeden Sensor in acht Tests die Maximalamplitude ermittelt, und dafür der Mittelwert sowie die Standardabweichung berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 3-12 zu sehen: Bei gleichem Sensortyp gibt es zwischen den Sensoren Abweichungen von über 7 dB_{AE}. Die maximale Abweichung eines Sensors vom Mittelwert aller Sensoren beträgt 4 dB_{AE}. Die anderen Sensoren liegen innerhalb eines 3 dB_{AE}-Bereiches vom Mittelwert aller Sensoren.

3.2 Akustische Eigenschaften der Versuchsplatten

Versuche, die sich auf die grundsätzliche Phänomenologie von SE-Quellen, Wellenausbreitung sowie Sensorantwort beziehen, werden im Folgenden besprochen. Dabei wurden zunächst Messungen der Oberflächenverschiebungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer durchgeführt und mit der Signalausgabe eines SE-Sensors verglichen. Des Weiteren wird die frequenzabhängige Wellenausbreitung in der Versuchsplatte in Abhängigkeit der Anregungsart untersucht. Die hier gewonnenen Ergebnisse werden verwendet, um SE-Signale aus den Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrisswachstum bestimmten SE-Quellen aufgrund ihrer Signatur (wie beispielsweise der Frequenz) zuzuordnen zu können.

Messung der Oberflächenbewegungen mittels Laser-Doppler-Vibrometrie

Um das Verständnis der akustischen Wellen in Platten zu verbessern und das Verhalten der SE-Sensoren im Vergleich zu den realen Oberflächenbewegungen zu analysieren, wurden Messungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer durchgeführt. Die Laser-Doppler-Vibrometrie ist eine berührungslose laseroptische Messtechnik, die Oberflächenverschiebungen mit einer Auflösung von wenigen Pikometern abbilden kann. Die Methode ist frequenzneutral und bis zu Frequenzen von 30 MHz anwendbar [BBOW09].

Laser-Doppler-Vibrometer verwenden das Prinzip der optischen Interferenz: aufgrund des Doppler-Effektes verschiebt sich bei einer Bewegung die Frequenz des auf der zu messenden Oberfläche reflektierten Laserstrahls. Aus dieser Frequenzverschiebung lässt sich die Verschiebung der Oberfläche berechnen und kann als Spannungssignal ausgegeben werden. Scanning-Vibrometer können außerdem die dynamische Antwort einer Oberfläche auf eine breitbandige mechanische Anregung wiedergeben und die Oberflächenvibration kartographieren [Shar08, S.384f].

Für diese Arbeit wurden sowohl Punktmessungen als auch Flächenscans durchgeführt. Als SE-Quellen wurden der Bleistiftminenbruchtest (BMT, 2H/ Ø 0,5 mm) für Punktmessungen und ein Ultraschallprüfkopf vom Typ V101-RM der Firma *Olympus* mit einer Resonanzfrequenz von 0,5 MHz für Punktmessungen und Flächenscans verwendet. Als SE-Sensor diente ein 150 kHz Resonanzsensor vom Typ VS-150RIC. Durch Mittelung des Vibrometer-Signals kann das Signal-Rausch-Verhältnis vergrößert werden. Der US-Prüfkopf gibt periodisch Impulse ab. Es entsteht eine sich wiederholende Oberflächenbewegung. Für die Darstellung des Signals werden über 100 US-Impulse gemittelt. Da bei der Verwendung des Bleistiftminenbruchs als SE-Quelle diese jedes Mal per Hand generiert werden muss, wurden hier nur je 10 Impulse für die Darstellung des Ausgangssignals gemittelt.

Werden periodisch gleiche Impulse abgegeben, ist durch ein flächenscannendes Vibrometer die Darstellung der Ausbreitung der Schallwelle in hoher Ortsauflösung möglich. Auch hier werden für jeden Punkt des Rasters über 100 Signale gemittelt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu vergrößern. Ein Beispiel für die Oberflächenbewegung auf einer 1 mm dicken Stahlplatte nach der breitbandigen Anregung durch den Ultraschallpuls ist in *Abb. 3-13* dargestellt. Hier sind, besonders in der Darstellung durch den SE-Sensor, die beiden Wellenmoden zu erkennen: die voraus laufende symmetrische (S_0) und die langsamere antisymmetrische (A_0) Grundmode.

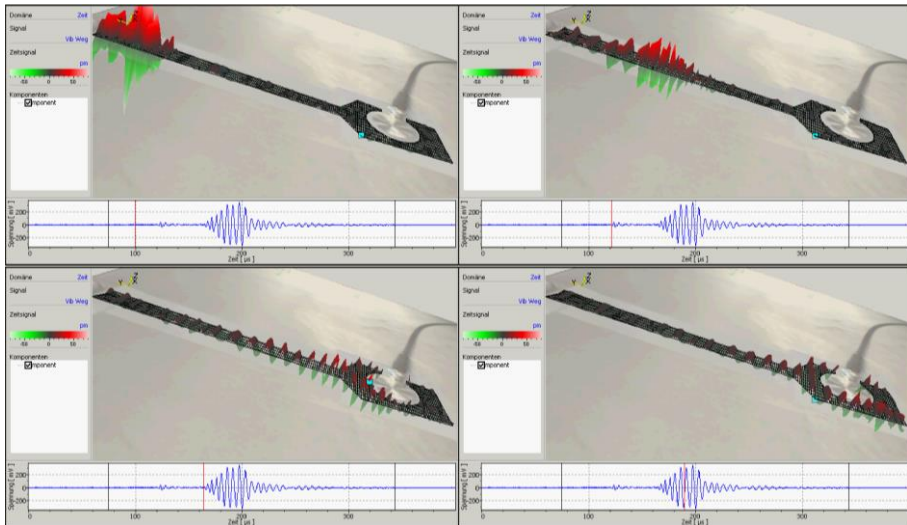


Abb. 3-13: Darstellung der Wellenbewegung auf der Oberfläche einer 1 mm dicken Stahlplatte durch ein flächenscannendes Vibrometer (jeweils oben) und durch einen SE-Sensor (jeweils unten); der rote Zeiger kennzeichnet die Verbindung des Vibrometersignals zum SE-Signal

In Platten größerer Dicke kommen Moden höherer Ordnung gemäß Dispersionsdiagramm (Abb. 2-10) hinzu. Für eine 10 mm dicke Platte, wie sie in weiteren Versuchen verwendet wird, ergeben sich beispielsweise für Frequenzen bis 400 kHz bereits fünf verschiedene Wellenmoden mit jeweils eigenen Intensitäten und Schallgeschwindigkeiten. Ein Beispiel für eine Vibrometermessung an einer 10 mm dicken Platte zeigt Abb. 3-14.

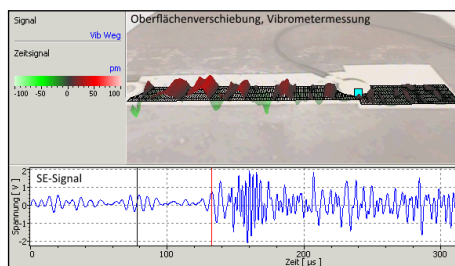


Abb. 3-14: Darstellung der Wellenbewegung auf der Oberfläche einer 10 mm dicken Stahlplatte durch ein flächenscannendes Vibrometer (oben) und durch einen SE-Sensor (unten)

Die Ergebnisse einer Punktmessung nach Anregung durch eine BMT-Quelle sind in Abb. 3-15 dargestellt. Die Auslenkung der Oberfläche nach der Anregung in 5 mm und 200 mm Abstand zum Quellenort sind in schwarz dargestellt sowie das Signal des SE-Sensors in 300 mm Abstand zur Quelle in grün. Der Impuls, der durch den Bleistiftminenbruch entsteht, wird nach 5 mm sehr gut durch das Vibrometersignal dargestellt. Nach 200 mm Abstand verschwindet es jedoch im Rauschen. Ein Nachweis des Impulses durch das Laser-Vibrometer ist nicht mehr möglich. Der SE-Sensor kann den Impuls nach 300 mm detektieren. Die Ankunft der S_0 -Welle, 60 μs nach dem Impuls, und der A_0 -Welle nach etwa 80 μs sind deutlich erkennbar.

3 Experimentelle Arbeit

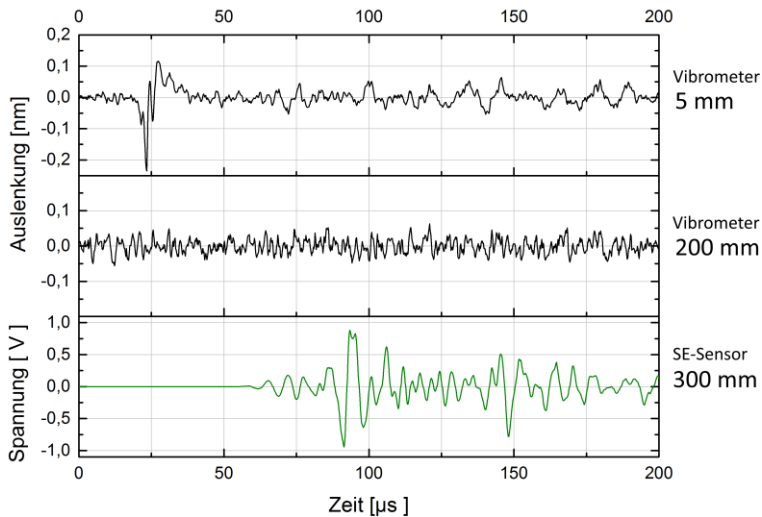


Abb. 3-15: Messung der Wellenbewegung, welche durch einen Bleistiftminenbruch an der Plattenoberfläche entsteht; Abstände jeweils zwischen Quelle und Messpunkt. Darstellungen v.o.: Vibrometermessung in 5 mm Abstand, Vibrometermessung in 200 mm Abstand und Signal des SE-Sensors in 300 mm Abstand

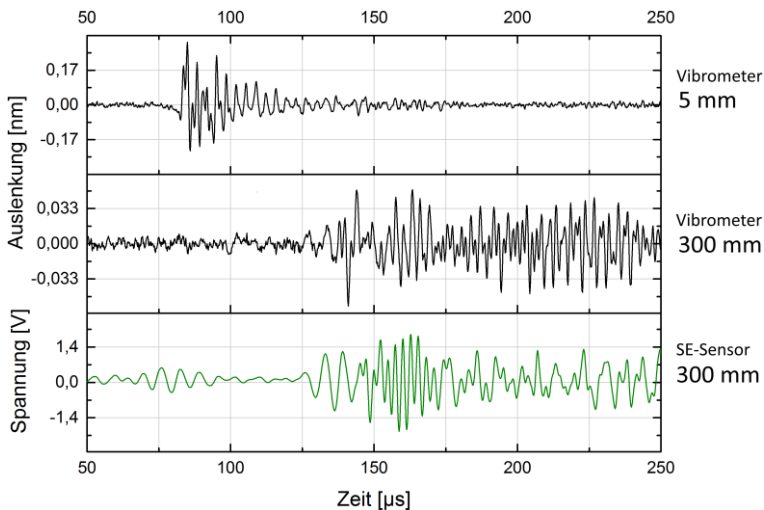


Abb. 3-16: Messung der Wellenbewegung, welche durch einen Ultraschallpuls (0,5 MHz) an der Plattenoberfläche entsteht; Abstände jeweils zwischen Quelle und Messpunkt. Darstellungen v.o.: Vibrometermessung in 5 mm Abstand, Vibrometermessung in 300 mm Abstand und Signal des SE-Sensors in 300 mm Abstand zur Quelle

In Abb. 3-16 sind die Ergebnisse einer Punktmessung nach Anregung durch einen US-Prüfkopf, welcher periodisch Impulse abgibt, dargestellt. Wieder wurden Punktmessungen in Quellennähe und einiger Entfernung zur Quelle durch das Vibrometer durchgeführt. Die maximale Auslenkung in Quellennähe ist ähnlich wie nach einem BMT, das Signal besitzt

jedoch eine größere zeitliche Ausdehnung. Durch die 100-fache Mittelung des Signals kann noch in 300 mm Abstand zur Quelle ein Nachweis des US-Impulses stattfinden. Der Vergleich von Vibrometer- und SE-Signal lässt einen direkten Vergleich zwischen tatsächlicher Auslenkung der Oberfläche und die Umsetzung dieser Auslenkung in ein SE-Signal zu. Aus dem Verhältnis von maximaler Oberflächenverschiebung zu maximalem Spannungswert nach gleichem Quelle-Sensor-Abstand, hier 300 mm, ergibt sich ein Wert von 0,03 nm/V. Von diesem Wert ausgehend können für SE-Messungen mit gleichem Sensortyp die Auslenkung der Oberflächenverschiebungen kalkuliert werden.

An den durchgeführten Punktmessungen zeigen sich die Grenzen der Vibrometermesstechnik: Soll ein nichtperiodischer Impuls gemessen werden, ist dessen Nachweis bereits nach kurzem Abstand nicht mehr möglich. Für die Messung natürlicher, also einmaliger und spontaner, SE-Ereignisse eignet sie sich also nicht.

Für die Auswertung von Schallemissionsmessungen spielt der Frequenzinhalt des Signals eine wichtige Rolle. Es ist bei dem gewählten SE-Sensortyp jedoch auf ein Frequenzband beschränkt. Um zu beurteilen, ob die FFT-Daten dennoch aussagekräftig sind, wird ein Vergleich mit der frequenzneutralen Vibrometermessung durchgeführt. Die Frequenzinformationen werden mithilfe von Fast-Fourier-Transformationen (FFT) gewonnen.

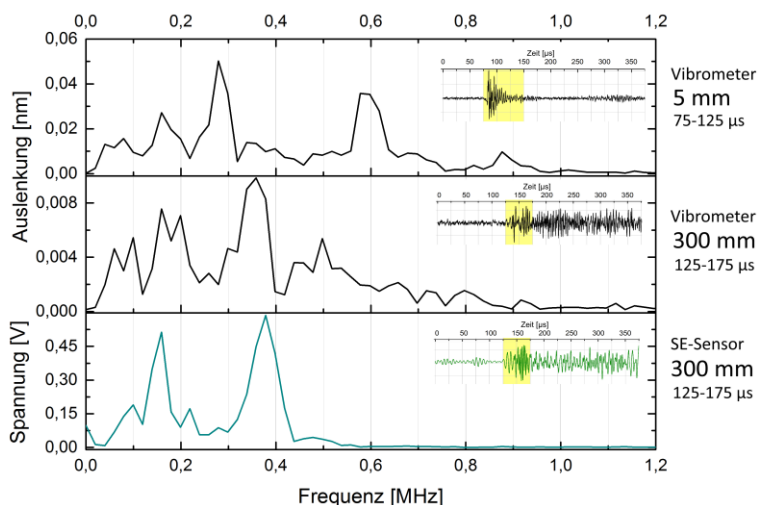


Abb. 3-17: Frequenzspektrum der in Abb. 3-16 dargestellten Signalformen aus Vibrometer- und SE-Messung im Zeitabschnitt nach dem Eintreffen der S_0 und der A_0 Wellenmoden; der gewählte Zeitabschnitt ist in der Signalform gelb gekennzeichnet

Zunächst werden Frequenzinhalte der Oberflächenbewegung nach 5 mm sowie 300 mm erstellt. Letztere wird mit einer SE-Messung im selben Abstand verglichen. Die Darstellungen sind in Abb. 3-17 dargestellt. Der Zeitabschnitt für die FFT wurde so gewählt, dass die Hauptinformation der Signalform dargestellt wird, ohne Reflexionen mit einzubeziehen. Die Zeitabschnitte sind in den Signalformen gelb markiert und am rechten Bildrand jeweils unter Messmethode und Quelle-Sensor-Abstand benannt. Die Vibrometermessungen weisen sowohl nach 5 als auch nach 300 mm Frequenzen bis zu 1,2 MHz auf, mit Hauptanteilen bis zu etwa 700 kHz (dies entspricht der messbaren Bandbreite durch den eingesetzten

Decoder). Die Schallemissionsmessung stellt die auftretenden Frequenzen nur bis 450 kHz dar. Wie auch in der Vibrometermessung im selben Abstand sind zwei Peaks zu erkennen, welche bei 150 kHz und bei 350 kHz liegen.

In *Abb. 3-18* werden ferner die Grundmoden der Lambwellen im Abstand von 300 mm zur Quelle betrachtet. Je nach berechneten Ankunftszeiten der S_0 - und A_0 -Wellenmoden wurden Zeitabschnitte von 125-146 μs bzw. 146-175 μs der Signalformen aus *Abb. 3-16* gewählt. Auch hier kann beobachtet werden, dass höhere Frequenzen nicht durch den SE-Sensor dargestellt werden. Jedoch ist bei beiden Messmethoden sichtbar, dass die Grundmoden der Plattenwellen jeweils eine eigene Frequenzsignatur aufweisen. Die symmetrische S_0 -Mode besitzt laut Vibrometermessung eine Hauptfrequenz von ca. 200 kHz, während die antisymmetrische A_0 -Mode einen Hauptpeak bei ca. 350 kHz aufweist. So lassen sich die Peaks in der Frequenzdarstellung auch in der Gesamtdarstellung in *Abb. 3-17* den beiden Wellenmoden zuordnen.

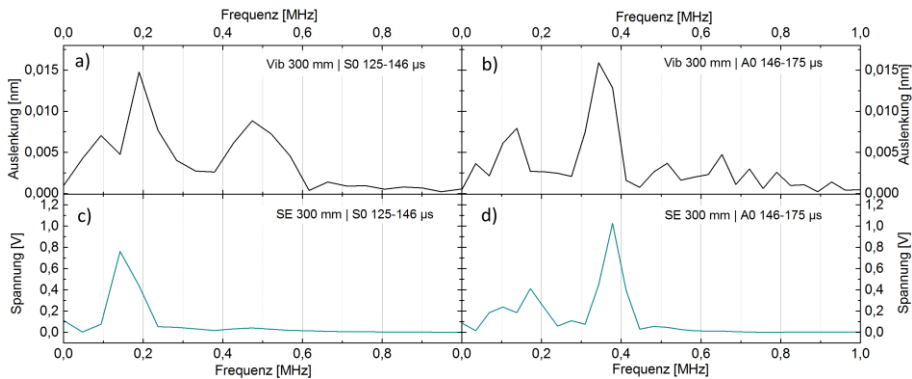


Abb. 3-18: Frequenzspektrum der Signalformen aus Vibrometermessung (schwarz) und SE-Messung (türkis) im Abstand von 300 mm zur Quelle; die Zeitabschnitte wurden so gewählt, dass hauptsächlich die S_0 -Wellenmode (links) bzw. die A_0 -Mode (rechts) betrachtet werden

Als Fazit der hier durchgeführten Frequenzdarstellung kann herausgestellt werden, dass hohe Frequenzen über 400 kHz durch den verwendeten Sensortyp nicht wiedergegeben werden. Die Basisfrequenzen der Grundmoden der Lambwellen – der 200 kHz-Peak erscheint aufgrund der Sensorresonanz bei ca. 150 kHz – können dagegen auch mit dem SE-Sensor nachgewiesen werden. Die Aussagekraft der Frequenzanalyse des verwendeten Sensortyps VS150-RIC kann somit nicht quantitativ sein. Es können jedoch Beobachtungen aus den tatsächlichen Oberflächenbewegungen bestätigt werden, nach denen eine Trennung der Grundmoden aufgrund der Frequenzbetrachtung möglich ist.

Dämpfungs- und Dispersionsverhalten der Versuchsplatten nach in-plane (IP) und out-of-plane (OOP) Anregungen

Schallwellen interagieren mit dem Material, in dem sie sich fortbewegen (vgl. S.28). In diesem Kapitel soll ein Einblick gewonnen werden, inwiefern die Art der Anregung, die Wellenmoden und deren Frequenzen mit der Schallschwächung von Plattenwellen zusammenhängen. Diese Informationen sind umso wichtiger, als das der hier verwendete Aufbau aus Versuchsplatte, SE-Sensor und Messsystem dem der späteren Ermüdungstests

entspricht. Die hier gewonnenen Daten fließen in die Analyse der SE-Signale aus Korrosion und Ermüdungsrisswachstum ein.

Es gibt im Allgemeinen zwei Arten, um durch einen Bleistiftminenbruchtest (BMT) eine akustische Welle anzuregen: Out-of-plane (OOP) und in-plane (IP) (vgl. *Abb. 3-19*). Können diese beiden Anregungsarten anhand der Wellenformen, die sie verursachen, voneinander unterschieden werden, so ist dies ein Hinweis, an welchem Ort sich die Quelle des Signals befindet: an der Oberfläche oder im Inneren der Struktur. Dies spielt bei der Mustererkennung eine Rolle: Oberflächenkorrosion und -risse stellen bevorzugt out-of-plane-Anregungen, tiefere Risse in-plane-Anregungen dar.

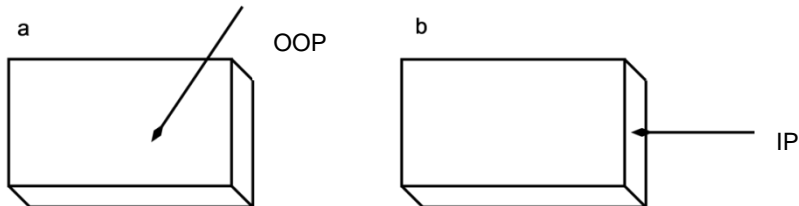


Abb. 3-19: Schematische Darstellung einer a) out-of-plane- (OOP) und b) in-plane- (IP) Anregung

In den folgenden Experimenten wurde eine Stahlplatte $1000 \times 650 \times 10 \text{ mm}^3$ mit Schweißnaht verwendet (Platte 3). Die Schallemission wird mit Sensoren vom Typ VS150-RIC gemessen. Bleistiftminenbrüche ($2H/\varnothing 0,5 \text{ mm}$) wurden verwendet, um akustische Wellen zu erzeugen. Die Schallschwächungskurve wurde aus der Maximalamplitude des SE-Signals aus fünf gemittelten Messpunkten gewonnen. Auch der Einfluss der Schweißnaht auf die Eigenschaften der Wellenausbreitung in der Platte wurde untersucht. Schematische Darstellungen der durchgeführten Versuchsreihen sind in *Abb. 3-20* und *Abb. 3-21* zu sehen. Die in-plane-Anregungen erfolgten in der Mitte des Plattenquerschnittes.

Durch die gleichzeitige Positionierung zweier Sensoren an unterschiedlichen Messpunkten wurde die Gruppengeschwindigkeit der Schallwellen erfasst. Bei einer Nachweisschwelle von $40 \text{ dB}_{\text{AE}}$ konnte bei Abständen von 50 bzw. 200 mm zur Quelle die Geschwindigkeit der S_0 -Wellenmode und bei Abständen von 100 bzw. 300 mm die Geschwindigkeit der A_0 -Mode aus den Ankunftszeitdifferenzen berechnet werden. Sie betragen

$$\begin{aligned} c_{S0} &= 5.240 \text{ m/s} \\ c_{A0} &= 3.280 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (24)$$

und liegen damit im Bereich der Longitudinal- bzw. Transversalwellengeschwindigkeiten in Stählen (5.850 bzw. 3.230 m/s , vgl. *Tab. C-4* in *Anhang C.3*).

3 Experimentelle Arbeit

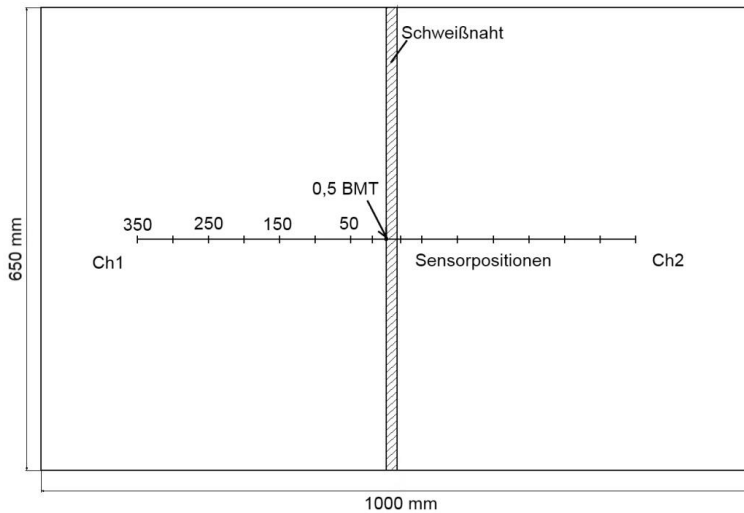


Abb. 3-20: OOP-Anregung durch einen Bleistiftminitentest (BMT) an der Schweißnaht; Striche markieren die Sensorpositionen; gemessen wurde gleichzeitig auf zwei Kanälen, ohne und mit Einfluss der Schweißnaht (Ch1 und Ch2)

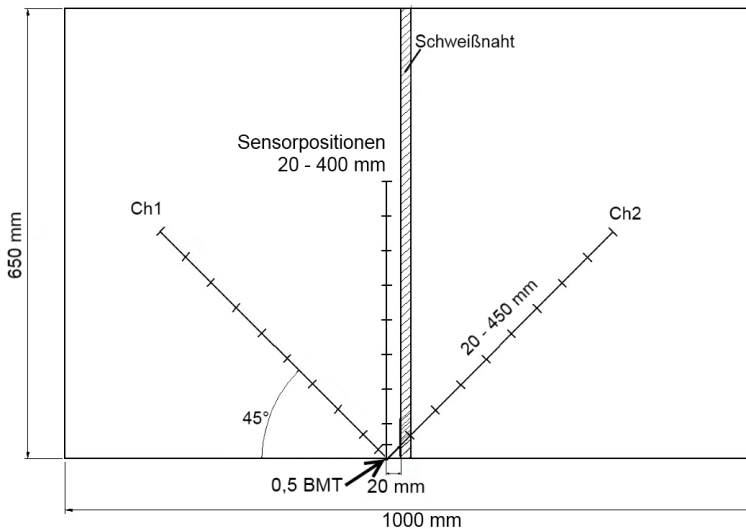


Abb. 3-21: IP-Anregungen vertikal und diagonal zum Plattenrand

Das aus den ermittelten Gruppengeschwindigkeiten erstellte Dispersionsdiagramm ist in Abb. 3-22 dargestellt. Neben Grundmoden der symmetrischen und antisymmetrischen Lamb-Wellen treten im betrachteten Frequenzbereich noch weitere Moden höherer Ordnung auf. Diese transportieren jedoch weniger akustische Energie als die Grundmoden und sind in der Signalform sowie im Wavelet-Diagramm nicht oder nur schwer zu erkennen; deshalb beschränkt sich die Betrachtung hier auf die Grundmoden.

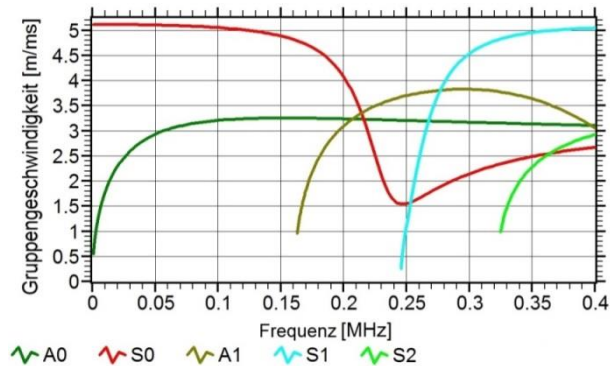


Abb. 3-22: Dispersionsdiagramm für die Versuchsplatte mit der Dicke 10,2 mm und den Wellenmodengeschwindigkeiten nach (24); erstellt mit Vallen Dispersion [Vall12b]

Die Signalformen aus einer Messreihe nach in-plane-Anregung sind in *Abb. 3-23 oben* dargestellt. Mit steigendem Abstand des Sensors von der Quelle verringert sich der Wert der Maximalamplitude aufgrund der Schallschwächung. Ferner zieht sich aufgrund der Dispersion das Wellenpaket auseinander: die Ankunftszeit bei $t = 0$ markiert die Detektion der S_0 -Wellenmode, die Ankunftszeit der A_0 -Mode verschiebt sich relativ dazu aufgrund der geringeren Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Die Amplituden nehmen bei einem Abstand von 300 und 400 mm wieder zu. Der Grund dafür wird in der Überlagerung von Wellenmoden höherer Ordnung vermutet. Reflexionen vom Plattenrand überlagern die A_0 -Mode erst nach einem Abstand von 400 mm.

Erwartungsgemäß verändert sich auch der Frequenzinhalt des SE-Signals mit dem Laufweg der SE-Welle. Dies ist in *Abb. 3-23 unten* dargestellt. Frequenzen über ca. 180 kHz werden mit steigendem Laufweg stark geschwächt. So ist zu beobachten, dass diese ab einem Abstand von 200 mm nicht mehr, oder nur in hohem Maße abgeschwächt, vorkommen. Dagegen findet bei Frequenzen um 150 kHz, der Resonanzfrequenz des verwendeten Sensors, eine sehr geringe Schallschwächung statt.

3 Experimentelle Arbeit

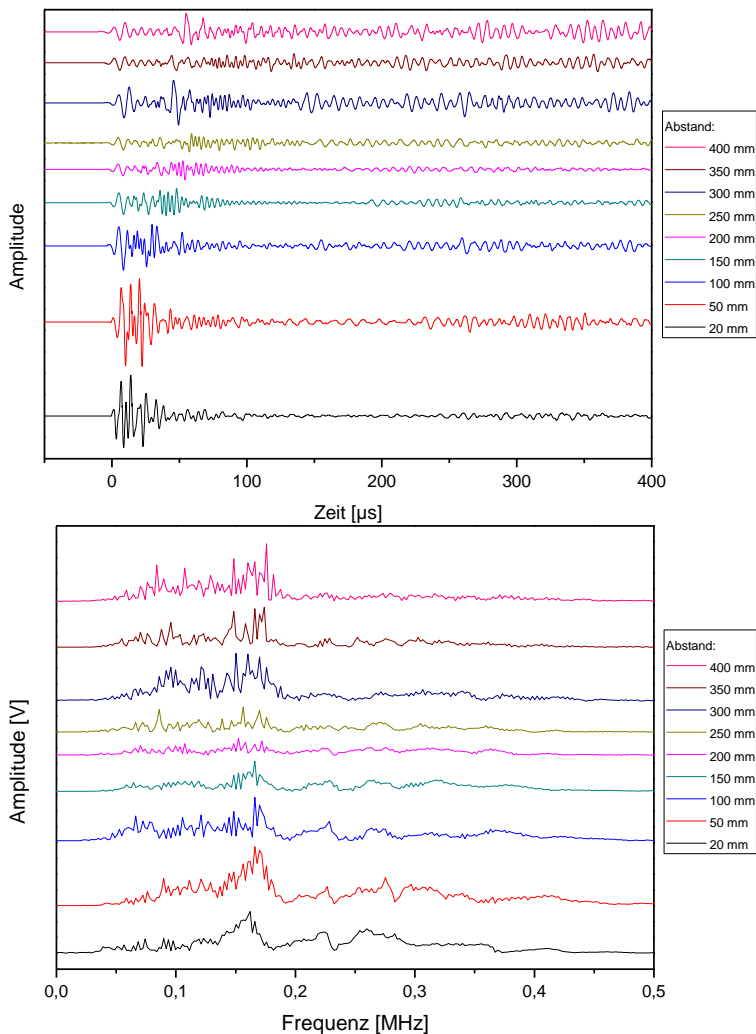


Abb. 3-23: Oben: Signalformen nach IP-Anregung im Abstand von 20 mm (unten) bis 400 mm (oben) von der Quelle; die Amplitude ist in relativen Einheiten dargestellt. Unten: FFT der oben dargestellten Signale

Modenabhängige Schallschwächung

Im Folgenden wird die Schallschwächung abhängig von der Anregungsart für die Grundmoden A_0 und S_0 betrachtet. Signalbeispiele für OOP- und IP-Anregungen mit einem Quelle-Sensor-Abstand von 100 mm sind in *Abb. 3-24* zu sehen. Hierin ist das Auftreten der Wellenmoden S_0 und A_0 gekennzeichnet. Nach einer IP-Anregung zeigen die Moden S_0 und A_0 eine Amplitude und Schallschwächung auf ähnlichem Niveau. Im Gegensatz dazu erzeugt eine OOP-Anregung eine geringe Amplitude des S_0 Modes und eine hohe Amplitude des A_0 Modes. *Abb. 3-25* zeigt die Schallschwächung einer Schallwelle, abhängig von

der Wellenmode und der Wellenanregung. Das Verhältnis von A_0 zu S_0 Mode wird für alle gemessenen Abstände beibehalten.

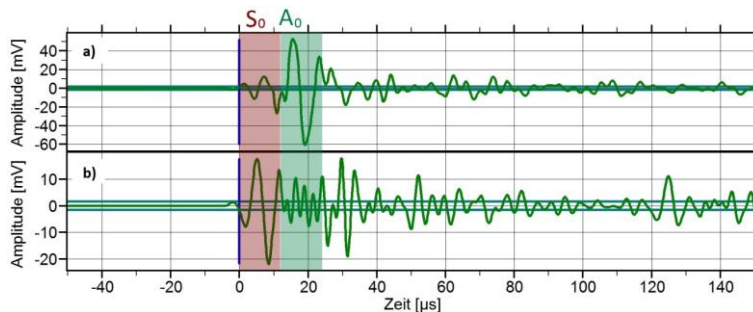


Abb. 3-24: SE-Signale bei einem Quelle-Sensor-Abstand von 100 mm nach a) OOP- und b) IP-Anregung mit Kennzeichnung der Grundmoden S_0 und A_0 (die Moden 1. Ordnung sind aufgrund ihrer geringen Intensität nicht eingezeichnet; in a) ist jedoch die Ankunft der A_1 -Welle kurz vor der A_0 -Welle in der Signalform zu erkennen)

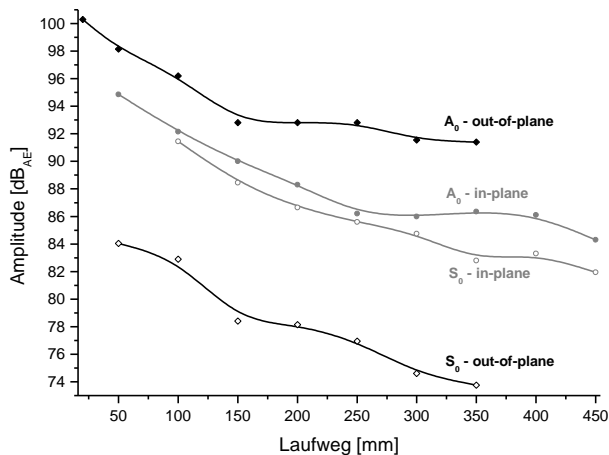


Abb. 3-25: Schallschwächung der Wellenmoden A_0 und S_0 , abhängig von dem Anregungsort

Es ist bekannt, dass S_i -Moden der Lamb-Wellen überwiegend eine Teilchenbewegung in der Ebene, also in-plane, besitzen, während A_i -Moden oft eine Verschiebung senkrecht zur Plattenebene, also out-of-plane, zeigen [SuYe09, S.20]. So werden bei IP-Quellen eher S_i -Moden angeregt, während nach OOP-Quellen eher A_i -Moden angesprochen werden. Genau dieses Phänomen ist hier zu beobachten.

Frequenzabhängige Schallschwächung

Die obere Kurve in Abb. 3-26 zeigt die Schallschwächung des SE-Signals nach einer IP-Anregung. Dieses besitzt nach Systemeinstellung eine Bandbreite von 10 bis 400 kHz. Das Signal erfährt nach 400 mm eine Schallschwächung von etwa 20 dB_{AE} . Die weiteren Kurven zeigen die Schallschwächung in vier Frequenzbändern des Originalsignals. Zu sehen ist zunächst, dass die Schallschwächung der Schallwellen in bestimmten Frequenzbändern nicht proportional zur Schallschwächung des Gesamtsignals ist. Nahe der SE-Quelle

können die fünf Kurven klar voneinander unterschieden werden, während ab einem Abstand von 200 mm nur die Signale in den Frequenzbändern von 10-100 kHz, 200-300 kHz und 300-400 kHz stärker, aber etwa auf demselben Niveau geschwächt werden. Hier zeigt das 100-200 kHz-Signal eine geringere Schallschwächung. Dies ist vermutlich eine Konsequenz des verwendeten SE-Sensors, der eine Resonanzfrequenz von 150 kHz besitzt und bei Frequenzen in diesem Bereich besonders stark angeregt wird (vgl. dazu die Frequenzantwort des Sensors in *Abb. 3-11*).

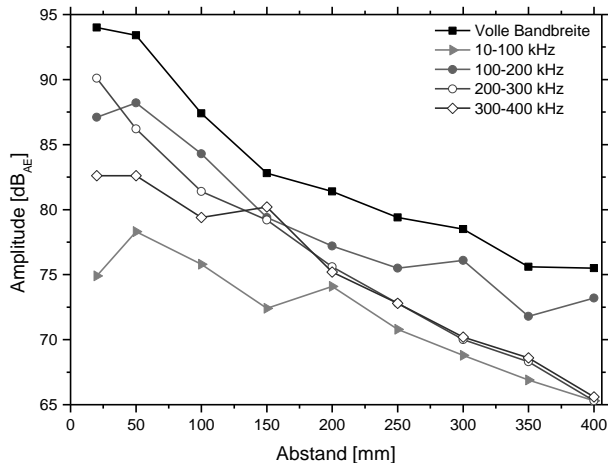


Abb. 3-26: Frequenzabhängige Schallschwächung der Plattenwellen nach IP-Anregung

Es wurden bisher zwei akustische Eigenschaften dargestellt. Zum einen, dass die Anregung der Wellenmoden vom Ort der Quelle abhängig ist. Zum anderen wird das Gesamtsignal, abhängig vom Frequenzinhalt, geschwächt. Signale mit höheren Frequenzen erfahren eine größere Schallschwächung als niederfrequente Signale.

Zeit-Frequenz-Analyse

Anhand einer Wavelet-Analyse einzelner SE-Signale kann gezeigt werden, inwieweit die einzelnen Wellenmoden im zeitlichen Verlauf des Signals durch die Anregungsart und den Abstand von der Quelle zum Sensor beeinflusst werden. Wie in Kap. 2.2 diskutiert wurde, besitzen die Grundmoden die höchsten Energieanteile in der Signalform; je höher die Ordnung der Moden, desto kleiner ist ihr Einfluss auf die Wavelet-Magnitude. Obwohl in der Versuchsplatte und bei Frequenzen bis 400 kHz Moden bis zur 2. Ordnung auftreten (vgl. das Dispersionsdiagramm in *Abb. 3-22*), werden hier allein die Grundmoden (A_0 , S_0) und die Moden 1. Ordnung (A_1 , S_1) dargestellt.

Abb. 3-27 zeigt die Signalformen mit den zugehörigen Wavelet-Diagrammen. In der linken Spalte sind Signale aus out-of-plane-Anregung, in der rechten Spalte aus in-plane-Anregungen im selben Abstand zu sehen. Es wurden Quelle-Sensor-Abstände von 20, 100 und 300 mm gewählt. Dem Wavelet-Diagramm überlagert sind die Dispersionskurven für die Grundmoden der Lamb-Wellen und Wellenmoden 1. Ordnung, um die Modenzugehörigkeit der Zeit-Frequenzdarstellung einordnen zu können. Um einen direkten Vergleich anstellen zu können, wurde der Maßstab der WT-Magnitude in allen Wavelet-Diagrammen

konstant bei einem Maximalwert von 0,4 gehalten. Es ist zu erkennen, dass die OOP-Anregungen stärkere Magnituden besitzen als die IP-Anregungen.

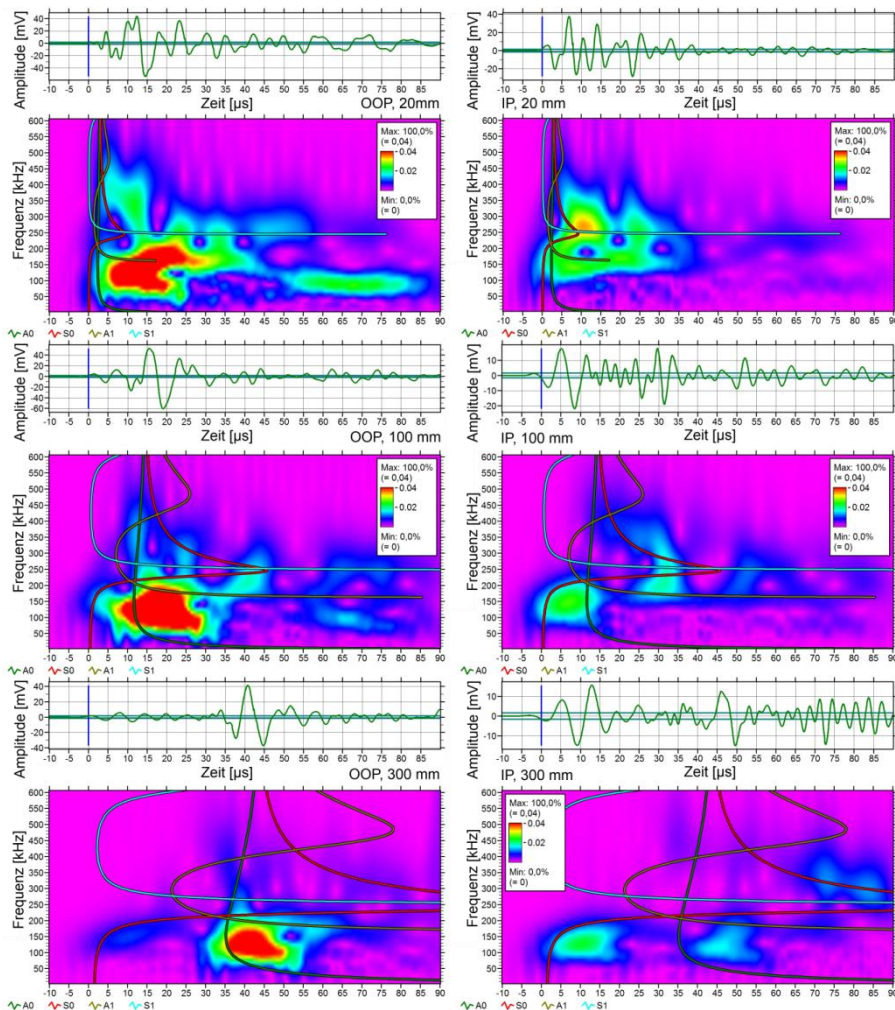


Abb. 3-27: Vergleich von Signalformen und Wavelet-Diagrammen nach out-of-plane-Anregungen (links) und in-plane-Anregungen (rechts) durch BMT in 20, 100 und 300 mm Abstand zum Sensor. Die Farbskala im Wavelet-Diagramm repräsentiert die Wavelet-Magnitude. Der Verlauf der Dispersionskurven der Grundmoden A_0 (grün) und S_0 (rot) sowie der Moden 1. Ordnung A_1 (ocker) und S_1 (türkis) wurde anhand der gemessenen Geschwindigkeiten (24) mit Vallen Wavelet [Vall12e] berechnet

Bei einem geringen Quelle-Sensor-Abstand von 20 mm ist aufgrund der noch nahe beieinander liegenden Moden eine Modentrennung schwer möglich. Im Gegensatz zur IP-Anregung gibt es nach einer OOP-Anregung einen deutlich höheren Anteil niedriger Frequenzen im Bereich zwischen 50 und 150 kHz. Dies ist der A_0 -Mode geschuldet, welche bei einer OOP-Anregung deutlich dominanter ist. Bei der IP-Anregung dagegen liegt das

3 Experimentelle Arbeit

Maximum der WT-Magnitude bei einer Frequenz von 250 kHz und somit in dem Bereich, in welchem S_0 - und S_1 -Moden einen Schnittpunkt bilden. Die A_0 -Mode hat dagegen wenig Gewicht.

Nach einem Abstand von 100 mm in der mittleren Darstellung ist der Dispersionseffekt deutlich zu sehen. Die Grundmoden gewinnen an Abstand zueinander, eine Zuordnung der WT-Werte zu den Dispersionskurven gewinnt an Bedeutung. Die OOP-Anregung zeigt im Bereich der S_0 -Welle kleine WT-Magnituden, während die A_0 -Mode weiterhin sehr stark bleibt. Bei der IP-Anregung ist die S_0 -Mode eher stark, die A_0 -Mode eher schwach. Moden 1. Ordnung sind in beiden Anregungsarten gleichermaßen vorhanden.

Die Unterschiede in den Grundmoden sind auch in der Signalform gut zu erkennen und werden mit steigendem Quelle-Sensor-Abstand deutlicher. Bei einem Abstand von 300 mm bleibt nach der OOP-Anregung der hohe Energiegehalt der A_0 -Mode erhalten, während die S_0 -Mode sehr schwach ist. Nach der IP-Anregung sind beide Grundmoden beinahe gleich stark. Hier wird deutlich, dass eine Modentrennung besser wird, je größer der Quelle-Sensor-Abstand ist. Dies gilt allerdings nur bis zu einem Abstand, bei dem die Wellenmoden noch nachweisbar sind.

Für die Klassifizierung lässt sich zusammenfassen, dass eine Wavelet-Analyse einen deutlichen Fingerabdruck von OOP und IP Quellen ermöglicht - auch mit den verwendeten Resonanzsensoren. Ferner wird deutlich, dass der Quelle-Sensor-Abstand eine wichtige Rolle bei der Erstellung eines solchen Fingerabdruckes spielt.

3.3 Erzeugung von Schallemissionsquellen und Aufzeichnung von SE-Signalen

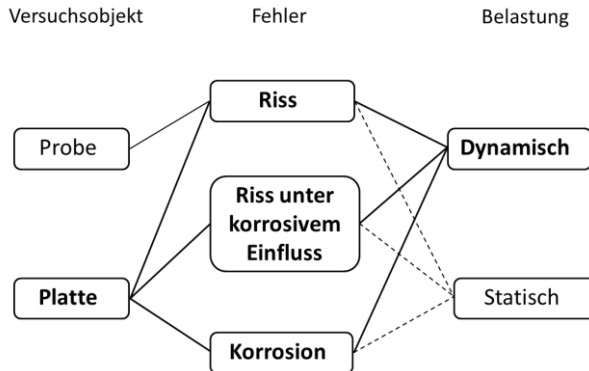


Abb. 3-28: Übersicht der Versuche zur Erzeugung von Schallemissionsquellen unterschiedlicher Schadensmechanismen

Ziel der folgenden Versuchsreihen ist es, Schallemissionssignale aus definierten Quellen aufzunehmen. Diese Quellen sollen aus Schadensmechanismen stammen, welche durch definierte Schädigungen im Material erzeugt werden. Die Schadensmechanismen sind Ermüdungsrisswachstum, Ermüdungsrisswachstum unter Einfluss von Korrosion und reine Oberflächenkorrosion. Abb. 3-28 gibt eine Übersicht der durchgeführten Versuche unter Berücksichtigung der Fehler- und Belastungsart. Hierbei handelt es sich jeweils um Versuchsreihen, um eine hohe Anzahl an klassifizierbaren SE-Signalen zu erhalten.

Tab. 3-5: Verwendete Platten und erzeugte Schadensmechanismen

Platten-Nr.	Abmaße Länge x Breite x Höhe [mm ³]	Schadensmechanismus	
		Ermüdungsriss- wachstum	Ermüdungsriss- wachstum und Korrosion
1 (4 Proben)	250 x 40 x 10	x	
2 (4 Proben)	155 x 40 x 10	x	
3	1000 x 650 x 10	x	
4	1000 x 650 x 10		x
5	1000 x 560 x 10	x	x

Das Hauptaugenmerk der Versuche liegt auf dynamischen Tests an Versuchsplatten. Es wurden jedoch auch Versuche an kleineren Proben durchgeführt, um erste Daten zum Schallemissionsverhalten zu sammeln und bruchmechanische Prozesswerte für die Auslegung der Plattentests festzustellen. Die Versuche an Probekörpern sind in *Anhang D.1* beschrieben. Dynamische Belastungen verursachen Ermüdungsrisse; deshalb ist ihre Untersuchung für die Anwendung der Schallemissionsprüfung als Methode der (permanenten) Zustandsüberwachung von Bauteilen hier im Vordergrund. Jedoch lassen sich Risse und Korrosion durch eine SEP auch in statischen Prüfungen nachweisen. Um einen qualitativen Vergleich zwischen Ergebnissen von Zustandsüberwachungen im Bauteilbetrieb und statischen Prüfungen, beispielsweise wiederkehrenden Überdruckprüfungen an Gasbehältern, zu erlangen, wurden auch statische Prüfungen an den Versuchsplatten durchgeführt (Ergebnisse und Beschreibung siehe *Anhang D.6*).

Eine Übersicht der Versuchsplatten und ihrer Verwendung gibt *Tab. 3-5*. Die Platten 1 und 2 dienten als Material für die kleineren Proben. Während auf Platte 3 und 4 jeweils Ermüdungsrisswachstum mit oder ohne Korrosionseinfluss stattfand, wurden auf Platte 5 alle Schadensmechanismen parallel induziert. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Schadensmechanismen bei gleichen Belastungsbedingungen.

Positionen von Sensoren und Schädigungen an den Versuchsplatten

In Versuchsreihen an den Platten wurden folgende Szenarien bearbeitet:

- **Zyklische Belastung** (Simulation einer SE-Zustandsüberwachung)
 - ohne Schädigung
 - eines korrodierten Bereiches
 - eines Ermüdungsrisses mit/ ohne Korrosionseinfluss
- **Statische Belastung** (Simulation einer SE-Druckprüfung, s. *Anhang D.6*)
 - eines trockenen korrodierten Gebietes
 - von korrodierten und nicht korrodierten Ermüdungsrissen
- Korrosion **ohne Belastung** (Korrosionsüberwachung)

Als **Korrosionsmedium** diente eine NaCl-Lösung mit einer Konzentration von 50 g NaCl pro Liter entionisiertem Wassers. Dieses Medium wurde nach [Dine06b] erstellt und besitzt bei Raumtemperatur eine Leitfähigkeit von höchstens 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Die Korrosionsbereiche wurden durch eine dünne Umrandung mit Abdichtmasse von ihrer Umgebung isoliert.

Auf drei Versuchsplatten wurden jeweils unterschiedliche Schädigungsmechanismen aufgebracht. Maße und Sensorpositionen der Versuchsplatten 3 und 4 sind in *Abb. 3-29* schematisch dargestellt. Die Sensoren sind in Dreiecksanordnung um die Schadensstelle angebracht. Diese Anordnung ermöglicht die besten Ortungsergebnisse in Verbindung mit dem verwendeten hyperbolischen Ortungsalgorithmus (vgl. *Anhang C.4*). Ein Sensor jeden Typs ist außerhalb der Auflager positioniert; so können auf der jeweiligen Seite die SE-Quellen aus der Auflagerreibung definiert geortet und separiert werden. Der Starterkerb liegt in der Mitte der Platte im Übergang vom Schweißgut zur Wärmeeinflusszone. Auf der Platte 4 befindet sich der Starterkerb in einem Korrosionsbereich, um Risswachstum unter korrosivem Einfluss zu generieren.

Die Sensor- und Schädigungsanordnung auf Versuchsplatte 5 ist in *Abb. 3-30* dargestellt. Die drei Schädigungsmechanismen Ermüdungsrisswachstum, Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss und Oberflächenkorrosion wurden parallel in unterschiedlichen Bereichen der Platte erzeugt. Vor dem Aufbringen des Korrosionsmediums wurde die Platte angeschwungen, bis nach etwa 500.000 Lastwechseln Ermüdungsrisse von 51 mm Länge an den Starterkerben K1 und K2 vorhanden waren. Daraufhin konnte das Korrosionsmedium über 36 Stunden in den Bereichen K2 und KB einwirken, während sich die Platte im Ruhezustand befand. Der relevante Versuchsteil beginnt nach dem Einwirken des Korrosionsmediums.

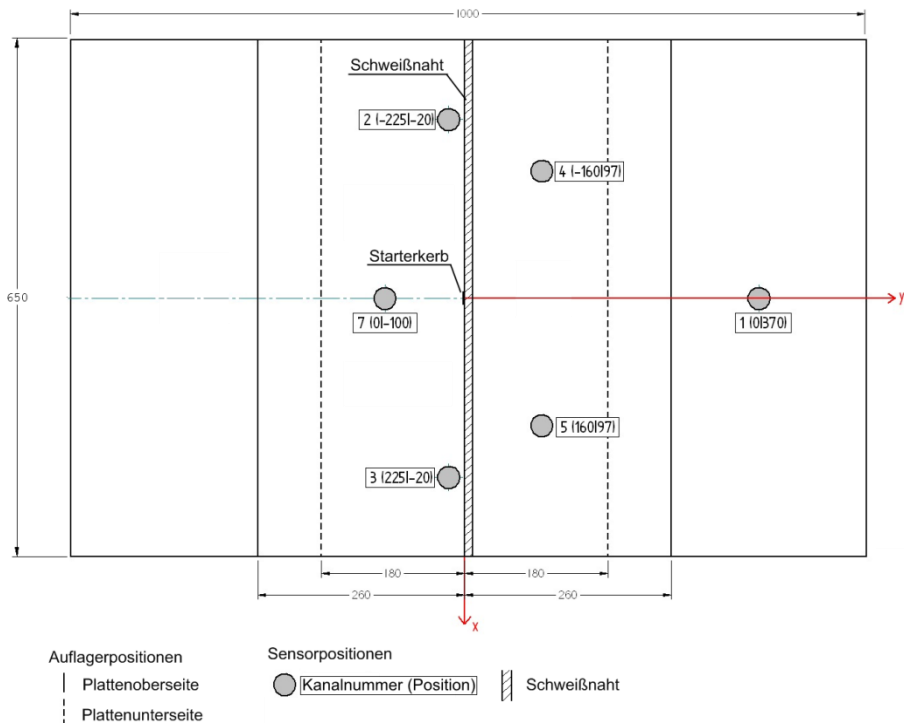


Abb. 3-29: Abmaße und Sensorpositionierung auf den Versuchsplatten 3 und 4

Konzept zur Versuchsführung

Die Versuchsergebnisse sollen ermöglichen, mehrere prinzipielle Fragestellungen zu beantworten:

- **Nachweisbarkeit:** die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen und Korrosion durch SEP bei verschiedenen Rissgrößen und Belastungsverhältnissen (definiert durch den zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK),
- **Bezug zur Bruchmechanik:** die Korrelation von akustischen (SE) und bruchmechanischen Parametern,
- **Mustererkennung:** Klassifizierbarkeit der SE-Signale und ferner die
- **Praxisrelevanz:** Aussage der Versuchsergebnisse für die technische Anwendung/ Prüfpraxis.

Um diese Fragestellungen zu beantworten, wurden an den drei Versuchsplatten die Belastungen wie folgt durchgeführt: Nach dem Anschwingen bis zur Anrissbildung bei allen Platten folgte bei Platte 3 eine Versuchsfolge, bei der Lastamplitude und Mittenlast konstant blieben, während bei den Platten 4 und 5 der Spannungsintensitätsfaktor konstant gehalten wurde. Die Versuchsdurchführung an den Platten wird im Folgenden stichpunktartig erläutert und ist in *Abb. 3-31* und *Abb. 3-32* als Zusammenhang aus Lastfolge und Risslänge graphisch dargestellt.

3 Experimentelle Arbeit

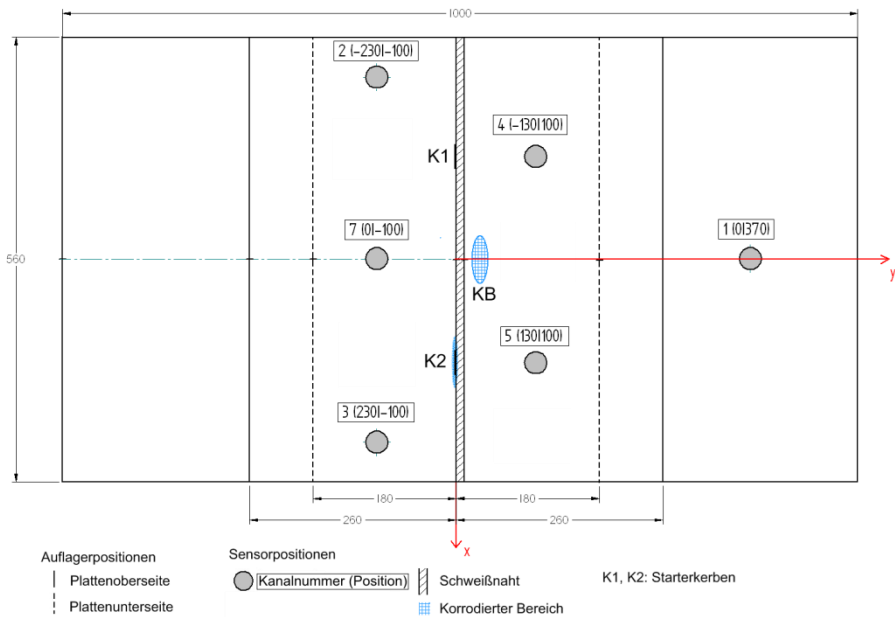


Abb. 3-30: Abmaße und Sensorpositionierung auf Versuchsplatte 5; Initialisierung dreier Schadensmechanismen: Ermüdungsrisswachstum im Kerb 1 (K1), Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss im Kerb 2 (K2) und Oberflächenkorrosion im Korrosionsbereich (KB)

Versuchsführung Platte 3 (reines Ermüdungsrisswachstum)

- Anschwingen bis zum Anriss
- Nach Anrissbildung erfolgt Reduzierung der Mittenlast
- Last konstant bis Versuchsende

Versuchsführung Platte 4 (korrodiertes Ermüdungsriss) und 5 (drei Schadensmechanismen)

- Anschwingen bis zum Anriss
- Nach der Anrissbildung wird ΔK konstant gehalten (Last wird nach signifikantem Risswachstum verringert)
 - Es sollen so wenig Veränderliche wie möglich vorhanden sein, um eine Änderung im SE-Verhalten auf eine Veränderliche zurückführen zu können
 - ΔK sowie da/dN sind konstant
 - Einzige Veränderliche: Rissgröße
- ΔK wird in drei Stufen immer wieder reduziert. Bei unterschiedlichen Risslängen werden SE-Signale aufgenommen; dabei findet kein oder nur geringes Risswachstum statt. Die Spannungen ergeben sich aus
 - $\Delta K/2$,
 - $\Delta K/4$,
 - $\Delta K/8$.

Die Reduzierung des Spannungsintensitätsfaktors dient hauptsächlich dem Praxisbezug: es soll zeigen, ob ein Rissnachweis auch bei geringen Beanspruchungen möglich ist.

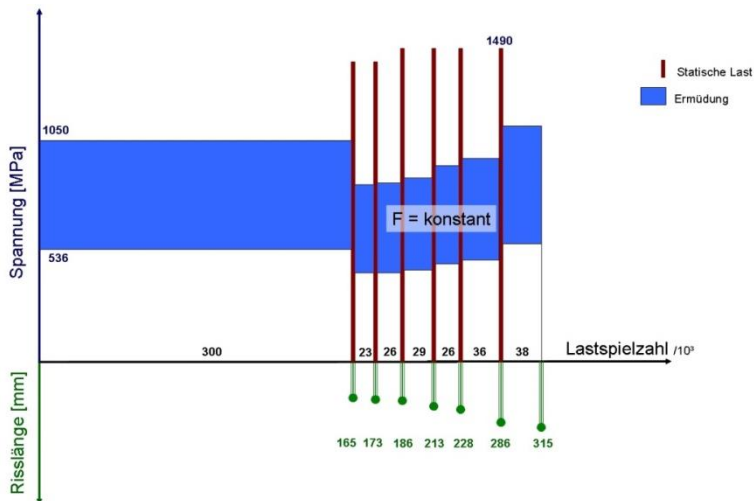


Abb. 3-31: Spannungsbelastung (blau) und Risslänge (grün) der Versuchsplatte 3 über der Lastspielzahl (in Abschnitten der Versuchszyklen angegeben); die ersten 300.000 Lastwechsel sind die Zeit des Anschwingens

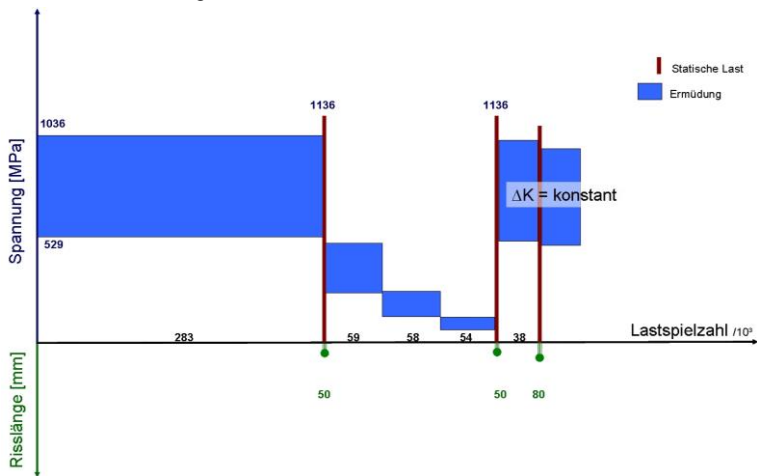


Abb. 3-32: Belastungsfolge (blau) und Risslänge (grün) der Versuchsplatte 4 über der Lastspielzahl; es sind nur die ersten Zyklen dargestellt

Datenfilterung

Die Auswertung der SE-Messungen wurde mit der Software *VisualAE* [Vall12a] durchgeführt. Es wurden Softwarefilter eingebaut, um Nutzsignale von Störsignalen und primäre von sekundären SE-Ereignissen unterscheiden zu können. Als Nutzsignale werden zunächst jene Signale eingestuft, welche den Eingangsfiler passieren, dessen Parameter in

Tab. 3-6 dargestellt sind (vgl. auch S.34 zur Definition der SE-Parameter). Die Ortungsunsicherheit (LUCY) wird in *Anhang C.4* im Rahmen der Ereignisortung definiert.

Tab. 3-6: Eingangsfilter für SE-Signale

Evaluationschwelle	$A_{TH,E}$	=	50	dB _{AE}
Signaldauer	t_D	>	3	μs
Anstiegszeit	t_R	>	1	μs
Counts	N_C	>	2	
Ortungsunsicherheit	-1	<	LUCY	< 50 mm

Um den SE-Ereignissen ihre Schadensmechanismen zuzuweisen, werden Ortungsfilter verwendet. Mit einem Abstand von 50 mm zu den jeweiligen Schädigungsorten (Risspitzen/ Korrosionsgrenzen) werden Ellipsen gebildet. Per Definition wird zunächst jedes Ereignis, das in einer Ellipsenfläche lokalisiert wird, dem jeweiligen Schadensmechanismus zugeordnet. Ein Beispiel hierfür ist in *Abb. 3-33* zu sehen. Jeder Punkt repräsentiert ein geortetes SE-Ereignis: das Signal hat alle Vorgaben des Eingangsfilters erfüllt und wurde von mindestens drei Sensoren erfasst und geortet. Die Farbe spiegelt die Größe der distanzkorrigierten Amplitude, also der errechneten Amplitude am Ort der SE-Quelle, wider.

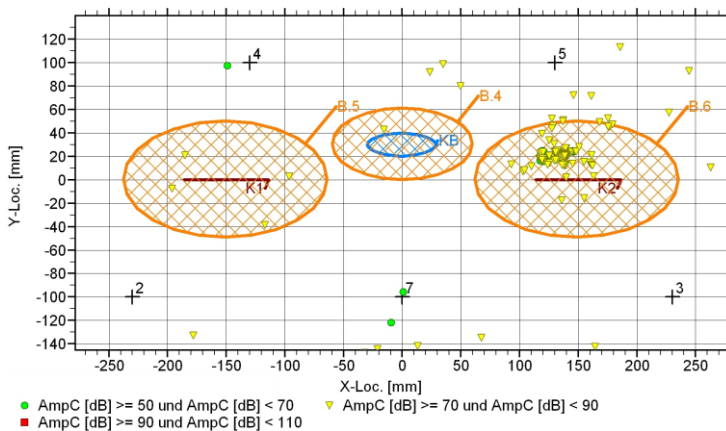


Abb. 3-33: Beispiel für die Ortung der Riss- bzw. Korrosionsbereiche durch die SEP an Platte 5; zu sehen ist ein Versuchsabschnitt von 50.000 Lastzyklen und einem Risswachstum von 73 auf 95 mm. K1: nicht korrodierter Riss, K2: korrodierter Riss, KB: Korrosionsbereich; die Kreuze markieren die Sensorpositionen, die Farbauflösung die distanzkorrigierte Amplitude der SE-Ereignisse. Die Ellipsen dienen der Zuordnung der SE-Ereignisse zum Schädigungsort: Ereignisse, die im Bereich B.5 lokalisiert werden, werden automatisch dem nicht-korrodieren Riss K1 zugeordnet

SE-Ereignisse werden so erkannt und den Schädigungsbereichen zugeordnet. Es folgt eine spezifische Zuordnung in primäre und sekundäre SE-Quellen für die Ermüdungsrisse. Diese erfolgt aufgrund des zeitlichen Auftretens der SE-Ereignisse im Kraftverlauf. Die Belastung wird als externer Parameter während der SE-Messung aufgezeichnet und der aktuelle Kraftwert jedem SE-Ereignis zugeordnet. Primäre SE-Ereignisse stehen direkt mit Prozessen der Rissöffnung und des Rissfortschrittes in Verbindung. Diese Prozesse finden bei hohen, steigenden Belastungen statt. Sekundäre Prozesse, wie das Aneinanderreiben

der Rissufer, dagegen finden statt, wenn der Riss sich schließt, also bei sinkender Belastung. Ein Beispiel aus einer SE-Messung ist in *Abb. 3-34* zu sehen. Der Kraftverlauf ist über der Zeit dargestellt. Bei dem durchgeführten 4-Punkt-Biegeversuch werden Druckkräfte gemessen, weshalb in dieser Darstellung die größte Belastung den höchsten negativen Wert besitzt, hier -60 kN. Die SE-Ereignisse, welche in diesem Bereich auftreten, finden mit -52 kN bei hoher, ansteigender Belastung statt, und sind somit der Gruppe der primären SE-Ereignisse zuzuordnen

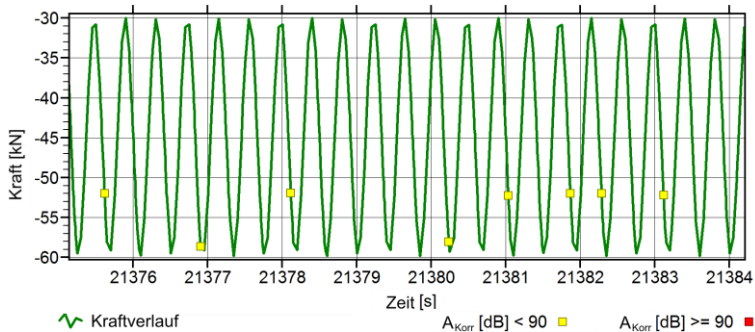


Abb. 3-34: Kraftverlauf bei einem Ermüdungsversuch; die SE-Ereignisse treten bei hoher, ansteigender Belastung auf und werden deshalb als primäre SE-Ereignisse eingestuft

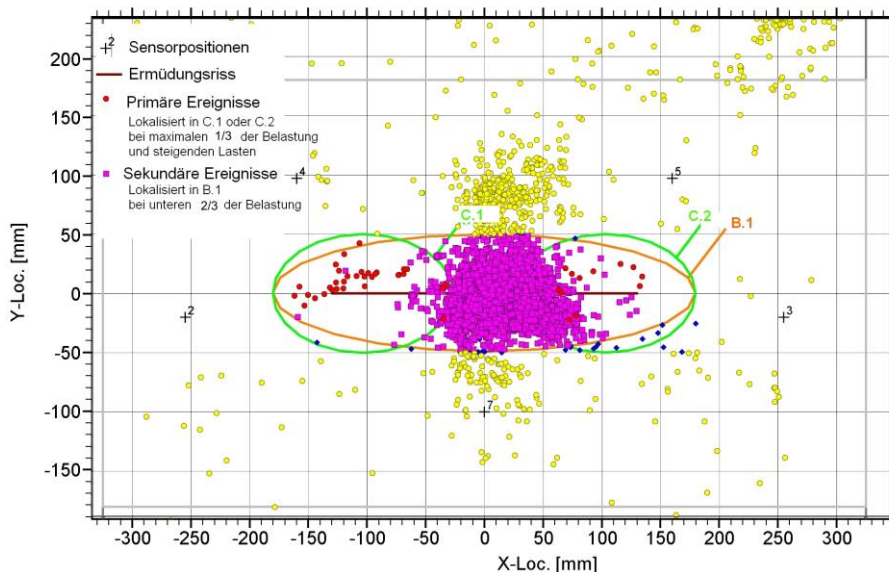


Abb. 3-35: Ortungsgrafik, bei welcher primäre Ereignisse (rot), sekundäre Ereignisse (pink) und Störgeräusche (gelb) nach einer Filterung farblich voneinander getrennt wurden. Versuch mit 46.000 Lastzyklen und einem Risswachstum von 243 auf 260 mm in Platte 4 (korrodierter Riss); blau markierte Ereignisse liegen zwar innerhalb der Ortungselipsen, passen jedoch aufgrund ihres Auftretens im Belastungsbereich nicht in die jeweilige Signalgruppe und werden den Störgeräuschen zugeordnet

Für die Einteilung in primäre SE-Ereignisse wird festgelegt, dass sie innerhalb des oberen Drittels der doppelten Belastungsamplitude und ausschließlich bei wachsender Belastung stattfinden, während sekundäre SE-Ereignisse innerhalb der unteren 2/3 der doppelten Belastungsamplitude vorkommen.

Die diskutierten Überlegungen eignen sich für die Bewertung von Oberflächenrissen. Sobald jedoch ein durchgehender Riss entsteht, verändert sich das Entstehungsverhalten der SE-Ereignisse: auch bei maximalen Belastungen finden sekundäre SE-Ereignisse statt, da nun die unteren Risskanten aneinandergedrückt werden, und so Schallemission entsteht. SE-Ereignisse aus diesem Prozess würden nach der oben beschriebenen Methode fälschlich den primären SE-Ereignissen zugeordnet werden. Deshalb wird oberhalb einer definierten Länge bei Durchbruch des Risses (160 mm in diesem Versuch) eine verfeinerte Lokalisierungszuordnung verwendet. Ausgangsrissslänge und maximale Rissgröße innerhalb eines Versuchsabschnittes werden als Eckpositionen für Ellipsen um die Rissspitzen verwendet, die ab dem Durchbruch für die Zuordnung zu primären SE-Ereignissen verwendet werden. Als Beispiel sind die grünen Ellipsen C.1 und C.2 in Abb. 3-35 zu sehen. Die Ortung des Rissbereichs zeigt einen Versuchsabschnitt von 46.000 Lastzyklen und ein Risswachstum von 243 auf 260 mm. C.1, C.2 und B.1 sind die Ellipsen, mit Hilfe derer die SE-Ereignisse primären (aktueller Rissfortschritt) bzw. sekundären (Rissuferreibung) Schadensquellen zugeordnet werden. Ihre Hauptscheitel besitzen einen Abstand von 50 mm zu den Rissspitzen. Sie werden bei Risswachstum angepasst.

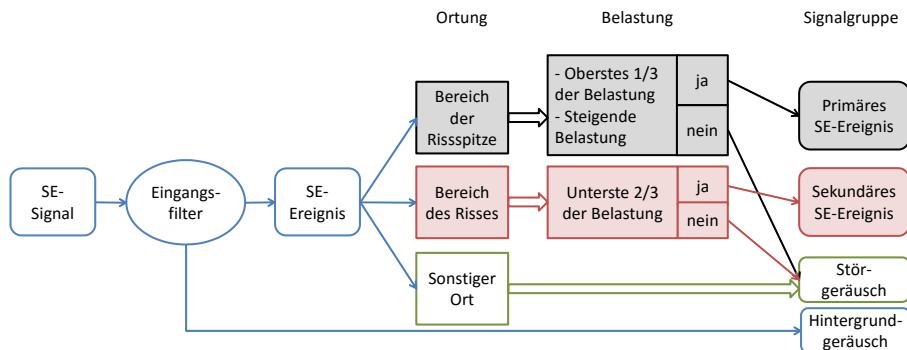


Abb. 3-36: Flussdiagramm der Datenfilterung eingehender SE-Signale in primäre SE-Ereignisse, sekundäre SE-Ereignisse oder Schallemissionsgeräusche

Ein Flussdiagramm des gesamten Datenfilterungsprozesses ist in Abb. 3-36 dargestellt. Ein eingehendes SE-Signal soll der Signalgruppe der primären SE-Ereignisse, der sekundären SE-Ereignisse oder den Schallemissionsgeräuschen (Störgeräusche und Hintergrundgeräusche) zugeordnet werden. Zunächst entscheidet der Eingangsfilter (vgl. Tab. 3-6), ob es sich um ein SE-Ereignis oder ein Hintergrundgeräusch (Nutz- oder Störsignal) handelt. Darauf folgt anhand der definierten Ortungs- und Belastungsgrenzen die Einteilung in die Signalgruppen.

Fehlerquellen bei der Signalzuordnung

Sekundäre Effekte werden fälschlich als primäre SE-Ereignisse eingeordnet, wenn bei wachsender Belastung Partikel im Rissspitzenbereich eingeklemmt werden und zu Schal-

emission führen. Dieser Effekt tritt insbesondere bei korrodierten Rissen auf. Gleiches gilt für Randgebiete der Risspitzen-Ortungselipsen. Bei einem Durchbruch der Platte werden Reibeffekte bei maximaler Belastung durch Zusammendrücken der unteren Risskante erzeugt und so als primäre SE-Ereignisse deklariert. Werden mehrere Schadensmechanismen ortsnahe auf gemeinsamer Versuchsplatte induziert, kann durch Ortungsungenauigkeiten eine Einsortierung in eine falsche Schadensklasse stattfinden. Gerade der korrodierte Riss erzeugt eine Vielzahl an SE-Ereignissen, die sich offensichtlich weit über seine eigene Ortungselipse erstreckt. Dieses Problem kann durch die Applikation eines Ortungsunsicherheitsfilters (LUCY-Filter) eingedämmt werden.

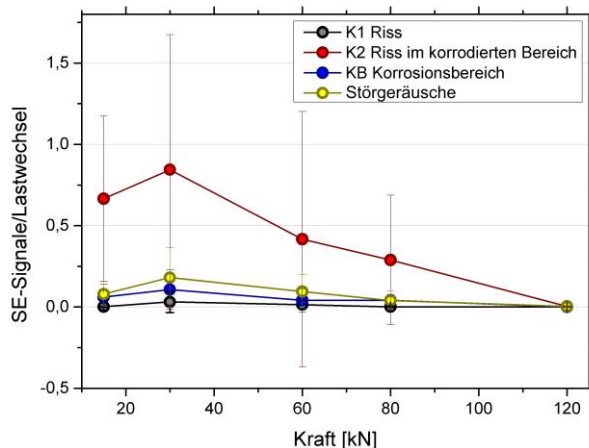


Abb. 3-37: Mittelwerte für die SE-Ereignisse pro Lastwechsel mit Standardabweichungen (Balken) in Abhängigkeit von der Mittellast der Ermüdungsversuche an Platte 5 für den nicht korrodierten Riss (schwarz), den korrodierten Riss (rot), den Bereich mit Oberflächenkorrosion (blau) und das Störgeräusch (gelb)

Ein Beispiel hierfür bieten die Ergebnisse in *Abb. 3-37*. Hier sind die Anzahl der SE-Ereignisse pro Lastwechsel in Abhängigkeit von der Belastungsgröße Kraft dargestellt. Risswachstum findet erst bei einer Mittellast von 60 kN statt; alle kleineren Belastungen können daher nur sekundäre Ereignisse widerspiegeln. Zu sehen ist, dass bei kleinen Kräften ein besonders hoher mittlerer SE-Output mit sehr großer Streuung für den korrodierten Riss zu verzeichnen ist. Dies ist allein auf Reibeffekte zurückzuführen, welche bei kleinen Kräften besonders hoch sind, da der Riss nicht so weit auseinandergedrückt wird und die Rissflanken in ständigem Kontakt stehen. Dies hat ferner Auswirkungen auf die anderen definierten SE-Quellen. Ist eine Quelle sehr stark, werden in der Ortung vermehrt Ereignisse außerhalb der definierten Ortungselipsen aufgefunden, die dann einer falschen Quelle zugeordnet werden. *Abb. 3-37* zeigt auch, wie wichtig die sekundären SE-Quellen für die Nachweisbarkeit von Fehlstellen sind und dass der Nachweis auch bei kleinsten Belastungen erfolgen kann.

Die hier diskutierten Fehleinordnungen haben Einfluss auf die durchgeführte Mustererkennung. Die Anzahl der falsch eingeordneten Signale ist unbekannt; sie können Anteil an Fehluordnungen bei der Mustererkennung besitzen. Bei einer Gesamtmenge von rund

3 Experimentelle Arbeit

50.000 SE-Signalen wird ihr Einfluss für große Signalklassen für statistisch unbedeutend eingestuft, für kleine Klassen können sie jedoch von Bedeutung sein.

4 Analyse der Schallemissionssignale

An drei Versuchsplatten wurden die Schadensmechanismen des alleinigen Ermüdungsrisswachstums, des Ermüdungsrisswachstums unter Einfluss von Korrosion sowie der Oberflächenkorrosion erzeugt. Die Schallemission, die von diesen Mechanismen generiert wird, wurde aufgenommen und soll in diesem Kapitel betrachtet werden. Dass ein Schadensmechanismus verschiedene Arten von SE-Signalen erzeugt, wird in *Kapitel 4.1* dargestellt. Welche dies sind, zeigen parametrische und Spektralanalysen. Eine Analyse der Bruchflächen (*Abb. 4-1*), die die Schadensmechanismen visualisieren und zuordnen, befindet sich in *Anhang D.2*.



Abb. 4-1: Bruchflächen der Platte 5, Randbereich; Oben: ohne und unten: mit Korrosionseinfluss

Ein Bezug zwischen SE-Parametern und bruchmechanischen Kennwerten wird in *Kapitel 4.2* hergestellt. Hier wird aufgezeigt, unter welchen Bedingungen die einzelnen Schadensmechanismen zu nachweisbaren SE-Quellen werden und wie mikroskopische Bruchvorgänge sich auf die Schallemissionssignale auswirken.

Einen Schwerpunkt stellt die Klassifizierung der SE-Signale dar. Es wird davon ausgegangen, dass die erzeugten Schadensmechanismen SE-Signale erzeugen, die sich voneinander unterscheiden. In *Kapitel 4.3* wird versucht, diese These zu belegen. Dazu werden frequenzbasierte sowie parameterbasierte Methoden der Mustererkennung verwendet, um auf Schadensmechanismen basierte Signalklassen zu trennen.

4.1 Schallemissionsereignisse durch Korrosion und Ermüdungsrisswachstum

Schallemission durch Korrosion

In diesem Abschnitt soll beispielhaft ein Korrosionsversuch an der ruhenden Platte besprochen werden. *Abb. 4-2* zeigt den Trocknungsprozess des Korrosionsmediums innerhalb einer Umrandung aus Knetdichtung. Dieser dauert etwa 18 Stunden, innerhalb derer an die 700 SE-Ereignisse detektiert werden. Die SE-Ereignisse sollen hier betrachtet und analysiert werden.

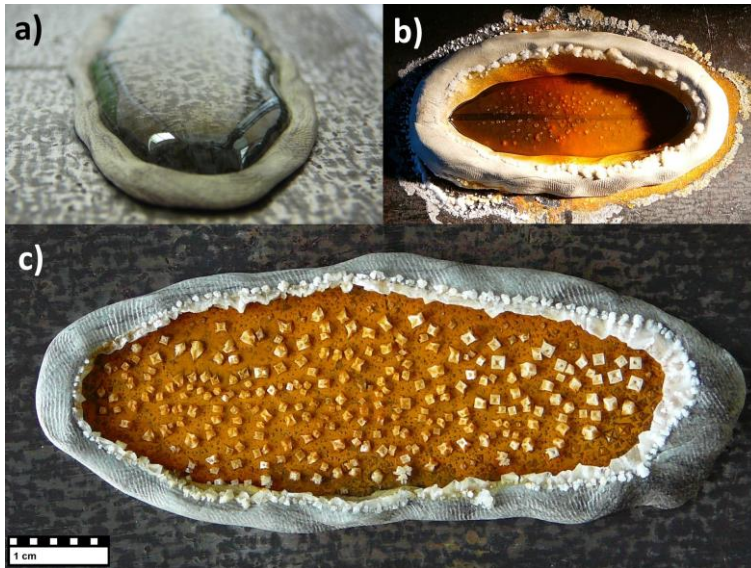


Abb. 4-2: Verlauf des Korrosionsprozesses innerhalb von 18 Stunden. a) zu Versuchsbeginn, b) nach 13 Stunden, c) im ausgetrocknetem Zustand



Abb. 4-3: Mikroskopische Aufnahme einer korrodierten Fläche

Abb. 4-4 zeigt die kumulierten SE-Ereignisse sowie die distanzkorrigierte Maximalamplitude über die gesamte Versuchsdauer. Die Nachweisschwelle kann mit 32 dB_{AE} niedriger gesetzt werden, als bei den bewegten Versuchen, da keine regelmäßigen Störgeräusche auftreten. Sehr viele Ereignisse treten in den ersten fünf Stunden des Korrosionsversuches

auf; Ereignisse mit dem höchsten Energieanteil in der 2. und 3. Stunde. Dies ist in *Abb. 4-5* zu sehen, in der die Betrachtung der SE-Ereignisse in einstündigen Abschnitten erfolgt. Die Energie der SE-Signale nimmt im logarithmischen Diagramm nach der dritten Stunde stetig ab. Im gesamten Korrosionsversuch treten Schwerpunktfrequenzen von 90 bis 380 kHz auf. Das Maximum liegt bei 175 kHz. Die große Anzahl der SE-Ereignisse, ihre hohen Energien und Amplituden machen die Detektion des Korrosionsbereiches in den ersten fünf Stunden nach Einsetzen der Korrosion am wahrscheinlichsten.

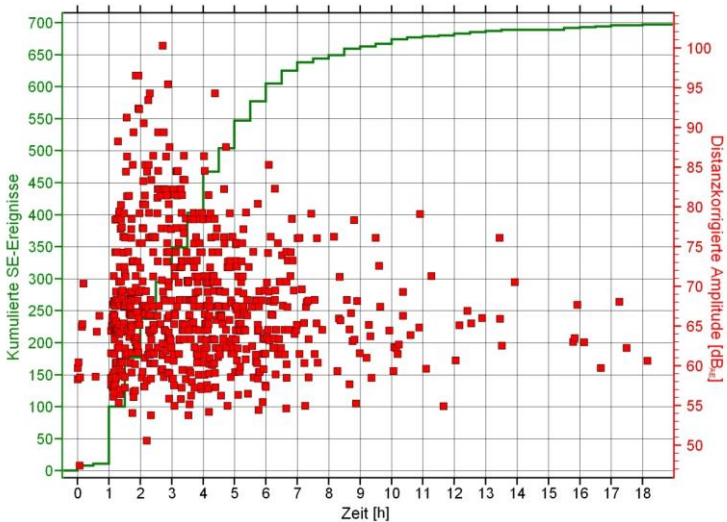


Abb. 4-4: Kumulierte SE-Ereignisse und distanzkorrigierte Amplitude eines Korrosionsversuches über 18 Stunden. Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

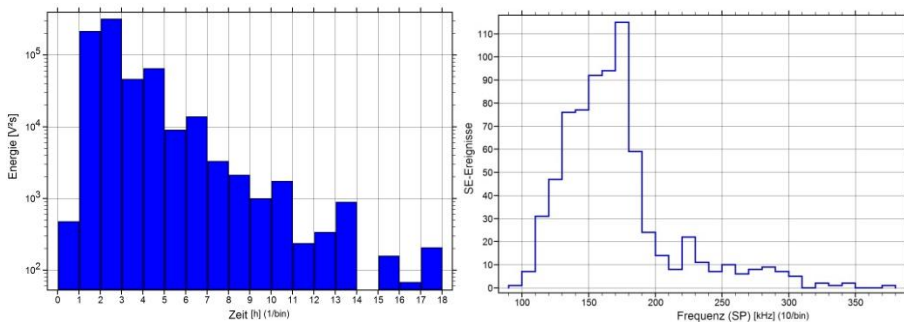


Abb. 4-5: Links: Energie der SE-Ereignisse je Stunde im 18-stündigen Korrosionsversuch, logarithmischer Maßstab. Rechts: Verteilung der Schwerpunktfrequenz aller SE-Ereignisse

Die Verteilung der Schwerpunktfrequenz der SE-Ereignisse je Stunde über der Versuchszeit ist in *Abb. 4-6* dargestellt. Es ist zu beobachten, dass Frequenzen über 250 kHz allein in der ersten Versuchshälfte, vermehrt in den ersten drei Stunden, zu finden sind. In der zweiten Versuchshälfte finden wenige SE-Ereignisse statt; die Frequenz dieser Ereignisse liegt jeweils zwischen 100 und 200 kHz. Um die Versuchsstadien, die sich hier bereits

4 Analyse der Schallemissionssignale

abzeichnen, unterschiedlichen SE-Quellen zuordnen zu können, wurde in *Abb. 4-7* die Frequenz über der Amplitude abgebildet.

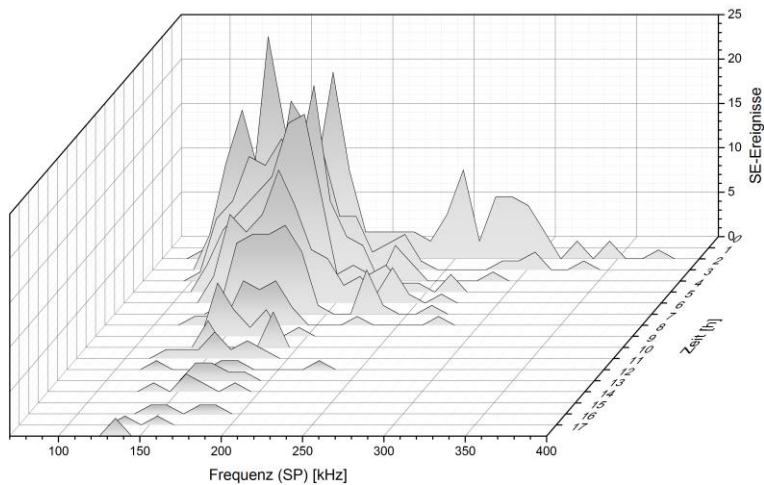


Abb. 4-6: Verteilung der Schwerpunktfrequenz von SE-Ereignissen je Stunde im 18-stündigen Korrosionsversuch

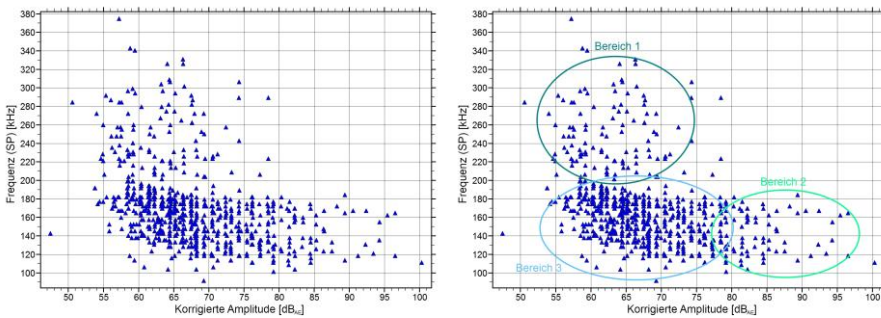


Abb. 4-7: Schwerpunktfrequenz im Verhältnis zur korrigierten Amplitude im Korrosionsversuch. Rechts: Suche nach unterschiedlichen SE-Quellmechanismen, Einteilung in die Bereiche 1-3

In der Darstellung lassen sich drei Bereiche unterscheiden: **Bereich 1** zeichnet sich durch sehr hohe Frequenzen bei eher geringen Amplituden aus und tritt, wie in *Abb. 4-6* zu sehen, zeitlich in den ersten 5 Stunden des Versuchs auf. Wie in Kap. 2.1 über Korrosionsquellen diskutiert, wurden dem elektrochemischen Prozess der Auflösung des Metalls SE-Signale mit Frequenzen zwischen 250 und 300 kHz zugeordnet. Das trifft auch hier zu und passt zum zeitlichen Eintreten dieses Effektes zu Korrosionsbeginn.

Bereich 2 besitzt sehr hohe Amplituden über 80 dB_{AE} bei Frequenzen zwischen 100 und 200 kHz. Auch diese lassen sich zeitlich der ersten Versuchshälfte zuordnen. Phänomenologisch handelt es sich wohl um die Ablagerung der Korrosionsprodukte auf dem Stahlbauteil und die damit verbundenen lokalen plastischen Verformungen. Durch keinen anderen Effekt ließen sich solch hohe Amplituden erklären. Es mögen bereits Schichtbrüche an getrockneten Rändern eintreten.

Bereich 3 beinhaltet den Großteil der SE-Ereignisse mit niedrigen Amplituden und geringen Frequenzen, die während der gesamten Versuchsdauer auftreten. Als Quellmechanismen für diesen Bereich verbleiben sodann: Bläschenbildung, Bildung von Salzkristallen und der Bruch dünner Schichten. Lichtmikroskopische Aufnahmen einer getrockneten korrodierten Oberfläche mit ausgebildeten Salzkristallen sind in *Abb. 4-3* zu sehen. Beispiele für SE-Signale im Zeit- und Frequenzbereiche aus den gekennzeichneten Bereichen 1, 2 und 3 bieten *Abb. 4-8*, *Abb. 4-9* und *Abb. 4-10*.

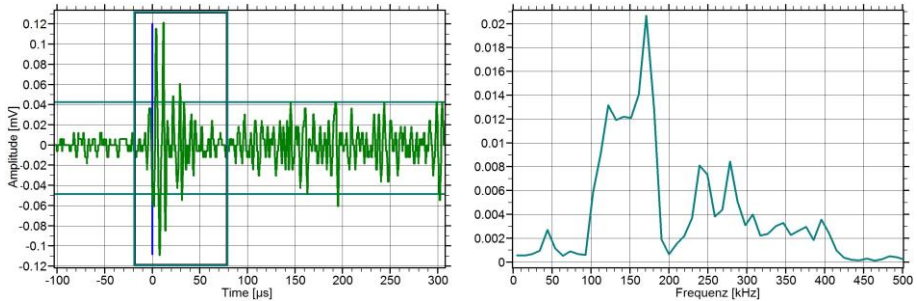


Abb. 4-8: Beispiel eines SE-Signals mit zugehörigem Spektrum aus dem Bereich 1. $A_{Korr} = 60 \text{ dB}_{AE}$,
 $f_{SP} = 236 \text{ kHz}$, $f_{max} = 170 \text{ kHz}$. Aufnahmezeit: $t = 2,4 \text{ h}$

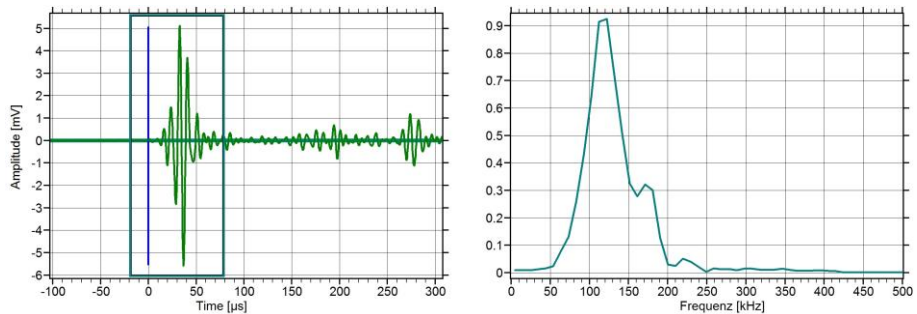


Abb. 4-9: Beispiel eines SE-Signals mit zugehörigem Spektrum aus dem Bereich 2. $A_{Korr} = 93 \text{ dB}_{AE}$,
 $f_{SP} = 121 \text{ kHz}$, $f_{max} = 120 \text{ kHz}$. Aufnahmezeit: $t = 2,3 \text{ h}$

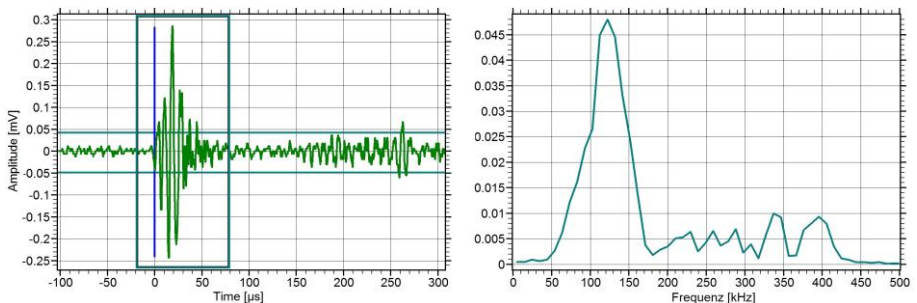


Abb. 4-10: Beispiel eines SE-Signals mit zugehörigem Spektrum aus dem Bereich 3. $A_{Korr} = 63 \text{ dB}_{AE}$,
 $f_{SP} = 143 \text{ kHz}$, $f_{max} = 120 \text{ kHz}$. Aufnahmezeit: $t = 2,7 \text{ h}$

Zyklische Beanspruchung eines korrodierten Gebietes

Abb. 4-11 zeigt ein typisches SEP-Ortungsdiagramm nach zyklischer Belastung der Platte 4 vor der Rissinitiierung. Dargestellt ist die x-y-Ebene der Platte mit einem Korrosionsbereich in der Plattenmitte. In Richtung der z-Achse ist die ortsabhängige Summe der korrigierten Amplituden aufgetragen (mit hohen Amplitudensummen in rot und kleinen in grau). Die Auflagerrollen verursachen durch Reibung an der Platte einen Hauptanteil der SE-Ereignisse. Sie sind durch die Lokalisierung deutlich den Positionen der Auflager zuzuordnen und somit als Hintergrundgeräusche zu identifizieren. Ferner ist die korrodierte Fläche in Plattenmitte durch eine Anzahl von SE-Signalen zu erkennen.

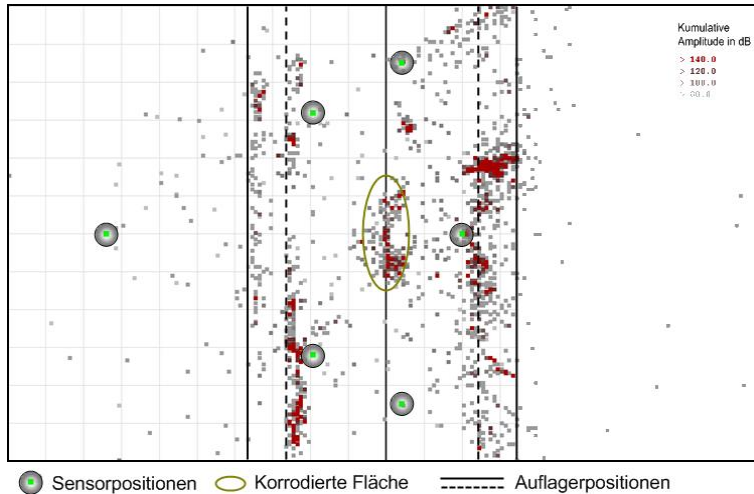


Abb. 4-11: Lokalisierungsdiagramm nach zyklischer Belastung der Platte.

Die SE-Ereignisse eines Korrosionsprozesses im Ruhezustand werden mit einem korrodierten Gebiet unter zyklischer Belastung verglichen. Die Korrosionsgebiete sind bei Belastung stets mit Korrosionsmedium benetzt, so dass eine trockene Korrosionsfläche nur im Randbereich entsteht. Eine Trocknung wie bei der oben beschriebenen Oberflächenkorrosion im Ruhezustand setzt also nur partiell ein.

Abb. 4-12 zeigt einen Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Amplitude und der Schwerpunktsfrequenz der vom Korrosionsprozess auf der ruhenden Platte und unter zyklischer Belastung aufgezeichneten Signale. Um eine Vergleichbarkeit für die spätere Mustererkennung herzustellen, wurde auch bei der Korrosion im Ruhezustand eine Evaluationsschwelle von 50 dB_{AE} eingesetzt. Diese ist ebenfalls für den Einsatz während einer Zustandsüberwachung realistisch. Beim Korrosionsprozess treten sowohl ein größerer Signalanteil mit höheren Amplituden, als auch höheren Frequenzen auf. Dies weist darauf hin, dass für eine Korrosion im Ruhezustand und die zyklische Belastung jeweils unterschiedliche Quellmechanismen für die Entstehung der Schallemission verantwortlich sind. Während dies für die Korrosion im Ruhezustand die oben besprochenen Mechanismen sind, steht bei der Korrosion unter zyklischer Belastung der Bruch von Rostschichten im Vordergrund.

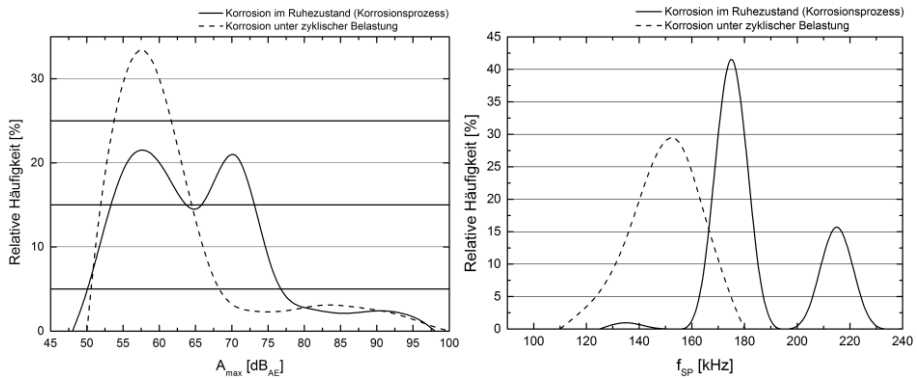


Abb. 4-12: Häufigkeitsverteilung der Maximalamplitude A_{max} und der Schwerpunktsfrequenz f_{SP} der bei Korrosion im Ruhezustand der Platte und unter zyklischer Belastung gemessenen SE-Signale (Messungen an Versuchsplatten 4 und 5)

Schallemission beim Ermüdungsrisswachstum

Die Schallemissionsquellen beim Ermüdungsversuch wurden in Kapitel 2.1 beschrieben und lassen sich reduzieren auf Mikrorissereignisse als primäre SE-Quellen und Reibereignisse als sekundäre SE-Quellen. Der Fokus bei der Betrachtung der Ermüdungsversuche liegt in der Differenzierung von SE-Signalen aus nicht-korrodiertem und korrodiertem Riss zum einen, und von primären und sekundären SE-Quellen zum anderen. Viele SE-Quellen können mithilfe von licht- und rastermikroskopischen Aufnahmen visualisiert werden. Diese Bruchflächenanalyse, zu der auch Schlibfbilder der Rissflanken zählen, sind in *Anhang D.2* dargestellt. So wird beispielsweise deutlich, dass das Risswachstum für den verwendeten Feinkornstahl transkristallin, also durch die Gefügekörner hindurch, verläuft.

Ein direkter Vergleich der Schadensmechanismen erschließt sich aus der Analyse der SE-Ereignisse an Platte 5. Hier fanden Risswachstum ohne und mit korrosivem Einfluss sowie die Oberflächenkorrosion auf derselben Platte statt. *Abb. 4-13* und *Abb. 4-14* zeigen die Entwicklungen der Signalstärke der SE-Ereignisse dieser Mechanismen im Vergleich zum Rissverlauf. Dabei besitzt die Signalstärke der SE-Ereignisse des korrodierten Ermüdungsrisses einen Gesamtwert, der mehr als eine Größenordnung höher ist, als beim Riss ohne Korrosionseinfluss. Auffällig ist außerdem, dass trotz makroskopisch scheinbar stetigem Risswachstum die SE-Ereignisse der Risswachstumsmechanismen kaskadiert auftreten. Dies erklärt sich aus der Entstehung der auftretenden SE-Quellen. Einige SE-Quellen sind aktiv, führen jedoch zu keinen nachweisbaren Ereignissen. Eine Quelle muss genügend akustische Energie produzieren, um Signale mit Amplituden zu erzeugen, die die jeweilige Nachweisschwelle überschreiten. Solche Quellen bleiben dann einige Zeit aktiv, bis ihre Energie erschöpft ist. In dieser Zeit wird oft eine hohe Anzahl an SE-Ereignissen erzeugt. Dieses Phänomen führt zu den Stufen in der Darstellung aufsummierter SE-Ereignisse, besonders bei sekundären Quellen. Hier ist die Ursache häufig ein Partikel, der sich zwischen den Bruchflächen befindet und zerrieben wird.

4 Analyse der Schallemissionssignale

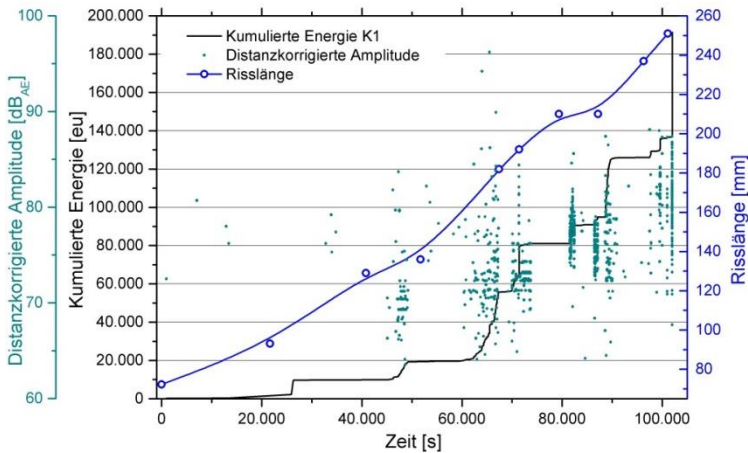


Abb. 4-13: Risswachstum (blau) des nicht korrodierten Ermüdungsrisses an Platte 5 im Vergleich mit der Signalstärke (schwarz) und der distanzkorrigierten Amplitude der SE-Signale (türkis); 1 eu \equiv 1nVs

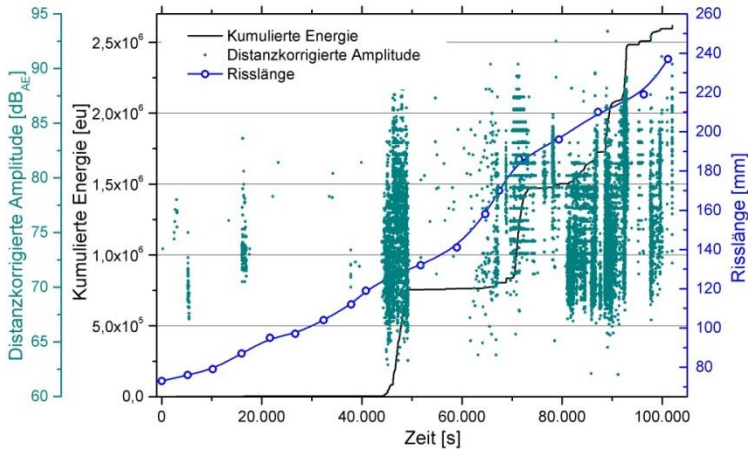


Abb. 4-14: Risswachstum (blau) des korrodierten Ermüdungsrisses an Platte 5 im Vergleich mit der Signalstärke (schwarz) und der distanzkorrigierten Amplitude der SE-Signale (türkis); 1 eu \equiv 1nVs

Der Verlauf des Ermüdungsversuches von Platte 3 ist in *Abb. 4-15* dargestellt. In schwarz ist die Risswachstumskurve des Versuches zu sehen. Der Versuch lässt sich grob in einen Bereich mit geringer ($da/dN = 5,7 \cdot 10^{-5}$ mm/LW) und einen mit hoher Risswachstumsrate ($da/dN = 1,4 \cdot 10^{-3}$ m/LW) unterteilen. In grün dargestellt sind die Anzahl der primären SE-Ereignisse, welche an den Rissspitzen auftreten, und in rot deren Amplitude am Ort der Quelle (distanzkorrigierte Amplitude). Während im Versuchsteil mit geringer Wachstumsrate wenig bis keine primären SE-Quellen detektiert werden, kann bei einer hohen Risswachstumsgeschwindigkeit auch ein hoher Anteil an primärer Schallemission vermerkt werden. Zum Nachweis primärer Risswachstumsquellen muss also erst ein schneller und genügend großer Mikrorissfortschritt erfolgen. Ein Blick auf *Abb. 4-16* 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 können kaum Ereignisse bei geringer Risswachstumsrate detektiert werden; denn mit der Gewinnung neuer Bruchfläche wächst der Anteil der sekundären Ereignisse.

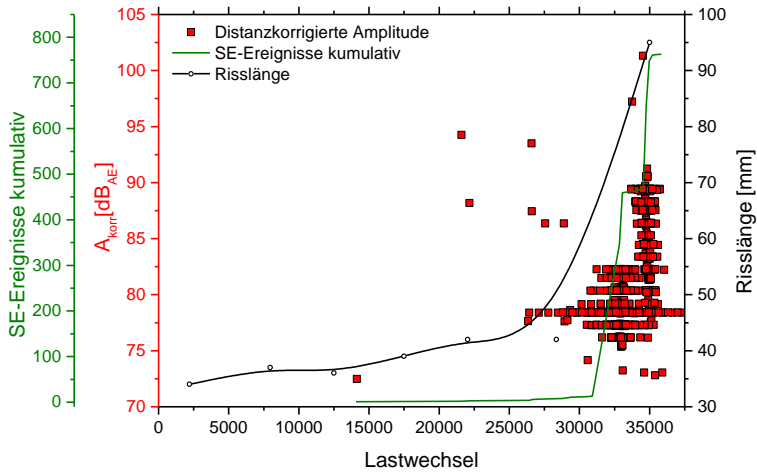


Abb. 4-15: Risswachstum (schwarz) des nicht korrodierten Risses an Platte 3 sowie die kumulative Anzahl der SE-Ereignisse (grün) und ihre distanzkorrigierten Amplituden (rot), welche durch primäre Quellen erzeugt wurden

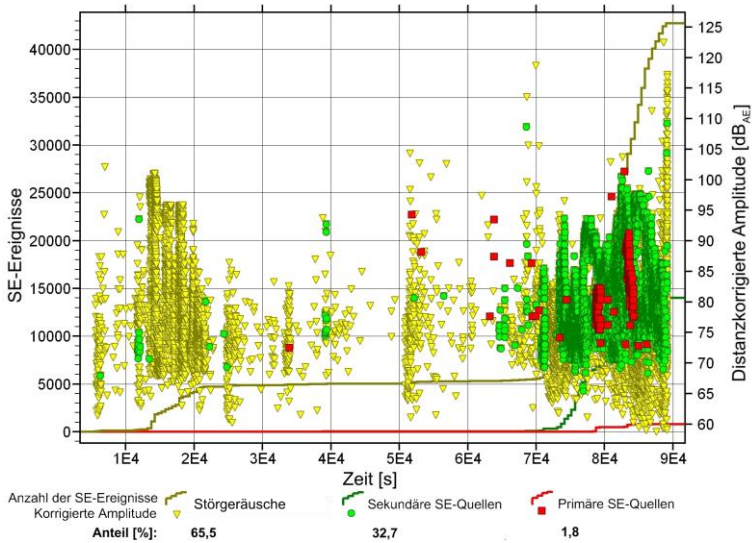


Abb. 4-16: Quellen für Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum ohne korrosiven Einfluss (Platte 3)

4 Analyse der Schallemissionssignale

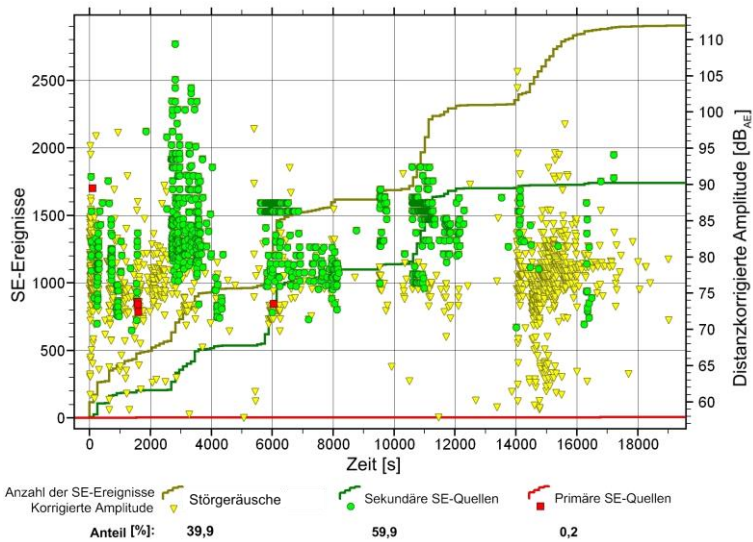


Abb. 4-17: Quellen für Schallemissionsereignisse beim Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss (Platte 4)

Abb. 4-17 zeigt einen Versuchsabschnitt, in welchem ein Ermüdungsriss in einem korrosiven Bereich mit einer Risswachstumsrate von $da/dN = 5,6 \cdot 10^{-5}$ mm pro Lastwechsel 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. Ein korrodierter Riss besitzt demnach, aufgrund der hohen Aktivität und Intensität sekundärer SE-Quellen, eine sehr viel höhere Detektionswahrscheinlichkeit als ein nicht korrodierter Riss.

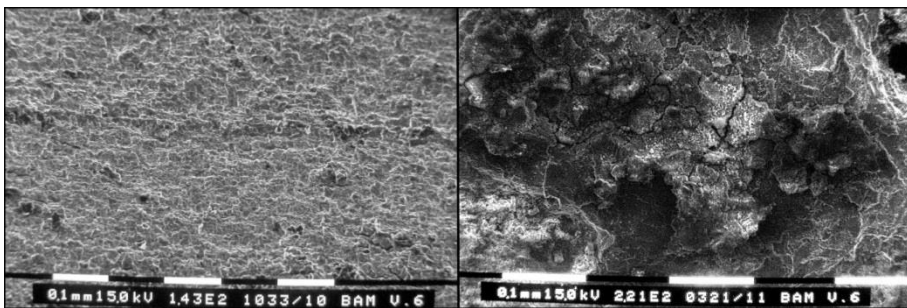


Abb. 4-18: REM-Aufnahmen der Bruchflächen eines nicht-korrodierten (links) und eines korrodierten Risses (rechts)

Die REM-Aufnahmen der Bruchflächen verdeutlichen die Ergebnisse der SEP (vgl. auch Anhang D.2). Während die Bruchfläche eines nicht-korrodierten Risses, wie sie in Abb. 4-18 link) zu sehen ist, nach der Trennung durch den Rissprozess eben ist, besitzt die Bruchfläche eines korrodierten Risses (Abb. 4-18, rechts) eine zerklüftete Oberfläche, die durch Mikrorisse in der Korrosionsschicht und deren Ablösen gekennzeichnet ist. Eine

zusätzliche sekundäre Quelle bei der Ermüdung eines korrodierten Risses ist in *Abb. 4-19* zu beobachten. Durch Korrosion sind bis zu 30 μm tiefe Furchen im Ferritgefüge entstanden, die bei Belastung der Versuchsplatte zusammengedrückt werden und Schallemission erzeugen können.

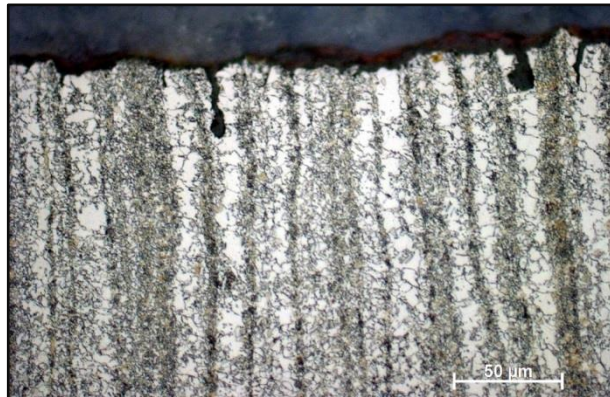


Abb. 4-19: Schliffbild des Rissufers aus Platte 4 (korrodiertes Riss). Oberflächenrisse senkrecht zur Bruchfläche

Verteilung der Signalamplitude

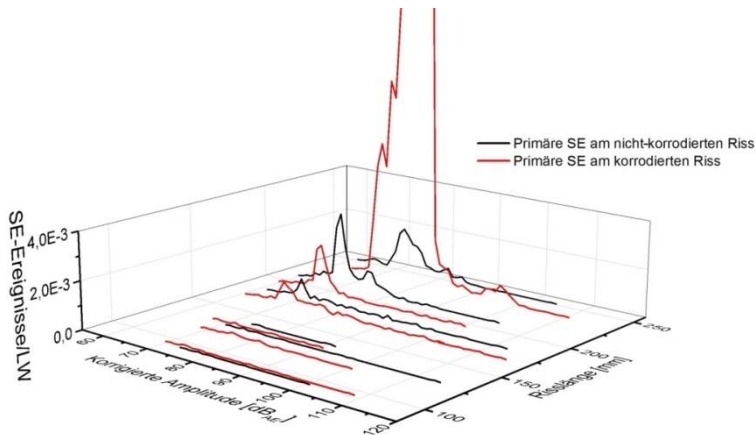


Abb. 4-20: Ereignisrate-Amplitudenverteilung primärer SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum in Abhängigkeit der Risslänge am nicht-korrodierten Riss (schwarz) und am korrodierten Riss (rot)

Die Maximalamplitude eines Schallemissionssignals besitzt unter den SE-Parametern besondere Bedeutung. Von der Amplitude hängt die Nachweisbarkeit des SE-Ereignisses ab. Durch sie lassen sich Rückschlüsse auf den Energiegehalt eines SE-Ereignisses ziehen und sie gibt einen Hinweis auf mögliche Quellmechanismen. Wie im Abschnitt über das Ermüdungsrisswachstum zu beobachten war, ist die Amplitude bei einem schnell voranschreitenden Riss besonders hoch. Es lohnt sich also, der Maximalamplitude der gewonnenen SE-Signale einer eingehenden Betrachtung zu unterziehen. Insbesondere die Risslänge, aber auch der zyklische Spannungsintensitätsfaktor, wird als Einflussbedingung be-

4 Analyse der Schallemissionssignale

trachtet und mit den entstehenden SE-Ereignissen sowie deren absoluten Energien als Verteilungskurven abgebildet.

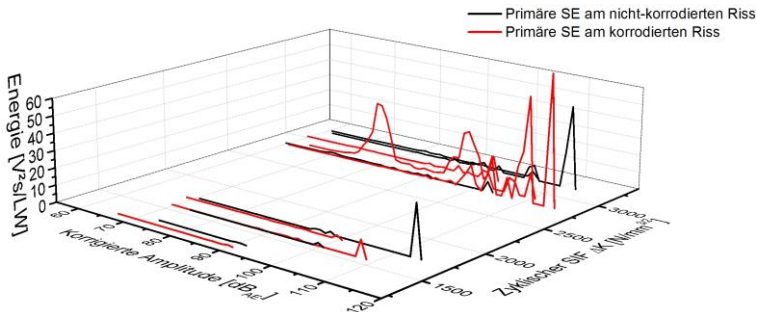


Abb. 4-21: Energierate-Amplitudenverteilung primärer SE-Signale beim Ermüdungsrisswachstum in Abhängigkeit und des zyklischen Spannungsfaktors am nicht-korrodierten Riss (schwarz) und am korrodierten Riss (rot)

Während die SE-Ereignisse die Amplitudenverteilung in der dB_{AE} -Skala logarithmisch wiedergeben, werden bei einer Betrachtung der Energie hohe Amplituden überproportional hervorgehoben (durch das Quadrieren des Signals in der Berechnung der absoluten Energie). Dieses Teilkapitel hat das Ziel, Informationen über die Verteilung der Maximalamplitude aus primären und sekundären Quellmechanismen an nicht-korrodierten und korrodierten Ermüdungsrissen zu gewinnen. Durch die Betrachtung der absoluten Energierate können auch Amplituden identifiziert werden, die in Darstellungen von Ereignisraten im Vergleich zum restlichen Amplitudenaufkommen kein Gewicht besitzen. Die im Folgenden betrachteten Ergebnisse dieses Teilkapitels stammen aus Versuchen an Platte 5, auf der die Risse ohne und mit Einfluss von Korrosion bei gleichen Bedingungen wachsen konnten. Weitere vergleichende Darstellungen primärer und sekundärer SE-Ereignisse aus allen Plattenversuchen sowie die Entwicklung der Maximalamplituden im Korrosionsbereich befinden sich in *Anhang D.3*.

Für die Überwachung der Schadensentwicklung eines wachsenden Risses sind insbesondere primäre SE-Ereignisse von Bedeutung. *Abb. 4-20* zeigt einen Merkmalsvergleich der primären SE-Ereignisse beim Risswachstum ohne und mit Korrosionseinfluss. Auf der Hochachse sind die SE-Ereignisse pro Lastwechsel dargestellt, welche die Verteilung der distanzkorrigierten Amplitude charakterisiert. Mit der Risslänge wächst die Anzahl der SE-Ereignisse pro Lastwechsel mit Amplituden, deren Großteil zwischen 65 und 80 dB_{AE} und damit nahe der Nachweisbarkeitsgrenze liegt (für distanzkorrigierte Amplituden beträgt diese für einen Sensorabstand von 100 mm etwa 60 dB_{AE}). Die Betrachtung in *Abb. 4-21* stellt die gleichen Daten bezogen auf die absolute Signalenergie pro Lastwechsel und in Abhängigkeit des zyklischen Spannungsfaktors dar. Hier ist erkennbar, dass ein Großteil der Energie von Ereignissen mit hohen Amplituden über 100 dB_{AE} abgegeben wird. Diese Ereignisse sind aufgrund der geringen Ereigniszahl pro Lastwechsel in *Abb. 4-20* nicht zu sehen. Die Energie der primären SE-Signale wächst unabhängig vom Korrosionsgrad mit dem zyklischen Spannungsfaktor. Ein direkter Vergleich der Amplitudenverteilung aus korrodiertem und nicht-korrodiertem Ermüdungsriss bei gleichem ΔK -Wert ist in *Abb. 4-22* zu sehen. Auch hier ist zu erkennen, dass die Amplitudenverteilung primärer Ereignisse unabhängig vom Korrosionsgrad des Risses ist.

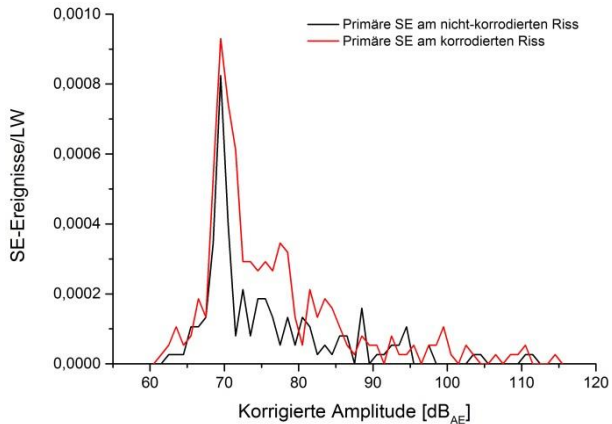


Abb. 4-22: Ereignisrate-Amplitudenverteilung von primären SE-Signalen bei Risswachstum mit einem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor von $\Delta K = 3.000 \text{ N/mm}^{3/2}$

Eine Betrachtung der sekundären SE-Ereignisse am nicht-korrodierten und korrodierten Riss wird in Abb. 4-23 angestellt. Wie bereits in den Ergebnissen des Ermüdungsrisswachstums ersichtlich war, ist die Anzahl der SE-Ereignisse des korrodierten Risses um ein Vielfaches höher. Beispielsweise ergibt sich bei einem Risswachstum von 73 auf 93 mm ein SE-Output von $5,8 \cdot 10^{-5}$ SE-Ereignissen/ LW für den nicht-korrodierten und $5,8 \cdot 10^{-2}$ SE-Ereignissen/ LW für den korrodierten Riss. Damit ist der SE-Output 1.000-mal höher für den korrodierten Riss. Eine signifikante Verschiebung in der Amplitudenverteilung findet jedoch nicht statt. Ein Großteil der Amplituden aller sekundären SE-Ereignisse liegt zwischen 65 und 90 dB_{AE} , ähnlich wie bei den primären Ereignissen.

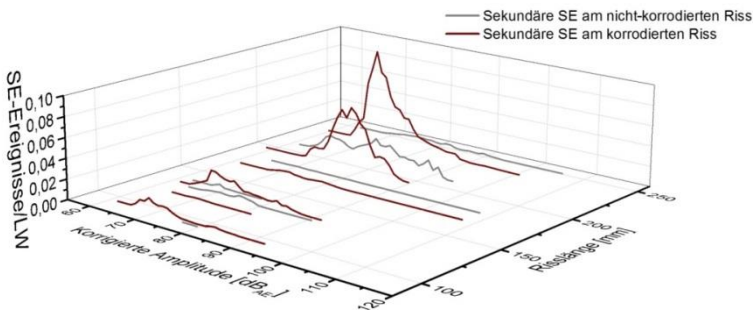


Abb. 4-23: Ereignisrate-Amplitudenverteilung sekundärer SE-Signale beim Ermüdungsrisswachstum in Abhängigkeit von der Risslänge

Abb. 4-24 und Abb. 4-25 vergleichen die Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der absoluten Energie pro Lastwechsel für unterschiedliche Risslängen für primäre und sekundäre SE-Ereignisse am nicht-korrodierten bzw. am korrodierten Riss. Sowohl beim nicht-korrodierten als auch beim korrodierten Riss besitzen die primären Ereignisse ihre Hauptenergieanteile im Amplitudenbereich über 100 dB_{AE} , während sekundäre Ereignisse ihre Hauptenergie mit Amplituden unter 100 dB_{AE} freisetzen. Diese Unterschiede von primären und sekundären SE-Ereignissen in der Merkmalskorrelation von absoluter Energie und korrigierter Amplitude lassen erste Schlüsse für eine Klassifizierung zu. Eine Unter-

scheidung allein anhand der Amplitude ist zwar nicht zwischen nicht-korrodiertem und korrodiertem Ermüdungsriss, jedoch zwischen primären und sekundären SE-Ereignissen möglich.

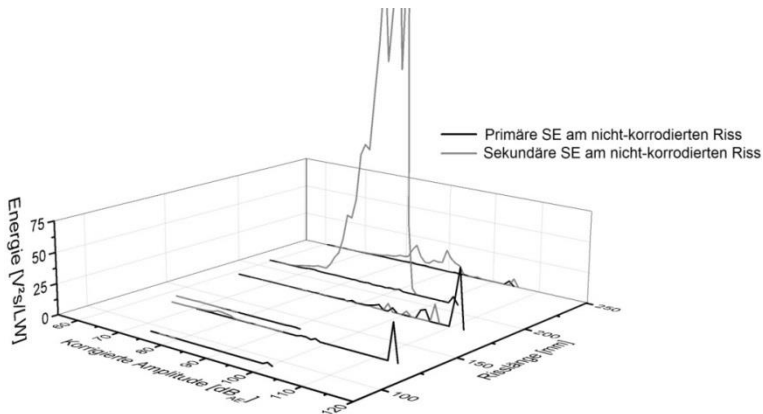


Abb. 4-24: Energierate-Amplitudenverteilung der Energie der SE-Signale beim Ermüdungsrisswachstum des nicht-korrodierten Risses Ermüdungsrisswachstum in Abhängigkeit von der Risslänge

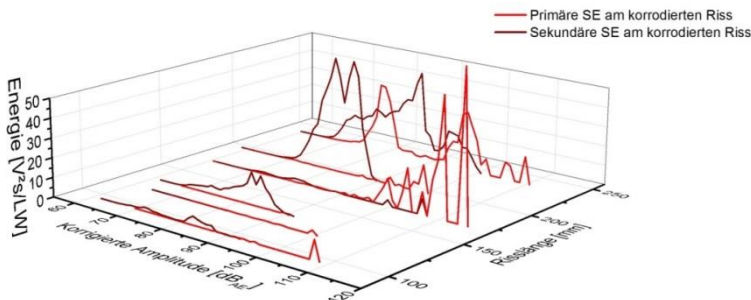


Abb. 4-25: Energierate-Amplitudenverteilung der Energie der SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum des korrodierten Risses Ermüdungsrisswachstum in Abhängigkeit von der Risslänge

Als Fazit für die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen lässt sich zusammenfassen, dass sich korrodierte Ermüdungsrisse erheblich besser nachweisen lassen als nicht korrodierte. Dies liegt an der unterschiedlichen Anzahl der sekundären SE-Ereignisse, die in korrodierten Rissen um ein 1.000-faches höher sein kann. Die Amplitudenverteilung hingegen ist für beide Ermüdungsrissarten vergleichbar. Primäre SE-Ereignisse besitzen sehr ähnliche Amplitudenverteilungen und Anzahl an SE-Ereignissen für Risse im korrodierten und nicht-korrodierten Zustand. Für alle Schadensmechanismen gilt, dass sich die Anzahl von SE-Ereignissen aus primären und sekundären Quellen stetig mit wachsendem Riss erhöht. Die Nachweisbarkeit eines Risses steigt also mit seiner Größe. Anzahl und Intensität primärer SE-Ereignisse steigen zusätzlich mit wachsendem Spannungsintensitätsfaktor.

Für eine Klassifizierung der SE-Signale ist die Betrachtung der absoluten Energie in Bezug zur Amplitude von Bedeutung: Sekundäre Effekte produzieren sehr viele SE-Signale mit

Amplituden zwischen 70 und 100 dB_{AE}. Signale aus primären Quellen dagegen sind charakterisiert durch hohe Energieraten im Amplitudenbereich über 100 dB_{AE}.

Wellenmodenanalyse

In Kap. 3.2 wurde dargestellt, dass sich aufgrund der Energiegehalte der Lambwellen-Moden SE-Quellen aufgrund ihres Anregungsortes innerhalb des Querschnittes der Platte unterscheiden lassen. Es wurde zwischen in-plane (IP) und out-of-plane (OOP) Anregungen unterschieden, welche in der Querschnittmitte bzw. auf der Plattenoberfläche stattfinden. Dabei ergab sich für IP-Anregungen eine dominante symmetrische Wellenmode (S_0), während für OOP-Anregung die antisymmetrische Wellenmode (A_0) einen höheren Energieanteil besaß.

Tab. 4-1: Ort für die Anregung der Schadensmechanismen und ihrer primären und sekundären Effekte.
IP: in-plane, innerhalb des Plattenquerschnittes; OOP: out-of-plane, auf der Plattenoberfläche

Schadensmechanismus:	Ermüdungsriß	Ermüdungsriß mit Korrosion	Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung
Anregungsart	IP	IP	OOP
Primäre Effekte	Risswachstum, plastische Deformation	Risswachstum, plastische Deformation	Korrosionsprozess
Anregungsart	IP	IP	OOP
Sekundäre Effekte	Bruchflächenreibung	Bruchflächenreibung, Brechen von Korrosionsprodukten	Brechen von Korrosionsprodukten
Anregungsart	IP	IP	OOP

Die IP/ OOP-Anregungen wurden mithilfe einer künstlichen Quelle, dem Bleistiftminenbruchtest, durchgeführt. Hier sollen SE-Signale der verschiedenen Schadensmechanismen auf die Eigenschaften ihrer Wellenmoden hin untersucht werden. Tab. 4-1 ordnet den Schadensmechanismen sowie ihren primären und sekundären Effekten einer Anregungsart zu. Dies kann jedoch nur zur groben Einteilung dienen, ist doch ein Riss sowohl an der Oberfläche als auch im Platteninneren aktiv. Hier wird davon ausgegangen, dass der Anteil der SE-Quellen innerhalb des Plattenquerschnittes bei Rissquellen überwiegen, da zwar neu entstehende Risspitzen auch an der Plattenoberflächen liegen, der Rest des Risses jedoch innerhalb des Plattenquerschnittes. Dies trifft sowohl für primäre als auch für sekundäre Quellen zu.

Anhand einer Auswahl von SE-Signalen aus den Schadensklassen soll untersucht werden, ob die hier vorgenommene Einteilung zutreffend ist. Wavelet-Diagramme der hier nicht dargestellten Signalklassen befinden sich im *Anhang 0*. Der Abstand zwischen Quelle und Sensor der zu untersuchenden SE-Signale wurde auf 100 mm festgelegt. Die hier ausgewählten SE-Signale besitzen eine Nachweisschwelle, die die Ankunftszeit der schnelleren S_0 -Mode als globale Ankunftszeit bei $t = 0$ ausweist. Die Ankunftszeit der A_0 -Mode erfolgt nach etwa 13 μ s (für Frequenzen im Bereich von 150 kHz). Je nachdem, welche Mode in den SE-Signalen dominiert, kann eine in-plane- bzw. out-of-plane-Anregung angenommen werden.

4 Analyse der Schallemissionssignale

Das erste Beispiel ist das SE-Signal eines primären Effektes des Ermüdungsrisswachstums. *Abb. 4-26* stellt Signalform und Wavelet-Diagramm dar. Hier hat die S_0 -Mode den höchsten Energieanteil des Signals inne. Auch die sichtbaren Anteile höherer Frequenzen laufen entlang der S_0 -Dispersionslinie. Die Dominanz des S_0 -Modes lässt auf eine in-plane-Anregung schließen.

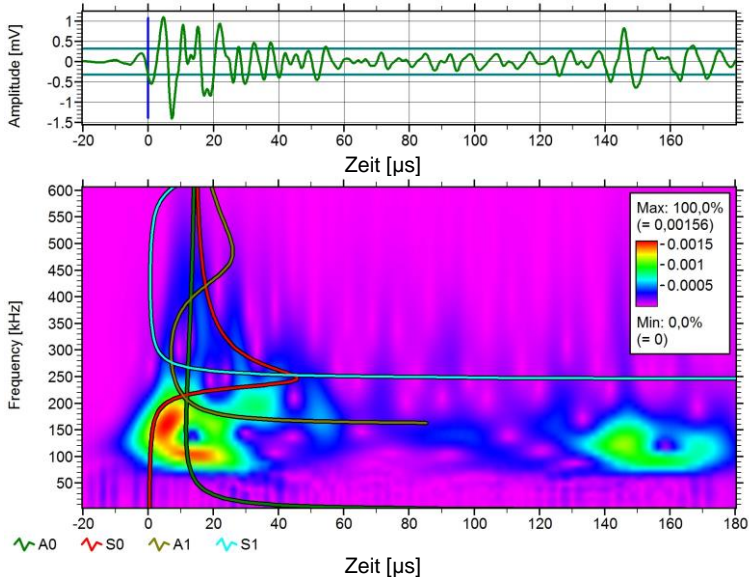


Abb. 4-26: SE-Signal (oben) und Wavelet-Diagramm (unten) eines primären Effektes des Ermüdungsrisswachstums mit überlagerten Dispersionskurven von Lambwellen-Moden

Abb. 4-27 ist aus der Signalgruppe der primären SE-Signale des korrodierten Risses. Auch hier ist eine dominante S_0 -Mode sichtbar, wodurch dieses Signal wieder die Eigenschaften einer Quelle im Querschnitt bekäme. Hier ist jedoch auch die A_0 -Dispersionslinie deutlich sichtbar. Dies lässt auf eine Quelle schließen, die sich zwar im Plattenquerschnitt, jedoch in Oberflächennähe befindet.

Abb. 4-28 schließlich zeigt eine Korrosionsquelle. Die A_0 -Mode besitzt besonders im Bereich hoher Frequenzen große Signalanteile. Neben der A_0 -Mode ist auch die A_1 -Mode dominant. Hier kann von einer oberflächenaktiven Quelle ausgegangen werden. Als Fazit lässt sich festhalten, dass auch bei natürlichen SE-Quellen anhand der Wellenmodenanalyse quellennah aufgezeichneter Signale Aussagen über den Anregungsort der Quellen gemacht werden können.

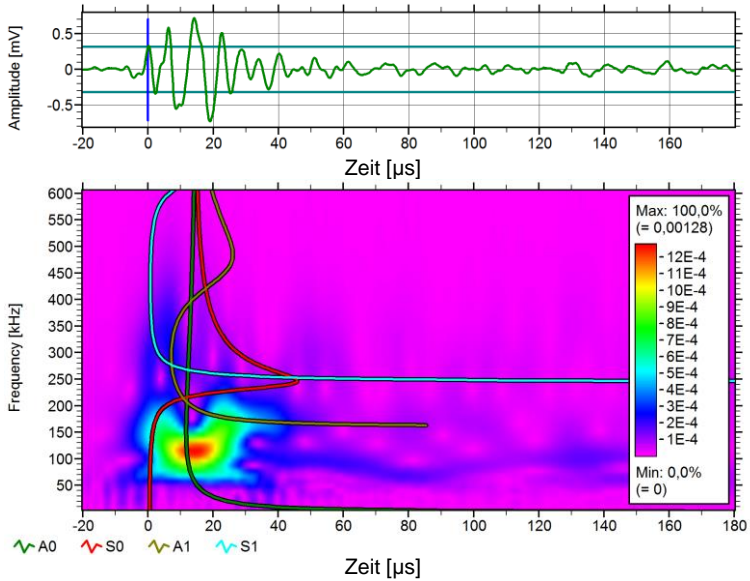


Abb. 4-27: SE-Signal (oben) und Wavelet-Diagramm (unten) eines primären Effektes des Ermüdungswachstums unter Korrosion mit überlagerten Dispersionskurven von Lambwellen-Moden

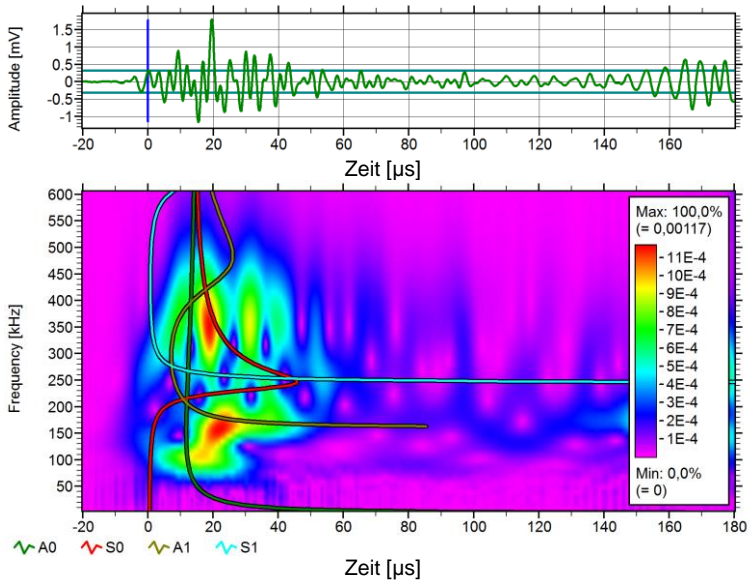


Abb. 4-28: SE-Signal (oben) und Wavelet-Diagramm (unten) aus der Korrosion im Ruhezustand der Versuchsplatte mit überlagerten Dispersionskurven von Lambwellen-Moden

4.2 Bruchmechanisches Verhalten im Vergleich zu Schallemissionsparametern

Schallemissionsquellen beim Ermüdungsrisswachstum sind hauptsächlich die mikroskopischen Bruchvorgänge. Diese These wurde in vielen frühen Arbeiten bestätigt [HaDu74, Ono00, SiCF77, TeEv74] und legt den Grundstein dafür, die Bruchmechanik mit der Schallemission in Verbindung zu bringen. Grundlagen zur Bruchmechanik werden in *Anhang C.1* beschrieben. Fokus dieses Kapitels ist es, Zusammenhänge zwischen bruchmechanischen Kennwerten und Parametern der Schallemissionsprüfung anhand von Versuchen an Platten mit bauteilnahe Design zu erkennen und mit Ergebnissen anderer Arbeiten an kleineren Probekörpern zu vergleichen.

Zusammenhang von absoluter Energie und Risslänge

Risswachstum erzeugt primäre, die Reibung bestehender Rissufer sekundäre Schallemissionsereignisse. Der Zusammenhang der Risslänge zu primären und sekundären SE-Signalen soll hier dargestellt werden. Als Indikator dient dazu die absolute Energie als SE-Parameter. *Abb. 4-29* und *Abb. 4-30* zeigen den Versuchsverlauf eines korrodierten Risses in Platte 4. Zu sehen ist die aufsummierte absolute Energie der SE-Signale im Vergleich zur Risslänge in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel. In *Abb. 4-29* sind primäre, sekundäre und die SE-Ereignisse insgesamt mit ihren Werten für die absolute Energie angegeben. Die Energie sekundärer Effekte macht den Hauptteil an der Gesamtenergie aus. Diese beiden Kurven steigen in ähnlichem Maße wie die Risslänge.

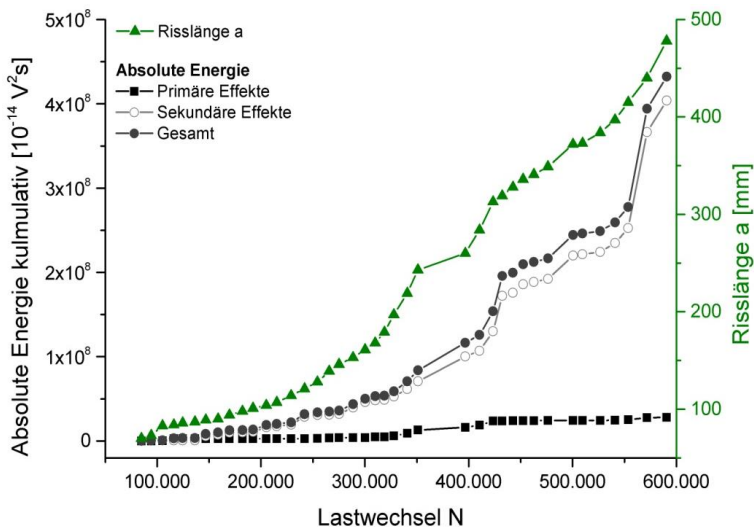


Abb. 4-29: Kumulative Werte der absoluten Energie der SE-Signale im Vergleich zur Risslänge an einem korrodierten Riss (Platte 4) in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl; Gesamtenergie der SE-Ereignisse sowie der primären und sekundären Effekten zugeordneten SE-Ereignisse

In *Abb. 4-30* ist allein die absolute Energie der primären SE-Ereignisse im Vergleich zur Risslänge zu sehen. Ihr Beitrag ist um ein 20-faches geringer als die Energie der sekundären Ereignisse. Aber auch an diesem Verlauf können Zusammenhänge zur Risslänge

festgestellt werden. Bei geringen Risswachstumsraten bis 10^{-3} mm/LW ist die Energie der primären SE-Ereignisse gering. Bei höheren Risswachstumsraten steigt sie rapide an. Die Energie sekundärer SE-Ereignisse ist also eher abhängig von der Risslänge, die Energie primärer SE-Ereignisse von der Risswachstumsrate.

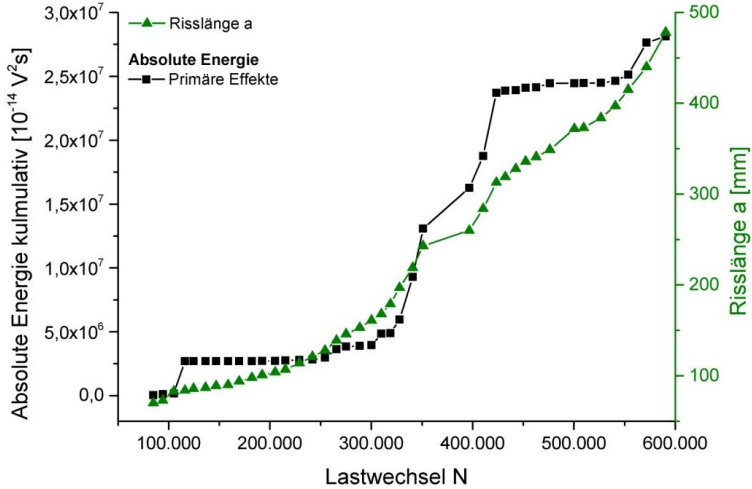


Abb. 4-30: Kumulative Energie der primären SE-Ereignisse im Vergleich zur Risslänge an einem korrodierten Riss (Platte 4) in Abhängigkeit von den Lastwechseln

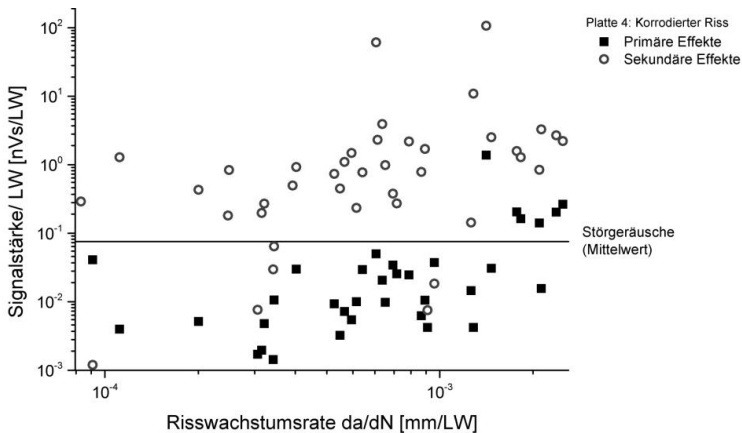


Abb. 4-31: Signalstärke (primäre und sekundäre Effekte) eines korrodierten Risses je Lastwechsel in Abhängigkeit von der Risswachstumsrate da/dN (Platte 4)

Die Abhängigkeit der Signalstärke je Lastwechsel primärer und sekundärer Effekte zur Risswachstumsrate ist in Abb. 4-31 dargestellt. Eingetragen ist ferner der Mittelwert der Signalstärke der Störgeräusche über der Versuchsdauer; also jenen lokalisierten SE-Ereignissen, welche beispielsweise durch die Auflagerreibung entstehen. Der Hauptteil der Signale aus primären Effekten liegt demnach unterhalb dieses Mittelwertes der Störgeräusche, während der Hauptteil der sekundären Effekte darüber liegt. Nur bei Risswachstums-

4 Analyse der Schallemissionssignale

raten über 10^{-3} mm/LW erhöht sich die Signalstärke; dann kann auch ein zuverlässiger Nachweis anhand der primären Ereignisse am Riss erfolgen. Bei niedrigeren Risswachstumsraten ist der Nachweis eines Risses hauptsächlich über sekundäre SE-Quellen möglich.

Einfluss der Spannungsintensität auf die Schallemission

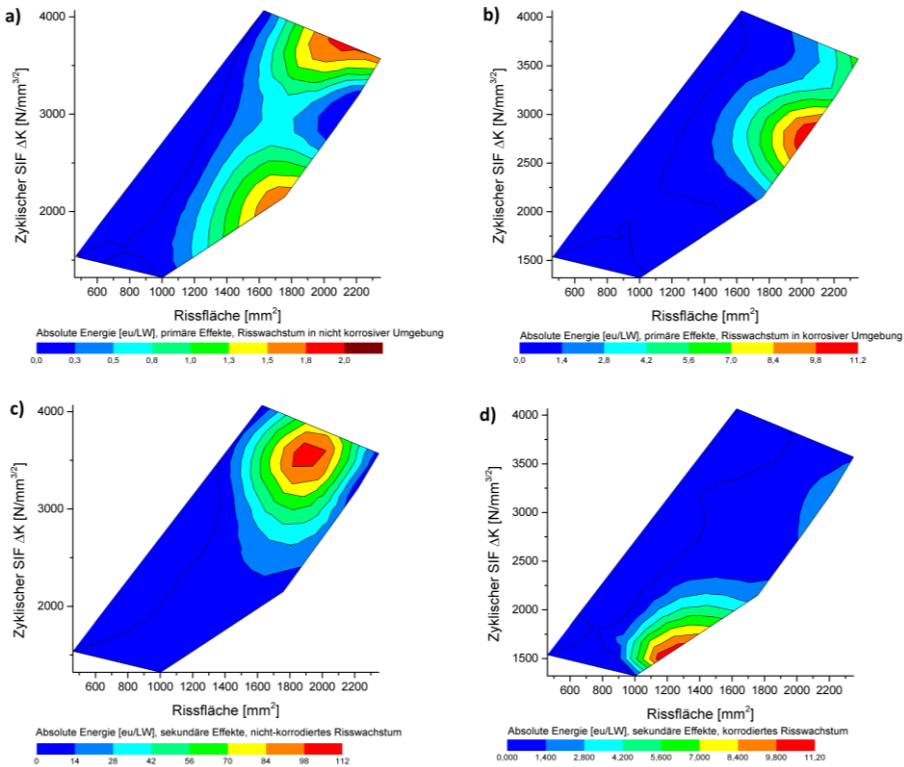


Abb. 4-32: Absolute Energie der SE-Signale je Lastwechsel bei einem nicht korrodierten Riss (links: a, c) und einem korrodierten Riss (rechts: b, d) in Platte 5; oben: primäre SE-Ereignisse, unten: sekundäre SE-Ereignisse ($1 \text{ eu} \equiv 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$)

Jedes SE-Ereignis ist singulär und wird aus einem bestimmten lokalen Prozess erzeugt; entweder meist wenige Ereignisse durch Freisetzung elastisch gespeicherter mechanischer Energie beim lokalen Rissfortschritt an der Risspitze (primäre Ereignisse) oder meist viele, über die Fläche der Rissflanken verteilte Ereignisse aus lokalen Reibprozessen (sekundäre Ereignisse). Nach den vorangegangenen Erkenntnissen sind primäre SE-Ereignisse das Ergebnis von Energiefreisetzungsraten, sekundäre SE-Ereignisse beruhen eher auf Flächeneffekten. Ein weiterer Zusammenhang soll zum Spannungsintensitätsfaktor hergestellt werden. Dieser stellt einen Wert für die Spannungsüberhöhung an der Risspitze dar. Er ist ein Parameter, der häufig in der Bruchmechanik verwendet wird und steht über das Paris-Gesetz (35) in einem logarithmischen Zusammenhang zur Risswachstumsrate, sofern stabiles Risswachstum vorliegt.

Der Einfluss des zyklischen Spannungsintensitätsfaktors ΔK und der Größe der Bruchfläche auf die absolute Energie der lokalisierten primären und sekundären SE-Ereignisse sind in *Abb. 4-32* dargestellt. Die Darstellungen auf der linken Seite zeigen diesen Zusammenhang für die primären Effekte am nicht korrodierten Riss (oben) und am korrodierten Riss (unten). Die maximale Energie (rotes Feld) befindet sich für die primären SE-Signale bei hohem ΔK und größter Bruchfläche. Bei den sekundären Effekten (*Abb. 4-32c, d*) verschiebt sich die Abhängigkeit, insbesondere für Ereignisse aus dem korrodierten Riss, in Richtung kleiner ΔK -Werte. Die Abhängigkeit von ΔK verringert sich im korrodierten Riss merklich, was im Umkehrschluss eine sehr starke Abhängigkeit von der Bruchflächengröße bedeutet. Dies ist auch bei den gesamten SE-Ereignissen der Fall; denn die sekundären Effekte machen dort den Hauptteil aus.

Der Spannungsintensitätsfaktor beeinflusst also hauptsächlich die Entstehung primärer Schallemissionsereignisse. Für die bruchmechanische Betrachtung und die Abhängigkeiten zu ΔK macht es also Sinn, nur die primären SE-Ereignisse zu betrachten, da die sekundären Ereignisse, wenn überhaupt, nur einen geringen Einfluss auf diesen zeigen.

Risswachstumsrate vs. Countrate

Ein in der Literatur häufig diskutierter Zusammenhang ist der, im doppellogarithmischen Diagramm aufgetragene, lineare Zusammenhang von Überschwingungen (Counts) pro Lastwechsel und ΔK sowie der in der Bruchmechanik zur Lebensdauervorhersage verwendete komplementäre Zusammenhang von Risswachstumsrate und ΔK (siehe *Abb. 4-33*). Für unterschiedliches Material und Versuchsparameter wurden in der Vergangenheit die Konstanten n und m ermittelt (vgl. *Tab. 4-2*) und Zusammenhänge zwischen ihnen gesucht, um aus der Countrate Verbindungen zur Risswachstumsrate herzustellen. Dies und der Vergleich mit Werten aus der Literatur ist auch hier das Ziel. Des Weiteren wurde eine entsprechende Gleichung für die SE-Energiefreisetzung (absolute Energie pro Lastwechsel) aufgestellt und auch hierfür der Exponent m' ermittelt.

<p>► Bruchmechanik</p> <p>– Paris und Erdogan 1963</p>	$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$
<p>► Schallemission</p> <p>– Morton et al. 1973</p> <p>– Sinclair et al. 1977</p> <p>– Lindley et al. 1978</p>	$N'_c = A(\Delta K)^m$

Abb. 4-33: Bekannte Zusammenhänge aus Bruchmechanik und Schallemission. da/dN : Risswachstumsrate; N'_c : Countrate; A, C, n, m : Konstante

Es wurden sowohl die Gesamtzahl der lokalisierten SE-Ereignisse ausgewertet als auch allein die primären Ereignisse. Letztere sind direkt mit dem Risswachstum verbunden und besitzen, wie oben beschrieben, einen engeren Zusammenhang zur Risswachstumsrate und mit dem Spannungsintensitätsfaktor, als die Gesamtzahl der Ereignisse, welche von den rissflächenabhängigen sekundären Effekten dominiert werden.

Ein Beispiel für die Auswertung der primären Effekte, gemessen am korrodierten Riss aus Platte 4, gibt *Abb. 4-34*. Im doppellogarithmischen Diagramm sind Messpunkte der SE-Energie, der Countrate sowie der Risswachstumsrate über ΔK dargestellt. Durch die

4 Analyse der Schallemissionssignale

Messpunkte werden Ausgleichsgeraden gelegt, welche den Gleichungen in Abb. 4-33 genügen. Zusätzlich wird für die SE-Energierate E_{AC} eine Gleichung

$$E_{AC} = \beta(\Delta K)^{m'} \quad (25)$$

eingeführt. Dabei sind β und m' Konstanten. Die SE-Energierate spiegelt die absolute Energie pro Lastwechsel wider. Die Exponenten der Gleichungen n , m und m' können anhand der Steigung der Regressionsgeraden abgelesen werden. Die erhaltenen Werte werden nun mit Daten aus der Literatur verglichen. Diese sind in Tab. 4-2 zusammengefasst. Das Ermüdungsrisswachstum in Platte 4 lässt sich aufgrund ähnlicher Risswachstumsraten besonders gut mit den Werten aus [LiPR78] vergleichen. Die Werte für m passen dort (sowohl für die primären als auch die gesamten SE-Ereignisse) zu den Daten aus der Literatur.

Tab. 4-2: Werte für n und m (Steigung im doppellogarithmischen Diagramm) aus der Literatur und eigener Berechnung (fett). Mit Probendicke t , Lastverhältnis $R = F_{min}/F_{max}$, Exponenten n , m und m' für die Risswachstumsrate da/dN , die Countrate N' und die SE-Energierate E_{AC} . Auswertung der primären SE-Ereignisse, Gesamtzahl der SE-Ereignisse in Klammern

Material	t [mm]	R	n	m	m'
2024-T851 Aluminium ¹	12,7	0,1	4	5	k.A.
DUCOL W30B ²	19	0,01	3	5	k.A.
1 % C Stahl ²	19	0,01	4	6	k.A.
1075-T651 Aluminium ² [LiPR78]	12,5	0,01	4	6	k.A.
C/Mn Stahl ²	19	0,01	3	5	k.A.
EN 30B ²	8	0,5	3	6	k.A.
X210CrW12 Stahl ³	12,7	0,4	3,44	3,78	k.A.
X210CrW12 Stahl ³	12,7	0,4	5,26	3,78	k.A.
X210CrW12 Stahl ³	12,7	0,4	7,19	3,78	k.A.
X210CrW12 Stahl ³	12,7	0,2	7,37	3,71	k.A.
X210CrW12 Stahl ³	12,7	0,2	7,13	3,71	k.A.
C15 Stahl ³	12,7	0,2	6,48	3,82	k.A.
C15 Stahl ³	12,7	0,4	2,91	3,82	k.A.
P3-P460NL1	10,2	0,5	5,4	5,0 (10,5)	5,0 (10,7)
P4-P460NL1, korrodiert	10,2	0,5	3,3	5,7 (5,8)	7,0 (5,1)
P5-P460NL1	10,2	0,5	1,3	3,5 (6,3)	3,6 (6,5)
P5-P460NL1, korrodiert	10,2	0,5	1,2	5,4 (6,3)	6,4 (7,3)

¹ [MoHB73], ² [LiPR78], ³ [HaBB81]

Aufgrund gleicher Versuchsbedingungen für Risswachstum ohne und mit Korrosionseinfluss lässt sich anhand von den Ergebnissen aus Platte 5 der Einfluss der Korrosion auf die Schallemission am besten beschreiben. Die Regressionsgeraden, die sich aus den Messwerten für die Risswachstums-, die Count- und die SE-Energierate ergeben, sind in Abb. 4-35 dargestellt. Bei einer geringen Steigung der Risswachstumsrate von 1,3, bzw. 1,2, ergeben sich für die primären Effekte eine Einflussnahme der Korrosion: Die Steigung im doppellogarithmischen Diagramm für die Count- und SE-Energierate fällt für den korrodierten Riss deutlich höher aus. Das Wachstum korrodiert Risse besitzt also eine höhere akustische Energiefreisetzungsrates als das Risswachstum ohne Korrosionseinfluss, sofern allein primäre Ereignisse betrachtet werden.

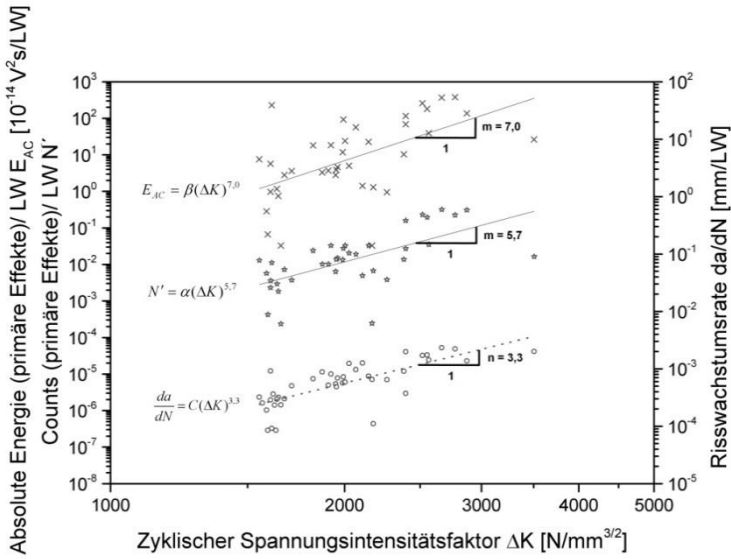


Abb. 4-34: SE-Energierate (Kreuze) bzw. Countrate (Sterne) primärer SE-Ereignisse und Risswachstumsrate (Kreise) in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor eines korrodierten Risses der Platte 4 sowie deren lineare Regression

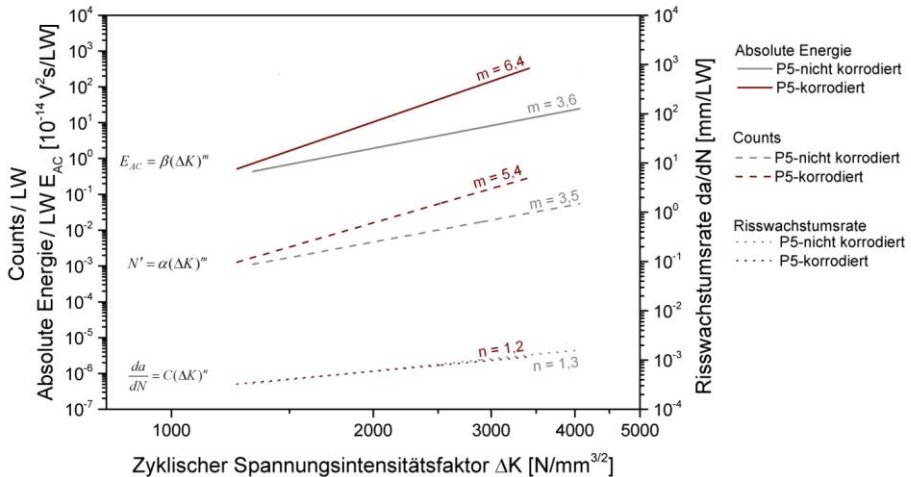


Abb. 4-35: Regressionsgeraden für Messwerte der SE-Energierate (oben), Countrate (Mitte) und Risswachstumsrate (unten) für primäre Effekte des Risswachstums an einem nicht korrodierten (grau) und einem korrodierten (rot) Riss (Platte 5)

In Abb. 4-36 sind die Ergebnisse aus dem Vergleich des Wachstums aus Rissen ohne und mit korrosiver Umgebung zusammengefasst. Hier wird deutlich, dass vorrangig die primären SE-Ereignisse den Einfluss der Korrosion ausdrücken, während die Gesamtanzahl der Ereignisse, welche von sekundären Effekten dominiert wird, keinen Einfluss auf die Countrate und nur einen geringen Einfluss auf die SE-Energierate besitzt. Die primären Ereignisse jedoch werden in starkem Maße durch die Korrosion beeinflusst.

4 Analyse der Schallemissionssignale

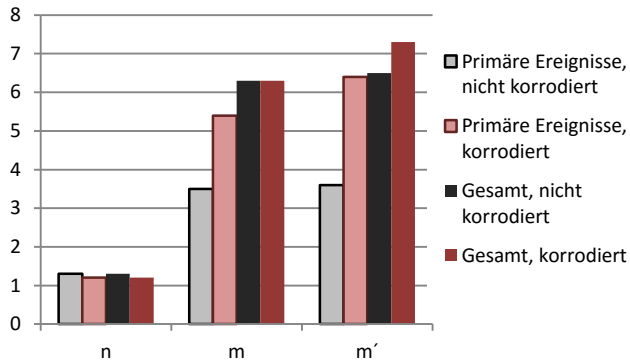


Abb. 4-36: Werte für n , m und m' aus Messwerten für die Risswachstumsrate, die Countrate und die SE-Energierate für primäre sowie die Gesamtanzahl der SE-Quellen aus Risswachstum ohne und mit korrosivem Einfluss (Platte 5)

Langfristiges Ziel der bruchmechanischen Betrachtung im Zusammenhang mit der Schallemission könnte es sein, eine ausreichend breite Datenbasis aufzubauen, um aufgrund von Messdaten aus der Schallemissionsprüfung eine Lebensdaueranalyse zu erstellen. Dazu müssen die SE-Parameter in einem direkten Zusammenhang zu bruchmechanischen Kennwerten stehen. Es wurde deutlich, dass die Trennung von primären und sekundären Effekten für die bruchmechanische Auswertung von Bedeutung ist, da nur die primären SE-Ereignisse in direktem Zusammenhang mit dem Risswachstum stehen. Sie werden in großem Maße durch Energiefreisetzungsraten wie die Risswachstumsrate beeinflusst. Der Vergleich der Konstanten n , m und m' zeigt, dass es bei dem vorhandenen Werkstoff trotz unterschiedlicher Geometrie der Probeplatten eine Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur gibt. Für die primären Effekte ist eine Abweichung in m und m' von korrodiertem zu nicht korrodiertem Riss bei gleichbleibender Risswachstumsgeschwindigkeit vorhanden. Dies führt zu der Annahme, dass korrodierte Risse bei ihrem Wachstum eine höhere akustische Energiefreisetzungsraten als nicht korrodierte Risse erzeugen.

4.3 Mustererkennung der transienten SE-Signale

Ein SE-Signal unterliegt von der Entstehung bis zur digitalen Verarbeitung vieler Einflussgrößen:

- der Quelle (Zeitfunktion, Lage, Energieabstrahlung),
- der Wellenausbreitung, inklusive
 - Materialparameter (Dämpfung, Heterogenität etc.),
 - Bauteilgeometrie (Dispersionseffekte etc.),
 - Laufweg Quelle-Sensor und
- des SE-Sensors (Typ, Charakteristik).

In dieser Arbeit findet eine Mustererkennung bei frequenzabhängiger Empfindlichkeit der Sensorik statt. Ob aus dem entstehenden SE-Signal noch Rückschlüsse auf die Quelle gezogen werden können, ist fragwürdig; denn die Frequenzinformation ist ein Hauptmerkmal in der Klassifikation transienter Signale. Die Vor- und Nachteile von Resonanzsensoren wurden ausführlich auf S.31f diskutiert. Sensoren, wie die hier verwendeten 150 kHz-Resonanzsensoren, besitzen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber natürlichen SE-Quellen als Breitbandsensoren. Sie besitzen deshalb eine höhere Praxisrelevanz. In diesem Kapitel soll der Versuch unternommen werden, einen praxisrelevanten Klassifikator für die verwendete frequenzabhängige Sensorik zu erstellen.

Die Einflussgröße „Laufweg zwischen Quelle und Sensor“ wird in dieser Arbeit bewusst umgangen, indem dieser konstant bei 100 mm gehalten wird. Des Weiteren gilt aufgrund der oben genannten Einflüsse auf das SE-Signal, dass die erstellten Klassifikatoren allein für den gewählten Versuchsaufbau gelten. Es soll vorrangig die Frage beantwortet werden, ob die Trennung der gewählten Schädigungsklassen „*Ermüdungsrisswachstum*“, „*Ermüdungsrisswachstum unter Korrosionseinfluss*“ und „*Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung*“ anhand ihrer SE-Signale möglich ist. Wenn dies der Fall ist, kann diese Arbeit Hinweise für zu verwendende Parameter geben, die bei ähnlichen Materialien, Strukturen und Sensoren die Erstellung eines Klassifikators zur Unterscheidung der verwendeten Mechanismen ermöglichen.

Mustererkennung von in-plane (IP) und out-of-plane (OOP) Anregungen

Für diese Arbeit steht die Suche nach einem sinnvollen Mustererkennungsmechanismus für die Trennung der Schadensmechanismen Korrosion und Ermüdungsrisswachstum im Vordergrund. In Untersuchungen mittels Wellenmodenanalyse wurde deutlich, dass die Art des Schadensmechanismus durchaus eine Einteilung der SE-Signale in IP- und OOP-Anregung zulässt. Dies führt zu der Annahme, dass ein Klassifikator, der für definierte IP- und OOP-Signale erstellt wird, gleichwohl eine Trennung der natürlichen Korrosions- und Risswachstumssignale ermöglicht.

Die Aufnahmebedingungen und Eigenschaften von SE-Signalen, deren Anregung out-of-plane und in-plane durch einen Bleistiftminenbruchtest erfolgte, wurden in Kapitel 3.2 besprochen. Die dort erhobenen Daten sollen für einen ersten Versuch der Mustererkennung herangezogen werden. Ausgewählt wurden Datensätze mit Quelle-Sensor-Abständen von 100 bis 150 mm. Dies entspricht den Abständen der Sensoren zu den natürlichen

Schadensquellen bei den Ermüdungsversuchen. Für die Auswertungen finden 64 IP- und 24 OOP-Signale Verwendung.

Die in Kapitel 2.3 erläuterte Methode des überwachten Lernens mithilfe von statistischen Klassifikatoren findet hier Anwendung. Ferner werden für die Merkmalsextraktion zwei Methoden herangezogen: die parameterbasierte Merkmalgewinnung und die automatisierte Merkmalsextraktion. Letzterer folgt der Prozess der Merkmalreduktion vor der endgültigen, automatisierten Klassifizierung.

Parameterbasierte Merkmalgewinnung

Für die parameterbasierte Merkmalgewinnung werden ausgewählte SE-Parameter der Mustergruppen als Merkmale verwendet. Es findet keine weitere Merkmalsextraktion statt. Zwei Signalklassen werden definiert: Signale aus IP-Anregungen (ω_{IP}) und Signale aus OOP-Anregungen (ω_{OOP}). Der Großteil der SE-Parameter eignet sich allerdings nicht oder nur bedingt als klassentrennende Merkmale. Ein direktes parametrisches Merkmal ist die Signalamplitude. Deren Häufigkeitsverteilung $p(A|\omega_i)$ ist in *Abb. 4-37* dargestellt. Allein durch die abstandsabhängige Signalschwächung ergibt sich eine natürliche Bandbreite an Amplitudenwerten. Die Streuung in der Amplitude der IP-Signale ist besonders hoch, da hier Messungen sowohl vertikal als auch diagonal zum Plattenrand durchgeführt wurden und so eine Richtungsabhängigkeit zutragen kommt (vgl. *Abb. 3-21*).

Es ist zu erkennen, dass in bestimmten Bereichen bereits anhand dieses Merkmals eindeutige Klassenzuordnungen möglich sind. So können alle Signale, deren Amplitude kleiner als 87 dB_{AE} ist, eindeutig einer IP-Anregung zugeordnet werden. Alle Signale mit einer Amplitude über 98 dB_{AE} gehören zur Klasse der OOP-Anregungen. Für alle dazwischen liegenden Werte müssen Entscheidungsregionen mit dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten für die Klassenzugehörigkeit festgelegt werden.

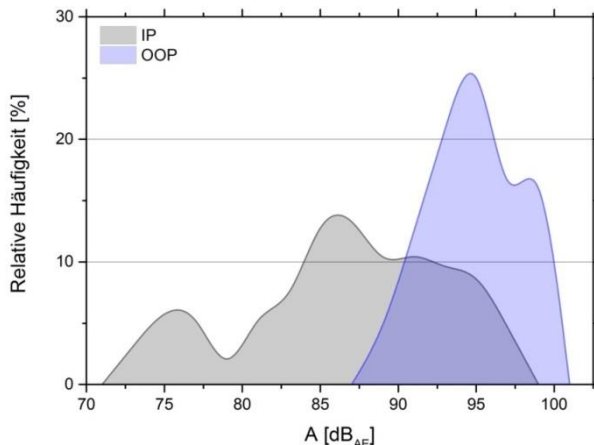


Abb. 4-37: Häufigkeitsverteilung $p(A|\omega_i)$ der Signalamplitude von SE-Signalen aus IP- und OOP-Anregungen

Dies soll an dieser Stelle jedoch nicht geschehen. Stattdessen wird ein indirekter Parameter, das Amplitudenverhältnis A_{Ratio} , eingeführt. In der Analyse der IP/OOP-Daten wurde

deutlich, dass die Intensität der Wellenmoden, insbesondere der Grundmoden A_0 und S_0 , einen maßgeblichen Einfluss auf die Form der SE-Signale besitzen. Das Amplitudenverhältnis ergibt sich aus dem Verhältnis der Maximalamplituden von antisymmetrischen und symmetrischen Grundmoden des jeweiligen SE-Signals:

$$A_{Ratio} = \frac{A_{A0}}{A_{S0}}. \quad (26)$$

Die zugehörige Häufigkeitsverteilung $p(A_{Ratio}|\omega_i)$ ist in *Abb. 4-38* zu sehen. Anders als bei der Signalamplitude ist hier bei einem Wert von $A_{Ratio} = 1,15$ das Setzen einer Entscheidungsgrenze möglich, mithilfe derer eine eindeutige Zuordnung aller vorhandenen Signale in die Signalklassen ω_{IP} und ω_{OOP} erfolgt:

$$\begin{aligned} P(A_{Ratio}|\omega_{IP}) &= 1 \text{ für } A_{Ratio} < 1,15 \\ P(A_{Ratio}|\omega_{OOP}) &= 1 \text{ für } A_{Ratio} \geq 1,15. \end{aligned} \quad (27)$$

Hier kann also anhand eines einzigen Merkmals eine eindeutige Klassifizierung erfolgen.

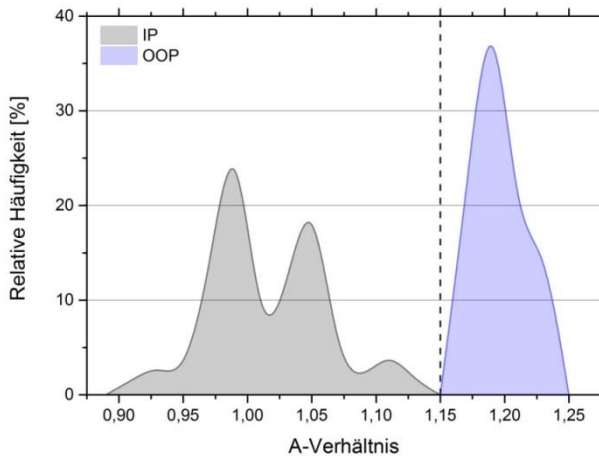


Abb. 4-38: Häufigkeitsverteilung $p(A_{Ratio}|\omega_i)$ bei einem Quelle-Sensor-Abstand von 100 bis 150 mm

Automatisierte Merkmalsextraktion

Die automatisierte Merkmalsextraktion erfolgt mithilfe der Klassifizierungssoftware *Visual-Class* [Vall12c]. Die Segmente wurden so gewählt, dass im ersten Segment die symmetrische Wellenmode, im zweiten die antisymmetrische Wellenmode dominierend ist. Dabei wurde die Differenz in der Ankunftszeit zu $\Delta t = 10,3 \mu\text{s}$ berechnet, davon ausgehend, dass sich die S_0 -Wellenmode mit einer Geschwindigkeit von 5.000 m/s und die A_0 -Mode mit 3.300 m/s fortbewegt und der Quelle-Sensor-Abstand 100 mm beträgt. Im Zeitsegment 1 (TS1) ist somit die S_0 -Wellenmode dominant, während im Zeitsegment 2 (TS2) die A_0 -Wellenmode einen Hauptanteil besitzt.

Abb. 4-39 zeigt eine solche Segmentierung für ein OOP- und ein IP-Signal. Tab. 4-3 gibt die Rahmenwerte für die Merkmalsextraktion wieder. Sie erfolgt wie auf S.42 beschrieben und resultiert in 23 Merkmalen (11 Merkmale aus jedem Segment plus ein Energiemerkmale). Eine Auflistung der Merkmale befindet sich in Tab. D-1 (Anhang D.5).

4 Analyse der Schallemissionssignale

Tab. 4-3: Rahmenwerte für die Merkmalsextraktion

Abtastrate	10	MHz
Abtastpunkte pro Signal	5120	
Segmente	2	
Abtastpunkte pro Segment	256	
Offset Abtastpunkte (Vorlaufzeit)	-100	
Zeitbereich pro Segment	25,6	μs
Frequenzbereich	0 - 430	kHz
Frequenzauflösung	39,063	kHz
Anzahl der resultierenden Merkmale	23	

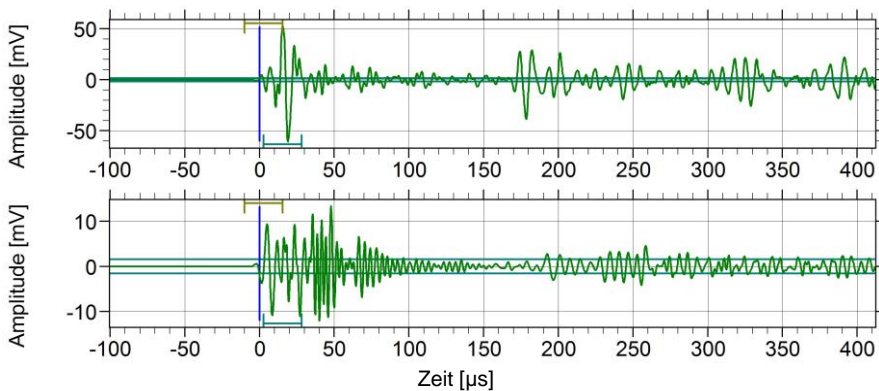


Abb. 4-39: SE-Signal nach einer OOP-Anregung (oben) und nach IP-Anregung (unten). Zwei für die Merkmalsextraktion markierte Abschnitte TS1 und TS2

In einem ersten Versuch erfolgt die separate Eingabe der einzelnen Bleistiftminenbruchtests. Es wurden je fünf BMT in den Abständen 100, 110, 120, 130, 140 und 150 mm zum Sensor gemacht und in diagonaler und horizontaler Richtung bezüglich der Schweißnaht sowie ohne Einfluss der Schweißnaht (Ch1) und mit deren Einfluss (Ch2) gemessen (vgl. auch Abb. 3-20 und Abb. 3-21). Abb. 4-40 zeigt die Projektionen zweier Basismerkmale (links) und zweier transformierter Merkmale nach einer Hauptachsentransformation (rechts) im zweidimensionalen Merkmalsraum. Eine Clusterung der einzelnen Testgruppen lässt sich insbesondere nach der Merkmalstransformation beobachten. Dort ist eine sehr gute räumliche Trennung zwischen IP- und OOP-Signalen möglich. Alle anderen Faktoren scheinen einen für diese Verteilung geringen Einfluss zu besitzen.

Daraufhin wurden die Signale, wie bei der parameterbasierten Merkmalsauswahl oben, in zwei Signalklassen ω_{IP} und ω_{OOP} zusammengefasst. Anhand des Fisher-Ratio (vgl. Abb. 4-41) wurden die Merkmale ausgewählt. Das Fisher-Ratio $R_{Fischer}$ ist der durchschnittliche Abstand zwischen den Klassen bezogen auf die durchschnittliche Klassenausdehnung. Je höher der Wert, desto besser eignet sich ein Merkmal für die Klassentrennung.

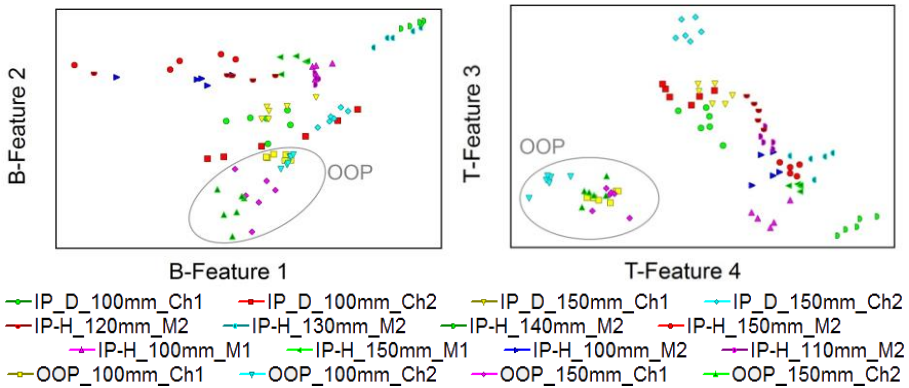


Abb. 4-40: Zweidimensionale Merkmalsverteilung von Basismerkmalen (B) und transformierten Merkmalen (T) nach Eingabe von IP- und OOP-Signalen aus unterschiedlichen Messungen. Nomenklatur: IP: In-Plane, OOP: Out-of-Plane; D: diagonal, H: horizontal bezgl. der Schweißnaht; Ch1: SE-Kanal ohne Schweißnahteneinfluss, Ch2: SE-Kanal mit Schweißnahteneinfluss; M1, M2: unabhängige Messungen, jeweils ohne Schweißnaht

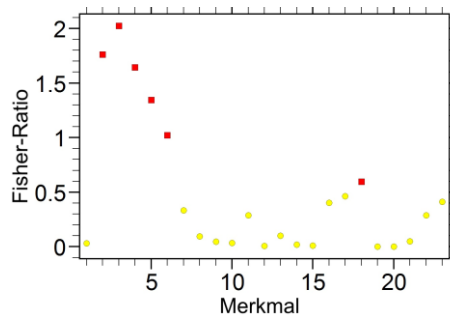


Abb. 4-41: Fisher-Ratio für die Merkmale aus IP- und OOP-Signalen; rot markierte Merkmale wurden für die Klassentrennung verwendet

Die verwendeten Merkmale werden nun transformiert und können als Häufigkeitsverteilung (Abb. 4-42) oder Merkmalsprojektion (Abb. 4-43) dargestellt werden. Anhand dieser Darstellungen ist oft schon ersichtlich, ob sich die ausgewählten Merkmale für die Klassentrennung eignen. Mithilfe des Bayes-Klassifikators wird in *VisualClass* als Klassifizierungsergebnis eine Wahrscheinlichkeit für die Signalklassifizierung ausgegeben. Diese beträgt für die Klassen ω_{IP} und ω_{OOP} jeweils 100 % (vgl. Abb. 4-44).

SE-Signale, welche durch einen Bleistiftminenbruchtest erzeugt wurden, können sowohl anhand einer parameterbasierten als auch der automatisierten Merkmalsgewinnung mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % in in-plane- bzw. out-of-plane-Anregung eingeordnet werden. Das bedeutet, dass die Lage der künstlichen SE-Quelle innerhalb des Plattenquerschnittes durch hier verwendete Klassifikationswerkzeuge unter Laborbedingungen erkannt werden kann. Und zwar sowohl mit frequenzunabhängiger (parametrisch) und frequenzabhängiger Methodik.

4 Analyse der Schallemissionssignale

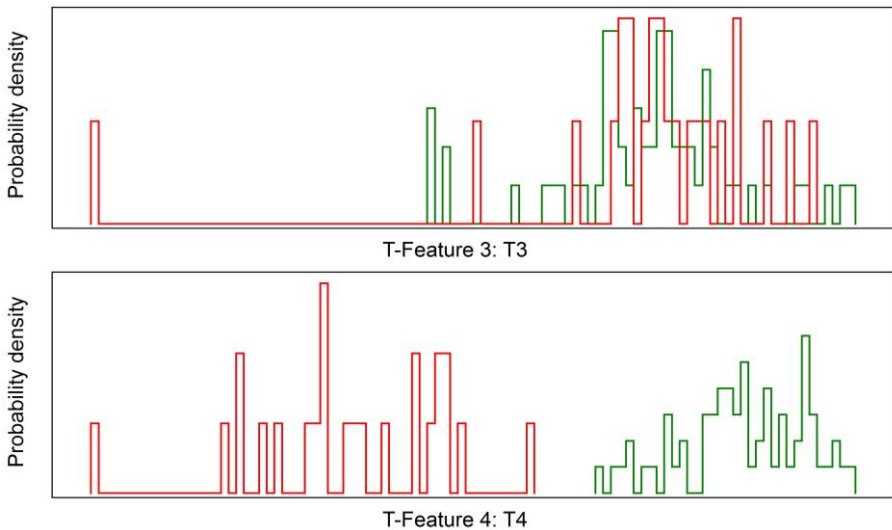


Abb. 4-42: Häufigkeitsverteilungen der Klassen ω_{IP} (grün) und ω_{OOP} (rot) zweier transformierter Merkmale für alle Signale dieser Klassen; T4 ist im Gegensatz zu T3 klassentrennend

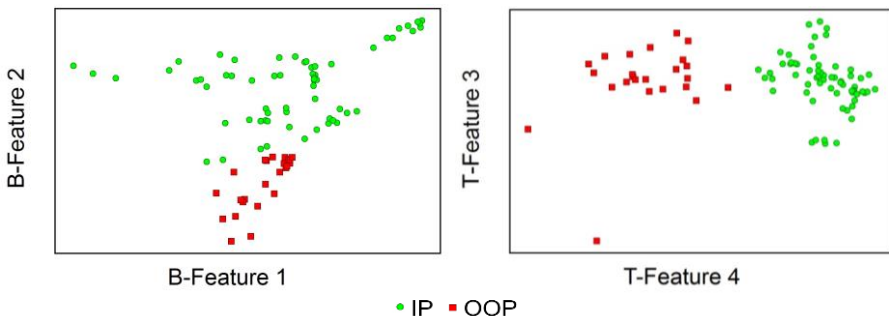


Abb. 4-43: Feature-Feature-Projektion zweier B-Features (Basismerkmale, links) und T-Features (transformierte Merkmale, rechts)

	IP	OOP	Results:
IP (64)	64	0	100,0%
OOP (24)	0	24	100,0%
	(64)	(24)	

Abb. 4-44: Ergebnis der Klassifizierung; die Anzahl der Signalformen ist in Klammern gesetzt

Klasseneinteilung und Signalauswahl

Schallemissionssignale aus Ermüdungsrisswachstum und Korrosion sollen durch die charakteristischen Merkmale der entstehenden SE-Signale voneinander unterschieden werden. Die rund 50.000 aufgenommenen SE-Signale werden gemäß ihren zugrunde liegenden Schadensmechanismen einander zugeordnet, so dass sich Schädigungsklassen ergeben, innerhalb derer sich Signale aus den Versuchen der Platten 3, 4 und 5 wiederfinden. Einige Schädigungsklassen besitzen jedoch gleiche Quellmechanismen und sind

daher ähnlich in ihrer Signalcharakteristik. Dieser Zusammenhang ist in *Abb. 4-45* schematisch dargestellt.

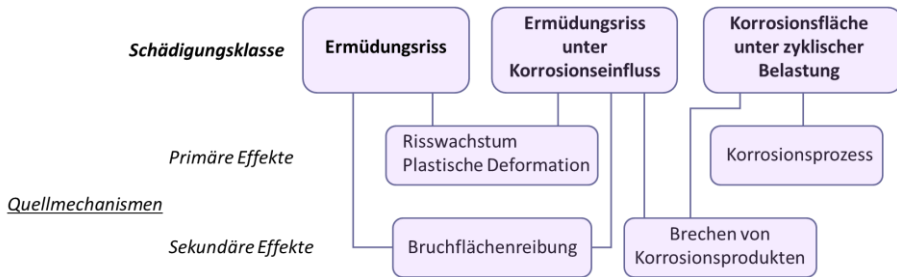


Abb. 4-45: Schematische Darstellung der zu trennenden Schädigungsklassen und ihrer Quellmechanismen (primäre und sekundäre Effekte)

Durch geeignete Filtermechanismen bei der Datenanalyse (z.B. Belastungsgröße, Ortung) können Gruppen von Signalen vorab einzelnen Effekten zugeordnet werden. Es wurden Unterklassen gebildet, welche sowohl die Schädigungsklasse als auch die Quellmechanismen beinhalten und fortan als Signalklassen bezeichnet werden. Diese lassen sich als Matrix gemäß *Abb. 4-46* darstellen.

	Schädigungsklasse 1 Ermüdungsris	Schädigungsklasse 2 Ermüdungsris unter Korrosionseinfluss	Schädigungsklasse 3 Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung
Primäre Effekte	Signalklasse 1-1 Risswachstum + Plastische Deformation	Signalklasse 2-1 Risswachstum + Plastische Deformation unter Korrosion	Signalklasse 3-1 Korrosionsprozess
Sekundäre Effekte	Signalklasse 1-2 Reibung der Bruchflächen	Signalklasse 2-2 Reibung der Bruchflächen + Brechen von Korrosionsprodukten	Signalklasse 3-2 Brechen von Korrosionsprodukten

Abb. 4-46: Matrix der vorhandenen Schädigungsklassen (Klassen 1 bis 3) und Signalklassen (Klassen 1-1 bis 3-2)

Es gibt demnach sechs Signalklassen, denen im Folgenden SE-Signale zugeordnet werden sollen. Die für die Signaltrennung verwendeten Datenfilter wurden in *Kapitel 3.3 (Abb. 3-36)* beschrieben. Alle Signale werden mit dem Sensor aufgenommen, der der Schadensquelle am nächsten liegt. Sie haben, je nach Lage der SE-Quelle, zu dieser einen Abstand von 100 bis 150 mm. Da der Riss unter Korrosionseinfluss in Platte 4 sehr viel größer als derjenige in Platte 3 ist, werden aus Platte 4 nur diejenige Signale verwendet, welche bis zur gleichen Rissgröße von 59 mm aufgenommen wurden. Für alle Klassen werden nur Signale verwendet, welche aus Versuchsabschnitten mit messbarem Risswachstum stammten. Signale aus Versuchen mit kleinen Lasten ohne Risswachstum werden nicht für die Klassifizierung verwendet.

Tab. 4-4: Benennung der Signalklassen nach Schadensmechanismus und primären/ sekundären Effekten; Anzahl der SE-Signale in den jeweiligen Klassen kursiv

Schädigungsklasse:	Ermüdungsrisss K1	Ermüdungsrisss unter Korrosionseinfluss K2	Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung K3
Primäre Effekte	K1-1	K2-1	K3-1
<i>Klassengröße</i>	<i>624</i>	<i>9.255</i>	<i>324</i>
Sekundäre Effekte	K1-2	K2-2	K3-2
<i>Klassengröße</i>	<i>9.540</i>	<i>28.486</i>	<i>266</i>

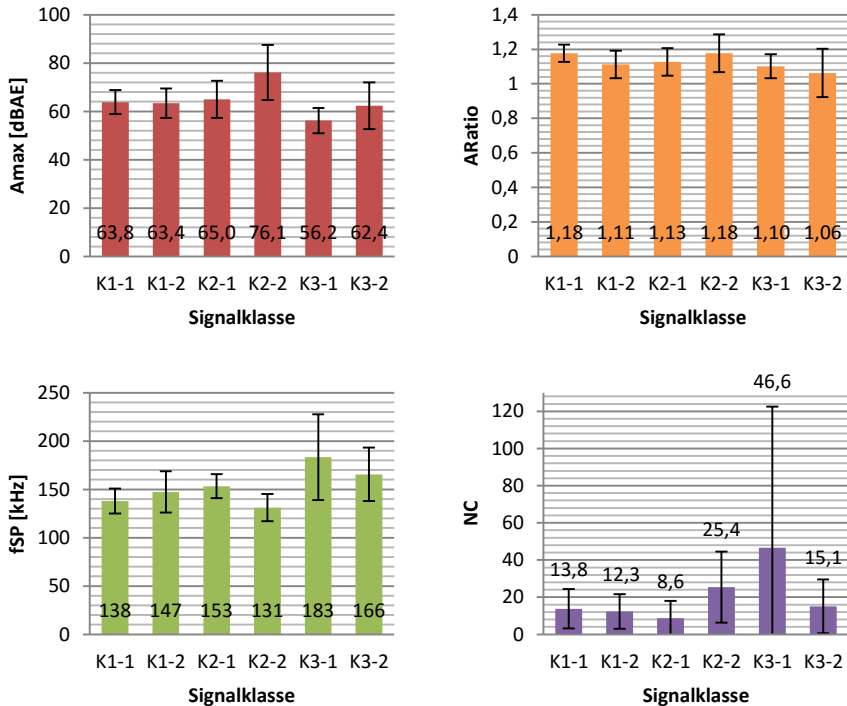


Abb. 4-47: Mittelwerte und Standardabweichungen (Balken) der SE-Parameter Maximalamplitude A_{max} (rot), Amplitudenverhältnis A_{Ratio} (orange), Schwerpunktsfrequenz f_{SP} (grün) und Counts N_C (lila) für die Signalklassen K1-1 bis K3-2

Die Anzahl der SE-Signale in den einzelnen Klassen ist in Tab. 4-4 dargestellt. Für eine Auswahl an SE-Parametern sind in Abb. 4-47 deren Mittelwerte aus SE-Signalen der jeweiligen Signalklassen mit ihren Standardabweichungen angegeben. Die Angabe weiterer SE-Parameter findet sich in Anhang D.5. Anhand dieser Daten kann ein erster Eindruck entstehen, welche Parameter für eine Klassentrennung in Frage kommen. Die Maximalamplitude scheint beispielsweise keine klassentrennende Funktion zu besitzen, während die Anzahl der Überschwingungen (Counts) in den verschiedenen Signalklassen stärker variiert. Hier sind jedoch auch die Standardabweichungen sehr hoch, so dass von einer breiten Varianz innerhalb der Signalklassen ausgegangen werden kann. Bei der

späteren Klassifizierung ist bei diesem Parameter mit einem erhöhten Anteil an Fehlzuordnungen zu rechnen.

Ebenfalls ist zu bemerken, dass die Klassengrößen signifikant voneinander abweichen. Das liegt an der natürlichen Entstehung der SE-Signale, die je nach Quelle entweder besonders häufig oder selten auftritt. Wie bei der Betrachtung der SE-Ereignisse beim Korrosionsprozess beobachtet werden konnte, sind dort die Amplituden überwiegend sehr klein. Die Nachweisschwelle für die Erstellung der Signalklasse 3-1 wurde jedoch denjenigen der anderen Klassen angepasst, so dass wie bei einer Zustandsüberwachung für alle Klassen gleiche Bedingungen herrschen. Signale mit kleinen Amplituden fallen somit heraus und verkleinern diese Signalklasse signifikant.

Klassifikation nach automatisierter Merkmalsbestimmung

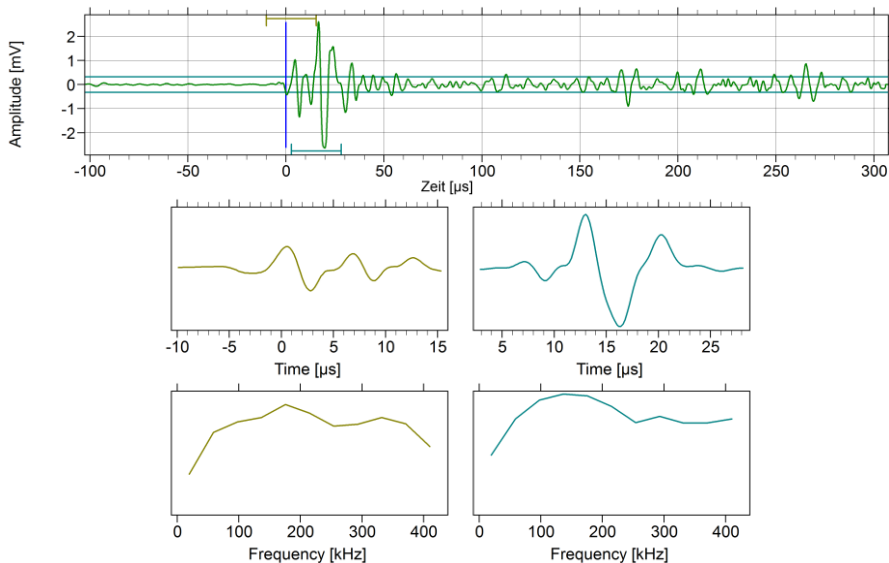


Abb. 4-48: Segmentiertes SE-Signal aus der Signalklasse K1-1 (oben) sowie dessen normierte Segmente 1 und 2 im Zeitbereich (Mitte) und im Frequenzbereich (unten)

Die sechs gebildeten Signalklassen werden verwendet, um mithilfe der Methode des überwachten Lernens einen Klassifikator zu erstellen, der in der Lage ist, jedes SE-Signal mit einer bestimmten Zuordnungswahrscheinlichkeit einer Signalklasse und somit einem Schadensmechanismus zuzuordnen. Für die automatisierte Merkmalsbestimmung werden die Rahmenwerte aus Tab. 4-3 verwendet. Diese Voreinstellung lieferte nach ersten Durchläufen die besten Ergebnisse für die Klassentrennung und basiert auf der Trennung nach der Quellenlage bezogen auf den Plattenquerschnitt; durch die Wahl der Signalsegmente im Zeitbereich der A_0 - bzw. S_0 -Wellenmodenanregung können, wie oben dargestellt, in-plane- und out-of-plane-Anregungen unterschieden werden. Die Segmentierung wird in Abb. 4-48 am Beispiel eines SE-Signals der Signalklasse K1-1 gezeigt.

Merkmalsbewertung und Klassifikationsergebnisse

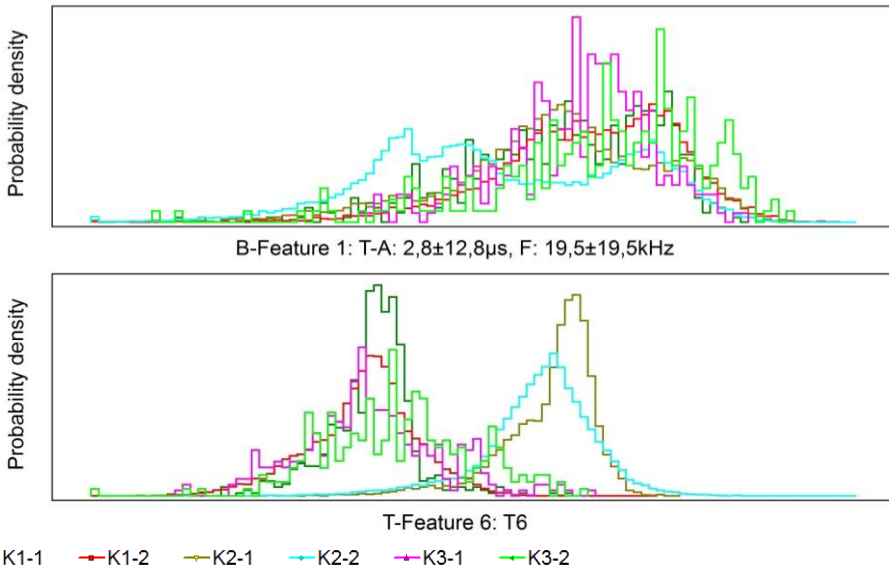


Abb. 4-49: Häufigkeitsverteilung eines Basismerkmals (oben) und eines transformierten Merkmals (unten)

Aus der Segmentierung folgen 23 Merkmale. Das Vorgehen entspricht dem der IP/OOP-Klassifizierung. Zunächst werden die Basismerkmale betrachtet. Die Häufigkeitsverteilungen (Abb. 4-49, oben) zeigen, dass es kein Basismerkmal gibt, welches eine gute Klassentrennung verspricht. Das *Class Couple Ranking* (Abb. 4-50, links) gibt eine gute Trennbarkeit der Klassenpaare K1-2/K2-2 sowie K2-1/K2-2 an. Nach der Merkmalstransformation zeigen die Klassen in den Häufigkeitsverteilungen ein differenzierteres Bild. Die Klassen K2-1 und K2-2 weichen in den transformierten Merkmalen T5 und T6 von den anderen Klassen ab (vgl. Abb. 4-49, unten). Das *Class Couple Ranking* zeigt nach der Transformation eine besonders gute Trennbarkeit der Klassen K1-2 und K2-1 (Abb. 4-50, rechts).

Das Ergebnis der Trennung der sechs Signalklassen ist in Abb. 4-51 dargestellt. Die Klasse K1-1, *primäre Effekte des korrosionsfreien Ermüdungsrisswachstums*, weist das schlechteste Klassifikationsergebnis auf: Nur 402 von 624 SE-Signalen (64,4%) werden mithilfe des erstellten Klassifikators der richtigen Klasse K1-1 zugeordnet. Die besten Ergebnisse in der Zuordnung erzielt die Klasse K2-2, *sekundäre Effekte des Ermüdungsrisswachstums unter Korrosionseinfluss*. Hier werden 80,3% der SE-Signale der richtigen Klasse zugeordnet.

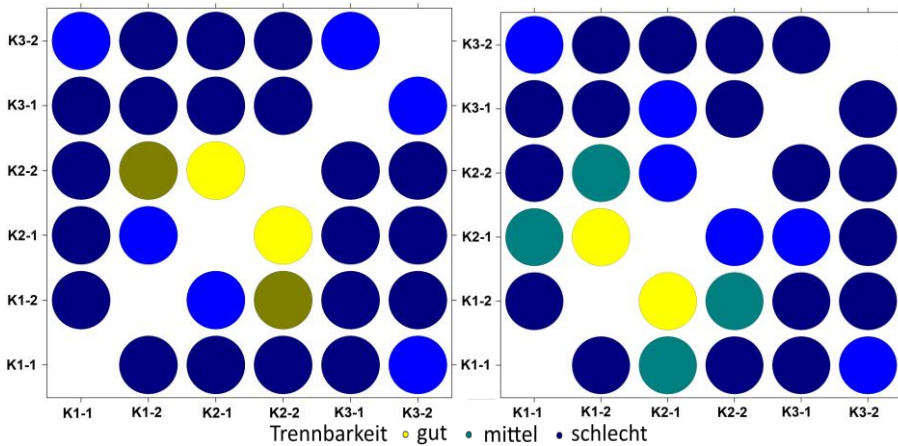


Abb. 4-50: Class Couple Ranking mit den Basismerkmalen (links) und den transformierten Merkmalen (rechts)

		K1-1	K1-2	K2-1	K2-2	K3-1	K3-2	Results:
K1-1	(624)	402	66	2	7	112	35	64,4%
K1-2	(9540)	387	6628	47	93	1466	919	69,5%
K2-1	(9255)	32	250	7267	1305	188	213	78,5%
K2-2	(28486)	58	563	1635	22883	1815	1532	80,3%
K3-1	(324)	4	11	0	4	240	65	74,1%
K3-2	(266)	0	8	2	7	44	205	77,1%
		(883)	(7526)	(8953)	(24299)	(3865)	(2969)	

Abb. 4-51: Ergebnis der 6K-Klassifizierung

Der erstellte Klassifikator mit sechs Signalklassen wurde jeweils an einem Versuchsabschnitt des Ermüdungsversuches und Korrosionsversuches getestet (Anhang D.5). In beiden Zuordnungen erweist sich der 6K-Klassifikator als sehr ungenau. Bei der Zuordnung im Korrosionsversuch, in dem fast sicher (durch Ortung und absolute Ruhe während der Versuchsdurchführung) ausschließlich Mechanismen des Korrosionsprozesses auftreten, werden nur 51 % der auftretenden SE-Ereignisse der Signalklasse K3-1 („Korrosionsprozess“) zugeordnet.

Reduktion der Signalklassen

Die Ergebnisse der Klassifizierung mit sechs Signalklassen zeigen, dass aufgrund der sich ähnelnden Quellmechanismen und der daraus resultierenden Ähnlichkeit von SE-Signalen innerhalb verschiedener Signalklassen keine Klassentrennung mit guter Zuordnungswahrscheinlichkeit möglich ist. Das weitere Vorgehen ist die prozessbezogene Zusammenlegung der Signalklassen auf Basis gleicher Quellmechanismen. Eine, wie beim 6K-Klassifikator bestehende, Ähnlichkeit der Signalklassen soll dadurch vermieden werden. Es wird angestrebt, Signalklassen zu bilden, die jeweils ein unabhängiges Repertoire an Mustern besitzen, um eine bessere Klassentrennung herzustellen.

4 Analyse der Schallemissionssignale

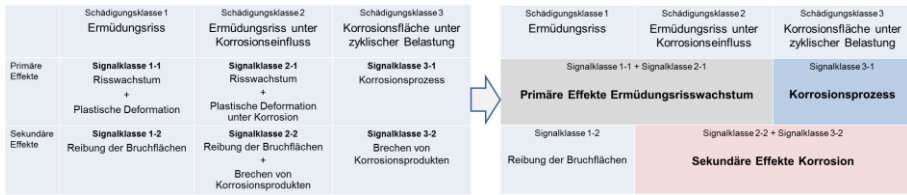


Abb. 4-52: Matrix der vorhandenen Klassen. Singuläre Signalklassen (rechts) und zusammengeführte Signalklassen (links)

In Abb. 4-52, links, sind die Klassen mit ihren Quellmechanismen in einer Matrixform angelegt. Primäre und sekundäre Effekte sind als Unterklassen dargestellt. Im nächsten Schritt erfolgt die Zusammenlegung ähnlicher Unterklassen (Abb. 4-52, rechts) in die Klassen „Primäre Effekte Ermüdungsrissewachstum“, „Sekundäre Effekte Korrosion“ und „Korrosionsprozess“.

3K-Klassifikator

Nach der Reduktion wird zunächst ein Klassifikator aus den vier verbleibenden Signalklassen gebildet (vgl. Anhang D.5). Da die Klasse 1-2 (Sekundäre Effekte Ermüdungsrissewachstum ohne Korrosionseinfluss) die geringste Zuordnungswahrscheinlichkeit besitzt, wird sie bei einer weiteren Reduzierung der Signalklassen herausgenommen. Es bleiben die Klassen

1. Primäre Effekte Ermüdungsrissewachstum (K1-1 + K2-1), 9.879 Signale,
2. Sekundäre Effekte Korrosion (K1-2 + K3-2), 28.752 Signale,
3. Korrosionsprozess (K3-1), 600 Signale.

Die Einstellungen des Klassifikators und seine Merkmale bleiben gemäß Tab. 4-3 bestehen.

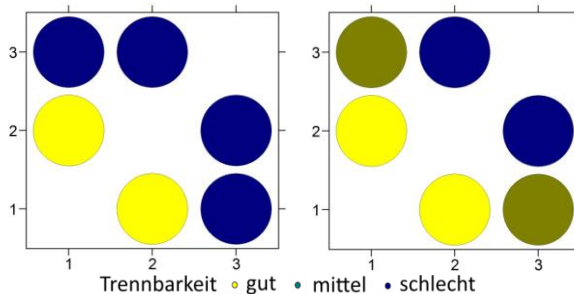


Abb. 4-53: Class Couple Ranking des 3K-Klassifikators. B-Features (links) und T-Features (rechts)

Das Class Couple Ranking (Abb. 4-53) ergibt hier eine schlechte Trennbarkeit der Klassen 2 und 3. Die Häufigkeitsverteilungen der transformierten Merkmale T3 und T4 sowie deren Projektion im Merkmalsraum sind in Abb. 4-55 bzw. Abb. 4-56 zu sehen. Das Ergebnis dieser Klassifizierung (vgl. Abb. 4-54) zeigt eine 97%-ige Trefferquote für die Klasse 3, den Korrosionsprozess.

	K1-1+K2-1	K2-2+K3-2	K3-1	Results:
K1-1+K2-1 (9879)	7689	1051	1139	77,8%
K2-2+K3-2 (28752)	2384	22881	3487	79,6%
K3-1 (600)	3	14	583	97,2%
	(10076)	(23946)	(5209)	

Abb. 4-54: Ergebnis der Klassifikation mit dem 3-Klassen-Klassifizierer

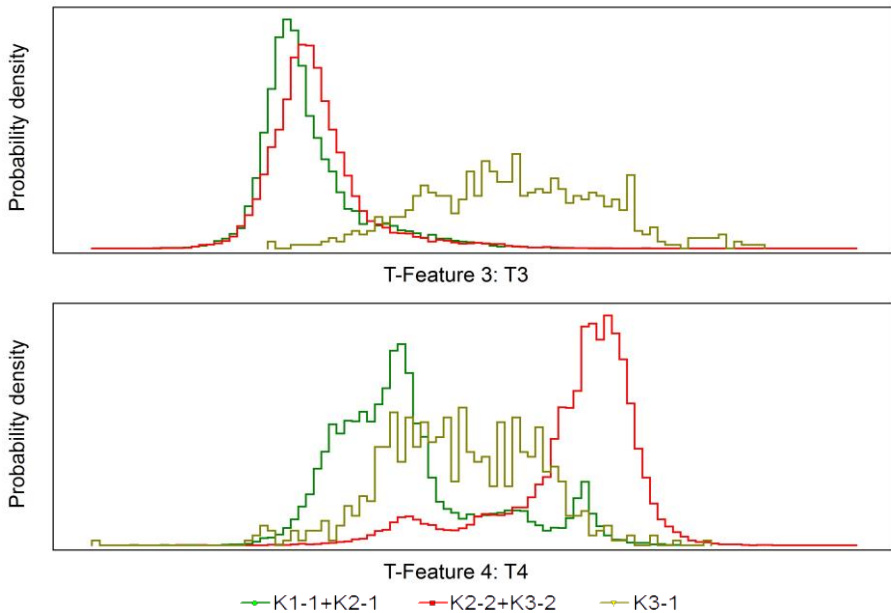


Abb. 4-55: Häufigkeitsverteilung der transformierten Merkmale T3 und T4 des 3K-Klassifikators

Der 3K-Klassifikator wird nun auf dieselbe Weise getestet wie bereits der 6K-Klassifikator oben; die Zuordnungsgenauigkeit wird anhand der Trefferquote beim Korrosions- und Ermüdungsversuch ermittelt. Die Anwendung des 3K-Klassifikators im Ermüdungsversuch ergibt jedoch, ähnlich wie beim 6K-Klassifikator, eine Klassifizierung mit geringer Zuordnungsgenauigkeit (vgl. Tab. D-4, Anhang D.5). Primäre SE-Ereignisse wurden nur mit einer Zuordnungsgenauigkeit von 33% zugeordnet. Das beste Ergebnis erzielten die SE-Ereignisse, die vom Korrosionsbereich ausgingen mit einer Zuordnungsgenauigkeit von 88%.

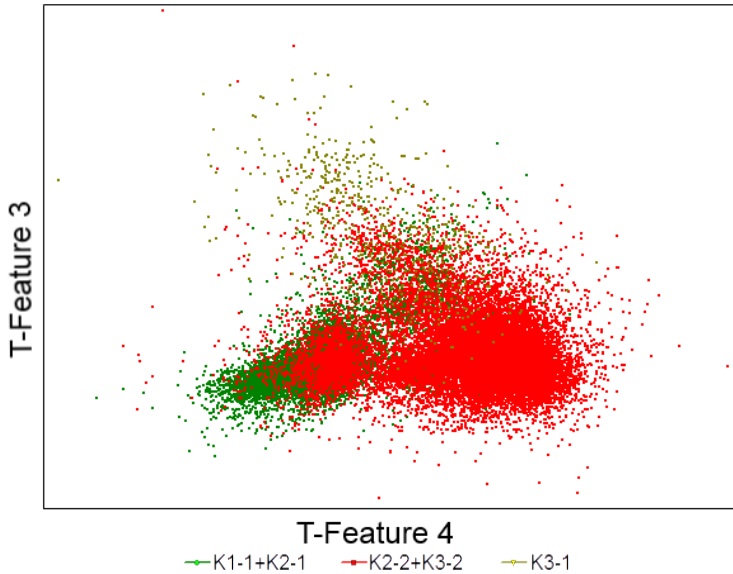


Abb. 4-56: Projektion im Merkmalsraum der transformierten Merkmale T3 und T4

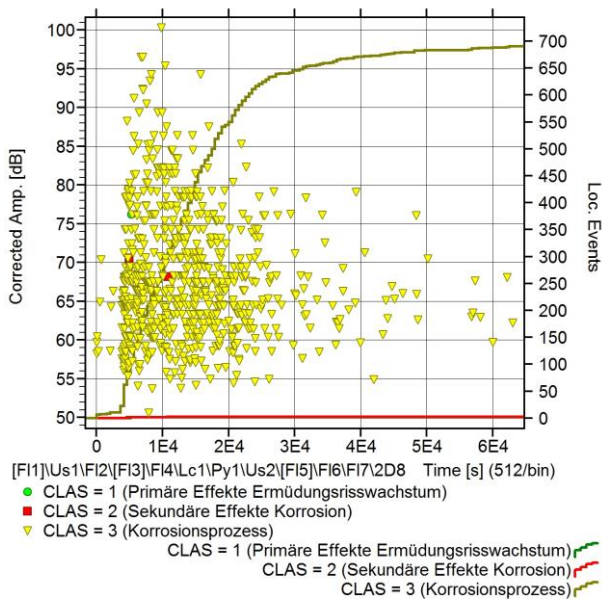


Abb. 4-57: Distanzkorrigierte Amplitude und kumulierte SE-Ereignisse nach Klassenzugehörigkeit; Oberflächenkorrosion über 18 Stunden

Der Test des Klassifikators mit 3 zusammengelegten Signalklassen im 18-stündigen Korrosionstest mit der Versuchsplatte im Ruhezustand ist in seinem zeitlichen Verlauf in *Abb. 4-57* dargestellt. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass der Großteil der SE-Signale richtig der Klasse 3, „Korrosionsprozess“, zugeordnet wurde. 690 von 693 Signalformen wurden

von dem verwendeten Klassifikator der richtigen Klasse zugeordnet, das entspricht einer Zuordnungsgenauigkeit von 99,6% (vgl. *Tab. 4-5*).

Tab. 4-5: Bewertung des 3K-Klassifikators nach Anwendung auf SE-Signale aus einem Korrosionsprozess

	K1-1 + K2-1	K2-2 + K3-2	K3-1	Gesamt	Logische Zugehörigkeit	Anzahl	Zuordnungs- genauigkeit [%]
Signale	1	2	690	693	K3-1	690	99,57

Gründe für eine Fehlklassifizierung

Ein Grund für eine Fehlklassifizierung ist eine grundsätzliche Anzahl von Fehlzuordnungen von einzelnen Signalen in die Signalklassen durch die logische Filterung. Es können beispielsweise Reibprozesse auch bei hohen, steigenden Lasten auftreten, die automatisch der Gruppe der Bruchereignisse zugeordnet wird. Gerade bei kleinen Klassen wie die der primären Prozesse sorgen Fehler in der Zusammenstellung der Signalklasse zu einer sehr großen Varianz in der Klasse. Dadurch verringert sich die Zuordnungsgenauigkeit.

Eine weitere Fehlerquelle ist die Segmentierung anhand der Ankunftszeit bei der Merkmalbestimmung. Große Ungenauigkeiten können bei der Merkmalextraktion aus den Signalelementen entstehen. Die Start- und Endpunkte der Segmente im Signal werden durch die Ankunftszeit t_0 , also dem ersten Überschreiten der Nachweisschwelle, definiert. Durch natürliche Unterschiede in den Signalen verschiebt sich t_0 und somit die Segmentbereiche, so dass, wie beispielsweise im erstellten Klassifikator, nicht immer die gewünschten Wellenmoden erfasst werden.

Parameterbasierte Mustererkennung

Anders als bei der automatisierten Merkmalextraktion ist bei dieser Methode die Merkmallerstellung trivial. Es gilt: das Merkmal entspricht dem SE-Parameter. Anhand von Häufigkeitsverteilungen kann beobachtet werden, welche Parameterabhängigkeiten in den Klassen vorliegen und welche dieser Parameter sich für eine Klassentrennung eignen. Gibt es keine eindeutige Trennlinie, werden Entscheidungsgrenzen festgelegt. Ausgegeben wird dann eine Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit zur Entscheidungsregion und somit zur Signalklasse.

Die Methode der parameterbasierten Klassifizierung wird jedoch umso unübersichtlicher, je mehr Signalklassen involviert sind. Einige Beispiele für die Häufigkeitsverteilungen aller sechs Signalklassen sind in *Anhang D.5* dargestellt. Des Weiteren wird mit den drei Signalklassen „Primäre Effekte“, „Sekundäre Effekte“ und „Korrosionsprozess“ gearbeitet. Ein Beispiel für die Häufigkeitsverteilung des Frequenzparameters f_{SP} , der Schwerpunktfrequenz, ist in *Abb. 4-58* dargestellt. Etwa 25% aller Signale der primären und sekundären Effekte besitzt eine Schwerpunktfrequenz von 150 kHz, während der Korrosionsprozess höhere Frequenzen im Spektrum erzeugt. Weitere Häufigkeitsverteilungen für die Parameter Signalstärke, Counts, Maximumfrequenz sowie A-Ratio befinden sich ebenfalls im *Anhang D.5*.

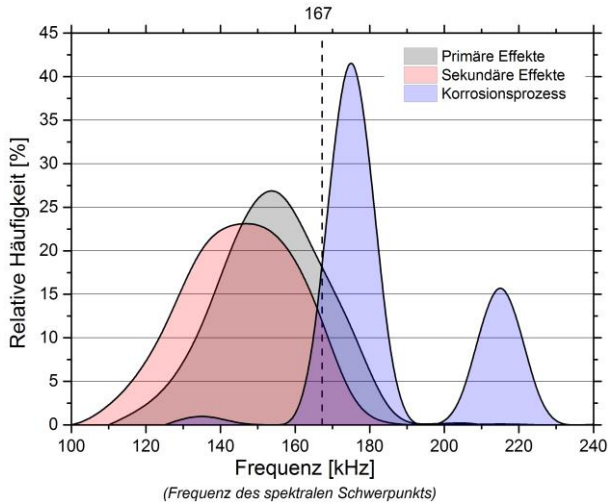


Abb. 4-58: Häufigkeitsverteilung der Schwerpunktfrequenz; die Entscheidungsgrenze bei $f_{SP} = 167$ kHz ist gekennzeichnet

Tab. 4-6: Werte für Entscheidungsgrenzen der Parameterverteilungen; mit $P(\omega_i)$: Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Klasse ω_i und $P(\omega_i|\mathbf{x})$: Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass $\mathbf{x} \in \omega_i$

Parameter	Entscheidungsgrenze	Dimension	Bereich	Klasse	$P(\omega_i)$ [%]	$P(\omega_i \mathbf{x})$ [%]
x_i	$x_{i,E}$					
E_{SS}	13	nVs	>	Primäre Effekte	21,77	33,26
				Sekundäre Effekte	1,28	1,96
				Korrosionsprozess	42,41	64,79
N_C	20		>	Primäre Effekte	25,54	32,78
				Sekundäre Effekte	1,53	1,96
				Korrosionsprozess	50,84	65,25
f_{max}	154	kHz	<	Primäre Effekte	68,81	33,68
				Sekundäre Effekte	90,43	44,27
				Korrosionsprozess	45,04	22,05
f_{SP}	160	kHz	>	Primäre Effekte	32,39	21,86
				Sekundäre Effekte	17,21	11,62
				Korrosionsprozess	98,55	66,52
f_{SP}	195	kHz	>	Primäre Effekte	0,24	0,66
				Sekundäre Effekte	0,14	0,38
				Korrosionsprozess	36,23	98,96
f_{SP}	167	kHz	>	Primäre Effekte	14,41	12,44
				Sekundäre Effekte	4,19	3,62
				Korrosionsprozess	97,22	83,94

Für die genannten Parameter wurden Entscheidungsgrenzen festgelegt. Durch Integration der Klassenverteilungen in den Entscheidungsregionen können nun die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Klasse in einer Entscheidungsregion sowie die relative Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Klassen ermittelt werden. Beispiele für einige Entscheidungs-

regionen befinden sich in Tab. 4-6. $P(\omega_i)$, die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Klasse ω_i , ist dabei das Verhältnis der Integrationssumme bis zur Entscheidungsgrenze zur Integrationssumme der Gesamtfunktion. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass $x_i \in \omega_i$, ergibt sich aus:

$$P(\omega_i|\mathbf{x}) = \frac{P(\omega_i)}{\sum_{j=1}^n P(\omega_j)} \cdot 100. \quad (28)$$

Ziel ist es, eine möglichst hohe Eintrittswahrscheinlichkeit einer Klasse mit einer hohen bedingten Wahrscheinlichkeit zu verbinden.

Tab. 4-7: Bedingte Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Klassen „Primäre Effekte“, „Sekundäre Effekte“ und „Korrosionsprozess“ für die SE-Parameter Signalstärke E_{SS} , Counts N_C , Maximumfrequenz f_{max} und Schwerpunktsfrequenz f_{SP} in den Entscheidungsregionen R_1 und R_2 mit der Entscheidungsgrenze $x_{i,E}$

Parameter	Entscheidungsgrenze	Dimension	Klasse	$P(\omega_i \mathbf{x})$ $x_i \in R_1$ [%]	$P(\omega_i \mathbf{x})$ $x_i \in R_2$ [%]
x_i	$x_{i,E}$		ω_i		
E_{SS}	13	nVs	Primäre Effekte	33,35	33,26
			Sekundäre Effekte	42,09	1,96
			Korrosionsprozess	24,55	64,79
N_C	20		Primäre Effekte	33,53	32,78
			Sekundäre Effekte	44,34	1,96
			Korrosionsprozess	22,14	65,25
f_{max}	154	kHz	Primäre Effekte	33,68	32,58
			Sekundäre Effekte	44,27	10,00
			Korrosionsprozess	22,05	57,42
f_{SP}	167	kHz	Primäre Effekte	46,47	12,44
			Sekundäre Effekte	52,02	3,62
			Korrosionsprozess	1,51	83,94

Am Beispiel des Parameters Schwerpunktsfrequenz f_{SP} (Abb. 4-58) soll dieses Verfahren erläutert werden. Die Entscheidungsgrenze liegt bei $f_{SP} = 167$ kHz. Die folgenden Angaben beschränken sich der Übersicht halber auf die Klasse „Korrosionsprozess“, wo 97,22% der SE-Signale dieser Klasse einen f_{SP} -Wert besitzen, der größer/ gleich 167 kHz ist, dagegen aber nur 14 % der primären Effekte und nur 4% der sekundären Effekte. Relativ zueinander betrachtet hat der Korrosionsprozess eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 84%. So groß ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein SE-Signal mit einem Parameterwert von $f_{SP} \geq 167$ kHz der Klasse „Korrosionsprozess“ angehört. Wird die Entscheidungsgrenze auf $f_{SP} = 195$ kHz erhöht, liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Klasse „Korrosionsprozess“ bei nahezu 100%; jedoch liegen nur 36% der Signale dieser Klasse im entsprechenden Entscheidungsbereich. Die niedrigere Grenze von $f_{SP} = 167$ kHz ist also vorzuziehen.

Die Entscheidungsgrenze $x_{i,E}$ teilt die Parameterwerte in zwei Entscheidungsregionen R_1 und R_2 . Alle Werte $< x_{i,E}$ werden R_1 , alle Werte $\geq x_{i,E}$ werden R_2 zugeteilt. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Klassen in den Wahrscheinlichkeitsregionen sind in Tab. 4-7 berechnet.

Für die Klassifizierung unbekannter SE-Signale muss nun anhand der gewählten Parameter erkannt werden, auf welcher Seite der Entscheidungsgrenze sich das Signal befindet

4 Analyse der Schallemissionssignale

und welche Klassenzuordnung aufgrund dessen getroffen wird. Ein Beispiel bietet die Klassifizierungstabelle *Tab. 4-8*. In den grauen Eingabefeldern können die aktuellen SE-Parameter eines Signals eingegeben werden. Die SE-Parameter sind Komponenten des Merkmalsvektors \mathbf{x} . Für jeden Parameter wird ein Vorschlag mit bedingter Wahrscheinlichkeit für die jeweilige Klassenzuordnung gemacht, basierend auf den Entscheidungsgrenzen aus *Tab. 4-7*. Aus der Summe dieser Wahrscheinlichkeiten, dividiert durch die Dimension des Merkmalsvektors, ergibt sich eine Klassifikationsgenauigkeit, die Werte von 0 bis 1 annehmen kann. Je höher die Klassifikationsgenauigkeit, desto höher die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Zuordnung.

Tab. 4-8: Parameterbasierte Klassifizierungstabelle für einen dreidimensionalen Merkmalsvektor \mathbf{x}

Gemessener SE-Parameter			Zuordnung zu Klasse	$P(\omega_i \mathbf{x})$ [%]	Klassifikationsgenauigkeit $\Sigma P(\omega_i \mathbf{x})/d$	
x_i			ω_i			
E_{SS}	15	nVs	Korrosionsprozess	64,79	0,71	
N_C	25			Korrosionsprozess		65,25
f_{SP}	200			Korrosionsprozess		83,94

Im Beispiel in *Tab. 4-8* ist die Zuordnung eindeutig: alle Merkmale x_i werden derselben Klasse zugeordnet. Ist dies nicht der Fall, wird die Klasse mit den meisten Treffern ausgewählt. Für die Berechnung der Klassifikationsgenauigkeit bekommt die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(\omega_i|\mathbf{x})$ der „falschen“ Klasse ein negatives Vorzeichen, so dass diese einen geringen Wert annimmt. Ein Beispiel dafür liefert *Tab. 4-9*. Parameter E_{SS} und N_C deuten auf die Klasse „Sekundäre Effekte“, während f_{SP} der Klasse „Korrosionsprozess“ zugeteilt werden. Das Signal wird der Klasse „Sekundäre Effekte“ zugeteilt. Die Klassifikationsgenauigkeit ergibt sich aus $(42\% + 44\% - 84\%)/3 = 0,0083$. Dieser Werte ist sehr klein und deutet auf eine unzuverlässige Klasseneinteilung hin.

Tab. 4-9: Parameterbasierte Klassifizierungstabelle für einen dreidimensionalen Merkmalsvektor \mathbf{x}

Gemessener SE-Parameter			Zuordnung zu Klasse	$P(\omega_i \mathbf{x})$ [%]	Klassifikationsgenauigkeit $\Sigma P(\omega_i \mathbf{x})/d$	
x_i			ω_i			
E_{SS}	5	nVs	Sekundäre Effekte	42,09	0,0083	
N_C	10			Sekundäre Effekte		44,34
f_{SP}	175			Korrosionsprozess		83,94

Abb. 4-59 zeigt zusammenfassend einen Ansatz für die parameterbasierte Klassifizierung über Verteilungsfunktionen für den allgemeinen Fall. Als erster Schritt erfolgt die Zuordnung eines vorhandenen Merkmals x_i in eine Entscheidungsregion R_i . Ist x_i nicht in R_i , so wird innerhalb der nächsten Entscheidungsregion R_{i+1} gesucht. Ist $x_i \in R_i$, wird diejenige Klasse als ω_i bestimmt, die in der Region R_i die größte Eintrittswahrscheinlichkeit $P(\omega_i|\mathbf{x})$ besitzt. Dieses Vorgehen entspricht der **Bayes'sche Entscheidungsregel** (19).

Dies wird für alle Komponenten x_i des Merkmalvektors \mathbf{x} wiederholt. Eine globale Klassenzuordnung für den Merkmalvektor \mathbf{x} erfolgt über die Entscheidungsregel, dass \mathbf{x} derjenigen Klasse zugordnet wird, die in der Klassenzuordnung für die Komponenten des Merkmalvektors x_i die größte Anzahl $N(\omega_i)$ besitzt. Ist die Anzahl mindestens zweier Klassen mit den höchsten Mengen an Klassenzuteilungen gleich, so wird dem Merkmalvektor keine Klasse zugeordnet. Die Klassifikationsgenauigkeit ergibt sich schließlich aus der Summe aller

zugeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten dividiert durch die Dimension d des Merkmalsvektors. Dabei wird $P(\omega_i|\mathbf{x})$ negativ, wenn die zugehörige Klasse ω_i vorher nicht als globale Klasse erkannt wurde.

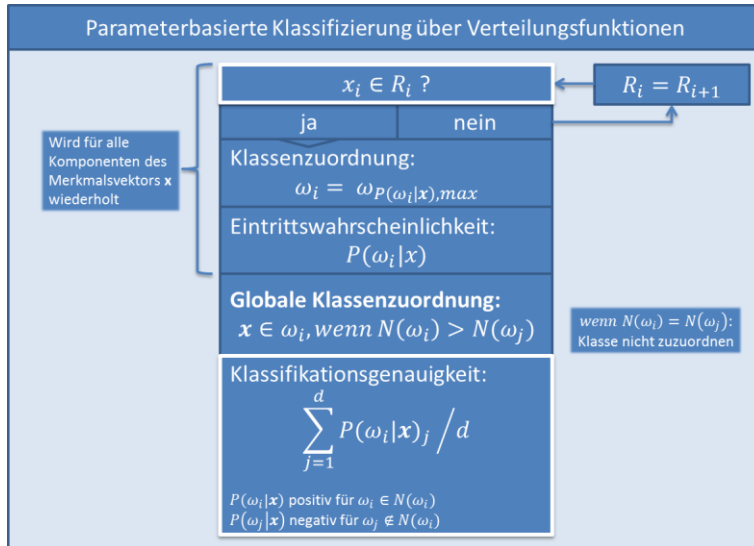


Abb. 4-59: Zusammenfassende Darstellung zur Vorgehensweise bei der parameterbasierten Klassifizierung über Verteilungsfunktionen. Zuordnung der Komponenten x_i ($i = 1, \dots, d$) des Entscheidungsvektors \mathbf{x} in eine Entscheidungsregion R_i ($i = 1, \dots, c$) und einer Klasse ω_i ($i = 1, \dots, n$) mit der Eintrittswahrscheinlichkeit $P(\omega_i|\mathbf{x})$. Entscheidungsregel für eine globale Klassenzugehörigkeit: ist die Anzahl $N(\omega_i)$ der Klasse ω_i größer als die Anzahl $N(\omega_j)$ der Klasse ω_j , dann entscheide für ω_i , für alle $i \neq j$

Die Methode der parameterbasierten Mustererkennung ermöglicht die Klassifizierung eines SE-Signals aufgrund der SE-Parameter. Ihr Ergebnis ist eine Klasseneinordnung mit der Angabe einer Klassifikationsgenauigkeit. Sie setzt allerdings voraus, dass die Häufigkeitsverteilungen der Parameter bekannt sind und diese das Setzen von klassentrennenden Entscheidungsgrenzen ermöglichen. Letzteres ist in der gewählten Klassifikation dreier Signalklassen besonders für die Klasse „Korrosionsprozess“ möglich. Hier kann, aufgrund der spezifischen Eigenschaften der SE-Signale dieser Signalklasse, eine Einordnung der Signale mit hoher Klassifikationsgenauigkeit erfolgen.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Nachweisbarkeit von Schallemissionsquellen

Die Nachweisbarkeit von Defekten ist bei der zerstörungsfreien Prüftechnik von höchster Bedeutung. Kann ein Defekt nicht rechtzeitig durch die ZfP erkannt werden, so ist die Prüfmethode für die jeweilige Prüfung nicht geeignet. „Rechtzeitig“ ist dabei genauso zu definieren wie die Prüfumgebung und der Prüfling. Die Schallemissionsprüfung besitzt einen sehr hohen Grad an Einflussgrößen (vgl. S. 23). Die Prüfumgebung spielt insofern eine große Rolle, als dass die Intensität von Störgeräuschen die Nachweisschwelle beeinflusst, welche wiederum die maximalen Sensorabstände bestimmt. Besonders großen Einfluss auf die Nachweisbarkeit von SE-Ereignissen haben deshalb zwei Faktoren:

1. Die Amplitude der SE-Signale, die von SE-Quelleneignissen ausgehen und
2. die Anzahl der lokalisierten SE-Ereignisse.

Ein einzelnes SE-Signal hat meist wenig Aussagekraft. Es muss eine definierte Zahl an Signalen von einer Quelle ausgehen, damit eine statistisch abgesicherte Aussage über eine mögliche Fehlstelle zulässig ist. Als nachweisbar werden für die Ermüdungsversuche an Platten SE-Ereignisse definiert, wenn sie Amplituden besitzen, die über der Nachweisbarkeitsgrenze von $50 \text{ dB}_{\text{AE}}$ liegen und bei denen eine Clusterbildung mengenmäßig möglich ist (mehr als 20 SE-Ereignisse pro Versuchsabschnitt für die Versuchsplatten).

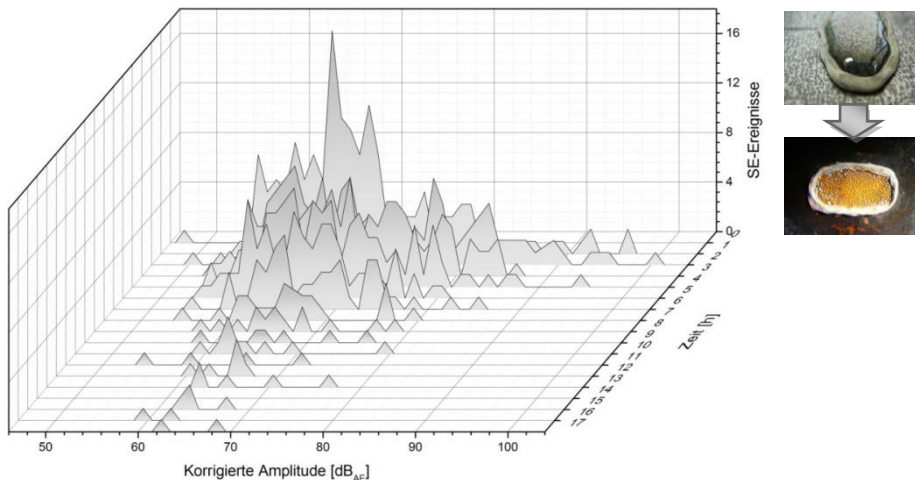


Abb. 5-1: Verteilung der korrigierten Amplitude von SE-Ereignissen je Stunde im 18-stündigen Korrosionsversuch

Ein Sonderfall bietet die Überwachung der Korrosion im Ruhezustand eines Bauteils. Hier kann die Nachweisbarkeitsgrenze mit $32 \text{ dB}_{\text{AE}}$ deutlich niedriger gesetzt werden. In den durchgeführten Versuchen wurde deutlich, dass die große Anzahl der SE-Ereignisse, ihre hohe Energie und Amplitude die Detektion des Korrosionsbereiches in den ersten fünf Stunden nach Einsetzen der Korrosion am wahrscheinlichsten machen. Die distanzkorrigierten Amplituden (vgl. Abb. 5-1) sind zu Beginn der Korrosion breit verteilt, von 50 bis 100

dB_{AE} . Der Großteil der Amplituden liegt im gesamten Versuch zwischen 60 und 80 dB_{AE} . In den Stunden 2 bis 5 treten zusätzlich Amplituden bis 100 dB_{AE} auf.

Bei der Betrachtung der Messumgebung ist, neben den Schallemissionsgeräuschen, das Umgebungsmedium eine wichtige Einflussgröße. In ein Fluid wird beispielsweise ein größerer Energieanteil der akustischen Welle übertragen als in ein Gas. Deshalb muss bei einem Prüfkörper mit angrenzender Flüssigkeit mit einer höheren Schallschwächung gerechnet werden. Nach eigenen Messungen (vgl. *Anhang D.7*) beträgt die Schallschwächung nach 500 mm Laufweg und in-plane-Anregung an Luft etwa 15 dB_{AE} , während diese sich mit einseitiger Lagerung in Wasser auf etwa 22 dB_{AE} erhöht. Dieses Phänomen muss bei der Messung an mit Flüssigkeit gefüllten Tanks Beachtung finden. Von Vorteil ist jedoch die dämpfungsarme Übertragung der akustischen Wellen über die Flüssigkeit, was wiederum die Nachweisbarkeit und Lokalisierbarkeit von SE-Quellen erhöht, wozu jedoch komplexere Ortungsalgorithmen benötigt werden.

Zustandsüberwachung im Vergleich zur statischen Prüfung

In dieser Arbeit geht es um die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrisswachstum und Korrosion in einer bewegten Umgebung. Durch die, im Vergleich zu Messungen im Ruhezustand, hohe Nachweisschwelle können SE-Signale mit kleiner Amplitude, wie sie z.B. durch plastische Verformung entstehen, nicht nachgewiesen werden. Als Vergleich zur SE-Zustandsüberwachung während des Betriebes soll hier die industriell angewendete Methode der Innendruckprüfung dienen. Diese wird durch eine statische Belastung der Versuchsplatten bis zu 10% über der Schwingbelastung simuliert. Dies entspricht der Belastung einer normgerechten Gasdruckprüfung [Dine05].

Ergebnisse der statischen Belastung von Platte 5 befinden sich in *Anhang D.6*. Der korrodierte Riss einer Länge von 51 mm konnte mit der Farbeindringprüfung und auch durch die statische Prüfung mittels SEP nachgewiesen werden. Dies trifft ebenso für die Oberflächenkorrosion zu. Der Nachweis des nicht-korrodierten Risses ist erst nach dem Durchriss der Platte und unter Einfluss der Reibung der Bruchflächen am unteren Plattenrand möglich. Auch entstehen sehr geringe Amplituden ($A_{\text{korrr}} \leq 72 \text{ dB}_{\text{AE}}$) im Vergleich zum korrodierten Riss ($A_{\text{korrr}} \leq 95 \text{ dB}_{\text{AE}}$).

Tab. 5-1 zeigt vergleichend am Beispiel dreier Risslängen die in den Schädigungsgebieten lokalisierten SE-Ereignisse pro Lastwechsel für das SE-Monitoring während der Ermüdungsversuche und die Anzahl der SE-Ereignisse, die bei der simulierten Druckprüfung entstanden. Bei einer Risslänge von 51 mm zeigen beide Methoden für die korrodierten Bereiche K2 und KB besonders viele SE-Indikationen. Der Grund dafür liegt in der Versuchsdurchführung: Bevor ein Anriss durch die Farbeindringprüfung nachgewiesen wurde, fand keine Korrosion statt. Die hier dargestellten Ergebnisse für $a = 51 \text{ mm}$ zeigen die erste Belastung nach einer Korrosionszeit von 3 Tagen. Es wird deutlich, dass der korrodierte Riss (K2) und die korrodierte Oberfläche (KB) durch beide Methoden frühzeitig erkannt werden. Dagegen wird der nicht-korrodierte Riss (K1) durch das SE-Monitoring erkannt, während es bei der Druckprüfung keine Indikation gibt.

Tab. 5-1: Vergleich der Anzahl der SE-Ereignisse N_E in den Schädigungsbereichen K1 (Riss ohne Korrosion), K2 (korrodierter Riss) und KB (Korrosionsbereich) bei ausgesuchten Risslängen a ; (nach einer Risslänge von 170 mm gibt es keinen Korrosionsbereich mehr, da sich die Schädigungsellipsen überschneiden würden)

a [mm]	N_E/LW Ermüdung				da/dN [mm/LW]	N_E Druckprüfung			
	K1	K2	KB			a [mm]	K1	K2	KB
51 bis 70	1,93E-04	0,06	4,24E-04	2,70E-04	51	0	132	78	
70 bis 84	0,04	3,69E-03	3,26E-04	3,91E-04	70	0	68	1	
184 bis 212	0,45	0,69	-	9,75E-04	184	28	30	-	

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Blick auf die in beiden Versuchsreihen entstandenen distanzkorrigierten Amplituden (Abb. 5-2). Diese sind für die Korrosionsfläche auf ähnlichem Niveau für Druckprüfung und Ermüdungsversuch. Für den korrodierten Riss sind die Amplituden bei der Druckprüfung sogar mit Werten über 95 dB_{AE} sehr hoch. Die Amplituden, die im Bereich des nicht-korrodierten Risses entstehen, sind allerdings mit Werten bis 70 dB_{AE} sehr gering. Und auch diese werden erstmals nach Plattendurchbruch nachgewiesen.

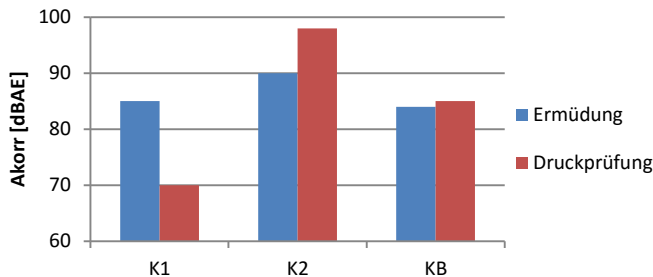


Abb. 5-2: Maximalwerte der distanzkorrigierten Amplituden der in den Schädigungsgebieten K1, K2 und KB lokalisierten SE-Ereignisse; Vergleich der Ermüdungsversuche und statischer Belastung von Platte 5; der dargestellte A_{korr} -Wert entspricht demjenigen des zehntgrößten Messwertes der über die gesamte Versuchsdauer aufgenommenen A_{korr} -Werte (Abb. D-52 und Abb. D-53 in Anhang D.6)

Bei der Zustandsüberwachung tauchen SE-Quellen auf, die während der Druckprüfung nicht nachgewiesen werden können. Dazu gehören vor allem sekundäre Quellen, deren Amplitude bei der Druckprüfung unter der Nachweisschwelle liegen. Rein statistisch ist die Detektionswahrscheinlichkeit bei der Zustandsüberwachung höher, da diese Quellen mit jedem Lastzyklus neu aktiviert werden können. Wie im Folgenden diskutiert wird, ist jedoch der Nachweis eines nicht-korrodierten Risses auch über das SE-Monitoring nicht immer möglich und von vielen Randbedingungen abhängig.

Der als Probenmaterial verwendete kaltzähe Feinkornstahl bietet keine gute Grundlage für Schallemissionsquellen. Bereits die REM-Aufnahmen der Bruchflächen zeigen, gerade bei geringen Rissfortschrittsgeschwindigkeiten, eine sehr glatte Oberfläche mit geringen plastischen Verformungen und transkristallinem Rissfortschritt. Die statischen Überlasten hinterlassen sichtbare plastische Verformungen, welche jedoch nicht durch Schallemissionssignale nachgewiesen werden können; es gibt kaum SE-Ereignisse bei maximaler Belastung. Entstandene SE-Signale liegen wohl unterhalb der Nachweisschwelle. Werden

5 Schlussfolgerungen

durch glatte Oberflächen keine oder wenig sekundäre Emissionsquellen generiert und durch eine hohe Nachweisschwelle keine primären Signale durch plastische Verformung detektiert, bleiben für den Nachweis des nicht-korrodierten Risses nur SE-Ereignisse, welche aus dem Rissfortschritt entstehen. Hier besteht wiederum die Einschränkung, dass der Rissfortschritt groß genug sein muss, um als SE-Quelle eine Verschiebungsamplitude zu erzeugen, deren Signal über die Nachweisschwelle gelangt.

Nachweisbarkeit von primären und sekundären SE-Quellen

Diese Betrachtung führt weiter in die Analyse der primären und sekundären SE-Quellen hinsichtlich ihres Anteils am jeweiligen Schadensmechanismus. Die Energieentwicklung der drei Schadensmechanismen ist in *Abb. 5-3* dargestellt.

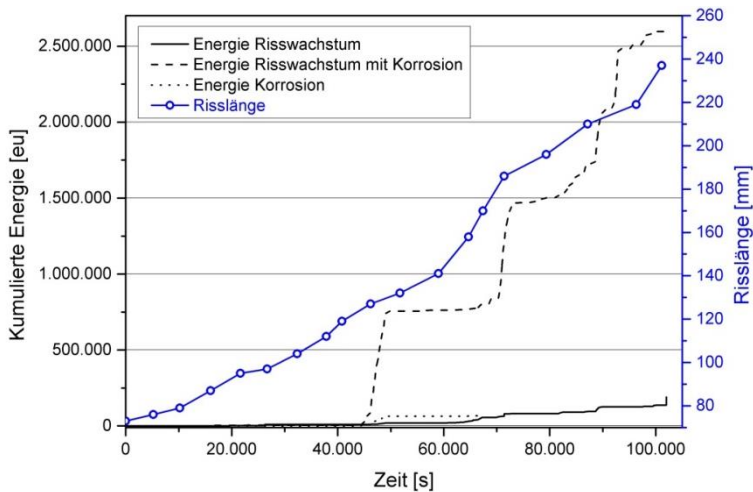


Abb. 5-3: Risslänge im Vergleich zur Signalstärke der Schadensmechanismen Ermüdungsrisswachstum, Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss und Oberflächenkorrosion an Platte 5; $1\text{eu} \equiv 1\text{nVs}$

Dabei ist die Energiesumme der SE-Ereignisse aus dem korrodierten Ermüdungsriss um eine Größenordnung höher als diejenige aus den beiden anderen Schadensquellen, dem Ermüdungsriss ohne Korrosion und der Oberflächenkorrosion. Dies gibt bereits einen Hinweis darauf, dass ein Ermüdungsriss in einem korrodierten Gebiet besser nachgewiesen kann, als ein Ermüdungsriss ohne Korrosionseinfluss oder die Oberflächenkorrosion unter zyklischer Belastung.

Werden, wie in *Abb. 5-4*, allein die primären Effekte betrachtet, ergibt sich ein anderes Bild. In Abhängigkeit des zyklischen Spannungsintensitätsfaktors, also der Spannungsüberhöhung an der Risspitze, zeigen die SE-Signale primärer Effekte des Risswachstums für den nicht-korrodierten sowie den korrodierten Riss nahezu deckungsgleiche Amplitudenverläufe.

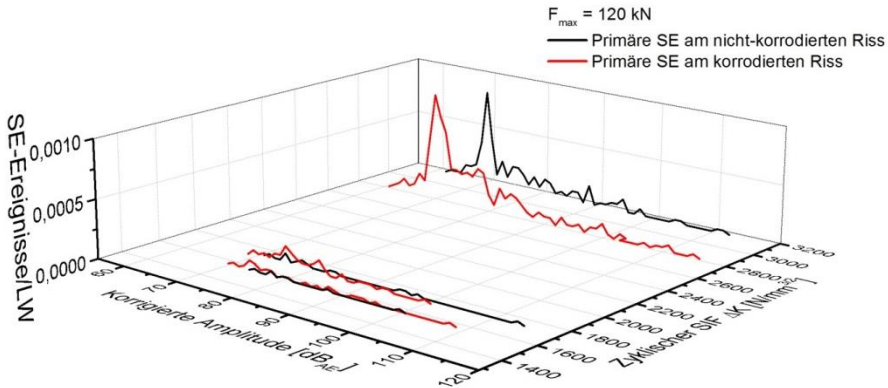


Abb. 5-4: Amplitudenverteilung primärer SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum am nicht-korrodierten Riss (schwarz) und am korrodierten Riss (rot) in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor

Der Unterschied in den Energieverläufen korrodierter und nicht-korrodierter Risse liegt somit scheinbar nicht in der Entstehung von primären SE-Ereignissen. Ein weiteres Beispiel soll dies verdeutlichen. In Versuchsabschnitten mit geringen Risswachstumsraten und somit geringen Anteilen an primären SE-Quellen wurde ein Vergleich zwischen einem Ermüdungsriss ohne und mit Korrosion angestellt. Die Anteile der primären und sekundären SE-Ereignisse in beiden Rissen sowie der Anteil der Störgeräusche sind in *Abb. 5-5* dargestellt. Dabei besitzt der korrodierte Riss mit knapp 60% einen sehr viel höheren Anteil an sekundären SE-Ereignissen als der nicht-korrodierte Riss (1,2%). Von Bedeutung ist hier vor allem der Bruch von Korrosionsprodukten im Riss und in rissnahen Bereichen. Die Störgeräusche werden hauptsächlich durch die Reibung der Auflagerrollen auf der Plattenoberfläche erzeugt.

Hier wird deutlich, dass gerade bei geringen Rissfortschrittsraten, d.h. wenn ein Rissnachweis durch primäre SE nicht möglich oder unsicher ist, sekundäre SE-Ereignisse für die Nachweisbarkeit essentiell sind. Da ein korrodiertes Riss bis zu 60-mal mehr sekundäre SE-Ereignisse erzeugt als ein nicht-korrodiertes Riss ist dieser dementsprechend einfacher nachzuweisen.

Ein Riss muss also nicht zwangsläufig wachsen, um durch die SEP identifiziert zu werden. Dies ist allein anhand der sekundären SE-Quellen, die durch Bruchflächenreibung entstehen, möglich. Sekundäre SE-Ereignisse pro Lastwechsel eines nicht-korrodieren Risses in Abhängigkeit von der entstandenen Bruchfläche sind in *Abb. 5-6* dargestellt. Die Anzahl der SE-Ereignisse wächst ab einer bestimmten Bruchflächengröße exponentiell an. Die angegebene Kraftgröße ist die Oberlast und ist hier weniger als Belastungsgröße denn als Indikator für die Rissöffnung von Einfluss. Je höher die Oberlast, desto mehr Bruchfläche steht der Reibung zur Verfügung und umso mehr SE-Quellen können aktiviert werden.

5 Schlussfolgerungen

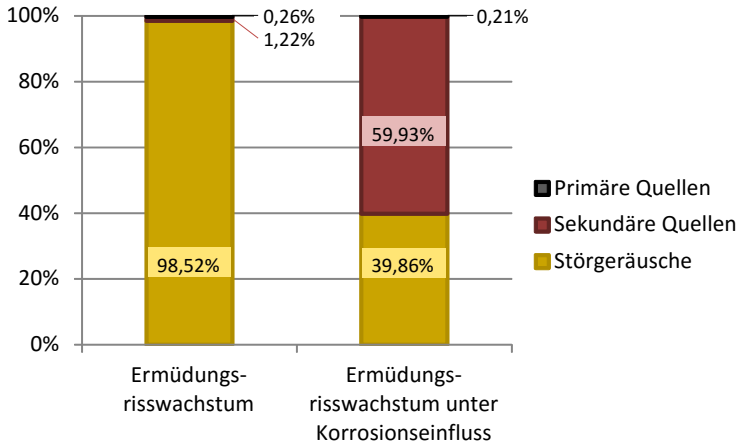


Abb. 5-5: Einfluss der Korrosion auf den Anteil sekundärer SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum. Anteile primärer und sekundärer Schallemissionsquellen/ Störgeräusche beim Nachweis von Ermüdungsrissen bei geringen Risswachstumsraten von $da/dN = 5,7 \cdot 10^{-5}$ bzw. $5,6 \cdot 10^{-5}$ mm

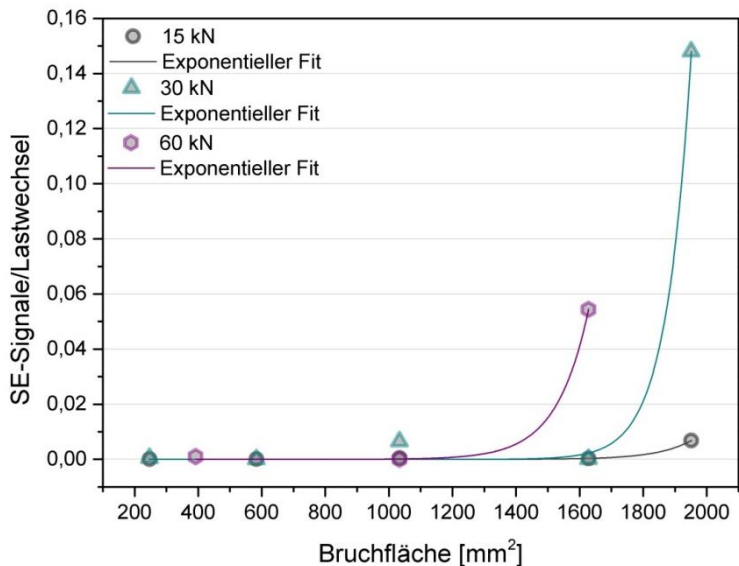


Abb. 5-6: Sekundäre SE beim nicht-korrodierten Riss (Platte 5) bei solchen Oberlasten (15, 30 und 60 kN), die nicht zum Risswachstum führen

Hintergrundgeräusche werden bei einer Schallemissionsprüfung größtenteils durch das Anheben der Nachweisschwelle vermieden. Störgeräusche dagegen sind bei einer kontinuierlichen Zustandsüberüberwachung oft unvermeidbar. Häufig können durch die Ortung SE-Quellen gut von Störgeräuschen getrennt werden. Ist jedoch ein Störgeräusch, wie beispielsweise die Reibung eines Auflagers, sehr aktiv, können kleine Cluster einer SE-Quelle in der Nähe, wie z.B. ein langsam wachsender Riss, in der Ortung leicht überdeckt werden.

Deshalb kann auch das Verhältnis von SE-Ereignissen aus dem Schadensprozess zu denen des Störgeräuschs für den Nachweis einer Fehlstelle von Bedeutung sein. *Abb. 5-7* zeigt die Anzahl der SE-Ereignisse pro Lastwechsel in den drei Schädigungsbereichen bei geringen Lasten. Als Vergleichswert dient die Markierung der durchschnittlichen Ereignisrate der Störgeräusche, die in dieser Versuchsreihe bei 0,08 SE-Ereignissen/ LW liegt. Die sekundären SE-Ereignisse des nicht-korrodierten Risses liegen mit einem Maximalwert von 0,008 SE- Ereignissen/ LW eine Größenordnung darunter, die des korrodierten Risses oft weit darüber. Die Oberflächenkorrosion hat in 2 von 5 Fällen eine höhere Ereignisrate als der Mittelwert der Störgeräusche.

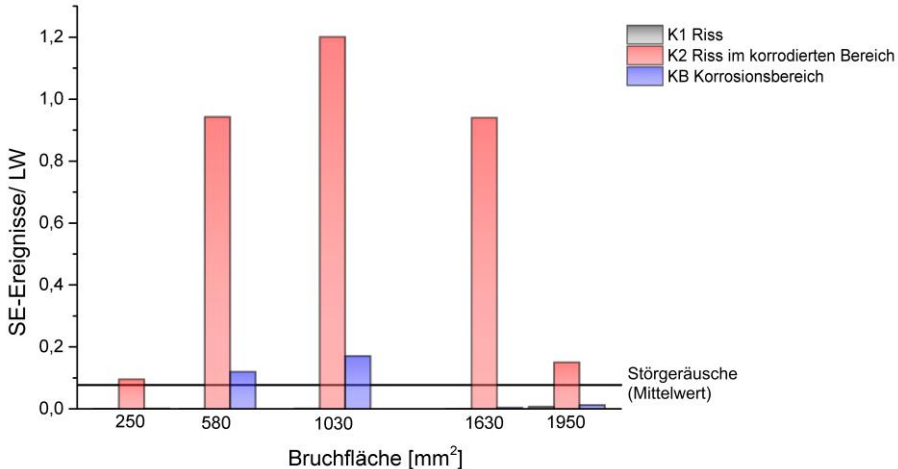


Abb. 5-7: Sekundäre SE-Ereignisse pro Lastwechsel in Abhängigkeit von der Bruchfläche bei geringer Belastung (15 kN Oberlast, Platte 5)

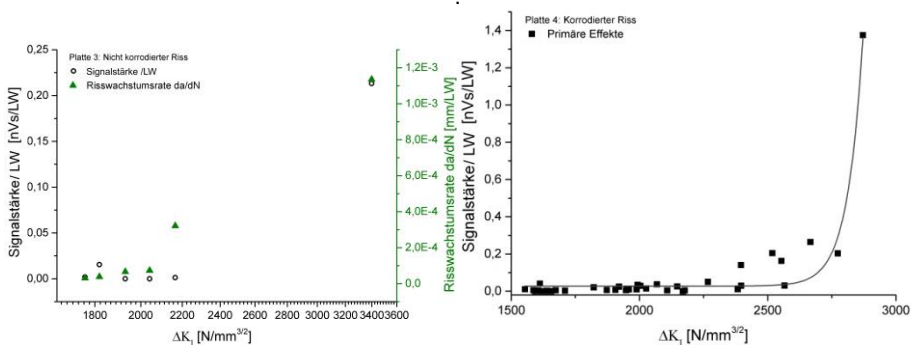


Abb. 5-8: Signalstärke der primären SE-Ereignisse beim Risswachstum eines nicht-korrodierten Risses (links) und eines korrodierten Risses (rechts) in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK

Wie insbesondere in Kapitel 4.2 diskutiert wurde, ist sowohl Ereignisrate als auch Signalintensität bei primären SE-Ereignissen weniger abhängig von der Rissgröße als vielmehr von bruchmechanischen Parametern wie der Risswachstumsrate und dem Spannungsintensitätsfaktor als Indikator für die Spannungszustände an der Risspitze. Für Ermüdungsrisse

5 Schlussfolgerungen

mit und ohne Korrosionseinfluss ergaben sich ähnliche Ergebnisse (vgl. Abb. 5-8): Die für einen Rissnachweis benötigten Amplitudenwerte und Ereignismengen ergeben sich bei Werten von Risswachstumsrate und Spannungsintensitätsfaktor für

$$da/dN > 10^{-3} \text{ mm/LW und}$$

$$\Delta K > 2.500 \text{ N/mm}^{3/2}.$$

Vergleichbare Werte ergaben sich in Arbeiten von [Ono05, Roge01, ScBS85] für Baustahl- und Aluminiumproben. Bei niedrigeren Risswachstumsraten ist der Nachweis eines Risses hauptsächlich über sekundäre SE-Quellen möglich.

Fazit

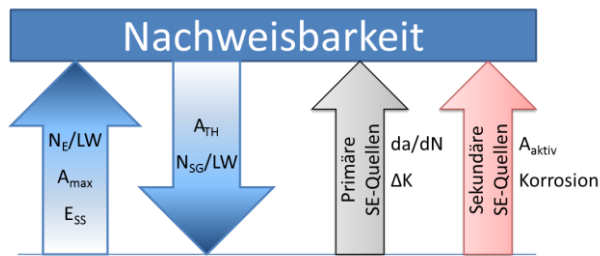


Abb. 5-9: Schema zur Beschreibung wichtiger Parameter zur Nachweisbarkeit von Fehlstellen durch die SEP. Positiv für die Nachweisbarkeit ist eine hohe Ereignisrate (N_E/LW), hohe Maximalamplituden (A_{max}) sowie hohe Signalstärken (E_{SS}). Negativ wirken sich eine hohe Nachweisschwelle (A_{TH}) sowie eine hohe Störgeräusch-Rate (N_{SG}/LW) aus. Für den Nachweis primärer SE-Quellen beim Ermüdungsrisswachstum ist eine hohe Risswachstumsrate (da/dN) und ein hoher zyklischer Spannungsintensitätsfaktor (ΔK) von Bedeutung, während zum Nachweis sekundärer Quellen die aktive Bruchfläche (A_{aktiv}) und der Grad der Korrosion ausschlaggebend sind

Ein Nachweis von Materialschäden durch Korrosion und Ermüdungsrisswachstum mittels Schallemissionsprüfung kann nur erfolgen, wenn die durch SE-Quelle und Messumgebung bestimmten Parameter dies erlauben. Abb. 5-9 zeigt schematisch, welche Parameter positive und welche negative Auswirkungen auf die Nachweisbarkeit derartiger SE-Quellen besitzen. Hohe Ereignisraten und Amplituden werden insbesondere als primäre SE-Quellen bei hohen Rissfortschrittsraten erzeugt, die für die Entstehung neuer Bruchflächenbereiche sorgt, welche wiederum Ausgangspunkt für sekundäre Quellen darstellen. Die Korrosion besitzt insbesondere für die Emission aus sekundären SE-Quellen eine große Bedeutung. Sie erhöht den Anteil an sekundären SE-Quellen und verbessert damit die Nachweisbarkeit von Ermüdungsrissen ähnlicher Geometrie und Risswachstumsrate bei der Zustandsüberwachung und bei hoher Störgeräuschaktivität erheblich.

5.2 Mustererkennung von SE-Quellmechanismen

Es wurden mithilfe von Methoden der Signalanalyse und logischer Verknüpfung externer Parameter knapp 50.000 SE-Signale sechs Quellenmechanismen in drei Schädigungsklassen „*Ermüdungsrisswachstum*“, „*Ermüdungsrisswachstum unter korrosivem Einfluss*“ und „*Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung*“ zugeordnet. Dabei wurde ein einheitlicher Sensorabstand von 100 bis 150 mm eingehalten, um Schallschwächungs- und Dispersionsseffekte zu minimieren.

Aus den Signalen wurden Klassifikatoren für die Mustererkennung von SE-Signalen bezüglich der drei Schädigungsklassen erstellt. Es wurden zwei Ansätze verwendet:

1. eine **automatisierte Merkmalsextraktion** und Klassifikation mithilfe des Klassifizierungsprogrammes *VisualClass* [Vall12c] und
2. eine **parameterbasierte Methode**, bei der die Klasseneinteilung auf Grundlage von Verteilungsfunktionen der SE-Parameter erfolgte.

Beide Methoden sind in ihrer grundlegenden Vorgehensweise in *Abb. 5-10* dargestellt.

Mustererkennung Eingang: SE-Signal Vorverarbeitung: Vorfilterung, Lokalisierung	Automatisiert Merkmale werden aus Signalsegmenten gewonnen	Hauptachsen- transformation Transformation der statistischen Merkmale in eine geringere Anzahl möglichst aussagekräftiger Linearkombinationen	Statistische Klassifikation Clustering der transformierten Merkmale in der Projektionsebene	Signalklasse + Abstandskriterien, die eine Aussage über ein SE-Signal im Vergleich zur Klasse treffen
	Merkmalsextraktion	Merkmalsreduktion	Klassifizierung	Ergebnis
	Parameterbasiert SE-Parameter oder Parameterkombinationen werden als Merkmale verwendet	Auswahl klassentrennender Merkmale anhand von Verteilungsfunktionen	Statistische Klassenbildung Einteilung in Entscheidungsregionen auf Grundlage der Verteilungsfunktionen	Signalklasse + Klassifikationsgenauigkeit, basierend auf Entscheidungsgrenzen und Trefferquote für Merkmalmenge

Abb. 5-10: Allgemeine Vorgehensweise bei einer Mustererkennung (blau) und Beschreibung der verwendeten Methoden der automatisierten Klassifizierung (grün) sowie der parameterbasierten Klassifizierung (orange)

Eine erste Mustererkennung wurde anhand von definierten BMT-Signalen durchgeführt, deren Anregung im Plattenquerschnitt (IP) bzw. an der Plattenoberfläche (OOP) erfolgten. Diese IP/OOP-Klassifizierung ergab nach parameterbasierter Merkmalgewinnung und Klassentrennung anhand der Häufigkeitsverteilung des Parameters „Amplitudenverhältnis“ eine eindeutige Klassentrennung bei einer Entscheidungsgrenze $A_{\text{Ratio}} = 1,15$. Die Wahrscheinlichkeiten $P(\omega_i)$ für die Klassenzugehörigkeit in der Entscheidungsregion R_i beträgt für beide Klassen jeweils 100%.

Auch nach automatisierter Merkmalsextraktion wird bei definierten in-plane- und out-of-plane-Signalen eine Klassentrennung mit einer Zuordnungswahrscheinlichkeit von 100% erreicht. Die verwendete Segmentierung für die Erstellung des Klassifikators legt den Schwerpunkt auf die Hauptanteile der S_0 - und A_0 -Wellenmoden. Aufgrund der guten Klassentrennung bei der IP/OOP-Klassifikation und der Erfahrung aus der Wellenmodenanalyse, dass eine Zuordnung in IP/OOP der natürlichen Signalklassen durch Zeit-Frequenz-Informationen (Wavelet-Diagramme) grundsätzlich möglich ist, wird dieser Klassifikator

5 Schlussfolgerungen

auch für die Klassentrennung der Signale aus den definierten Schädigungsklassen verwendet. Bei allen automatisierten Klassifikationsprozessen wurde durch eine Transformation der Merkmale das Klassifikationsergebnis verbessert.

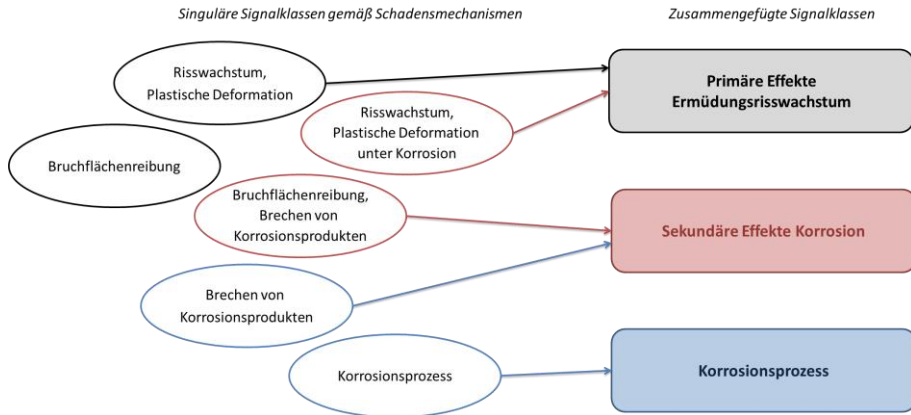


Abb. 5-11: Entwicklung von Signalklassen aus den Schadensmechanismen Risswachstum (schwarz), Risswachstum unter Korrosion (rot) und Oberflächenkorrosion unter zyklischer Belastung (blau). Sechs singuläre Signalklassen (links) und zusammengeführte Signalklassen (rechts)

Aus den Schadensmechanismen wurden Signalklassen gemäß den Quellmechanismen für Schallemission gebildet. Der Mustererkennungsprozess wurde mit einer Menge von sechs, vier und drei Klassen durchgeführt (6K-, 4K- und 3K-Klassifikator). Dabei wurde die Klassenreduktion durch eine Zusammenlegung der Signalklassen nach gleichen Quellmechanismen erreicht (vgl. Abb. 5-11).

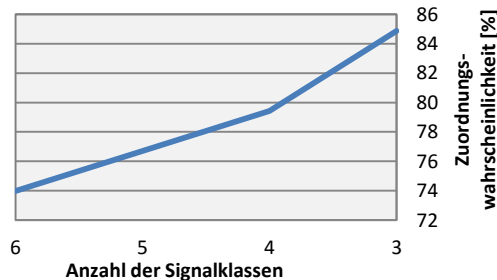


Abb. 5-12: Zuordnungswahrscheinlichkeit (Durchschnittswert für alle Klassen) in Abhängigkeit von der Anzahl der Klassen

Bei allen Variationen der Mustererkennung ergaben sich die besten Klassifikationsergebnisse für den Korrosionsprozess. Der 6K-Klassifikator erzielte für diese Klasse eine Zuordnungswahrscheinlichkeit von 77,1 % und der 3K-Klassifikator von 97,2 %. Die Zuordnungswahrscheinlichkeit sowie die Klassifikationsgenauigkeit wachsen mit Reduzierung der Klassenanzahl (vgl. Abb. 5-12). Die beste Trennbarkeit zeigt sich bei 3 Klassen. Jedoch ist durch das Zusammenlegen der Klassen keine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Schadensmechanismen mehr möglich.

Die parameterbasierte Mustererkennung ist für die Schallemissionsprüfung eine praxisorientierte Methode. SE-Parameter können dabei, auch ohne Aufzeichnung des SE-Signals, für jedes Ereignis erfasst und online bearbeitet werden. In der Arbeitsgruppe um *M.G.R. Sause* wurde Erfahrung mit der Klassifizierung von Schadensmechanismen in Faserverbundwerkstoffen gesammelt. Für die dort auftretenden SE-Signale ist eine natürliche Clusterbildung im frequenzbasierten Merkmalsraum unter Verwendung von Breitbandsensoren möglich [SGUH12].

Für die hier untersuchten Merkmale und unter Verwendung von Resonanzsensoren konnten anhand der betrachteten Merkmale keine natürliche Clusterbildung beobachtet werden. Deshalb wurde die Methode des überwachten Lernens angewendet; die Klassentrennung wurde anhand von Entscheidungsgrenzen in den Verteilungsfunktionen der Merkmale durchgeführt. Erfahrungen mit der automatisierten Merkmalbestimmung zeigten, dass sich die reduzierte Anzahl an Signalklassen nach *Abb. 5-11*, die sich an den natürlichen Quellmechanismen der SE-Ereignisse orientieren, am besten für eine Mustererkennung eignet. Auch für die parameterbasierte Mustererkennung erlaubten die Signale der Signalklasse „*Korrosionsprozess*“ aufgrund der, sich von den anderen Klassen oft grundsätzlich unterscheidenden, Parameterverteilungen die besten Ergebnisse für die Klassenzuordnung.

Automatisierte Mustererkennung	Parameterbasierte Klassifikation
<ul style="list-style-type: none"> • Online möglich • Automatisierte Methode • Merkmalsextraktion aus Signalsegmenten <ul style="list-style-type: none"> • Ankunftszeitbasiert, • Merkmale werden durch Nachweischwelle beeinflusst • Methode auf Versuchsbedingungen beschränkt 	<ul style="list-style-type: none"> • Online möglich • Methode fordert Entwicklungsarbeit • Merkmale basieren auf SE-Parametern <ul style="list-style-type: none"> • Einfache Extraktion • Zusammenhangnahe Darstellung • Aussagekraft auch für andere Materialien/Sensorik

Abb. 5-13: Vergleich der verwendeten Methoden für die Mustererkennung

Ein direkter Vergleich der für die Klassifikation verwendeten Methoden ist in *Abb. 5-13* dargestellt. Während die verwendete automatisierte Methode abstrakte Merkmale generiert, ist bei der parameterbasierten Klassifikation oft ein direkter Bezug zum untersuchten Material und zur Sensorik vorhanden. So kann beispielsweise an Frequenzparametern der Einfluss eines Resonanzsensors abgelesen werden. Beide zur Mustererkennung verwendeten Methoden können online genutzt werden, also während einer laufenden Schallemissionsprüfung Aussagen über einen Schadensmechanismus treffen. Dabei ist zu beachten, dass eine Abhängigkeit von Material, Laufweg und Sensorik besteht. Wie bereits *Aggelis und Matikas* diskutierten, ist es sinnvoll, jeder Klassifikation von SE-Signalen einen Ortungsalgorithmus vorzuschalten, um Dispersionseffekte auszuschließen [AgMa12]. Während in dieser Arbeit durch gleichbleibende Quelle-Sensorabstände versucht wurde, dieses Problem zu umgehen, schlugen *Aggelis und Matikas* eine Distanzkorrektur nicht nur der Amplitude, sondern auch anderer SE-Parameter, wie der Anstiegszeit vor. Dies erfordert eine Simulation des gesamten Systems aus Quelle, Bauteil und Sensor, wie es bereits von *Sause* [SaHH12, SaHo10, Saus10] für Faserverbundwerkstoffe durchgeführt wurde.

Des Weiteren wurde die parameterbasierte Mustererkennung über Verteilungsfunktionen auf wenige Parameter und somit Merkmale beschränkt. Die Entscheidungsgrenzen wurden

5 Schlussfolgerungen

statisch in den Parameterverteilungen installiert. Dieser Ansatz kann mit einiger Entwicklungsarbeit erweitert werden. Eine automatisierte und vollständige Parameterauswahl, wie sie *Sause et al.* [SGUH12] durchgeführt haben, um optimale Parameterkombinationen für die Klassifizierung zu erhalten, ist auch für dieses Klassifikationsmodell sinnvoll. Ein dynamisches Setzen der Entscheidungsgrenzen in den Verteilungskurven, abhängig vom Parameterwert eines zu klassifizierenden Signals, kann punktgenaue Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Klassenzugehörigkeit liefern. Ferner kann nach einer Ermittlung weiterer klassentrennender Parameter eine mehrdimensionale Betrachtung mit Clusterbildung im Merkmalsraum folgen.

Für eine globale Zustandsüberwachung mittels SEP sind die hier vorgestellten Mustererkennungsmethoden aufgrund der Veränderungen der Merkmale mit dem Laufweg allerdings nicht geeignet. Vielmehr können sie in der Überwachung von Hot-Spots angewendet werden, deren Lage am Bauteil durch FE-Modellierungen bestimmt werden können.

5.3 Konsequenzen für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung

Als kontinuierliche Zustandsüberwachung, oder auch Online-Condition-Monitoring, wird eine permanente Erfassung des Zustandes eines Prüfobjektes bezeichnet [KoWa08]. Sie hat eine zustandsorientierte Instandhaltung zum Ziel, die im Gegensatz zu einer präventiven Instandhaltung eine maximale Nutzung der Bauteil-Lebenszyklen sowie mehr Sicherheit durch schnelles Reaktionsvermögen auf Schadensbildung verspricht.

Die Schallemissionsprüfung bietet alle Voraussetzungen für solch eine ganzheitliche Überwachungsmethode. Die Sensortechnik und Messsysteme mit der Möglichkeit und auch den Kapazitäten für Online-Messungen sowie kommerzielle Software zur Online-Analyse sind vorhanden. Jedoch ist die Verbindung von Schallemissionsquelle, der Ausbreitung der akustischen Welle als Körperschall und dem Einfluss der Messumgebung derart von den einzelnen Teilschritten abhängig, dass die Frage, ob die SEP für eine kontinuierliche Zustandsüberwachung geeignet ist, nicht pauschal beantwortet werden kann. Vielmehr muss sie für jede Prüfaufgabe gesondert entschieden werden.

Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse gelten für

- Materialschäden durch Ermüdungsrisswachstum und/ oder Korrosion,
- hochfesten Feinkornstahl (P460NL1),
- eine Umgebung mit Hintergrundgeräuschen unter 50 dB_{AE} sowie
- Sensorik mit einer Resonanzfrequenz von 150 kHz.

Um den Nutzen der SEP bei einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung zu beurteilen, steht zunächst die Nachweisbarkeit von SE-Ereignissen, die durch Materialschäden erzeugt werden, im Vordergrund. Ob die Zuordnung von Schadensmechanismen durch Mustererkennung der transienten SE-Signale einen ähnlich großen Stellenwert besitzt oder eher als zusätzlicher Nutzfaktor betrachtet werden sollte, bleibt zu diskutieren.

Nachweisbarkeit von Schädigungen bei einer Zustandsüberwachung

Die Nachweisbarkeit von Schadensmechanismen im Labor wurde oben besprochen. Für eine praxisnahe Betrachtung der Zustandsüberwachung wurden zusätzlich Versuche an Tankwagen durchgeführt. Die Beschreibung dieser Versuche befindet sich in *Anhang D.8*. Der geprüfte Tank für den Transport von Flüssiggas ist aus dem gleichen Feinkornstahl gefertigt wie die Versuchsplatten; der Tankmantel besitzt mit 15,6 mm eine größere Wanddicke. Es wurden stationäre Tests, wie z.B. eine hydraulische Druckprüfung, Fahrten auf unterschiedlichen Straßenbelägen mit verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt und mittels SEP überwacht. Die Fotografie einer Testfahrt ist in *Abb. 5-14* zu sehen. Dabei wurden künstliche SE-Quellen aktiviert, die Korrosions- und Ermüdungsrissquellen auf der Tankwand simulierten.

Die Schallschwächungskurve des mit Wasser gefüllten Tanks zeigt, dass bei einem gewählten Sensorabstand von 2,54 m und einer Nachweisschwelle von 40 dB_{AE}, SE-Quellen eine distanzkorrigierte Amplitude von mindestens 90 dB_{AE} besitzen müssen, um sicher detektiert und geortet zu werden. Natürliche SE-Quellen besitzen eher niedrigere Amplituden (vgl. *Abb. 5-2*). Einzige Ausnahmen sind die Reibung korrodierter Bruchflächen und der Rissfortschritt bei Rissfortschrittsraten über 10⁻³ mm/LW (jedoch treten Amplituden über 90 dB_{AE} auch bei hohem Rissfortschritt nur vereinzelt auf). Nach der vorhandenen Norm für

5 Schlussfolgerungen

Gasdruckprüfungen mittels SEP [Dine05] müsste auf die Nachweisschwelle bei der Analyse der SE-Ereignisse zusätzlich eine Evaluationsschwelle beaufschlagt werden, die in diesem Beispiel bei 52 dB_{AE} liegt. Nachgewiesen werden können so nur SE-Quellen, deren Amplituden über 100 dB_{AE} liegen.



Abb. 5-14: Zustandsüberwachung eines Gastanks auf dem BAM-Versuchsgelände während der Testfahrt auf einer Asphaltstraße

Die künstlichen Quellen konnten nachgewiesen werden, jedoch wurden sie, besonders bei höheren Fahrgeschwindigkeiten (> 50km/h) oder Wendemanövern, von einer Vielzahl an Störgeräuschen örtlich überlagert, die aus Schweißverbindungen zum Rahmen stammten. Natürliche Quellen benötigen jedoch genau diese „unruhigen“ Umgebungsbedingungen, um durch erhöhte Belastungen aktiviert zu werden. In einer Zustandsüberwachung müsste also, bei einem hohen Aufkommen an Störgeräuschen, eine Identifikation von Schadensmechanismen stattfinden, um echte Schädigungsereignisse von irrelevanten Störquellen zu unterscheiden. Die Mechanismen von Störgeräuschen sind dabei von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich. Oft ähneln jedoch die Quellmechanismen der Störgeräusche denen der Schadensquellen, beispielsweise wenn Auflagerreibung und Bruchflächenreibung stattfinden.

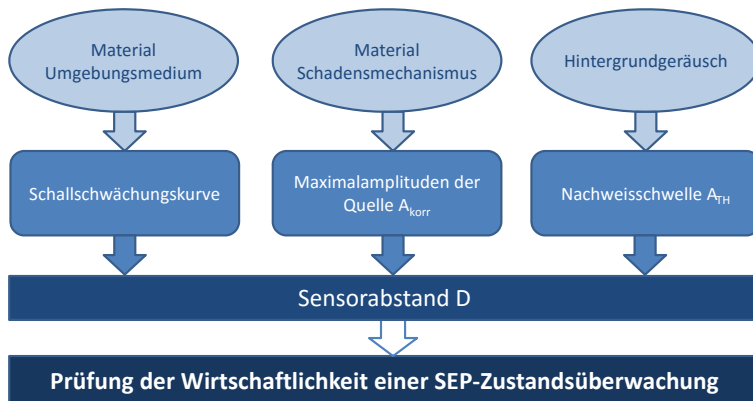


Abb. 5-15: Abhängigkeiten bei einer Zustandsüberwachung mittels SEP

In den hier vorgenommenen Studien ergab sich eine besonders gute Klassifizierbarkeit von Korrosionsprozessen. Hier wäre eine Unterscheidung zu Störgeräuschen möglich, wie bereits von Tscheliesnig vermutet wurde [Tsch07]. Ferner kann die betrachtete Signalklas-

se der „*primären Effekte des Ermüdungsrisswachstums*“ als ein Faktor für einen Alarm bei einer Zustandsüberwachung dienen. Dies wäre aufgrund der für den Bauteilzustand kritischen Eigenschaften von direktem Risswachstum von praktischem Nutzen. Die Unterscheidung auftretender Reibgeräusche von primären Risswachstumseffekten sollte durch eine Mustererkennung außerdem leichter möglich sein als von sekundären SE-Ereignissen.

Es wurde festgestellt, dass eine Nachweisbarkeit mittels SEP von vielen Faktoren abhängig ist (s. auch *Abb. 5-9*). In der Prüfpraxis sind besonders die Schallschwächung, die von der Schadensquelle ausgehenden Amplituden sowie die Nachweisschwelle von Bedeutung. Diese Zusammenhänge sind in *Abb. 5-15* schematisch dargestellt. Nachdem ein Wert für den maximal zulässigen Sensorabstand kalkuliert wurde (vgl. *S. 28ff*), kann bestimmt werden, ob eine Zustandsüberwachung unter den gegebenen äußeren Umständen von wirtschaftlichem Nutzen ist.

Wahl der Überwachungsmethode

Ist der erforderliche Sensorabstand sehr gering, kann eine Zustandsüberwachung mittels SEP unwirtschaftlich werden. Für die Überwachung wären dann sehr viele Sensoren und Messkanäle nötig, was wiederum einen großen Umfang an Messdaten erzeugt. Ist die Überwachung des Objektes unwirtschaftlich oder zu aufwendig, kann eine Hot-Spot-Überwachung in Betracht gezogen werden. Hot Spots können aus Erfahrungswerten oder FEM-Berechnungen ermittelt werden und schränken den zu überwachenden Bereich erheblich ein. Sensoren können näher an die zu überwachenden Bereiche gesetzt werden, so dass ein Quellnachweis auch bei geringeren Amplituden möglich wird. Ferner wird eine Mustererkennung durch kürzere Laufwege erleichtert.

Eine weitere Möglichkeit zur Zustandsüberwachung mittels SEP ist, anstatt der kontinuierlichen Zustandsüberwachung während des Betriebes, eine SEP-Überwachung spezieller Betriebsabläufe oder zyklisch geplanter Prüfvorgänge vorzunehmen. Dies hätte den Charakter einer wiederkehrenden Prüfung und könnte in einen Betriebsablauf integriert werden. Hier ist besonders von Vorteil, dass die Nachweisschwelle (bei niedrigeren Hintergrundgeräuschen) gesenkt werden kann, die Amplituden der Quellen jedoch oft, wie bei der statischen Plattenbelastung beobachtet, ähnlich hoch bleiben (vgl. *Abb. 5-2*).

Tab. 5-2: Beispiel für Bedingungen einer Zustandsüberwachung mittels SEP auf Basis des maximalen Sensorabstandes D , eines Tankumfanges U , der detektierten Amplituden A_{max} und der Nachweisschwelle A_{TH}

$D > U/3$	Kontinuierliche Zustandsüberwachung möglich
$D \leq U/3$	Kontinuierliche Hot-Spot-Überwachung SEP-Überwachung spezieller Betriebsabläufe (Be- und Entladen, Befüllen, hydraulische Prüfungen etc.)
$A_{max} < A_{TH}$	keine Schadenserkennung mittels SEP-Überwachung möglich

Tab. 5-2 stellt Bedingungen für eine Überwachung mittels SEP am Beispiel eines Tankwagens auf (wie in *Anhang D.8* beschrieben). Dabei wird angenommen, dass für eine wirtschaftliche, kontinuierliche Zustandsüberwachung der Umfang des Tanks von drei Sensoren abgedeckt werden darf. Der maximal zulässige Sensorabstand D muss also größer sein, als ein Drittel des Umfangs. Nur so ist eine wirtschaftlich sinnvolle kontinuierliche Zustandsüberwachung des gesamten Tanks möglich. Ist dies nicht der Fall, sollte eine

alternative Überwachungsstrategie genutzt werden. Liegt die Amplitude aus den Schadensquellen nach Schallschwächung unterhalb der Nachweisschwelle, ist ein Nachweis mittels SEP nicht möglich.

Diagnose und Entscheidungshilfe

Wird eine SE-Zustandsüberwachung durchgeführt, muss als Ergebnis der Diagnose ein Hinweis auf die Materialschädigung bzw. strukturelle Schwächung stehen, die eine Entscheidungshilfe für den weiteren Betrieb eines Bauteils liefert. In der Norm zur Prüfung von metallischen Druckgeräten durch die SEP [Dine05] wird zwischen unbedeutenden, aktiven und kritisch aktiven Quellen unterschieden. Die Bewertung der SE-Quellen bei einer Druckprüfung erfolgt dabei hauptsächlich aufgrund von Zusammenhängen von der Anzahl (Cluster bildender) SE-Ereignisse und deren Amplitudenniveaus.

Bei einer Zustandsüberwachung sind nach den gewonnenen Ergebnissen für eine Bewertung von SE-Quellen entscheidend:

- **Ereignis-Rate** (im Cluster über einen definierten Zeitraum)
- Distanzkorrigierte Amplitude im Zusammenhang mit der Anzahl der Ereignisse, evtl. zusammenzuführen als **kumulativer Amplitudenwert** für ein Cluster
- Klasse „primäre Effekte des Ermüdungsrisswachstums“

Eine Quellendiagnose kann aufgrund dieser Kriterien stattfinden und eine Entscheidungshilfe für den Betreiber eines Tanks bieten. Diese könnte, ebenso wie die Diagnose, in drei Stufen erfolgen und ist in *Tab. 5-3* dargestellt. Könnten durch eine Mustererkennung tatsächlich die SE-Signale aus primären Effekten des Ermüdungsrisswachstums extrahiert werden, kann aufgrund der SE-Parameter auch ein Bezug zu bruchmechanischen Kennwerten hergestellt werden. Aus Energie- und Countrate lassen sich Tendenzen für die Risswachstumsgeschwindigkeit und Spannungsintensität ableiten.

Tab. 5-3: Quellendiagnose und Entscheidungshilfe bei einer SE-Zustandsüberwachung nach [Dine05]

Diagnose	Entscheidungshilfe	
Unbedeutende Quelle	Run	Keine Aktionen notwendig; Dokumentation der Quelle
Aktive Quelle	Check	ZfP-Überprüfung wird empfohlen
Kritisch aktive Quelle	Repair	ZfP-Überprüfung ist sobald wie möglich durchzuführen

Ist die Schallemissionsprüfung nun unter den beschriebenen Kriterien für alle Arten der Zustandsüberwachung geeignet? Um diese Frage zu beantworten muss zuvor geklärt werden, was von der SE-Überwachung erwartet wird. Soll sie eine Intervallprüfung ersetzen oder ergänzen? Um eine zeitabhängige, wiederkehrende Bauteilprüfung zu ersetzen, müsste, gerade bei schadensintoleranten Bauteilen, mit Sicherheit eine Indikation durch die SEP stattfinden. Dies ist jedoch, besonders bei nichtkorrodierten Ermüdungsrissen, nicht immer der Fall. Ferner muss für jeden Einsatz die Frage beantwortet werden, wie viele Fehlanzeigen die Prüfung ergeben darf (mit den zugehörigen Follow-up Inspektionen nach SE-Indikation), um weiterhin wirtschaftlich zu sein. Je nach systemabhängigem Zusammenhang dieser beiden Kriterien („Wie wichtig ist der Nachweis jedes Fehlers?“ vs. „Wie viele Fehlanzeigen kann sich das System leisten?“) müssen die Bewertungskriterien der SE-Quelle angepasst werden.

Für eine Zustandsüberwachung mittels SEP eignet sich die Korrosionsüberwachung im Ruhezustand eines Systems, wie z.B. die Überwachung von Flachbodenlagertanks [LaTs02]. Hier treten hohe Amplituden auf, die bei geringer Nachweisschwelle auch über lange Laufwege nachgewiesen werden können. Für ein Ersetzen der Intervallprüfung ist die kontinuierliche SEP-Zustandsüberwachung nach Ansicht der Autorin bis jetzt nicht geeignet. Aufgrund des hohen Aufkommens an Störgeräuschen ist eine Prüfung entweder anfällig für Fehlanzeigen; oder aber für spontane Ausfälle durch kritische Schäden, wenn durch eine Desensibilisierung des Systems Störgeräusche verringert werden sollen. Für die Einordnung lokalisierter aber nicht bekannter SE-Quellen ist die Mustererkennung als ein weiteres Bewertungskriterium unbedingt sinnvoll, muss jedoch für jedes Quelle-Material-Sensor-System neu erstellt werden und abhängig vom Laufweg erfolgen.

Weitaus sicherer erscheint, auch aufgrund des besseren Stör-/Nutzsinal-Verhältnisses, die SE-Überwachung spezieller Betriebsabläufe oder aber einer Druckprüfung. Ferner ist die Überwachung von Hot-Spots oder bekannter Risse sinnvoll, wo bei geringen Sensorabständen auch zunächst unbedenkliche Schadensentwicklungen anhand von niedrigen Amplituden erfasst werden können. Hier würde auch die Mustererkennung der SE-Signale besser eingesetzt werden können. Bei bekannten Laufwegen der Schallwelle könnte eine Signalbibliothek mit Signalklassen wie „Korrosion“ oder „Risswachstum“ für geläufige Materialien und Wanddicken angelegt werden, auf die bei Bedarf zugegriffen werden kann. So könnte eine Schadensfrüherkennung an kritischen Bauteilstellen mit Hinweis auf den Schädigungsmechanismus erfolgen.

Anhang

A Literaturverzeichnis

- [Agge11] AGGELIS, DG: Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. In: *Mechanics Research Communications* Bd. 38 (2011), Nr. 3, S. 153–157
- [AgKM11] AGGELIS, DG ; KORDATOS, EZ ; MATIKAS, TE: Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates. In: *Mechanics Research Communications* Bd. 38 (2011), Nr. 2, S. 106–110
- [AgMa12] AGGELIS, DG ; MATIKAS, TE: Effect of plate wave dispersion on the acoustic emission parameters in metals. In: *Computers & Structures* Bd. 98–99 (2012), Nr. 0, S. 17–22
- [AKSS12] ARUMUGAM, V ; KUMAR, CS ; SANTULLI, C ; SARASINI, F ; STANLEY, AJ: Identification of failure modes in composites from clustered acoustic emission data using pattern recognition and wavelet transformation. In: *Arabian Journal for Science and Engineering* (2012), S. 1–16
- [ALSS91] ANDREIKIV, OÉ ; LISAK, MV ; SERGIENKO, OM ; SKAL'S'KII, VR: Acoustic emission in tests on materials in hydrogenous and corrosive media. In: *Soviet materials science : a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov / Academy of Sciences of the Ukrainian SSR* Bd. 26 (1991), Nr. 5, S. 512–520
- [AsSI03] ASSOULI, B ; SRHIRI, A ; IDRISSE, H: Characterization and control of selective corrosion of α,β' -brass by acoustic emission. In: *NDT & E International* Bd. 36 (2003), Nr. 2, S. 117–126
- [Barg12] BARGEL, H-J: Werkstoffprüfung. In: *Werkstoffkunde* : Springer, 2012 — ISBN 3642177166, S. 119–173
- [Bass87] BASSIM, MN: Section 2: Macroscopic Origins of Acoustic Emission. In: MILLER, R. ; MCINTIRE, K. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. 2. Aufl. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 1987, S. 46–61
- [BaYi87] BARON, JA ; YING, SP: Section 6: Acoustic Emission Source Location. In: MILLER, R. ; K MCINTIRE (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. 2. Aufl. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 1987, S. 135–153
- [BBOW09] BEHRENDT, R ; BOHSE, J ; ORTWEIN, H-P ; WACHSMUTH, J: Möglichkeiten des Einsatzes von Laser-Doppler-Vibrometern im Bereich der Schallemissionsanalyse. In: *BB 118*. Bad Schandau : DGZfP, 2009
- [Blum87] BLUMENAUER, H: *Werkstoffprüfung*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1987
- [Bohs00] BOHSE, J: Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites. In: *Composites Science and Technology* Bd. 60 (2000), Nr. 8, S. 1213–1226

- [Bohs04] BOHSE, J: Acoustic emission examination of polymer-matrix composites. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 22 (2004), S. 208–223
- [Corf14] CORFAT: Corrosion and Fatigue Monitoring for Transport Products - Online: Project Tasks, <http://www.corfat.eu/project-tasks/>. URL <http://www.corfat.eu/project-tasks/>. - abgerufen am 2014-01-22
- [CoTu65] COOLEY, JW ; TURKEY, JW: An algorithm for the machine computation of the complex fourier series. In: *Mathematics of Computation* Bd. 19 (1965)
- [CrHe95] CREMER, L ; HECKL, M: Körperschall, Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. 2., völlig neubearbeitete Auflage. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1995 — ISBN 978-3-662-08183-9
- [CrHP05] CREMER, L ; HECKL, M ; PETERSSON, BAT: *Structure-Borne Sound*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005
- [Czic13] CZICHOS, H: Physics of Failure. In: CZICHOS, H. (Hrsg.): *Handbook of Technical Diagnostics* : Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-25849-7, 978-3-642-25850-3, S. 23–40
- [Din00] DIN 1311-1: Schwingungen und schwingungsfähige Systeme - Teil1:Grundbegriffe, Einteilung (2000)
- [Dine05] DIN EN 14584: Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung - Planare Ortung von Schallemissionsquellen (2005)
- [Dine06a] DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe—Härteprüfung nach Vickers— Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507–1: 2005) (2006)
- [Dine06b] DIN EN ISO 9227: Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären-Salzsprühnebelprüfungen (2006)
- [Dine09] DIN EN 1330-9: Zerstörungsfreie Prüfung—Terminologie—Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung (2009)
- [Dine10] DIN EN 13306: Instandhaltung (2010)
- [Drou87] DROUILLARD, TF: Introduction to Acoustic Emission Technology. In: MILLER, R. ; MCINTIRE, K. (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 1987, S. 1–10
- [Drou94] DROUILLARD, TF: Acoustic emission: The first half century. In: . Sapporo, Japan, 1994
- [DuHS12] DUDA, RO ; HART, PE ; STORK, DG: *Pattern Classification* : John Wiley & Sons, 2012 — ISBN 9781118586006
- [DuHT68] DUNEGAN, HL ; HARRIS, DO ; TATRO, CA: Fracture analysis by use of acoustic emission. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 1 (1968), Nr. 1, S. 105–122

- [DuTH63] DUNEGAN, HL ; TATRO, CA ; HARRIS, DO: *Acoustic Emission Research: Status Report, Report UCID-4868* (Nr. Rev. 1). Livermore, Californien : Lawrence Radiation Laboratory, 1963
- [Egle87] EGLE, D: Section 4: Wave Propagation. In: R.K. MILLER ; K MCINTIRE (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. 2. Aufl. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 1987, S. 91–120
- [EiBr87] EITZEN, D ; BRECKENRIDGE, FR: Section 5: Acoustic Emission Sensors and their Calibration. In: MILLER, R. K. ; K MCINTIRE (Hrsg.): *Nondestructive Testing Handbook*. Bd. 5. 2. Aufl. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 1987, S. 121–131
- [Ency84] ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA: Pottery. In: *The New Encyclopedia Britannica*. Bd. 14. Chicalo, IL : Encyclopedia Britannica, Inc, 1984, S. 78 ff
- [Enis99] EN ISO 8044: Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen (1999)
- [FeSt98] FEICHTINGER, HG ; STROHMER, T: *Gabor Analysis and Algorithms: Theory and Applications* : Springer, 1998 — ISBN 9780817639594
- [Fkmr06] FKM-RICHTLINIE: *Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. 3. Aufl. : VDMA-Verlag GmbH, 2006
- [FöSc36] FÖRSTER, F ; SCHEIL, E: Akustische Untersuchungen der Bildung von Martensitnadeln. In: *Zeitschrift für Metallkunde* Bd. 29 (1936), Nr. 9, S. 245–247
- [Fowl92] FOWLER, TJ: Acoustic Emission Testing of In-service Railroad Tank Cars. In: *Corrosion92*. Nashville, TN, USA, 1992, S. Paper No. 363
- [GeHa67] GERBERICH, WW ; HARTBOWER, CE: Some observations on stress wave emission as a measure of crack growth. In: *International Journal of Fracture Mechanics* Bd. 3 (1967), Nr. 3, S. 185–192
- [Gein14] GE INSPECTION TECHNOLOGIES: *G 0,25G Low Frequency Straight Beam Probe*. URL <http://www.ge-mcs.com/download/ultrasound/transducers/special-app-transducers/low-freq-probes/67422.pdf>. - abgerufen am 2014-03-25
- [GHSW07] GROSS, D ; HAUGER, W ; SCHNELL, W ; WRIGGERS, P: *Technische Mechanik. 4. Hydromechanik, Elemente der höheren Mechanik, numerische Methoden*. 6. Aufl. : Springer DE, 2007 — ISBN 9783540220992
- [GiHa74] GILLIS, PP ; HAMSTAD, MA: Some fundamental aspects of the theory of acoustic emission. In: *Materials Science and Engineering* Bd. 14 (1974), Nr. 2, S. 103–108
- [GoPr90] GORMAN, MR ; PROSSER, WH: AE Source Orientation by Plate Wave Analysis. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 9 (1990), Nr. 1, S. 283–288
- [GrLS63] GREEN, AT ; LOCKMANN, CS ; STEEL, RK: Acoustic verification of structural integrity of polaris chambers. In: *Modern Plastics* Bd. 41 (1963), Nr. 137

- [GrOh08] GROSSE, CU ; OHTSU, M: *Acoustic Emission Testing* : Springer, 2008 — ISBN 9783540699729
- [GrSe11a] GROSS, D ; SEELIG, T: *Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik* : Springer DE, 2011 — ISBN 3642101968
- [GrSe11b] GROSS, D ; SEELIG, T: *Fracture mechanics: with an introduction to micromechanics* : Springer, 2011 — ISBN 3642192408
- [GrWJ95] DE GROOT, PJ ; WIJNEN, PAM ; JANSSEN, RBF: Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. In: *Composites Science and Technology* Bd. 55 (1995), Nr. 4, S. 405–412
- [HaBB81] HAMEL, F ; BAILON, JP ; BASSIM, MN: Acoustic emission mechanisms during high-cycle fatigue. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 14 (1981), Nr. 4, S. 853–860
- [HaDu74] HARRIS, DO ; DUNEGAN, HL: Continuous monitoring of fatigue-crack growth by acoustic-emission techniques. In: *Experimental Mechanics* Bd. 14 (1974), Nr. 2, S. 71–81
- [Hams09] HAMSTAD, MA: Some Observations on Rayleigh Waves and Acoustic Emission in thick Steel Plates. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 27 (2009), S. 114–129
- [HaOG01] HAMSTAD, MA ; O’GALLAGHER, A ; GARY, J: Effects of lateral plate dimensions on acoustic emission signals from dipole sources. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 19 (2001), S. 258–274
- [HaOG02a] HAMSTAD, MA ; O’GALLAGHER, A ; GARY, J: A wavelet transform applied to acoustic emission: Part 1: Source Identification. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 20 (2002), S. 39–61
- [HaOG02b] HAMSTAD, MA ; O’GALLAGHER, A ; GARY, J.: A wavelet transform applied to acoustic emission signals: part 1: source identification. In: *Journal of Acoustic Emission* (2002), Nr. 20, S. 39–61
- [Holf00] HOLFORD, KM: Acoustic Emission—Basic Principles and Future Directions. In: *Strain* Bd. 36 (2000), Nr. 2, S. 51–54
- [Iser11] ISERMANN, R: *Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems* : Springer Science & Business Media, 2011 — ISBN 9783642127670
- [JTWB12] JAGENBREIN, A ; TSCHELIESNIG, P ; WACHSMUTH, J ; BOHSE, J: Detection of Corrosion Processes and Fatigue Cracks by Means of Acoustic Emission Monitoring. In: *Materials Testing* Bd. Jg. 2012 (2012), Nr. 11, S. 769–778
- [Kais50] KAISER, J: *Untersuchungen über das Auftreten Geräuschen beim Zugversuch*. München, Technische Hochschule München, Dr.-Ing. Dissertation, 1950

- [KAMG10] KOVAC, J ; ALAUX, C ; MARROW, TJ ; GOVEKAR, E ; LEGAT, A: Correlations of electrochemical noise, acoustic emission and complementary monitoring techniques during intergranular stress-corrosion cracking of austenitic stainless steel. In: *Corrosion Science* Bd. 52 (2010), Nr. 6, S. 2015–2025
- [Kish34] KISHINOUE, F: Harmonic Analysis of Damped Vibrations (1934)
- [KoAM12] KORDATOS, EZ ; AGGELIS, DG ; MATIKAS, TE: Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. In: *Composites Part B: Engineering, Homogenization and Micromechanics of Smart and Multifunctional Materials*. Bd. 43 (2012), Nr. 6, S. 2676–2686
- [KoWa08] KOLERUS, J ; WASSERMANN, J: *Zustandsüberwachung von Maschinen: Das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker*. 4. Aufl. Renningen : expert, 2008 — ISBN 9783816925972
- [KrKr80] KRAUTKRÄMER, J ; KRAUTKRÄMER, H: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 4. Aufl. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1980 — ISBN 978-3-662-13423-8
- [KrRS11] KROSCHEL, K ; RIGOLL, G ; SCHULLER, B: *Statistische Informationstechnik* : Springer DE, 2011 — ISBN 3642159540
- [KuMM05] KUROKAWA, Y ; MIZUTANI, Y ; MAYUZUMI, M: Real-time executing source location system applicable to anisotropic thin structures. In: *J. of Acoustic Emission* Bd. 23 (2005), S. 224
- [KuMM06] KUROKAWA, Y ; MIZUTANI, Y ; MAYUZUMI, M: Frequency Filtering Algorithms of Plate Wave AE for Source Location. In: *Journal of Acoustic Emission* (2006), Nr. 24, S. 145–152
- [KüSV07] KÜHNICKE, H ; SCHULZE, E ; VOIGT, D: Verbesserte Lokalisation mittels Signalformanalyse. In: *DGZfP-Berichtsband BB 105*. Puchberg, Österreich, 2007
- [Lamb17] LAMB, H: On Waves in an Elastic Plate. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* Bd. 93 (1917), Nr. 648, S. 114–128
- [LaRu07] LAPITZ, P ; RUZZANTE, J: AE response of α -brass during stress corrosion crack propagation Bd. 49 (2007), Nr. 10, S. 3812–3825
- [LaTs02] LACKNER, G ; TSCHELIESNIG, P: Acoustic Emission Testing on Flat-Bottomed Storage Tanks: How to Condense Acquired Data to a Reliable Statement Regarding Floor Condition. In: *25th EWGAE conference*. Prag, 2002
- [LiPR78] LINDLEY, TC ; PALMER, IG ; RICHARDS, CE: Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth. In: *Materials Science and Engineering* Bd. 32 (1978), Nr. 1, S. 1–15
- [MAJI13] MOHAMMAD, M ; ABDULLAH, S ; JAMALUDIN, N ; INNAYATULLAH, O ; NOPIAH, ZM: Fatigue Failure Assessment of Metallic Specimens Using the Acoustic Emission Technique. In: *Materials Testing* Bd. 55 (2013), Nr. 4, S. 310–318

- [MaMS48] MASON, WP ; McSKIMIN, HJ ; SHOCKLEY, W: Ultrasonic observation of twinning in tin. In: *Physical Review* Bd. 73 (1948), Nr. 10, S. 1213
- [MCFG05] MILLER, RK ; CARLOS, MF ; FINLAYSON, RD ; GODINEZ-AZCUAGA, V ; RHODES, MR ; SHU, F ; WANG, WD: Chapter 4: Acoustic Emission Source Location. In: *Acoustic Emission Testing*. 3. Aufl. Columbus, OH : American Society for Nondestructive Testing, 2005 — ISBN 978-1-57117-137-5, S. 121–135
- [Merk04] MERKBLATT DVS 2401: *Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen*. 3. Aufl. : Verlag für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verlag, 2004 — ISBN 3871552135
- [MiRo92] MITCHELL, J ; ROGERS, LM: Monitoring Structural Integrity of North Sea Production Platforms by Acoustic Emission. In: : The Offshore Technology Conference, 1992 — ISBN 9781613990889
- [MLMP90] MURAVIN, GB ; LEZVINSKAYA, LM ; MAKAROVA, NO ; PAVLOVSKAYA, GS: The Problems of Acoustic Emission Diagnosis of Corrosion Process. Review. In: *Defektoskopiya* (1990), Nr. 2, S. 18–28
- [MoHB73] MORTON, T.M. ; HARRINGTON, R.M. ; BJELETICH, J.G.: Acoustic emissions of fatigue crack growth. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 5 (1973), Nr. 3, S. 691–697
- [MOKY07] MURAKAMI, S ; OGAWA, R ; KOIKE, T ; YAMADA, M ; YUYAMA, S ; HOMMA, K: Fundamental Studies of Signal Strength and and Source Location using simulated AE Sources produced in model Corrosion Pits placed on the bottom plate of an above-ground Tank. In: *Advances in Acoustic Emission*. Lake Tahoe, Nevada, USA : The Acoustic Emission Working Group and Acoustic Emission Group, Encino, CA, USA, 2007, S. 241–246
- [Möse12] MÖSER, M: *Technische Akustik* : Springer DE, 2012 — ISBN 9783642309335
- [NeRa81] NEWMAN JR., JC ; RAJU, IS: An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 15 (1981), Nr. 1–2, S. 185–192
- [NeSi83] NEWMAN, RC ; SIERADZKI, K: Correlation of acoustic and electrochemical noise in the stress-corrosion cracking of α -brass. In: *Scripta Metallurgica* Bd. 17 (1983), Nr. 5, S. 621–624
- [O'br96] O'BRIEN, EW: *Continous Remote NDT for Damage Detection and Monitoring, Mechanical Technology* : South African Inst. of Materials and Handling in conjunction with the SA Inst. of Welding, 1996
- [ObSc88] OBERPARLEITER, W ; SCHÜTZ, W: Berechnung des Rißfortschrittsverhaltens geschweißter Proben aus Offshore-Stählen in Meerwasser zur Abschätzung der Lebensdauer von Offshore-Komponenten. In: *Materials and Corrosion* Bd. 39 (1988), Nr. 8, S. 369–378

- [OhHa06] OH, KH ; HAN, KS: Interrelationship between stress intensity factor and acoustic emission parameter in the opening mode fatigue crack propagation. In: KIM, Y. (Hrsg.): *Advances in Safety and Structural Integrity 2005*. Bd. 110. Zurich-Uetikon : Trans Tech Publications Ltd, 2006. — WOS:000236111300010 — ISBN 3-908451-15-9, S. 71–77
- [OJYH04] OH, KH ; JUNG, CK ; YANG, YC ; HAN, KS: Acoustic Emission Behavior during Fatigue Crack Propagation in 304 Stainless Steel. In: *Key Engineering Materials* Bd. 261–263 (2004), S. 1325–1330
- [Ono00] ONO, K: New goals for acoustic emission in material research. In: KISHI, T. ; OHTSU, M. ; YUYAMA, S. (Hrsg.): *Acoustic Emission-Beyond the Millennium*. Tokio, Japan : Elsevier, 2000, S. 57–76
- [Ono05] ONO, K: Current understanding of mechanisms of acoustic emission. In: *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* Bd. 40 (2005), Nr. 1, S. 1–15
- [Ono07] ONO, K: Structural integrity evaluation using acoustic emission. In: *Journal of Acoustic Emission* Bd. 25 (2007), S. 1–20
- [PaEr63] PARIS, P ; ERDOGAN, F: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. In: *Journal of Basic Engineering* Bd. 85 (1963), Nr. 4, S. 528–533
- [Poll07] POLLOCK, A: Probability of Detection for Acoustic Emission. In: *Advances in Acoustic Emission*. Lake Tahoe, Nevada, USA : The Acoustic Emission Working Group and Acoustic Emission Group, Encino, CA, USA, 2007, S. 167–172
- [Poll86] POLLOCK, A: Acoustic emission capabilities and applications in monitoring corrosion. In: *Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods* (1986), S. 30–42
- [Raus04] RAUSCHER, F: Charakterisierung der Druckprüfung und der Schallemissionsuntersuchung im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfungen. In: *DACH-Jahrestagung*. Salzberg, 2004
- [Raus06] RAUSCHER, F: Acoustic Emission during Fatigue Testing of Pressure Vessels. In: *Advanced Materials Research* Bd. 13–14 (2006), S. 147–152
- [RiSi09] RIEHLE, M ; SIMMCHEN, S: *Grundlagen der Werkstofftechnik* : Wiley-VCH, 2009 — ISBN 3527309535
- [Roge01] ROGERS, LM: Structural Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods - Fundamentals and Applications. London : Lloyd's Register, Technical Investigation Department, 2001
- [Roge05] ROGERS, LM: Crack Detection Using Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications. In: *Key Engineering Materials* Bd. 293–294 (2005), S. 33–48
- [Rose04] ROSE, JL: *Ultrasonic Waves in Solid Media* : Cambridge University Press, 2004 — ISBN 9780521548892

- [RPRG04] RAMIREZ-JIMENEZ, CR ; PAPADAKIS, N ; REYNOLDS, N ; GAN, TH ; PURNELL, P ; PHARAOH, M: Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. In: *Composites Science and Technology* Bd. 64 (2004), Nr. 12, S. 1819–1827
- [SaHH12] SAUSE, MGR ; HAMSTAD, MA ; HORN, S: Finite element modeling of conical acoustic emission sensors and corresponding experiments. In: *Sensors and Actuators A: Physical* Bd. 184 (2012), S. 64–71
- [SaHo10] SAUSE, MGR ; HORN, S: Influence of Specimen Geometry on Acoustic Emission Signals in Fiber Reinforced Composites: FEM-Simulations and Experiments. In: *29th European Conference on Acoustic Emission Testing*, 2010
- [SaHo13] SAUSE, MGR ; HORN, S: Quantification of the Uncertainty of Pattern Recognition Approaches Applied to Acoustic Emission Signals. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* Bd. 32 (2013), Nr. 3, S. 242–255
- [SaMS13] SAVAIDIS, G ; MALIKOUTSAKIS, M ; SAVAIDIS, A: Finite element simulation of road tanks for ADR and fatigue assessments. In: *International Journal of Structural Integrity* Bd. 4 (2013), Nr. 3, S. 383–395
- [Saus10] SAUSE, MGR: Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals. Augsburg, Universität Augsburg, Dissertation, 2010
- [ScBS85] SCRUBY, CG ; BALDWIN, GR ; STACEY, KA: Characterisation of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission. In: *International Journal of Fracture* Bd. 28 (1985), Nr. 4, S. 201–222
- [Schu04] SCHULZE, G: Die Metallurgie Des Schweißens: Eisenwerkstoffe-Nichteisenmetallische Werkstoffe : Springer DE, 2004 — ISBN 3540206493
- [Schu05] SCHULZ, M: Beitrag zur Untersuchung der Spannungsrissskorrosion von CuZn-Knetlegierungen in NaNO₂ - Lösungen mit Hilfe der Schallemissionsanalyse. Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, Dissertation, 2005
- [Scru87] SCRUBY, CB: An introduction to acoustic emission. In: *Journal of Physics E: Scientific Instruments* Bd. 20 (1987), Nr. 8, S. 946–953
- [ScTs00] SCHAURITSCH, G ; TSCHELIESNIG, P: Die Schallemissionsprüfung als integrales Prüfverfahren für die Beurteilung von Flüssiggaslagerbehältern—Erfahrungsbericht (2000)
- [ScWa83] SCRUBY, CB ; WADLEY, HNG: An assessment of acoustic emission for nuclear pressure vessel monitoring. In: *Progress in Nuclear Energy* Bd. 11 (1983), Nr. 3, S. 275–297

- [SDLC98] SISON, M ; DUKE JR, JC ; LOZEV, MG ; CLEMEÑA, GG: Analysis of Acoustic Emissions from a Steel Bridge Hanger. In: *Research in Nondestructive Evaluation* Bd. 10 (1998), Nr. 3, S. 123–145
- [SGUH12] SAUSE, MGR ; GRIBOV, A ; UNWIN, AR ; HORN, S: Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals. In: *Pattern Recognition Letters* Bd. 33 (2012), Nr. 1, S. 17–23
- [Shar08] SHARPE, WN ; SHARPE JR, W. (Hrsg.): *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* : Springer, 2008 — ISBN 9780387268835
- [SiCF77] SINCLAIR, ACE ; CONNORS, DC ; FORMBY, CL: Acoustic emission analysis during fatigue crack growth in steel. In: *Materials Science and Engineering* Bd. 28 (1977), Nr. 2, S. 263–273
- [SKHT96] SUZUKI, H ; KINJO, T ; HAYASHI, Y ; TAKEMOTO, M ; ONO, K ; HAYASHI, Y: Wavelet transform of acoustic emission signals. In: *Journal of acoustic emission* Bd. 14 (1996), Nr. 2, S. 69–84
- [SMJS13] SAVAIDIS, G ; MALIKOUTSAKIS, M ; JAGENBREIN, A ; SAVAIDIS, A ; SOARE, M ; PREDOI, MV ; SOARE, A ; DIBA, IC: Structural Integrity and Health Monitoring of Road and Railway Tanks based on Acoustic Emission. In: *SDHM: Structural Durability & Health Monitoring* Bd. 9 (2013), Nr. 2, S. 129–154
- [SuYe09] SU, Z ; YE, L: Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications : Springer, 2009 — ISBN 9781848827844
- [TeV74] TETELMAN, AS ; EVANS, AG: Failure Prediction in Brittle Materials Using Fracture Mechanics and Acoustic Emission. In: BRADT, R. ; HASSELMAN, D. ; LANGE, F. (Hrsg.): *Fracture Mechanics of Ceramics* : Springer US, 1974 — ISBN 978-1-4615-7016-5, 978-1-4615-7014-1, S. 895–924
- [Timm01] TIMMERS, R: *Schallemissionsuntersuchungen bei LCF-Versuchen an Baustahl St 52* /. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, Dissertation, 2001
- [Tsch07] TSCHELIESNIG, P: Detection of corrosion attack on oil tankers by means of acoustic emission (AE). In: *Non destructive Testing Australia* Bd. 44 (2007), Nr. 6, S. 178
- [Vall01] VALLEN, H.: Schallemissionsprüfung: Grundlagen – Gerätetechnik – Anwendungen. In: , 2001
- [Vall12a] VALLEN SYSTEME GMBH: *Vallen VisualAE*. Windows XP. Icking, Deutschland : Vallen Systeme GmbH, 2012
- [Vall12b] VALLEN SYSTEME GMBH: *Vallen Dispersion*. Windows 7. Icking, Deutschland : Vallen Systeme GmbH, 2012
- [Vall12c] VALLEN SYSTEME GMBH: *Vallen VisualClass*. Windows XP. Icking, Deutschland : Vallen Systeme GmbH, 2012

- [Vall12d] VALLEN SYSTEME GMBH: *Acoustic Emission Sensors*. URL <http://www.vallen.de/sites/default/files/sov1212.pdf>. - abgerufen am 2014-02-21
- [Vall12e] VALLEN SYSTEME GMBH: *Vallen Wavelet*. Windows 7. Icking, Deutschland : Vallen Systeme GmbH, 2012
- [VaTh11] VALLEN, H ; THENIKL, T: Anwendungsbeispiel für einen nach ATEX zertifizierten, eigensicheren AE-Sensor. In: *Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse*. Wetzlar, 2011
- [Vikt67] VIKTOROV, IA: *Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications*. Bd. 147 : Plenum press New York, 1967
- [WMSS12] WACHSMUTH, J ; MALIKOUTSAKIS, M ; SAVAIDIS, G ; SAVAIDIS, A ; BOHSE, J: Corrosion and fatigue crack monitoring by means of acoustic emission for application in transportation means. In: *International Journal of Terraspace Science and Engineering, Damage tolerance of Engineering Structures*. Bd. 5 (2012), Nr. 1, S. 9–17
- [WuLT15] WU, W ; LIN, TR ; TAN, ACC: Normalization and source separation of acoustic emission signals for condition monitoring and fault detection of multi-cylinder diesel engines. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* (2015)
- [WuSW08] WU, Z ; SHEN, S ; WANG, S: The Acoustic Emission Monitoring During the Bending Test of Q235 Steel Box Beam. In: . Shanghai, China, 2008
- [YMNT00] YAMADA, H ; MIZUTANI, Y ; NISHINO, H ; TAKEMOTO, M ; ONO, K: Lamb wave source location of impact on anisotropic plates. In: *Journal of Acoustic Emission(USA)* Bd. 18 (2000), S. 51

B Entwicklungen und Anwendungen der Schallemissionsprüfung

B.1 Geschichte der Schallemission

Die Anfänge der Schallemissionsuntersuchungen

Dass bestimmte strukturelle Veränderungen in Materialien Geräusche auslösen und diese auch für den Menschen von Nutzen sind, wusste man bereits 6500 v. Chr. Um die Qualität ihrer Ware zu prüfen, verließen sich Töpfer traditionell auf das hörbare Knacken ihrer Tonkessel, wenn diese nach dem Brennen abkühlten [Ency84, S.78ff]. Später wurde vor allem das Zinngeschrei, welches beim Verbiegen des relativ weichen Zinns durch Aneinanderreiben der β -Kristallite auftritt, als hörbare Schallemission wahrgenommen [Drou87]. Die erste Aufzeichnung über dieses Phänomen erschien im achten Jahrhundert. Der arabische Alchemist *Jabir ibn Hayyan* schreibt in seinem Buch „Summa Perfectionis Magisterii“ über die akustischen Eigenschaften von Zinn und Eisen.

Während man im 19. Jahrhundert hörbare Schallereignisse wie das Zinngeschrei als Nebeneffekte behandelte, wurden Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts erstmals gezielte Studien durchgeführt, die die Phänomene der Schallemission beleuchteten. Besonders erwähnenswert sind hierbei drei Forschungsprojekte, die in den 30er und 40er Jahren unabhängig voneinander unternommen wurden und neben der Betrachtung der Schallemissionsphänomene die Entwicklung von elektronischen Messgeräten zu ihrer Erfassung beinhalteten [Drou94]. Das erste bekannte, wissenschaftlich geplante Experiment zur Schallemission wurde von *Prof. Fuyuhiko Kishinouye* im Jahre 1933 bei einem Treffen des Earthquake Research Institute, Tokio, vorgestellt und 1934 veröffentlicht. *Kishinouye* führte Experimente durch, in welchen er Schallemission aus einem Bruch in Holz verstärkte und aufnahm, um Erkenntnisse über die Bewegungen der Erdkruste bei Erdbeben zu erlangen [Kish34]. 1936 wurde von *Friedrich Förster* und *Erich Scheil* in Deutschland das Ergebnis eines Experiments veröffentlicht, bei dem die Geräusche untersucht wurden, die bei der Martensitbildung in Stahl entstehen [FöSc36]. Förster baute ein elektrodynamisches Transmitter/Receiver System, um die mechanischen Vibrationen und Schallemissionen in elektrische Volt umzuwandeln. Dieses konnte genutzt werden, um die niederfrequenten Geräusche, welche bei der martensitischen Transformation produziert werden, elektronisch zu verstärken und aufzunehmen. 1948 führten *W.P. Mason*, *H.J. McSkimin* und *W. Shockley* die ersten wissenschaftlichen Schallemissionsexperimente in den USA durch. Sie beobachteten die Versetzungsbewegung in reinen Zinnproben über die Spannungswellen, die sie generierten. Ihre Messtechnik konnte Auslenkungen von ungefähr 10^{-7} mm in einem Zeitraum von 10^{-6} Sekunden erfassen [MaMS48].

Als Pionier der Schallemission gilt jedoch *Joseph Kaiser*. In seiner Dissertation im Jahre 1950 an der Technischen Hochschule München untersuchte er das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch [Kais50]. Es ist die erste umfassende Erforschung von Schallemissionsphänomenen. Seine wohl bedeutungsvollste Entdeckung war das Irreversibilitätsphänomen in der Schallemission, welches heute seinen Namen trägt: der *Kaiser Effekt*. Kaiser schlug die Unterscheidung zwischen kontinuierlichem und transientem Signal vor. Die

Entstehung der Schallemissionssignale sah er als Folge des Aneinanderreibens von Körnern in polykristallinen Werkstoffen und interkristalliner Rissbildung.

Die Entwicklung der Schallemissionsprüfung in den letzten 60 Jahren

Erste Anwendungen in der Industrie fand die Schallemission in der Raumfahrt und der Atomindustrie [Drou87]. In den 60er Jahren lag der Schwerpunkt jedoch weitgehend in der Grundlagenforschung. Eine der wichtigsten technischen Errungenschaften nach *Kaiser* kam 1964 aus den USA von *H.L. Dunegan*. Ihm gelang es, die Störgeräusche signifikant zu verringern, indem er Schmalbandfilter in einem Frequenzbereich weit über dem Hörbaren verwendete [DuTH63]. Es wurde daran gearbeitet, eine Verbindung zwischen Bruchmechanik und Schallemission herzustellen [Drou94, HaDu74]. In dieser Zeit war es den SE-Systemen aufgrund der geringen Rechenkapazitäten nicht möglich, in größerem Umfang Wellenformen aufzunehmen. Stattdessen wurden SE-Parameter wie die Maximalamplitude, die Durchschnittsfrequenz oder die Energie aufgenommen. Diese Parameter können eine gute Möglichkeit für die Intensität und den Schadensgrad in einer SE-Prüfung darstellen, limitieren jedoch ihre Möglichkeiten [Holf00]. Erste erfolgreiche Versuche der Quellenortung fanden statt.

Mitte der 1980er Jahre begannen erste Arbeitsgruppen, Schallemissionssignale quantitativ Quellereignissen zuzuordnen. Aufgrund von Fortschritten in deterministischen und statistischen Analysemethoden können nun die SE-Daten detaillierter separiert und interpretiert werden. Waren mithilfe der Schallemission zuvor allein qualitative Aussagen über Mechanismen wie das Ermüdungsrisswachstum möglich, so wurden diese nun durch Zuordnungen von Größe, Ausrichtung und Typus des Mikroereignisses erweitert. *C.B. Scruby et al.* untersuchten SE-Signale eines Ermüdungsrisses an CT-Proben aus Aluminium [ScBS85]. Sie definierten die Quelle über einen Verschiebungstensor (zwei-dimensionaler Dipol oder seismisches Moment) und konnten den Signalen so die primären Quelltypen Versetzungssprünge in der plastischen Zone und Mikroriss (Rissmodus I, II oder III) zuweisen. Auch Eigenschaften des Quellereignisses wie die Ausrichtung, welche durchschnittlich horizontal war, und die Größe, welche im Durchschnitt rund $2.000 \mu\text{m}^3$ betrug, wurden berechnet. Sie zeigten zudem, dass die Verschiebung der Körperoberfläche proportional zu dem zeitbezogenen Differenzialquotient der Signalstärke der Quelle sei. Diese kann also direkt durch Integration der gemessenen Verschiebung ermittelt werden. Mit ihrer Studie konnten sie belegen, dass der Hauptanteil an Schallemission durch Mikrobruchereignisse an der Risspitze generiert wird und nicht durch Versetzungsbewegungen in der plastischen Zone vor der Risspitze. Dies wurde in vorhergehenden Arbeiten zwar vermutet, konnte aber bis zu diesem Zeitpunkt nicht quantitativ belegt werden.

Mit der Jahrtausendwende waren sowohl die Computertechnik als auch das Verständnis über Zusammenhänge von SE-Quelle, Wellenausbreitung und Sensoren so weit fortgeschritten, dass Wellenform- und Modalanalysen zum viel genutzten Werkzeug wurden. Es gab eine Revolution in der Erweiterung von Potential und Bandbreite der Forschungsgebiete [Holf00]. Die Klassifizierung der SE-Signale weckte aufgrund der technischen Möglichkeiten und ihrem praktischem Nutzen großes Interesse. So entstand im letzten Jahrzehnt eine Reihe von Forschungsarbeiten zu diesem Gebiet [Agge11, AKSS12, Bohs04, GrWJ95, HaOG02a, RPRG04, SGUH12].

B.2 Darstellung der CORFAT-Projektaufgaben

Ein Teil der hier verwendeten Versuche wurde im Rahmen des EU-Projektes „CORFAT – Cost Effective Corrosion and Fatigue Monitoring for Transport Products“ durchgeführt. Um herauszustellen, dass alle hier aufgeführten Ergebnisse aus eigener Forschungsarbeit stammen, soll der Inhalt des Projektes kurz vorgestellt und eine Abgrenzung zu den Arbeiten der Projektpartner vorgenommen werden.

Zusammenfassung der Projektarbeit

Erklärte Zielstellung des Projektes war es, mithilfe der SEP eine Möglichkeit zur effektiven Zustandsüberwachung von Gefahrguttransportbehältern zu studieren und zu entwickeln. Hierbei ging es um den Schiffs-, Schienen-, und Straßenverkehr. Überwacht und detektiert werden sollten wachsende Ermüdungsrisse und aktive Korrosionsvorgänge. Dafür sollte ein Prototyp für eine Überwachungseinrichtung der Transportmittel (Sensorik, Software) entwickelt, ein allgemeingültiges Inspektionsprogramm unter Verwendung von Schallemission als Monitoring-Technik erstellt sowie ein Entwurf für die Normung des Verfahrens erarbeitet werden. Das Projekt wurde von elf Partnern aus acht EU-Ländern über vier Jahre bearbeitet.

Hierzu wurden in elf Arbeitspaketen, von Grundlagenversuchen über Monitoring-Strategien, Instrumentierung und die tatsächliche Zustandsüberwachung von Schiffen und Tankfahrzeugen für Straße bzw. Schiene, bis hin zur Standardisierung, die Arbeitsbereiche der einzelnen Projektpartner festgelegt. Die Auflistung der Arbeitspakete (WP) und Teilaufgaben befindet sich in *Tab. B-1*. Der Beitrag der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), und somit der eigene Beitrag, für das Projekt bezieht sich im praktischen Bereich hauptsächlich auf das *Arbeitspaket 2: Grundlagen des SE-Monitorings* und abschnittsweise auf das *Arbeitspaket 6: Zustandsüberwachung von Tanks auf Straße und Schiene*.

Tab. B-1: Aufgaben des CORFAT-Projekt [Corf14]

WP 1	Basics Task 1.1 technology review Task 1.2 failure mechanisms Task 1.3 instrumentation
WP 2	Fundamentals of AE monitoring Task 2.1 corrosion monitoring with AE (lab tests) Task 2.2 fatigue crack monitoring with AE (lab tests) Task 2.3 monitoring analysis Task 2.4 requirements on the monitoring system Task 2.5 AE-Instrumentation adaptation and development
WP 3	Fundamentals of follow-up test methods Task 3.1 capabilities of ROBTANK as sensor carrier Task 3.2 feasibility and validation of NDT methods for follow-up Task 3.3 requirements on the NDT methods for the follow-up

WP 4	Monitoring strategy Task 4.1 data management Task 4.2 equipment integration Task 4.3 overall strategy Task 4.4 preparation of a technology assessment report
WP 5	Ship condition monitoring Task 5.1 structural integrity of ships Task 5.2 boundary condition measurements Task 5.3 development of instrumentation for ship monitoring Task 5.4 trial tests on-board ships Task 5.5 procedure for condition monitoring Task 5.6 application of follow-up NDT
WP 6	Road and railway tank cars condition monitoring Task 6.1 structural integrity of tank cars Task 6.2 boundary condition measurements Task 6.3 development of instrumentation for ship monitoring Task 6.4 trial tests on tank cars task Task 6.5 procedure for condition monitoring Task 6.6 application of follow-up NDT
WP 7	Validation of ship monitoring Task 7.1 guidelines for application Task 7.2 monitoring measurements Task 7.3 monitoring follow-up Task 7.4 validation report
WP 8	Validation of tank car monitoring Task 8.1 guidelines for application Task 8.2 monitoring measurements Task 8.3 monitoring follow-up Task 8.4 validation report
WP 9	Monitoring system for maintenance and inspection Task 9.1 monitoring instructions Task 9.2 instrumentation adaptation Task 9.3 evaluation criteria Task 9.4 condition assessment and follow-up NDT Task 9.5 implementation in maintenance programme
WP 10	Dissemination and standardisation Task 10.1 preparation of guidelines Task 10.2 dissemination of results Task 10.3 standardisation
WP 11	Project management

Abgrenzung zu anderen Projektpartnern

Viele der in dieser Arbeit verwendeten Ergebnisse resultieren aus Versuchen, welche im Rahmen des EU-Projektes CORFAT durchgeführt worden sind. Diese wurden jedoch ausnahmslos eigenständig durchgeführt und analysiert. In diese Arbeit fließen keine Ergebnisse ein, welche von Projektpartnern stammen. Um dies zu unterstreichen, werden im Folgenden die Projektpartner aufgezählt und ihre Aufgaben im Projekt mit den eigenen in Beziehung gestellt. Die Aufgabengebiete der Projektpartner und aus dem Projekt entstan-

dene Veröffentlichungen sind in *Tab. B-2* dargestellt. Überschneidungen in den Aufgabengebieten gibt es mit einigen Projektpartnern. Jedoch wurden zu keinem Zeitpunkt Ergebnisse von Projektpartnern zu eigenen Ergebnissen hinzugefügt.

Tab. B-2: Partner im Projekt CORFAT und ihre Aufgabengebiete

Organisation	Aufgabengebiete	Veröffentlichungen
TÜV Austria Services GmbH (Österreich)	Laborprüfung: Korrosion, Durchführung des SE-Monitorings, SE-Analysen, Projektmanagement	[JTWB12] [SMJS13]
Vallen Systeme GmbH (Deutschland)	Sensorentwicklung und -herstellung	[VaTh11]
American Bureau of Shipping Europe Ltd. (Großbritannien)	Zertifizierung, Kontaktaufnahme zu Schiffseignern	
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Deutschland)	Laborprüfung: Korrosion und Ermüdungsrisswachstum, SE-Monitoring an Tankwagen, Standardisierung	[JTWB12] [WMSS12]
Aristotle University of Thessaloniki (Griechenland)	FE-Modellierung, Bereitstellung von Tankwagen für das SE-Monitoring	[WMSS12] [SMJS13] [SaMS13]
Gdansk University of Technology (Polen)	Laborprüfung: Ermüdungsrisswachstum, SE-Monitoring an Schiffen	
ISQ Instituto de Soldadura e Qualidade (Portugal)	Entwicklung eines Sensorträgers für Messungen unter Wasser, Bereitstellung von Tankwagen für das SE-Monitoring	
Laboratory of Applied Research, Krakow University of Technology (Polen)	Laborprüfung: Ermüdungsrisswachstum, SE-Monitoring an Schiffen, Standardisierung	
Nuclear N.D.T. Research & Services S.R.L. (Rumänien)	Bereitstellung von Schienenfahrzeugen für das SE-Monitoring	[SMJS13]
Reneko AS (Estland)	Bereitstellung von Schienenfahrzeugen für das SE-Monitoring	
Naval Shipyard of Gdynia (Polen)	Bereitstellung von Schiffen für das SE-Monitoring	

In gemeinsamen Veröffentlichungen und Projektberichten wurden Ergebnisse aus den unterschiedlichen Teilgebieten des Projektes zusammengefügt. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern TÜV Österreich bzw. der Universität Thessaloniki sind zwei Veröffentlichungen entstanden. In [JTWB12] wird das SE-Monitoring im Labor und an Tankwagen beschrieben. Dabei stammen die Ergebnisse aus der Überwachung von Ermüdungsrissen im Labor aus eigenen Messungen, während die Tanküberwachung vom TÜV Österreich durchgeführt wurde. In der Veröffentlichung mit der Universität Thessaloniki [WMSS12] wurden wiederum eigene Laborergebnisse verwendet. Der Projektpartner steuerte die FEM-Simulation von Hot-Spots für die Entwicklung möglicher Schädigungen an einem Tankwagen bei. Es fand eine gemeinschaftliche Forschung statt; in keinem Falle jedoch ein Ergebnistransfer in diese Arbeit hinein.

C Theorieteil

C.1 Exkurs in die Bruchmechanik

Zusammenhänge von Parametern der Schallemission zu Bruchvorgängen in Stahlwerkstoffen werden in dieser Arbeit diskutiert. Letztere werden anhand der Bruchmechanik beschrieben. Um einen Einblick in das Gebiet der Bruchmechanik zu erlangen und wichtige bruchmechanische Kenngrößen kennenzulernen, wird dieses Kapitel verwendete Begriffe und Methoden erläutern.

Das Konzept der linear-elastische Bruchmechanik ermöglicht die quantitative Erfassung des Versagens angerissener Bauteile als Folge instabiler Rissausbreitung. Es kann angewendet werden, wenn die beim Rissvorgang entstehende plastische Zone klein bleibt gegenüber der Bauteilabmessung [Blum87, S.52f].

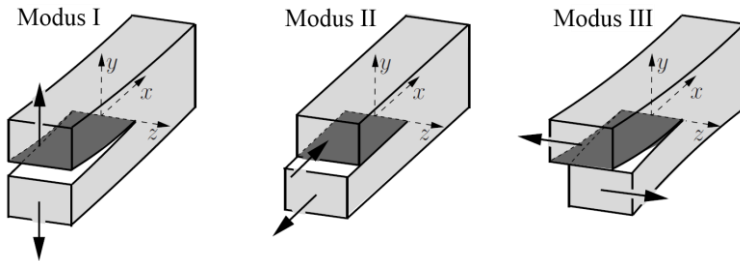


Abb. C-1: Rissöffnungsarten [Blum87, GrSe11b]

Modus I Eine Zugspannung führt zum symmetrischen Abheben der Rissufer

Modus II Längsscherung, ebener Schub

Modus III Querschermung, nichtebener Schub

Ein wichtiger Parameter in der Bruchmechanik ist der Spannungsintensitätsfaktor K . Dieser stellt einen Wert für die Spannungsüberhöhung an der Risspitze dar und kontrolliert die Rissausbreitung im sogenannten K -bestimmten Feld (vgl. Abb. C-2). Er setzt sich zusammen aus der Nennspannung σ , der Risslänge a und einem oft komplexen riss- und bauteil-abhängigen Korrekturfunktion f .

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f. \quad (29)$$

Nach den möglichen Rissöffnungsmodi, welche in Abb. C-1 dargestellt sind, werden die Spannungsintensitätsfaktoren K_I , K_{II} und K_{III} unterschieden. Für jeden Modus gibt es explizite Lösungen. Das Modus I Rissspitzenfeld (wie es beim Biegeversuch entsteht) kann durch die Beziehung

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos(\varphi/2) \begin{Bmatrix} 1 - \sin(\varphi/2) \sin(3\varphi/2) \\ 1 + \sin(\varphi/2) \sin(3\varphi/2) \\ \sin(\varphi/2) \cos(3\varphi/2) \end{Bmatrix} \quad (30)$$

beschrieben werden. Die Formelgrößen sind in Abb. C-2b dargestellt.

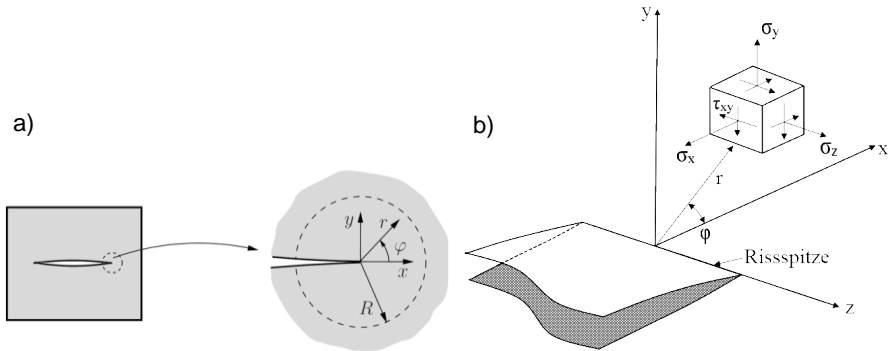


Abb. C-2: Umgebung der Risspitze (links). R beschreibt die Ausdehnung des K -bestimmten Feldes [GrSe11b]; Volumenelement mit Spannungskomponenten an der Risspitze (rechts) nach [Blum87]

Die Spannungen wachsen nach (30) mit $r \rightarrow 0$ unbeschränkt an (sie sind vom Typ $r^{-1/2}$ singular). Als Beispiel hierfür ist in Abb. C-3 der Verlauf von σ_y vor der Risspitze bei $\varphi = 0$ dargestellt. Für ein positives K_I ergeben sich die Verschiebungen entlang der Rissflanken ($\varphi = \pm\pi$) nach [GrSe11b, S.66] folgendermaßen:

$$v^{\pm} = v(\pm\pi) = \pm \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} (\kappa + 1). \quad (31)$$

Dabei gilt für den ebenen Verzerrungszustand (EVZ) bzw. den ebenen Dehnungszustand (EDZ)

$$\begin{aligned} \text{EVZ} : \kappa &= 3 - 4\nu \\ \text{EDZ} : \kappa &= \frac{(3 - \nu)}{(1 + \nu)}. \end{aligned} \quad (32)$$

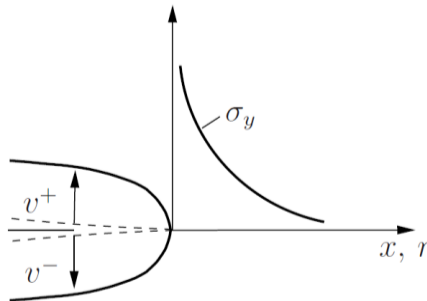


Abb. C-3: Modus I Risspitzenfeld [GrSe11b]

Zur Bestimmung der K -Faktoren können, je nach Komplexität des Systems, analytische, numerische oder experimentelle Methoden angewendet werden. *Newman und Raju* haben beispielsweise auf empirische Weise eine Gleichung für K -Faktoren an semielliptischen Oberflächenrissen auf einer geometrisch definierten Platte ermittelt [NeRa81]. Ihre Methode wurde in dieser Arbeit für die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren verwendet und wird in diesem Kapitel abschließend erläutert.

Bei zyklischen Beanspruchungen wird als Parameter der zyklische Spannungsintensitätsfaktor ΔK , auch Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors (SIF), verwendet. Er ist die Differenz aus maximalem und minimalem K :

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \cdot f \quad (33)$$

$\Delta\sigma = \sigma_o - \sigma_u$	Schwingbreite
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
K_{\max} bzw. K_{\min}	Die sich aus Ober- bzw. Unterspannung ergebenden Spannungsintensitätsfaktoren
f	Bauteil- und rissformabhängige Korrekturfunktion
a	Risllänge.

In diesem Zusammenhang ist das Lastverhältnis R von Bedeutung. Es ist definiert als Verhältnis von minimaler Belastung F_{\min} zu maximaler Belastung F_{\max} :

$$R = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}. \quad (34)$$

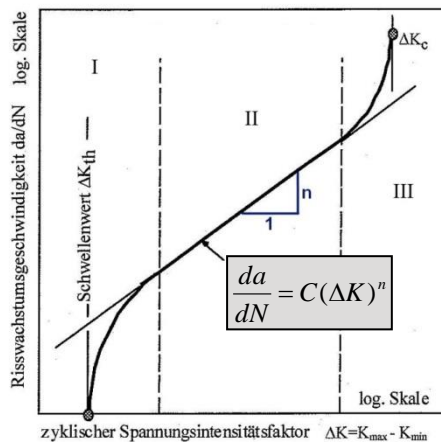


Abb. C-4: Risswachstumskurve mit der Risswachstumsgeschwindigkeit über dem zyklischen SIF und Darstellung der Paris-Geraden [Merk04]

Wird die Risswachstumsrate da/dN in einem doppel-logarithmischen Zusammenhang zu ΔK gestellt, ergibt sich eine Risswachstumskurve, wie sie in Abb. C-4 dargestellt ist. Im **Bereich I** beginnt das Ermüdungsrisswachstum, nachdem der kritische zyklische SIF ΔK_{th} erreicht wurde. **Bereich II** beschreibt den Bereich des stabilen Risswachstums. Dieser Abschnitt lässt sich hinreichend genau durch die *Paris-Erdogan-Gleichung* beschreiben [PaEr63]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n. \quad (35)$$

C und n sind Konstanten, welche vom Werkstoff sowie von Umgebungseinflüssen abhängen. n beschreibt die Steigung der Paris-Geraden. Im **Bereich III** erfolgt mit hohen ΔK -

Werten eine Annäherung an den statischen Bruchvorgang. Beim Erreichen der kritischen Spannungsintensität ΔK_c tritt der Rest- oder Gewaltbruch ein [Blum87].

Zusammenhänge zur Schallemission

Ein erster, von *Gerberich und Hartbower* 1967 aufgestellter, Zusammenhang für Ermüdungsrischwachstum und Schallemission in D6-Stahl betrachtet die Bruchflächenzunahme und bezieht sich auf Risswachstumsraten höher als 10^{-3} mm/Lastzyklus [GeHa67]:

$$\Delta A \propto N_E^2 \frac{E}{K^2}, \quad (36)$$

wobei E der Elastizitätsmodul, K der Spannungsintensitätsfaktor, ΔA die Bruchflächenzunahme und N_E die Summe der SE-Ereignisse, die während der Bruchflächenzunahme ΔA auftreten, sind. *Sinclair et al.* zeigten, dass die Anzahl der gesamten SE-Ereignisse N_E direkt proportional zur erzeugten Fläche des Ermüdungsrissses A ist [SiCF77]:

$$N_E = \gamma A, \quad (37)$$

wobei γ eine Materialkonstante ist. Eine frühe und sehr umfangreiche Arbeit von *Dunegan, Harris und Tatro* fokussiert das Verhältnis zwischen Schallemissionsparametern und Spannungsintensitätsfaktor im Rissöffnungsmodus I und der plastische Zone. Das in dieser Studie vorgestellte Modell kann angewendet werden, um Risse zu beschreiben, bei denen sprödes oder duktiles Risswachstum vorliegt [DuHT68]. Das Modell basiert darauf, dass in einer rissbehafteten Probe die plastische Deformation des Materials vor der Rissspitze Schallemission auslöst. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die Mechanik im Mikrometerbereich, welche das Risswachstum auslöst, auch zum Auftreten von Schallemission im Material führt [Bass87]. Demnach sollte es einen Zusammenhang geben zwischen Parametern, die den Bruchvorgang und jenen, welche das Phänomen der Schallemission beschreiben. Während des subkritischen Risswachstums wurde für spröde Bruchvorgänge folgender Zusammenhang zum Spannungsintensitätsfaktor K_I festgestellt [Ono00, TeEv74]:

$$N_E = C(K_I)^m \quad (38)$$

wobei N_E die kumulative Anzahl an SE-Ereignissen und C und m konstant sind.

Auch bei Ermüdungsversuchen wurde ein ähnlicher Zusammenhang mit dem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK beobachtet [SiCF77]:

$$N_C = C(\Delta K)^m. \quad (39)$$

N_C ist dabei die Anzahl der Überschwingungen (Counts) im SE-Signal pro Lastzyklus. Dieser Zusammenhang in der Schallemission sieht ganz ähnlich aus wie die Paris-Erdogan-Gleichung aus der Bruchmechanik (35):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n.$$

Auf der linken Seite von Gleichung (2) steht statt der Risswachstumsrate die Countrate, also die Anzahl der Counts pro Lastwechsel. Der Zusammenhang liegt nahe: die Mecha-

nismen für das Risswachstum sind Mechanismen für die risswachstumsbedingten Effekte der Schallemission. Es wurden in verschiedenen Arbeiten Daten zum Zusammenhang zwischen diesen beiden Gleichungen gesucht. Abhängig von Materialien und Messgeräten ergab sich ein Zusammenhang zwischen den Exponenten n und m [HaBB81, LiPR78, MoHB73]. Die SE-Quellen, die für eine vergleichende Betrachtung in Frage kommen, geben entweder Energie durch die Risserweiterung oder durch Deformations- und Bruchvorgänge innerhalb der plastischen Zone vor der Risssspitze ab [Bass87].

Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors für den halbelliptischen Oberflächenriss nach Newman und Raju

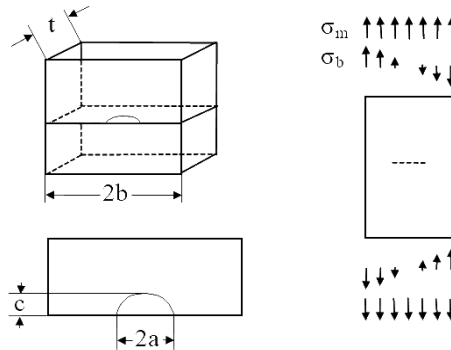


Abb. C-5: Scheibe mit halbelliptischem Oberflächenriss unter Zug- und Biegebeanspruchung nach [NeRa81]

Spannungsintensitätsfaktoren für den Scheitel K_a , bzw. für einen Oberflächenpunkt K_c [NeRa81]:

$$K_a = (\sigma_m + H_2 \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi c}{Q} F g_2} \quad (40)$$

$$K_c = (\sigma_m + H_1 \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi c}{Q} F g_1} \quad (41)$$

mit
$$F = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{c}{t} \right)^2 + M_3 \left(\frac{c}{t} \right)^4 \right] f_w$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi}{2b} \sqrt{\frac{c}{t}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

für $\frac{c}{t} \leq 1$:
$$M_1 = 1,13 - 0,09 \frac{c}{a}$$

$$M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{c}{a}}$$

$$M_3 = 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{c}{a}} + 14 \left(1 - \frac{c}{a} \right)^{24}$$

$$g_1 = \sqrt{\frac{c}{a} \left[1,1 + 0,35 \left(\frac{c}{t} \right)^2 \right]}$$

$$g_2 = 1$$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1,65}$$

für $\frac{c}{t} > 1$: $M_1 = \sqrt{\frac{a}{c} \left(1 + 0,04 \frac{a}{c} \right)}$

$$M_2 = 0,2 \left(\frac{a}{c} \right)^4$$

$$M_3 = -0,11 \left(\frac{a}{c} \right)^4$$

$$g_1 = 1,1 + 0,35 \left(\frac{a}{c} \right) \left(\frac{c}{t} \right)^2$$

$$g_2 = \sqrt{\frac{a}{c}}$$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}$$

für $\frac{c}{a} \leq 1$: $H_1 = 1 - 0,34 \frac{c}{t} - 0,11 \frac{c^2}{at}$

$$H_2 = 1 + \left(-1,22 - 0,12 \frac{c}{a} \right) \frac{c}{t} + \left[0,55 - 1,05 \left(\frac{c}{a} \right)^{0,75} + 0,47 \left(\frac{c}{a} \right)^{1,5} \right] \left(\frac{c}{t} \right)^2$$

Gültigkeitsbereich: $0 \leq \frac{c}{a} \leq \infty$, $0 \leq \frac{c}{t} \leq 1$, $\frac{a}{b} < 0,5$ für Zugbeanspruchung

$0 \leq \frac{c}{a} \leq 1$, $0 \leq \frac{c}{t} < 1$, $\frac{a}{b} < 0,5$ für Biegebeanspruchung

C.2 Elektrochemische Sauerstoffkorrosion und Schwingkorrosion als Schallemissionsquellen

Elektrochemische Sauerstoffkorrosion

Korrosionsschäden bei Metallen sind hauptsächlich auf elektrochemische Korrosionsprozesse zurückzuführen. Eine elektrochemische Korrosion beinhaltet mindestens eine anodische und eine kathodische Reaktion [Enis99]. Typische elektrochemische Korrosionsvorgänge sind die Sauerstoff- und die Wasserstoffkorrosion. Letztere ist bei Säureangriffen auf Metalle von Bedeutung, bei denen ein hoher Gehalt an Wasserstoffionen H^+ vorliegt ($pH \leq 5$). Wesentlich häufiger als die Wasserstoffkorrosion ist jedoch die Sauerstoffkorrosion [Barg12, S.71]. In *Tab. C-3* sind einige elektrochemische Begriffe definiert, die für das Verständnis des Korrosionsvorganges von Bedeutung sind.

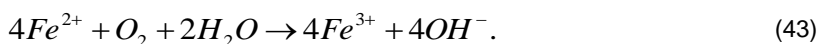
Tab. C-3: Korrosionstechnische und elektrochemische Definitionen nach [Barg12, Enis99]

Korrosionsmedium	Umgebung, die ein oder mehrere Angriffsmittel enthält
Angriffsmittel	Stoff, der Korrosion verursacht, wenn er mit einem Metall in Berührung kommt
Rost	sichtbare Korrosionsprodukte, die hauptsächlich aus hydratisierten Eisenoxiden bestehen
Abblättern	Abspalten und Abheben von Oberflächenschichten
Elektrolytlösung	Medium, in dem der elektrische Strom durch Ionen transportiert wird
Elektrode	Elektronenleiter in Kontakt mit einer Elektrolytlösung. Im elektrochemischen Sinne ist die Elektrode tatsächlich begrenzt auf die enge Region zu beiden Seiten der Phasengrenze dieses Systems
Kathode	Elektrode, an der die kathodische Reaktion überwiegt
Anode	Elektrode, an der die anodische Reaktion überwiegt
Kathodische Reaktion	Kationen werden durch Aufnahme von Elektronen reduziert; Reduktion
Anodische Reaktion	Abgabe von Elektronen; Oxidation

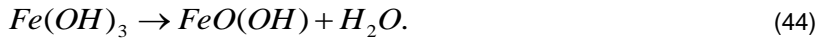
Das Rosten von Eisen und Stahl beispielsweise ist ein Vorgang der Sauerstoffkorrosion. Der Sauerstoff wirkt hier als Oxidationsmittel; er nimmt Elektronen auf. Sauerstoff diffundiert von außen in den Wassertropfen und löst so einen Konzentrationsunterschied im Wassertropfen aus. Dieser führt wiederum zu einer Potentialdifferenz zwischen innerem (Anode) und äußerem (Kathode) Tropfenbereich. Mit dem Wasser als Elektrolyten bilden sie eine galvanische Zelle [Schu04, S.68ff]. Durch die anodische Reaktion



gelangen Fe^{2+} -Ionen in den Elektrolyten, die durch nochmalige Oxidation die Elektronen für die Sauerstoffreaktion liefern:



Über das Zwischenstadium $Fe(OH)_3$ entsteht der unlösliche Rost $FeO(OH)$ durch Abspalten von Wasser [Barg12, S.72]:



Schwingkorrosion

Die Schwingkorrosion ist ein Vorgang, bei dem Korrosion und wechselnde Dehnungen beteiligt sind und der häufig zu Rissbildung führt [Enis99]. Sie kommt vor, wenn ein Metall zyklischen Belastungen in einer korrosiven Umgebung ausgesetzt ist. Korrosive oder andere chemisch aktive Umgebungen können das Einsetzen von Ermüdungsrisswachstum in Metallen oder Legierungen beschleunigen und die Rate der Ermüdungsrissausbreitung erhöhen. Das Vorhandensein von Korrosion kann daher unkalkulierbare Auswirkungen auf das Ermüdungsrisswachstum und somit auf die ansonsten gut definierte Betriebsfestigkeit eines Bauteils haben [Czic13].

Vor und neben dem einsetzenden Risswachstum ist hier vor allem der Schichtbruch des Rosts als SE-Quelle von Bedeutung. Der Energiegehalt der SE-Ereignisse ist dabei abhängig von der Schichtdicke der Korrosionsprodukte: Bei dünnen Schichten entsteht ein schwaches, bei dicken Schichten ein starkes SE-Ereignis.

SE-Quellen an der Schweißnaht

Schweißnähte sind in vielen realen metallischen Bauteilen zu finden und oft Entstehungsort für Ermüdungsrisse. Schweißnahtfehler, wie Einschlüsse von Fremdpartikeln, Schlackeneinschluss oder spröde Grenzschichten im Material, entstehen beim Schweißprozess. Dem überlagern sich thermischen Spannungen. Dies führt zur vermehrten Fehler- und Rissbildung im Betrieb des Bauteils. Rissarten, die in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone (WEZ) vorkommen, sind in *Abb. C-6* dargestellt. Eine Schweißnaht ist so auch ohne die Bildung von Makrorissen eine starke Schallemissionsquelle.

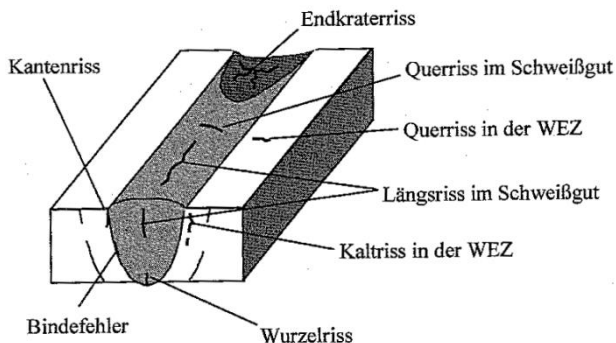


Abb. C-6: Typische Rissarten an einer Schweißnaht [Merk04]

C.3 Ausbreitungscharakteristik elastischer Wellen und Herleitung der Rayleigh-Lamb-Gleichungen

In einem infiniten festen Medium breiten sich elastische Wellen als Volumenwellen, der Longitudinal- und der Transversalwelle, aus. Jede besitzt eine charakteristische Geschwindigkeit, abhängig von der Dichte und den elastischen Konstanten des Materials. Einige Materialien mit ihren Kennwerten sind in *Tab. C-4* dargestellt.

Tab. C-4: Dichte und Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle (c_L) und der Transversalwelle (c_T) für einige Materialien nach [Rose04]

Material	Dichte g/cm ³	Schallgeschwindigkeit	
		c_L m/s	c_T m/s
Luft	0,001	330	-
Wasser (20°C)	1	1.480	-
Aluminium	2,7-2,8	6.250-6.350	3.100
PZT	7,65	3.791	-
Glas	2,23-2,25	5.570-5.770	3.430-3.440
Stahl	7,8	5.850	3.230
Rostfreier Stahl	7,67-8,03	5.660-7.390	2.990-3.120

Bei longitudinalen Wellen fallen Schwingungs- und Ausbreitungsrichtung zusammen. Sie können sich allerdings nur allseitig ausbilden, wenn die Ausdehnung des Festkörpers einem Vielfachen ihrer Wellenlänge entspricht. Diese ergibt sich bei Stahl mit einer longitudinalen Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_L = 5.000$ m/s und einer Frequenz $f = 10$ kHz zu $\lambda_{\text{Welle}} = c_L/f = 0,5$ m. In Platten ist die Querabmessung also klein zur longitudinalen Wellenlänge. Dort kommt es zur Bildung sogenannter quasi-longitudinaler Wellen [CrHe95]; ihre Ausbreitung erfolgt in Plattenrichtung in der x/y-Ebene. Da das Gesamtvolumen erhalten bleibt, tritt eine Querkontraktion in Plattendicke z auf. Die Deformation, die der Durchlauf einer quasi-longitudinalen Welle in einer Platte erzeugt, ist in *Abb. C-7a* dargestellt.

Neben der Verschiebung u_1 in x-Richtung tritt die Querverschiebung u_2 in y-Richtung auf. Ein kleiner Volumenwürfel innerhalb eines Festkörpers ändert bei der Longitudinalbewegung sein Volumen, während seine 90°-Winkel erhalten bleiben. Dies verhält sich bei der Transversalwelle gegensätzlich. Hier ändern sich die Winkel eines infinitesimalen Würfels im Festkörper, während das Volumen konstant bleibt. In begrenzten Medien mit nicht verschwindender Schubspannung wie Balken oder Platten breiten sich die Transversalwellen als sogenannte BiegeWellen aus (vgl. *Abb. C-7b*).

Taucht eine Ober- oder Grenzfläche auf, verbinden sich die Longitudinal- und Transversalwellen, welche sich zuvor als Volumenwellen durch das Material bewegt haben, in der oberflächennahen Region. Durch eine Verdichtung wird eine transversale Verschiebung, entsprechend der Querkontraktionszahl des Materials, hervorgerufen. Die gesamte Partikelbewegung ist dort weder rein longitudinal noch transversal und bewegt sich nun an der Oberfläche fort (vgl. *Abb. C-7c*). Diese Art Oberflächenwelle wird *Rayleigh-Welle* genannt (Rayleigh, 1842-1919). Sie breitet sich planar aus; ein Oberflächenpunkt beschreibt beim Durchgang einer Rayleigh-Welle eine elliptische Bewegung [Holf00]. Näherungsweise gilt für die Wellengeschwindigkeit der Rayleigh-Welle

$$c_R \approx c_T \frac{(0,874 + 1,12\nu)}{1 + \nu}. \quad (45)$$

Diese ist also frequenzabhängig und etwas kleiner als die Transversalwellengeschwindigkeit [CrHP05, S.98].

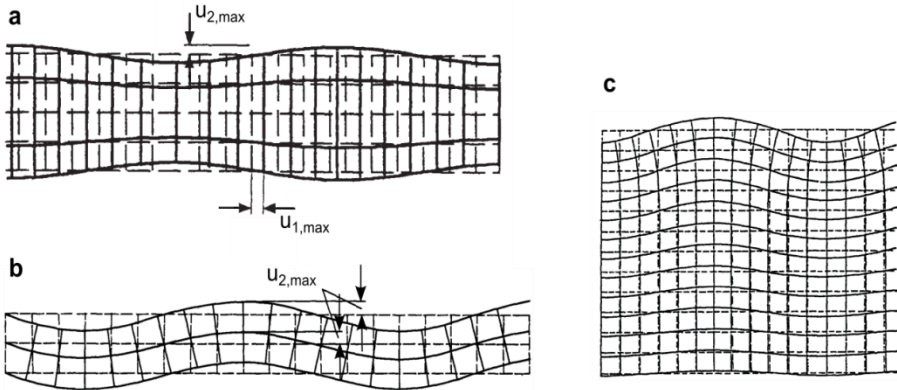


Abb. C-7: a, b) Deformation einer Platte bei Durchgang einer quasi-longitudinalen Welle bzw. einer Biegewelle; Grundmoden S_0 und A_0 der Lamb-Wellen. c) Deformation bei einer Rayleigh-Welle, nach [CrHe95]

Das Verhalten elastischer Wellen an Grenzflächen

Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche, also einen Übergang von einem Medium in ein anderes, kommt es, abhängig vom Einfallswinkel und Art der Medien, zur Brechung und Reflexion der Schallwelle. Außerdem kann eine Umwandlung der Wellenarten und –moden auftreten. Abb. C-8c zeigt die Grenzfläche zweier fester Medien, auf die eine Longitudinalwelle L_0 des Mediums 1 trifft. Es treten eine Reflexion L_R und eine Brechung L_D auf. Da es sich um zwei feste Medien handelt, spaltet sich in Medium 1 als auch im Medium 2 jeweils noch eine Transversalwelle ab (T_R und T_D).

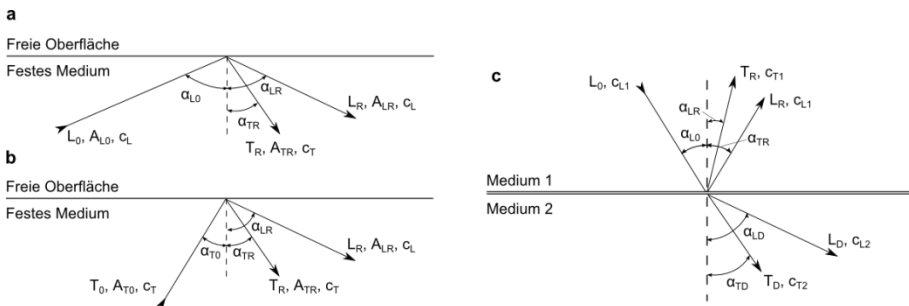


Abb. C-8: Verhalten elastischer Wellen an Grenzflächen. a) Reflexion einer Longitudinalwelle an einer freien Oberfläche, b) Reflexion einer Transversalwelle an einer freien Oberfläche und c) Reflexion und Diffraction einer Longitudinalwelle an der Grenzfläche zweier fester Medien

Für gleiche Wellenarten gilt bei der Reflexion das Reflexionsgesetz der Optik, bei welchem der Einfallswinkel dem Reflexionswinkel entspricht. Für die im Medium 2 gebrochene Longitudinalwelle L_D gilt das *Snelliussche Brechungsgesetz* [Blum87, S.292]:

$$\frac{\sin \alpha_{L0}}{\sin \alpha_{LD}} = \frac{c_{L1}}{c_{L2}}. \quad (46)$$

Die Abspaltung der Transversalwelle T_D unter dem Winkel α_{TD} im Medium 2 erfolgt nach

$$\frac{\sin \alpha_{LD}}{\sin \beta_{TD}} = \frac{c_{L2}}{c_{T2}}. \quad (47)$$

Ist eines der Medien schubspannungsfrei, ist eine Abspaltung der Transversalwelle nicht möglich [Blum87, S.292].

Abb. C-8a und b zeigen die Reflexionen an einer freien Oberfläche nach Eintreffen einer Longitudinal-, bzw. Transversalwelle. Nach [Egle87, S.97ff] ergeben sich die Amplituden der reflektierten Longitudinalwelle A_{LR} und der reflektierten Transversalwelle A_{TR} für freie Oberflächen nach dem Eintreffen einer Longitudinalwelle zu

$$A_{LR} = \frac{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{TR}) - \kappa^2 \cos^2(2\alpha_{TR})}{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{TR}) + \kappa^2 \cos^2(2\alpha_{TR})} \quad (48)$$

$$A_{TR} = \frac{2\kappa \sin(2\alpha_0) \cos(2\alpha_{TR})}{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{TR}) + \kappa^2 \cos^2(2\alpha_{TR})} \quad (49)$$

mit $\kappa = c_L/c_T$. Nach der Reflexion einer Transversalwelle an einer freien Oberfläche ergeben sich die Amplitude der reflektierten Longitudinalwelle A_{RL} und der reflektierten Transversalwelle A_{RT} zu

$$A_{LR} = \frac{\kappa \sin(4\alpha_0)}{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{LR}) + \kappa^2 \cos^2(2\alpha_0)} \quad (50)$$

$$A_{TR} = \frac{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{LR}) - \kappa^2 \cos^2(2\alpha_0)}{\sin(2\alpha_0) \sin(2\alpha_{LR}) + \kappa^2 \cos^2(2\alpha_0)}. \quad (51)$$

Die allgemeinen Feldgleichungen

Bei der Beschreibung der Bewegung elastischer Wellen bedient sich die Akustik der Kontinuumsmechanik. Der Festkörper wird als Kontinuum betrachtet, in dem sein mikroskopischer Aufbau keinen Einfluss nimmt. Aus den Grundgleichungen der linearen Elastizitätstheorie lassen sich für die Verschiebungen u_i in einem linear elastischen, homogenen und isotropen Festkörper, wie sie in Abb. C-9 für den ebenen Fall dargestellt sind, für den dreidimensionalen Fall und die Richtungen x_1 , x_2 und x_3 in folgenden Gleichungen ausdrücken [Egle87]:

$$\begin{aligned}
 (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2 \partial x_1} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3 \partial x_1} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} \right) + \rho f_1 &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\
 (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3 \partial x_2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_3^2} \right) + \rho f_2 &= \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (52) \\
 (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_3} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2 \partial x_3} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3^2} \right) + \rho f_3 &= \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}.
 \end{aligned}$$

Diese lassen sich zu

$$(\lambda + \mu) u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (53)$$

mit:

$i = 1, 2, 3$

u_i Kartesische Komponenten des Verschiebungsvektors \mathbf{u} für Partikelbewegung

ρ Materialdichte

ρf_i Kraftkomponente in Richtung x_i

λ, μ Lamésche Konstanten, repräsentieren elastische Eigenschaften des Materials

zusammenfassen. Bei der verwendeten Indexschreibweise bedeutet das Komma im Index eine Differentiation ($u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j$) und doppelte Indizes eine Summation nach der Einsteinschen Summenkonvention ($u_{i,jj} = u_{i,11} + u_{i,22} + u_{i,33}$). λ und μ sind die *Laméschen Konstanten*, welche voneinander unabhängig sind und alle elastischen Parameter für isotrope Festkörper, wie den Elastizitätsmodul E oder die Querkontraktionszahl ν , beschreiben [GHSW07, S.105]. Sie sind definiert als

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (54)$$

$\mathbf{u} = u_i$ kann als Zusammensetzung von dilatatorischer und verzerrender Komponente betrachtet werden:

$$u_i = u_i^L + u_i^T, \quad (55)$$

wobei die beiden Anteile für die longitudinale, bzw. die transversale Wellenbewegung verantwortlich sind. Diese Verschiebungen sind in *Abb. C-9b* und *c* dargestellt.

Nach dem Helmholtz-Theorem kann (53) in zwei unabhängige Gleichungen für longitudinale und transversale Bewegungen aufgespalten werden [SuYe09].

Für den ebenen Verzerrungszustand ($u_2 = 0$) gilt:

$$\phi_{,11} + \phi_{,33} = \frac{1}{c_L^2} \ddot{\phi} \quad \text{longitudinale Wellenmoden} \quad (56)$$

$$\psi_{,11} + \psi_{,33} = \frac{1}{c_T^2} \ddot{\psi} \quad \text{transversale Wellenmoden.} \quad (57)$$

Dabei sind

$$\phi = \phi(x_1, x_3, t) = [A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3)] \cdot e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (58)$$

$$\psi = \psi(x_1, x_3, t) = [B_1 \sin(px_3) + B_2 \cos(px_3)] \cdot e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (59)$$

$$\text{mit } p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2, k = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{Welle}}} \quad (60)$$

- k Wellenzahl
- ω Kreisfrequenz
- λ_{Welle} Wellenlänge
- c_L Wellengeschwindigkeit der longitudinalen Welle
- c_T Wellengeschwindigkeit der transversalen Welle
- A_1, A_2, B_1 und B_2 sind Konstanten, welche durch die Randbedingungen bestimmt werden.

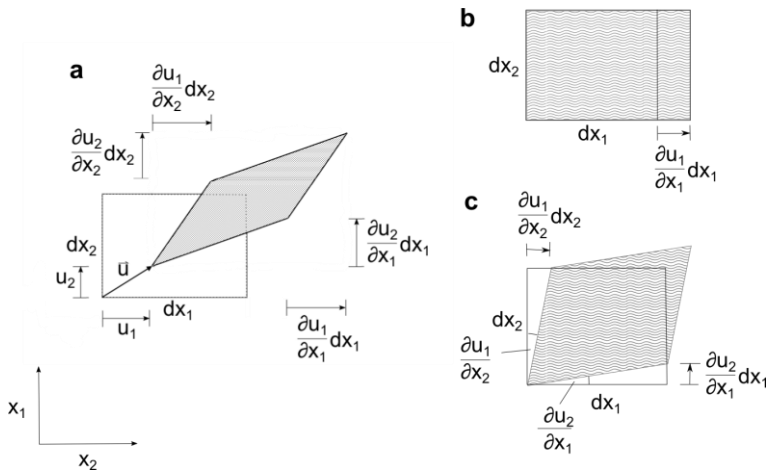


Abb. C-9: Verschiebungen im zweidimensionalen Fall. Infinitesimales Rechteck mit den Seitenlängen dx_1 und dx_2 geht in deformierten Zustand über. Der Verschiebungsvektor $\mathbf{u}(x_1, x_2)$ besitzt dabei die Komponenten $u_1(x_1, x_2)$ und $u_2(x_1, x_2)$ in x_1 , bzw. x_2 -Richtung. a) Zusammen wirkende Verzerrung und Dehnung, b) reine Dehnung in x_1 -Richtung wie bei longitudinaler Wellenbewegung und c) reine Schubdeformation wie bei transversaler Wellenbewegung, nach [CrHP05, GHSW07]

Die Geschwindigkeiten für die Bewegungen in longitudinaler Richtung c_L , bzw. in transversaler Richtung c_T ergeben sich nach [Egle87] zu

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (61)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (62)$$

Lamb-Wellen sind eine Überlagerung von Longitudinal- und Transversalmoden. In einer Platte existieren gleichzeitig eine infinite Anzahl von Wellenmoden, welche sich zwischen oberer und unterer Oberfläche überlagern und zusammengesetzt definierte geführte Wellen ergeben [SuYe09, S.19]. Aus der Definition des ebenen Verzerrungszustandes ergibt sich für die Verschiebungen in Richtung der Wellenbewegung x_1 und senkrecht zur Wellenbewegung x_3 (vgl. *Abb. C-9*):

$$u_1 = \phi_{,1} + \psi_{,3} \quad (63)$$

$$u_2 = 0 \quad (64)$$

$$u_3 = \phi_{,3} + \psi_{,1} \quad (65)$$

und für die Spannungen

$$\sigma_{31} = \mu(u_{3,1} + u_{1,3}) = \mu(\phi_{,13} - \psi_{,11} + \psi_{,33}) \quad (66)$$

$$\sigma_{33} = \lambda(u_{1,1} + u_{3,3}) + 2\mu u_{3,3} = \lambda(\phi_{,11} + \phi_{,33}) + 2\mu(\phi_{,33} - \psi_{,13}). \quad (67)$$

Mit der Randbedingung für freie Oberflächen

$$\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0 \quad \text{bei} \quad x_3 = \pm h, \quad (68)$$

wobei h die halbe Plattendicke ist, kann eine allgemeine Beschreibung für Lamb-Wellen in einer isotropen und homogenen Platte gewonnen werden [SuYe09]:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 qp\mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)}. \quad (69)$$

J.L. Rose stellt dar, dass diese Gleichung unter Einsetzen von (60), (61) und (62) in zwei Teile, einen symmetrischen und einen antisymmetrischen, aufgeteilt werden kann [Rose04]. Dabei wird berücksichtigt, dass die trigonometrische Funktion Tangens durch das Verhältnis von Sinus zu Kosinus definiert ist, welche antisymmetrische, bzw. symmetrische Eigenschaften besitzen: $\sin(-x) = -\sin x$; $\cos(-x) = \cos x$. Gleichung (69) kann also in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Teil aufgebrochen werden, was impliziert, dass die Lamb-Wellen der Platte auch physikalisch symmetrische und antisymmetrische Moden besitzen:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 qp}{(k^2 - p^2)^2} \quad \text{für symmetrische Moden} \quad (70)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{(k^2 - p^2)^2}{4k^2 qp} \quad \text{für antisymmetrische Moden.} \quad (71)$$

Im Folgenden werden die symmetrischen Moden der Lamb-Wellen mit S_i und die antisymmetrischen Moden mit A_i bezeichnet ($i=0, 1, \dots$), wobei S_0 und A_0 jeweils die Moden der niedrigsten Ordnung darstellen. Die Gleichungen (70) und (71) werden als *Rayleigh-Lamb-Gleichungen* bezeichnet. Sie können analytisch nur für einige wenige Fälle gelöst werden.

C.4 Ortung von Schallemissionsereignissen

Die Möglichkeit der Ortung ist wohl einer der größten Vorteile der SEP gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden. Die heutige Rechenleistung erlaubt eine Echtzeitlokalisierung detektierter SE-Ereignisse und somit eine schnelle Identifikation von kritischen Bereichen eines Bauteils. Die Methoden der Ortung von detektierten SE-Ereignissen können sehr einfach bis beliebig komplex ausfallen. Ausschlag gebend für die Auswahl des Ortungsverfahrens ist dabei zum einen, wie genau die Ortung für den jeweiligen Anwendungsfall sein muss. Zum anderen ist auch die Art des Werkstoffs entscheidend: in anisotropen Werkstoffen ist beispielsweise die einfache Messung der Laufzeitdifferenz, welche von einer einheitlichen Schallgeschwindigkeit ausgeht, sehr ungenau. In isotropen Werkstoffen ist die Messung der Laufzeitdifferenzen hingegen das Standardverfahren, welches für viele Anwendungen bei einer guten Sensorsetzung auch hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Vorstellung einiger geläufiger Ortungsverfahren

Die einfachste Lokalisierungsmöglichkeit ist die **zonale Ortung**. Der erstgetroffene Sensor bestimmt den Ortungsbereich. Dieses Verfahren ist so einfach wie ungenau. Auch die **Ausnutzung der Schallschwächung** ist eine Methode zur Lokalisierung. Ist die Schallschwächungscharakteristik der Struktur bekannt, können, ähnlich wie bei der unten beschriebenen Laufzeitdifferenzmessung, eine Differenz der Messgröße an mindestens drei Sensoren ermittelt werden. Anschließend werden für jeden Sensor Hyperbeln so auf die Ebene gelegt, dass alle möglichen Quellen abgedeckt werden. Am Schnittpunkt der Hyperbeln befindet sich die Quelle [MCFG05]. Als Messgröße können beispielsweise die Energie oder die maximale Amplitude dienen. Sowohl die zonale als auch die schallschwächungsbasierte Ortung können auf kontinuierliche und transiente Signale angewendet werden. Die im Folgenden vorgestellten Verfahren hingegen benötigen ein definiertes transientes Signal.

Ein weiteres Verfahren basiert auf der **Identifikation der Lamb-Wellen Moden**. Aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz von S_0 - und A_0 -Wellenmoden kann die Distanz zur Quelle ermittelt werden. Für eine genaue Ortung müssen beide Moden klar erfasst werden. Bei Materialien mit starker Schallschwächung ist die symmetrische S_0 -Mode bei größeren Distanzen jedoch schwer zu detektieren. Positiv an diesem Verfahren ist eine flächendeckende Lokalisierung, auch außerhalb eines gewählten Sensorarrays. Bei Quellen in unmittelbarer Sensornähe ist die Messung jedoch ungenau, da dort die Trennbarkeit der Moden nicht gegeben ist [KüSV07].

Gerade für **Plattenwellen in anisotropen Medien** ist die verbreitete Ortung durch Laufzeitdifferenzmessungen sehr ungenau. Deshalb gibt es mehrere Ansätze, eine Ortung allein aufgrund der eintreffenden Wellenform zu ermöglichen. Dadurch ist unter anderem eine Lokalisierung gleichzeitig aktiver Quellen möglich [KüSV07]. *Yamada et al.* entwickelten hierzu eine Vorgehensweise, bei der eine spezifische Frequenz mit Hilfe einer Wavelet-Transformation aus eintreffenden A_0 -Lamb-Wellen gefiltert wird, woraufhin für diese spezielle Frequenz die Laufzeiten berechnet werden können [YMNT00]. Dieses Verfahren kann in Echtzeit für isotrope Werkstoffe angewendet werden. Für die Berechnung der jeweiligen Schallgeschwindigkeit in anisotropen Körpern ist der Rechenaufwand jedoch so hoch, dass sie im Frequenzbereich der SE gegenwärtig noch nicht in Echtzeit eingesetzt werden kann.

Kurokawa et al. entwickelten daraufhin ein Verfahren zur Echtzeit-Lokalisierung durch kontinuierliche Wavelet-Transformation für Lamb-Wellen, besonders geeignet für anisotrope Platten. Der Algorithmus ermöglicht eine sofortige Extraktion einer spezifischen Frequenzkomponente aus einer detektierten Lamb-Welle und bezieht sie auf die richtungsspezifischen Schallgeschwindigkeiten [KuMM05, KuMM06]. Diese Verfahren sind besonders interessant für die Ortung in faserverstärkten Verbundwerkstoffen. Für Stahlwerkstoffe ist die Laufzeitdifferenzmessung, bei der allein die Ankunftszeiten an den Sensoren gemessen werden, die geläufigste Methode.

Die Laufzeitdifferenzmessung

Die Laufzeitdifferenzmessung hat für isotrope Werkstoffe bei einer überschaubaren Verfahrenskomplexität eine gute Ortungsgenauigkeit. Dieses ist besonders für anwendungsorientierte Messungen entscheidend und ist deshalb das Verfahren, welches in der SEP am häufigsten verwendet wird. Es basiert auf der Bestimmung der Ankunftszeit t_0 . Diese wird bei einem transienten Signal durch das Setzen der Nachweisschwelle ermittelt. Der Zeitpunkt des SE-Ereignisses ist erst einmal unbestimmt. Durch die Ermittlung der Ankunftszeiten der Schallwellen desselben Ereignisses an unterschiedlichen Sensoren kann die Ankunftszeitdifferenz Δt zwischen ihnen errechnet werden. Liegen die Sensoren und die Quelle auf einer Geraden, kann eine **lineare Ortung** vorgenommen werden. Die Position der Quelle X_S auf der Geraden ist dann

$$X_S = \frac{1}{2}(D - \Delta t \cdot c_G), \quad (72)$$

mit

D	Sensorabstand
c_G	konstante Gruppengeschwindigkeit
Δt	Zeitdifferenz.

Eine schematische Darstellung der linearen Ortung ist in *Abb. C-10* dargestellt. Die Zeitdifferenz ist hier die Differenz der Ankunftszeiten vom zweitgetroffenen zum erstgetroffenen Sensor:

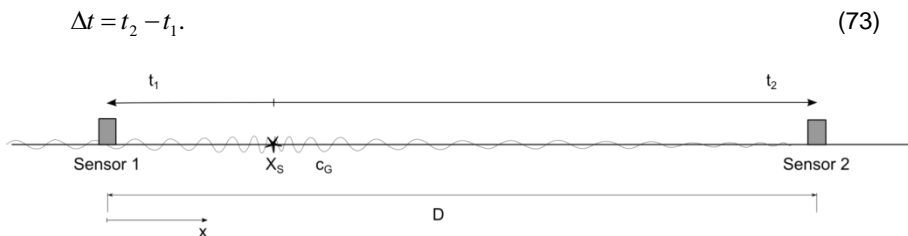


Abb. C-10: Lineare Ortung der Position der Quelle X_S mit zwei Sensoren

Für die meisten Anwendungen reicht eine lineare Ortung jedoch nicht aus. Mit mindestens drei Sensoren findet eine **planare Ortung** in der Ebene statt. Diese Art der Ortung eignet sich für plattenähnliche wie auch zylindrische Strukturen. *Abb. C-11* stellt zwei Sensoren eines möglichen Sensorarrays dar. Vorausgesetzt wird eine konstante Schallgeschwindigkeit in alle Richtungen auf einer unendlich ausgedehnten Platte.

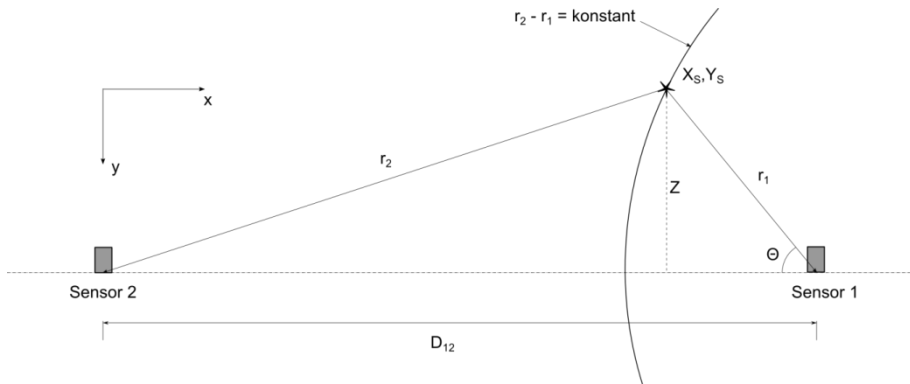


Abb. C-11: Planare Ortung, Darstellung mit zwei Sensoren; die Position der Quelle (X_s, Y_s) muss auf einer Hyperbel liegen, für die gilt: $\Delta r = r_2 - r_1 = \text{konstant}$

Es gilt:

$$\Delta t \cdot c_G = r_2 - r_1. \quad (74)$$

Dabei ist c_G die global geltende Gruppengeschwindigkeit der von der Quelle ausgehenden elastischen Wellen sowie r_1 und r_2 die Abstände der Sensoren zur Quelle. Die Sensorummernummerierung richtet sich nach der Hit-Reihenfolge. Das ist die Reihenfolge, in welcher die Sensoren von Schallwellen desselben Ereignisses getroffen werden. Des Weiteren gehen aus geometrischen Überlegungen hervor (vgl. Abb. C-11):

$$Z = r_1 \sin \Theta, \quad (75)$$

$$Z^2 = r_2^2 - (D_{12} - r_1 \cos \Theta)^2, \quad (76)$$

$$r_1^2 \sin^2 \Theta = r_2^2 - (D_{12} - r_1 \cos \Theta)^2. \quad (77)$$

Wird nun $r_2 = \Delta t \cdot c_G + r_1$ aus (74) in (77) substituiert, ergibt sich die Gleichung für eine Hyperbel, welche die Quellenposition (X_s, Y_s) passiert [BaYi87]:

$$r_1 = \frac{1}{2} \frac{D_{12}^2 - \Delta t^2 c_G^2}{\Delta t \cdot c_G + D_{12} \cos \Theta}. \quad (78)$$

Zwei Sensoren können auf diese Weise also die Position der Quelle auf den Verlauf einer Hyperbel eingrenzen. Wird ein weiterer Sensor der Messung hinzugefügt, können aus zwei weiteren Laufzeitdifferenzen zwei weitere Hyperbeln berechnet werden. Der Schnittpunkt dieser Hyperbeln bildet mathematisch genau den Ort der Quelle ab. Dies ist in Abb. C-12 schematisch dargestellt. Analytisch lässt sich der Quellenort also einfach bestimmen. Die größte Unsicherheit in der Messung liegt in der genauen Erfassung der Ankunftszeiten an den einzelnen Sensoren.

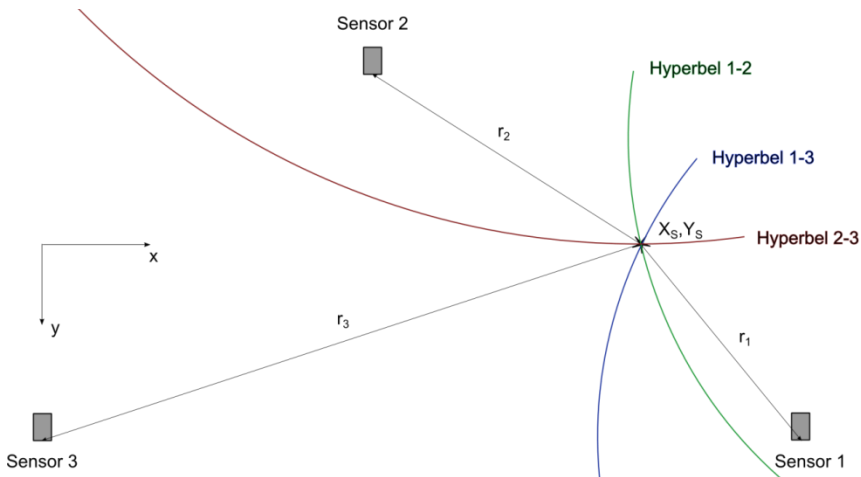


Abb. C-12: Planare Ortung mit drei Sensoren; durch je zwei Differenzen der Sensorabstände wird eine Hyperbel definiert, welche mögliche Positionen der Quelle darstellen. Der Schnittpunkt der Hyperbeln bildet das Ortungsergebnis

Ortungsunsicherheit (LUCY)

Die Ortungsunsicherheit oder LUCY (location uncertainty) ist ein Parameter, welcher eine Aussage über die Qualität eines Ortungsergebnisses gibt [Vall12a]. Sie wird definiert durch:

$$LUCY = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (\Delta r_i - \Delta t_i c_i)} \quad (79)$$

für $n > k_{\min}$, sonst $LUCY = -1$

mit

n Anzahl der an der Ortung beteiligten SE-Kanäle

k_{\min} Mindestanzahl der SE-Kanäle, die für eine Ortung nötig sind (3 bei planarer Ortung)

i Nummer des getroffenen Kanals

Δr_i Abstand des getroffenen Kanals i zur (aus allen Kanälen) errechneten Quellenposition minus den Abstand zur SE Quelle des erstgetroffenen Kanals

$\Delta t_i c_i$ Abstand des getroffenen Kanals i zur (aus Kanal i errechneten) tatsächlichen Quellenposition minus den Abstand zur SE Quelle des erstgetroffenen Kanals.

Je kleiner der LUCY-Wert, desto verlässlicher ist das Ortungsergebnis. Allerdings werden in der Ortungsunsicherheit keine systematischen Fehler erfasst. Es wird stets angenommen, dass durch die Messung der Zeitdifferenz Δt ein physikalischer Wert vorhanden ist, welcher die tatsächliche Quellenposition definiert. In der Messung der Ankunftszeiten selbst liegt jedoch eine große Ungenauigkeit. Dies ist ein Problem der Definition der Nachweisschwelle im Verhältnis zu den vorhandenen Wellenmoden und wird im nachfolgenden Absatz weiter ausgeführt.

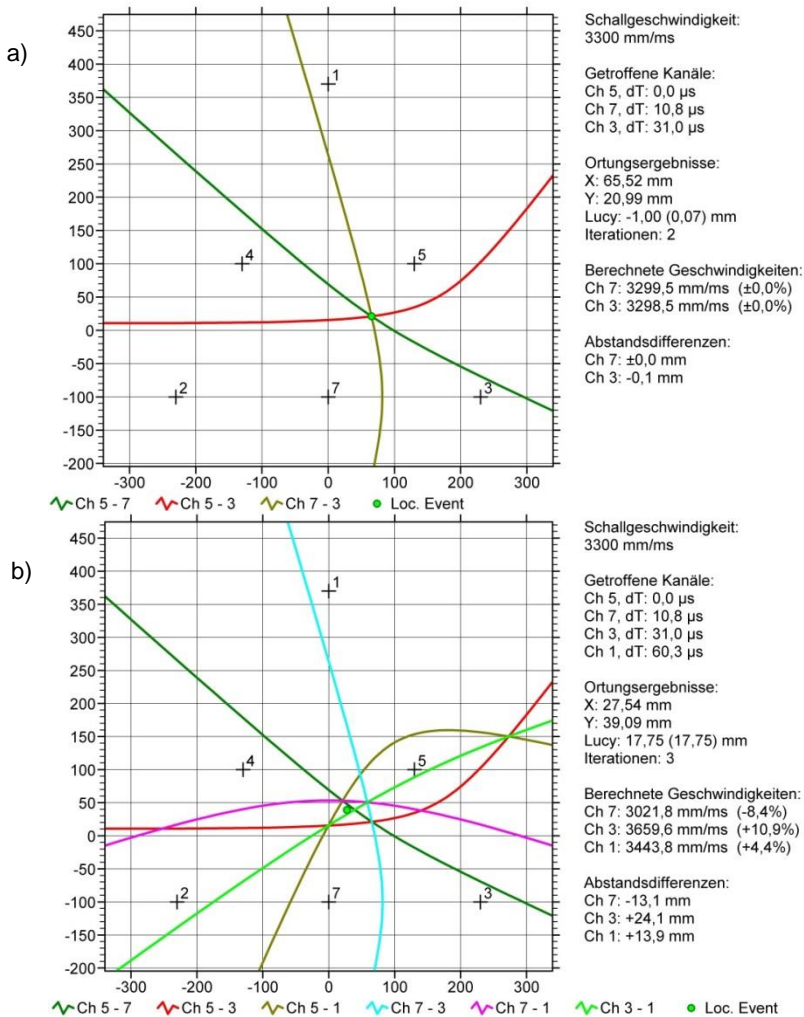


Abb. C-13: Location Analyzer in Visual AE [Vall12a]: Laufzeitdifferenzmessung unter Verwendung von a) drei und b) vier Sensoren

Als Beispiel zur Anwendung der Ortungsunsicherheit sind in Abb. C-13 zwei Bilder zu sehen, welche mit Hilfe des Location Analyzers in der Software VisualAE [Vall12a] erstellt wurden. Es wurde eine Ortungsmessung durchgeführt, bei welcher sechs Kanäle aktiv waren. Die Ergebnisse der Messung sind in der Liste auf der rechten Seite von Abb. C-13 zu sehen. Es wurde mit einer Schallgeschwindigkeit von 3.300 m/s, der Gruppengeschwindigkeit für die A_0 -Lamb-Wellenmode, kalkuliert. Die Ankunftszeiten an den getroffenen Kanälen sind angegeben sowie die Ortungsergebnisse und die Geschwindigkeiten, die die Schallwelle bei den gemessenen Ankunftszeiten und dem errechneten Quellenort haben müsste. In einer ersten Analyse wird allein das Sensorarray aus den Kanälen 3, 5 und 7 betrachtet (Abb. C-13a). Die Abbildung zeigt drei Hyperbeln, welche aus den Zeitdifferenzen der Ankunftszeiten der drei Kanäle ermittelt wurden. Der Schnittpunkt der Hyperbeln markiert die errechnete Quellenposition. Weil nur die Mindestanzahl an Kanälen für die

planare Ortung vorhanden ist, kann die Ortungsunsicherheit LUCY nicht angegeben werden und wird per Definition auf -1 gesetzt. In *Abb. C-13b* sind vier Kanäle aktiviert. Sechs Hyperbeln können zwischen den aktivierten Sensoren gezogen werden. Die errechnete Position des SE-Ereignisses verschiebt sich um 38 mm in x- und 18 mm in y-Richtung. Außerdem kann ein Wert für die Ortungsunsicherheit angegeben werden. Die errechnete Quellenposition markiert die Abstände r_i zwischen Sensoren und Quelle, welche in Gleichung (79) für die Berechnung von Δr_i verwendet werden. Die „berechneten Geschwindigkeiten“ hingegen beziehen sich auf die jeweils gemessenen Zeitdifferenzen Δt_i . Hieraus ergibt sich der Widerspruch in der angegebenen und der berechneten Geschwindigkeit, was auch in *Abb. C-13b* zu sehen ist: es gibt keine Überschneidung der Hyperbeln und somit einen positiven LUCY-Wert. Dies kann bedeuten, dass ein Hit durch eine Wellenmode getriggert wurde, die schneller war als die angegebene oder die Welle den Sensor durch einen kürzeren Weg erreicht hat, z.B. durch Flüssigkeit in der Struktur. Durch den LUCY-Wert lässt sich sagen, wie groß das Ungleichgewicht zwischen angenommenem und errechnetem Werten ist.

Ein Beispiel in *Abb. C-14* zeigt einige Vor- aber auch Nachteile der LUCY-Filterung. Ohne LUCY-Filterung (schwarze Balken) werden in allen Messbereichen SE-Ereignisse erfasst. Allerdings liegen alle Ereignisraten aus Rissquellen hinter denjenigen des Hintergrundgeräuschs. Durch eine LUCY-Filterung verringert sich die durchschnittliche Ereignisrate des Hintergrundgeräuschs, so dass zumindest in einem Fall die Ereignisrate der Rissquelle höher ist. Jedoch findet in 3 von 6 Fällen keine Rissdetektion mehr statt.

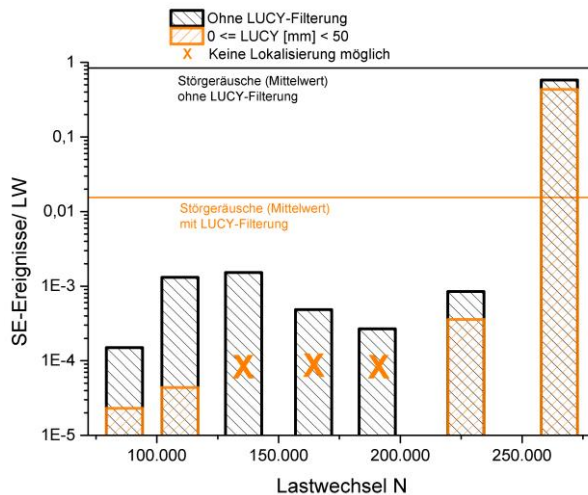


Abb. C-14: SE-Ereignisse pro Lastwechsel an Platte 3. Beispiel für eine Messauswertung mit und ohne LUCY-Filterung

Verbesserung der Ortungsgenauigkeit bei der Laufzeitdifferenzmessung durch Bandbreitenanpassung

Ein großes Problem bei der Lokalisierung von SE-Ereignissen besteht darin, dass, abhängig von der Nachweisschwelle einer SEP, der Signalamplitude und dem Laufweg der Schallwelle, unterschiedliche Wellenmoden die Nachweisschwelle zuerst überschreiten

können und damit die Ankunftszeit des Ereignisses bestimmen. Dies ist in *Abb. C-15* dargestellt: Da jede Mode ihre eigene frequenzabhängige Schallgeschwindigkeit besitzt und bei der einfachen Laufzeitdifferenzmessung nicht für jedes transiente Signal individuell geprüft wird, welche Schallgeschwindigkeit zu der jeweiligen Ankunftszeit gehört, kann so das Ortungsergebnis erheblich verfälscht werden.

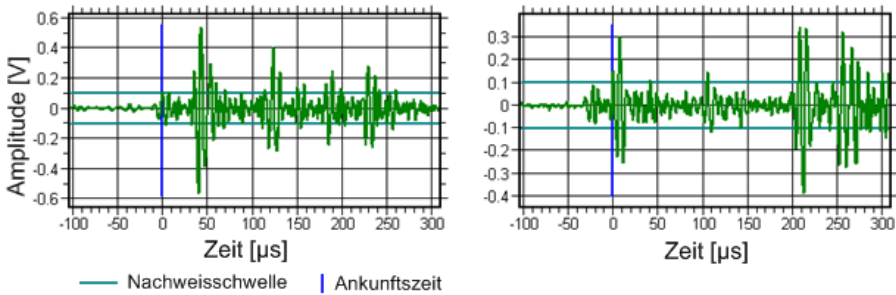


Abb. C-15: SE-Signal, welches durch zwei Sensoren mit verschiedenen Abständen zur Quelle detektiert wurde. Links: Sensor triggert auf die schnellere S_0 -Wellenmode. Rechts: Sensor triggert auf die langsamere A_0 -Wellenmode

Deshalb ist die Schallgeschwindigkeit in bestimmten Frequenzbändern betrachtet worden; die Ergebnisse sind in *Abb. C-16* dargestellt. Gemessen wird die jeweils schnellste Wellenmode. Die Geschwindigkeit nimmt bis zu Frequenzen von 250 bis 270 kHz ab, um danach wieder anzusteigen. Ein Vergleich mit dem Dispersionsdiagramm in *Abb. 3-22* zeigt, dass es sich bei der Messung bis 250 kHz um die S_0 -Mode handelt; bei den folgenden Frequenzen und steigenden Geschwindigkeiten wird die S_1 -Mode gemessen. Im Frequenzbereich von 240 bis 280 kHz befinden wir uns in einem speziellen Bereich des Dispersionsdiagramms, einem Tripelpunkt, in welchem die Wellenanteile der S_0 -, der A_1 - und der S_1 -Mode mit derselben Gruppengeschwindigkeit transportiert werden.

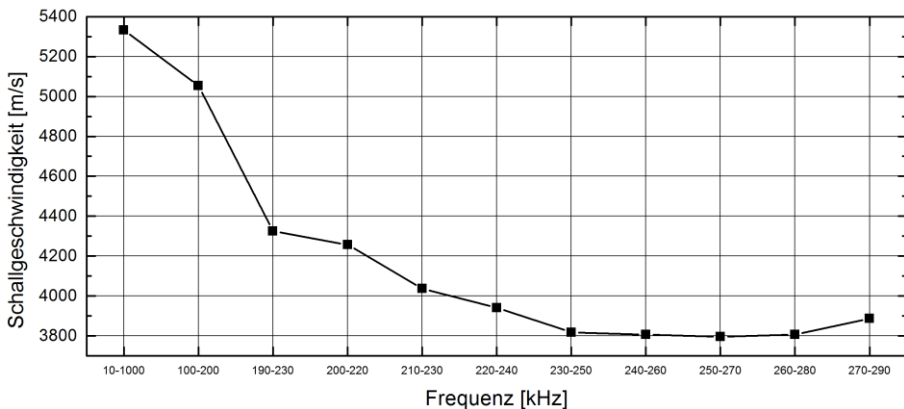


Abb. C-16: Experimentell ermittelte Gruppengeschwindigkeiten innerhalb spezifischer Frequenzbänder an einer 10,2 mm dicken Stahlplatte

Nun wird eine Frequenzfilterung der aufgezeichneten Signale mit einer Bandbreite von 240 bis 280 kHz durchgeführt. Es gilt für alle detektierten Signale die gleiche Schallgeschwindigkeit von ca. 3.800 m/s. Diese Schallgeschwindigkeit soll nun im Ortungsalgorithmus

verwendet und die Auswirkungen auf die Ortungsgenauigkeit im Vergleich zu ungefilterten Signalen dargestellt werden.

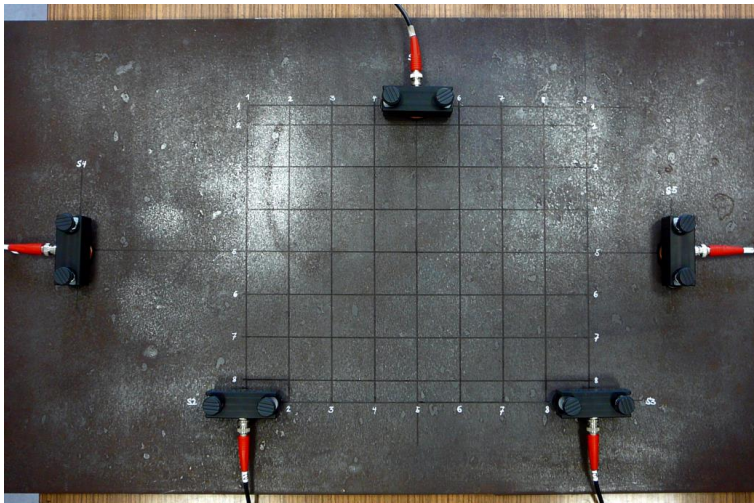


Abb. C-17: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Ortungsgenauigkeit

Auf einem Raster, wie es in Abb. C-17 zu sehen ist, wurden an jedem Kreuzungspunkt jeweils vier Bleistiftminenbruchtests (BMT) durchgeführt. Um eine Richtungsabhängigkeit der Quelle zu berücksichtigen, wurde der BMT jeweils in vier Richtungen durchgeführt (0° , 90° , 180° und 270°). Verwendet wurde eine Bleistiftmine mit einem $0,3\text{ mm}$ Durchmesser und der Härte 2H. Fünf SE-Sensoren des Typs VS150-RiC wurden für die Signalaufzeichnung verwendet.

Tab. C-5: Messung der Ortungsgenauigkeit durch Nutzung unterschiedlicher Ortungssysteme

Ortungssystematik	Frequenzspektrum [kHz]	Nachweis-schwelle [dB_{AE}]	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Ortungsabweichung vom Sollwert [mm]			Ortungsunsicherheit [mm]
				x	y	\varnothing	
A_0 -Mode	10 – 2.000	74	3.300	15,0	6,4	10,6	5,2
S_0 -Mode	10 – 2.000	40	5.240	11,5	5,7	8,6	4,7
Bandpass	240 – 280	26	3.800	5,6	1,9	3,7	2,7

Die Datenanalyse erfolgte durch eine Anwendung unterschiedlicher Ortungssystematiken. Diese basieren auf der Annahme, dass eine bestimmte Wellenmode den Trigger auslöst. Dazu wurde die Nachweis-schwelle angepasst und die dazugehörige, effektive Schallgeschwindigkeit eingestellt, wie sie in (24) ermittelt wurden. Soll die A_0 -Mode den Trigger auslösen, muss die Nachweis-schwelle beispielsweise hoch sein, damit die schnellere S_0 -Mode passieren kann. Erfolgt eine Frequenzfilterung mit einem Bandpass von 240-280 kHz bleiben nur Signalanteile mit wesentlich geringeren Amplituden übrig (vgl. Abb. 3-26). Um auch hier noch den Anfang des Signals gut erfassen zu können, wird die Nachweis-schwelle auf 26 dB_{AE} herabgesetzt. Tab. C-5 enthält sowohl die Daten der angewendeten Ortungssystematik als auch zusammengefasste Ergebnisse der Studie.

Abb. C-18 zeigt den Vergleich zwischen einem Ortungsgraph nach S_0 -Moden-Erfassung und der Bandpassfilterung. Zu sehen sind die vier Ereignisse pro Rasterpunkt, die je nach Ort und Ortungssystematik mehr oder weniger von den Anregungspunkten abweichen. Ihnen wurde außerdem ein Wert für die Ortungsungenauigkeit (LUCY, s. S. 179) zugeordnet, der durch eine Farbskala dargestellt wird. Die Ortungsungenauigkeit ist eine Größe, die angibt, wie genau der errechnete Ereignisort mit den gemessenen Ankunftszeiten übereinstimmt. Grüne Ortungspunkte besitzen eine kleine Ortungsunsicherheit, während diese bei den roten Punkten am größten ist. Wie zu erwarten war, ist die Ortung in der Plattenmitte am genauesten und nimmt in den Außenbereichen stark ab. Dies liegt hauptsächlich an dem verwendeten Ortungsalgorithmus. Bei dem hyperbolischen Ortungsverfahren liegt der Quellenort im Schnittpunkt von Hyperbeln, deren Lage durch die Sensoranordnung und die Laufzeitdifferenzen bestimmt werden. Erfolgt, wie in diesem Versuch, die Sensoranordnung als Eckpunkte eines gleichseitigen Dreiecks, gibt es eine hervorragende gleichmäßige Überdeckung der Dreiecksfläche. Die Überdeckung im Rückraum ist dagegen schlecht [KüSV07]. Insgesamt entsteht der Eindruck, dass die Ortungsergebnisse nach der Bandpassfilterung besser den Rasterpunkten zugeordnet werden können, als dies nach der Ortung auf Basis der S_0 -Mode-Erfassung der Fall ist.

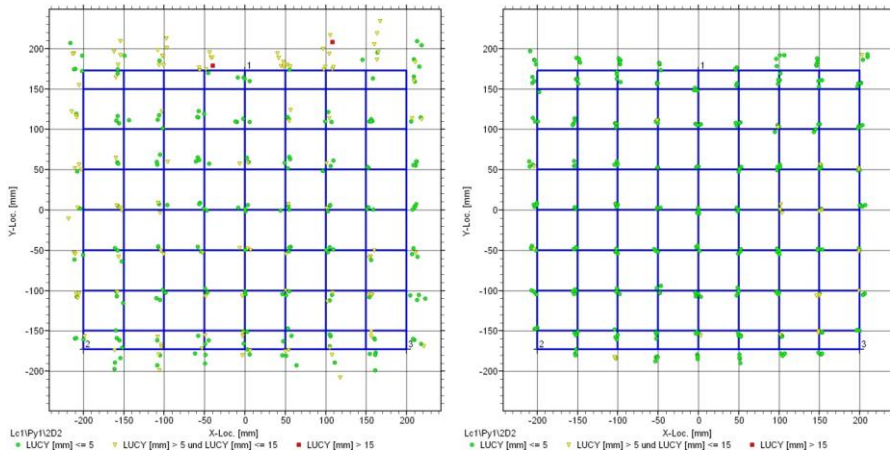


Abb. C-18: SE-Ortungsgrafiken. Links: Breitbandige Ortung auf die symmetrische Lambwelle (S_0). Rechts: Ortung im Frequenzband 240-280 kHz

An jedem Gitterpunkt wurde der Mittelwert des Ortungsergebnisses der vier Messpunkte gebildet und daraus eine Abweichung zu dem tatsächlichen Ort des Ereignisses errechnet. Die Größe der Abweichungen sind in Abb. C-19 zu sehen. Hier wird noch einmal deutlich, dass alle Ortungssysteme, auf dem hyperbolischen Ortungsalgorithmus beruhend, mit großen Ortungsabweichungen an den Randgebieten reagieren. Die durchschnittlichen Abweichungen über das gesamte Raster in x- und y-Richtung sowie die durchschnittliche Ortungsunsicherheit sind in Tab. C-5 und in Abb. C-20 zusammengefasst. Es wird dargestellt, dass mithilfe der Bandpassfilterung sowohl die durchschnittliche Abweichung als auch die Ortungsunsicherheit deutlich verringert werden kann. Am unsichersten ist die Ortung auf Basis der A_0 -Moden-Erfassung. Hier wurden eine durchschnittliche Abweichung von 10,6 mm und eine Ortungsunsicherheit von 5,2 mm ermittelt.

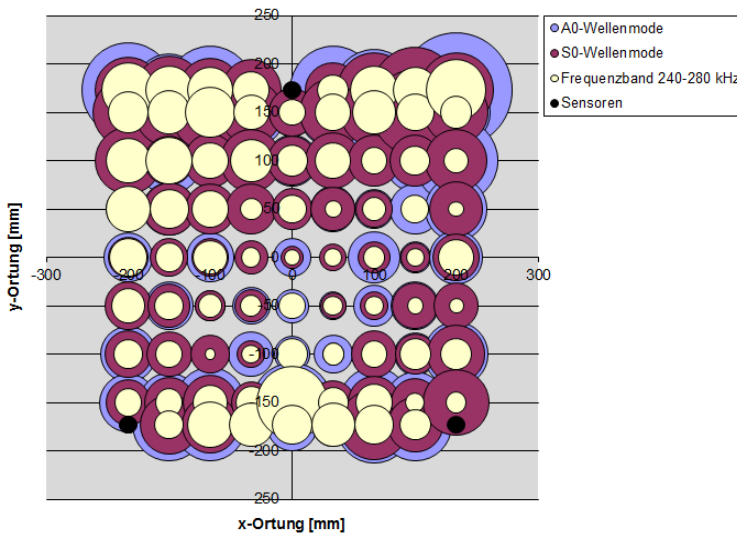


Abb. C-19: Durchschnittliche Abweichung von der Sollposition in Abhängigkeit von Anregungsort und Ortungssystematik

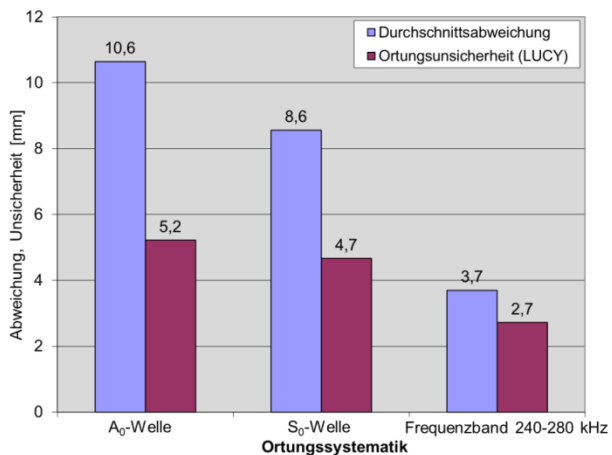


Abb. C-20: Diagramm zur Veranschaulichung der Ortungsabweichungen und -unsicherheiten abhängig von der Ortungssystematik

Das Experiment fand in einem, für industrielle Anwendungen, sehr kleinen Maßstab statt. Die Abweichungen und Unsicherheiten werden mit größeren Sensorabständen zunehmen, so dass gerade dann eine neue Methodik für die Ortung gefordert würde. Bei der Nutzung der Bandpass-Methode muss beachtet werden, dass die Schallschwächung gerade bei großen Sensorabständen negative Auswirkungen auf die Nachweisbarkeit von SE-Quellen besitzt. Um diese Methode anwenden zu können, müssen die zu erwartenden Nutzsignale möglichst hohe Anteile im Frequenzbereich des Bandpassfilters besitzen. Die Empfindlichkeit der Messung wird durch die Filterung verringert. Es muss also immer auch die Nachweisschwelle angepasst werden. Schwache Signale können so gänzlich verschwinden.

Diese Methode eignet sich also weniger für eine Echtzeituntersuchung, als für einen Vergleich zu einer bereits durchgeführten Ortung, um diese zu verfeinern. Ferner ist sie sowohl material- als auch geometrieabhängig.

C.5 Die Gabor-Transformation zur Erstellung von Wavelet-Diagrammen

Zur Erstellung von Wavelet-Diagrammen wird in dieser Arbeit die Gabor-Transformation verwendet (*D. Gábor*, 1900-1979). Sie stellt einen Spezialfall der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) dar und ist eng mit der Wavelet-Transformation verwandt, basiert jedoch auf einer Gaußschen Fensterfunktion [FeSt98]. Die STFT einer Funktion $f(t)$ ist definiert als

$$F_{STFT}(\omega, \tau) = \int f(t) \cdot g(t - \tau) \cdot e^{i\omega t} dt. \quad (80)$$

Mit einer Gaußschen Fensterfunktion

$$g(t - \tau) = \frac{e^{-(t-\tau)^2}}{\sigma^2} \quad (81)$$

wird daraus eine Gabor-Transformation. Dabei ist σ konstant, ω die Kreisfrequenz und τ zeitliches Zentrum der Fensterfunktion $g(t)$. Die allgemeine Definition einer Wavelet-Funktion lautet

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (82)$$

a und b sind dabei Parameter, welche für die Skalierung, bzw. die Verschiebung verantwortlich sind, ψ ist die Funktion der sog. Mutter-Wavelet [SKHT96]. Als Magnitudenangabe eines Wavelet-Diagrammes dient der Wavelet-Koeffizient K_{WT} . Dieser ist definiert als

$$K_{WT}(a, b) = \sum_{i=0}^{N_A} f_i \Delta t \cdot \psi_{a,b}(t). \quad (83)$$

H. Suzuki et al. ermittelten eine für SE-Signale passende Konfiguration für die Gabor-Transformation mit der Mutter-Wavelet-Funktion $\psi(t)$ und ihrer Fourier-Transformation $\hat{\psi}(\omega)$ [SKHT96]:

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} e^{\left[-\frac{t^2 \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2}{2} + i\omega_p t \right]} \quad (84)$$

$$\hat{\psi}(\omega) = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \pi^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} e^{\left[-\frac{t^2 \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^2}{2} (\omega - \omega_p)^2 \right]} \quad (85)$$

ω_p ist hier die Mittenfrequenz und γ eine Konstante, welche, um die sogenannte Zulässigkeitsbedingung zu erfüllen, hier als $\gamma = \pi(2/\ln 2)^{1/2} = 5,336$ gewählt wurde.

C.6 Bewertung von Merkmalen bei der Mustererkennung

Es gibt neben der Darstellung im Merkmalsraum einige Werkzeuge, mithilfe derer die Merkmale auf ihre Fähigkeit zur Klassentrennung hin bewertet werden können. Zu diesen gehören die Häufigkeitsverteilung der Merkmale, die Betrachtung des Fisher-Ratio, des Abstands-Verhältnisses und das „Class Couple Ranking“. Das Fisher-Ratio $R_{Fischer}$ ist der durchschnittliche Abstand zwischen den Klassen bezogen auf die durchschnittliche Klassenausdehnung [Timm01, Vall12c]:

$$R_{Fischer} = \frac{r_{ij}}{r_{ic}} \quad (86)$$

mit

r_{ij} Durchschnittlicher Abstand zwischen den Klassen (Klassenmittelpunkten)
 r_{ic} Durchschnittliche Ausdehnung der Klasse, Kovarianz.

Je höher das Fisher-Ratio eines Merkmals im Vergleich zu anderen Merkmalen desselben Klassifikators, desto besser eignet es sich für die Klassentrennung. Wie gut einzelne Punkte im Merkmalsraum in die ihnen zugordnete Klasse passen, lässt sich durch das Abstands-Verhältnis R_{dis} ausdrücken:

$$R_{dis} = \frac{r_{iP}}{r_{iMax}} \quad (87)$$

mit

r_{iP} Abstand eines beliebigen Punktes P_i einer Klasse ω_i zu deren Klassenmittelpunkt
 r_{iMax} Abstand vom Klassenmittelpunkt einer Klasse ω_i zu dem Punkt, welcher am weitesten vom Klassenmittelpunkt entfernt liegt.

Die verwendeten Abstände sind in *Abb. C-21* im zweidimensionalen Merkmalsraum dargestellt. Das Abstands-Verhältnis ist ein Indikator dafür, inwiefern ein Signal im Vergleich zu anderen Signalen dieser Klasse zu seiner Klasse passt. Der Wert 1 bedeutet die schlechteste mögliche Zuordnung in der jeweiligen Klasse. Die Verteilung des Abstands-Verhältnisses spiegelt die Verteilung der Merkmale der Muster wider [Timm01].

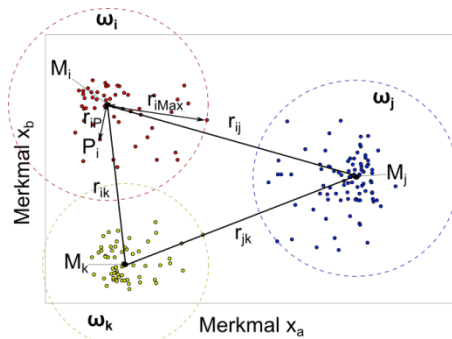


Abb. C-21: Zweidimensionaler Merkmalsraum mit $\mathbf{x} = (x_a, x_b)^T$, den Klassen ω_i und den Klassenmittelpunkten M_i . r_{iP} ist der Abstand eines beliebigen Punktes P_i einer Klasse ω_i zu deren Klassenmittelpunkt; r_{iMax} ist der Abstand vom Klassenmittelpunkt einer Klasse ω_i zu dem Punkt, welcher am weitesten vom Klassenmittelpunkt entfernt liegt; r_{ij} der Abstand der Mittelpunkte von Klasse ω_i und ω_j

Das in *VisualClass* verfügbare *Class Couple Ranking*, bei welchem in einer Matrixdarstellung jeweils die Trennbarkeit zweier Klassen auf Basis des Fisher-Ratios verglichen wird, ist in *Abb. C-22* dargestellt. Die Einteilung der Trennbarkeit der Klassen erfolgt anhand der Abstände r_{ij} der Klassenschwerpunkte im Merkmalsraum. Klassen, welche weit voneinander entfernt sind und somit am leichtesten zu trennen sind, werden gelb markiert. Sind die Klassenschwerpunkte nahe beieinander, ist die Einteilung der Signale in ihre Klasse oft nicht eindeutig; diese Klassenpaare werden dunkelblau markiert. Anhand der vorgestellten Methoden können Merkmale ausgewählt und bewertet werden.

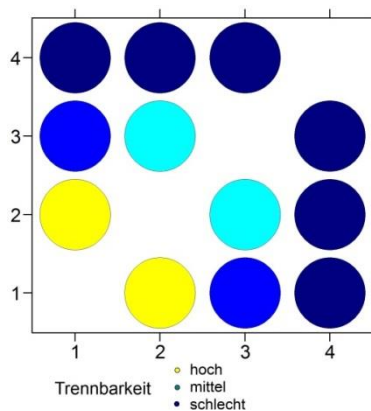


Abb. C-22: Darstellung der Trennbarkeit der Klassen anhand ausgewählter Merkmale; die Darstellungsmatrix ist stets symmetrisch. In diesem Beispiel werden einander 4 Klassen gegenüber gestellt, von denen sich ein Paar (Klasse 1 und Klasse 2) mit hoher Wahrscheinlichkeit voneinander unterscheiden lässt

D Messdaten und Analyse

D.1 Versuche an Probekörpern

Im 4-Punkt-Biegeversuch wurden Ermüdungsversuche an Proben durchgeführt. Der Versuchsaufbau sowie ein Ermüdungsriss nach dem Versuch sind in *Abb. D-1* dargestellt. Die Versuche dienen der Ermittlung der bruchmechanischen Materialeigenschaften für die späteren Plattenversuche und einer ersten Abschätzung von minimal nachweisbaren Risszuständen.

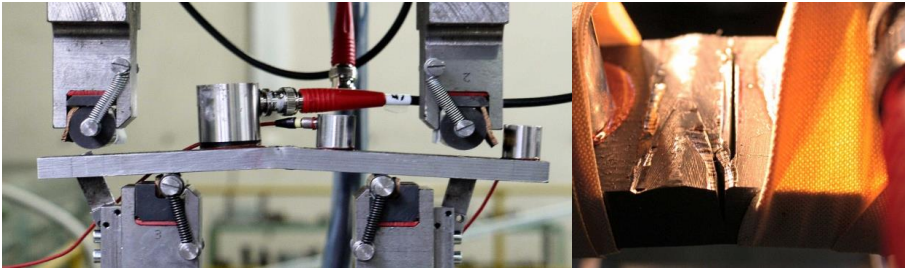


Abb. D-1: 4-Punkt-Biegeaufbau mit Materialien zur Verminderung der Reibung in den Widerlagern sowie zur Schallisolierung gegen Maschinengeräusche mit drei SE-Sensoren (links); Ermüdungsriss zu Versuchsabschluss (rechts)

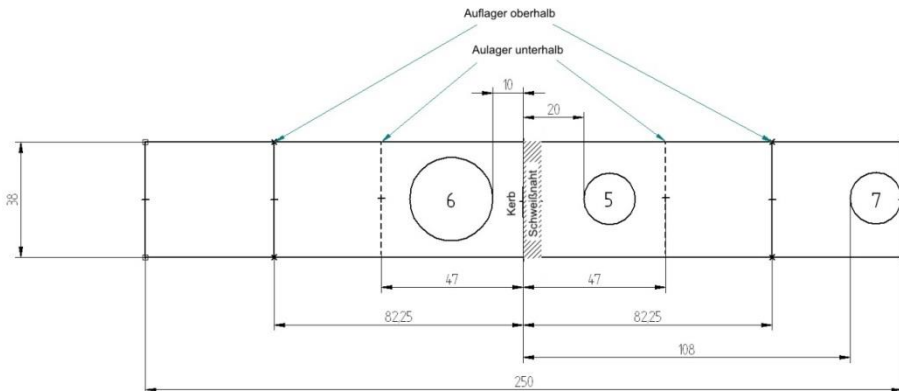


Abb. D-2: Sensor- und Auflagerpositionen bei den Probeversuchen; Sensortypen für Kanal 6: VS150-RIC und für die Kanäle 5 und 7 aufgrund des geringen Raumes an den kleinen Proben: PAC-R15 (150 kHz-Resonanzsensor der Firma PAC, ohne integriertem Vorverstärker)

Die Versuche wurden an einer 100 kN Resonanzprüfmaschine der Firma Schenck durchgeführt. Resonanzprüfmaschinen schwingen in ihrer Resonanzfrequenz, welche durch aufgelegte Gewichte und die Elastizität der Probe beeinflusst wird. Anhand der automatischen Verringerung der Resonanzfrequenz der Prüfmaschine durch veränderte Schwingbedingungen lässt sich auch das Risswachstum in der Probe verfolgen. Die Schallemission wurde über drei 150 kHz-Resonanzsensoren aufgenommen. Sensor- und Auflagerpositionen auf einer Probe ist in *Abb. D-2* schematisch dargestellt. Die Nachweischwelle wurde aufgrund hoher Störgeräusche durch die Prüfmaschine auf 60 dB_{AE} gesetzt.

Bei den Versuchen an Probekörpern wurden die Lasten F und das Lastverhältnis R variiert; bei allen Probeversuchen galt jedoch: $0,4 < R < 0,6$. Bei den Ermüdungsversuchen der Platten wurde stets ein Lastverhältnis von $R = 0,5$ eingestellt. Bei einem Lastverhältnis von $R = 0,4$, einer Schwingbreite der Spannung von $\Delta\sigma = 540 \text{ N/mm}^2$ ($\Delta F = 14 \text{ kN}$) wurde bei einem zyklischen Spannungsintensitätsfaktor $\Delta K = 980 \text{ N/mm}^{3/2}$ eine Schwingzahl von ca. 120.000 Lastwechseln benötigt, um einen Ermüdungsriss zu generieren. Kritisches Risswachstum wurde nach etwa 300.000 Lastwechseln erreicht. In einem Bereich von 180.000 Schwingspielen fand demnach stabiles Risswachstum statt. Da für die Auslegung SE-Messung an Versuchsplatten eine lange Phase stabilen Risswachstum erwünscht war (realitätsnahe Simulation des Ermüdungsrisswachstums in Bauteilen), wurde der Spannungsintensitätsfaktor für die Auslegung der Plattenversuche übernommen. Das Schwingverhalten einiger Proben ist in *Abb. D-3* dargestellt.

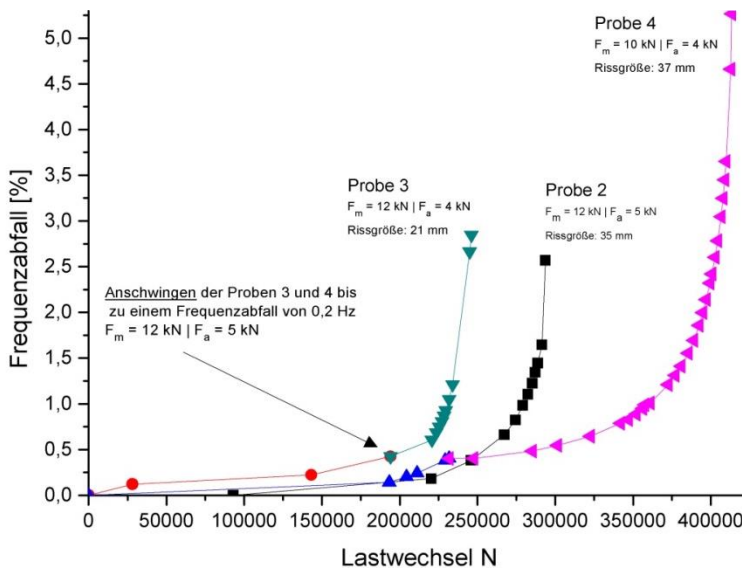


Abb. D-3: Schwingverhalten der Proben aus Platte 1 in der Resonanzprüfmaschine. Dargestellt ist der Abfall der Resonanzfrequenz der Prüfmaschine über der Lastwechselzahl mit Variationen in der Mittellast F_m und der Schwingamplitude F_a

Abb. D-4 zeigt das typische SE-Verhalten während eines Probenversuches. Es sind die im Kerbereich lokalisierten SE-Ereignisse als Hits mit ihrer Amplitude als Funktion der Zeit zu sehen. Die Risswachstumskurve wurde aus dem Frequenzabfall der Resonanzprüfmaschine ermittelt. Deutlich zu sehen ist, dass eine hohe Hitrate erst bei kritischem Risswachstum auftritt. Die aufgenommenen Amplituden können aufgrund des geringen Quelle-Sensor-Abstandes als Amplituden der Quelle angesehen werden, später auch distanzkorrigierte Amplitude genannt. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Amplituden von stabilem, unterkritischem Risswachstum eher unter 60 dB_{AE} anzusiedeln sind [Roge01, WuSW08]. Auch in diesem Versuch werden bei einer Nachweisschwelle von 60 dB_{AE} keine SE-Signale im Bereich des stabilen Risswachstums detektiert. Bei den späteren Plattenversuchen kann durch die oben beschriebene, gezielte Minimierung der Hintergrundgeräusche die Nachweisschwelle herabgesetzt werden.

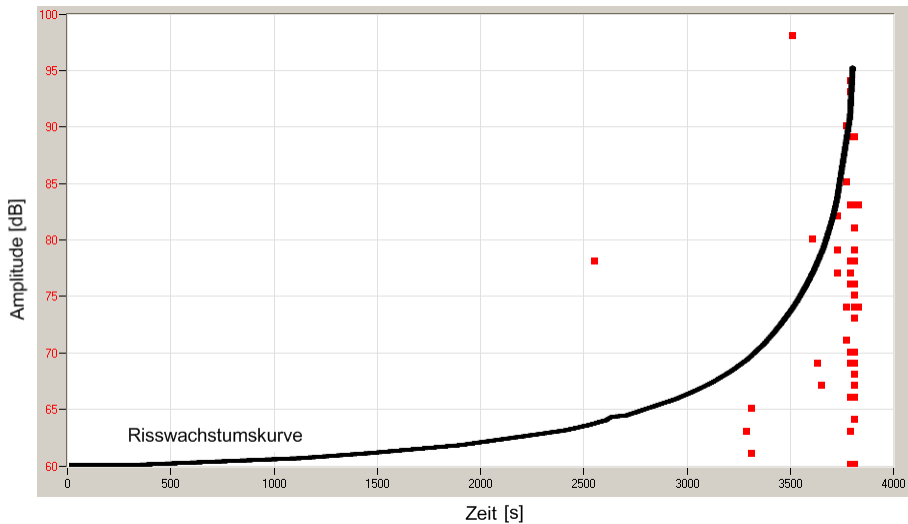


Abb. D-4: SE-Diagramm (Platte 1, Probe 4): Amplituden der SE-Signale (rot) von Ereignissen im Kerbbereich sowie die zugehörige Risswachstumskurve

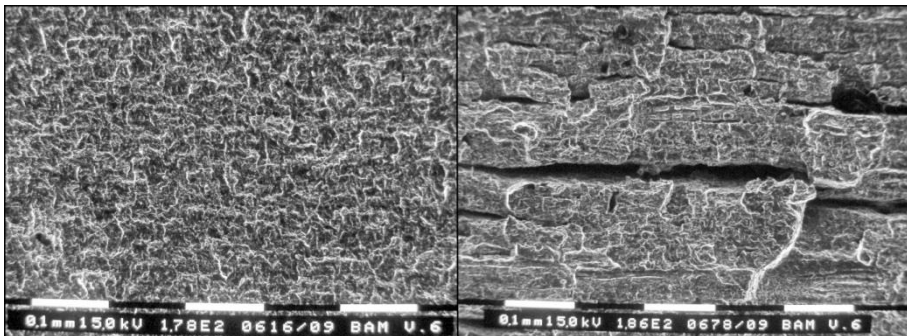


Abb. D-5: REM-Aufnahme einer Probenbruchfläche nach stabilem (links) und kritischem Ermüdungsrissswachstum (rechts)

REM-Aufnahmen der Bruchfläche zeigen die Schallemissionsquellen für das kritische Ermüdungsrissswachstum. Der Vergleich zum stabilen Ermüdungsrissswachstum (Abb. D-5 links) zeigt, dass sich beim kritischen Wachstum (Abb. D-5 rechts) Mikrorisse senkrecht zur Bruchfläche bilden, die als SE-Quelle bei jedem Lastwechsel aktiviert werden können. Eine ausführliche Analyse der Bruchflächen befindet sich in Anhang D.2.

D.2 Analyse der Bruchflächen

Nach Abschluss der Ermüdungsversuche wurden die Risse geöffnet und die Bruchflächen mithilfe von Lichtmikroskopie (LM) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Ferner wurden Schliffbilder der Rissufer erstellt und auch von diesen mikroskopische Aufnahmen erzeugt. Bei den folgenden Betrachtungen liegt der Fokus auf der Charakterisierung der Schadensmechanismen und Schallemissionsquellen an den Bruchflächen. Ferner können genaue Abmaße der Bruchflächen für die bruchmechanische Auswertung ermittelt werden; durch eine Kraftüberhöhung an der Risspitze, welche in den statischen Prüfungen stattfand, entstanden Haltelinien auf der Bruchfläche. So kann jeder Versuchsschritt nachvollzogen und den jeweiligen Bruchflächen zugeordnet werden. Dies ist allerdings nur bei nicht korrodierten Rissen möglich, da durch die Korrosion auf der Bruchfläche die Haltelinien oft nicht zu erkennen sind.

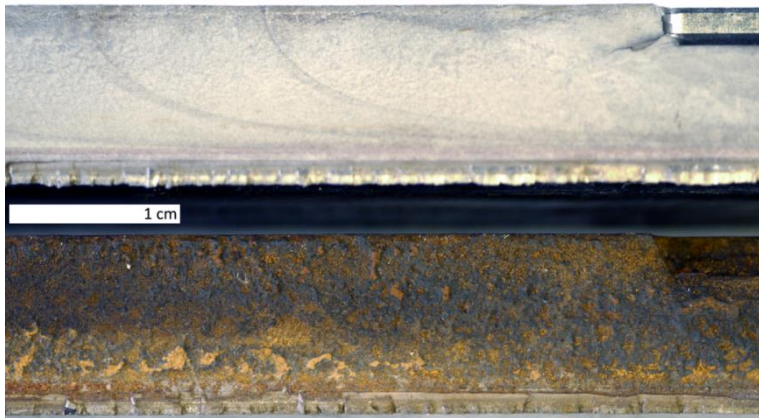


Abb. D-6: Bruchflächen aus Platte 5; Oben: Riss K1 ohne Korrosionseinfluss und unten: korrodiertes Riss K2

Die Bruchflächengrößen der korrodierten Proben wurden anhand von Wachstumskurven aus den Rissen ohne Korrosionseinfluss gewonnen. In Abb. D-6 ist eine Aufnahme einer nicht korrodierten und einer korrodierten Bruchfläche zu sehen, welche aus derselben Platte stammen, also gleiche äußere Belastungen erlebt haben. Auf der nicht korrodierten Bruchfläche oben sind deutlich die Haltelinien und somit die verschiedenen Versuchsstadien zu erkennen.

Topologie der Proben nach stabilem und kritischem Ermüdungsrisswachstum

Die Ermüdungsversuche an den Proben fanden in zwei Phasen statt: Einer Einschwingphase, bis erstes Risswachstum detektiert werden konnte und einer Ermüdungsphase mit etwas geringeren Kräften, die über stabiles Risswachstum bis zum kritischen Ermüdungsrisswachstum führte. Zu einem solchen Bruchverlauf nach der Risswachstumskurve, wie er in Abb. D-4 beschrieben wird, kommt es bei den Plattenversuchen nicht. Hier wird ein durchgehend stabiles Risswachstum angestrebt, wie es in der Praxis oft der Fall ist.

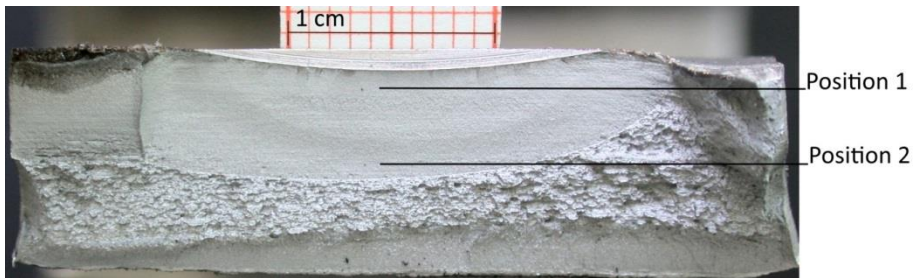


Abb. D-7: Bruchfläche der Probe 1-3 mit Kennzeichnung der Positionen für die REM-Aufnahmen. Phasen von oben nach unten: Starterkerb, Ermüdungsriss in der Einschwingphase (Position 1), Ermüdungsrisswachstum bei geringerer Kraft (Position 2), instabiles Risswachstum und Restbruch

In Abb. D-7 ist die Bruchfläche der Probe 1-3 zu sehen. Durch eine leichte Schattierung lassen sich Einschwingphase und eine zweite Ermüdungsphase unterscheiden. In der Einschwingphase findet die Rissinitiiierung und stabiles, elliptisches Risswachstum in Dickenrichtung statt. In der zweiten Ermüdungsphase erfolgt eine stabile Rissausbreitung in Dicken- und Längsrichtung. Die betrachteten REM-Aufnahmen befinden sich an Position 1 in der Einschwingphase und Position 2 im Endbereich der zweiten Ermüdungsphase.

An Position 1 findet stabiles Ermüdungsrisswachstum statt. Es entspricht dem Bereich II der Risswachstumskurve mit kleinen ΔK -Werten und geringer Rissfortschrittsgeschwindigkeit. REM-Aufnahmen aus diesem Bereich sind in Abb. D-8 zu sehen. Das Gefüge normal zur Bruchfläche ist intakt, die Materialtrennung erfolgte nach geringen plastischen Verformungen. Diese Bruchereignisse sind sehr schwache Schallemissionsquellen.

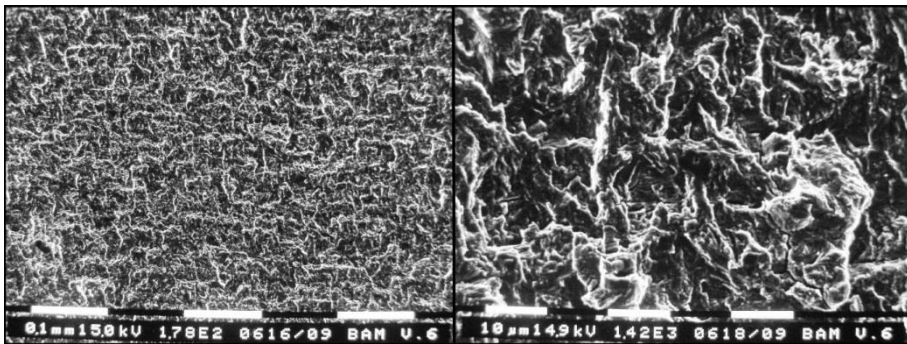


Abb. D-8: Ermüdungsriss in Wachstumsphase II – stabiles Risswachstum (Position 1) in unterschiedlicher Auflösung

Abb. D-9 ist eine Aufnahme aus dem Bereich der Bruchfläche, als Bedingungen entsprechend dem Bereich III der Risswachstumskurve mit hohen ΔK -Werten und hoher Rissfortschrittsgeschwindigkeit vorlagen. Im unteren Bereich der REM-Aufnahme ist bereits ein Spröbruch durch instabiles Risswachstum zu sehen, welcher auftritt, nachdem der zyklische Spannungsintensitätsfaktor einen kritischen Wert angenommen hat. In Anhang D.1 wurde dargestellt (vgl. Abb. D-4), dass in der kritischen Risswachstumsphase eine sehr hohe Anzahl an Schallemissionssignalen emittiert wird. Dies wird in Abb. D-9 deutlich: die spröden Perlit-Schichten des Gefüges brechen auf und bilden Mikrorisse senkrecht zum

Ermüdungsriß. Jeder einzelne von ihnen ist Quelle für Schallemission, die bei jedem Zusammendrücken der Probe erneut aktiviert werden kann.

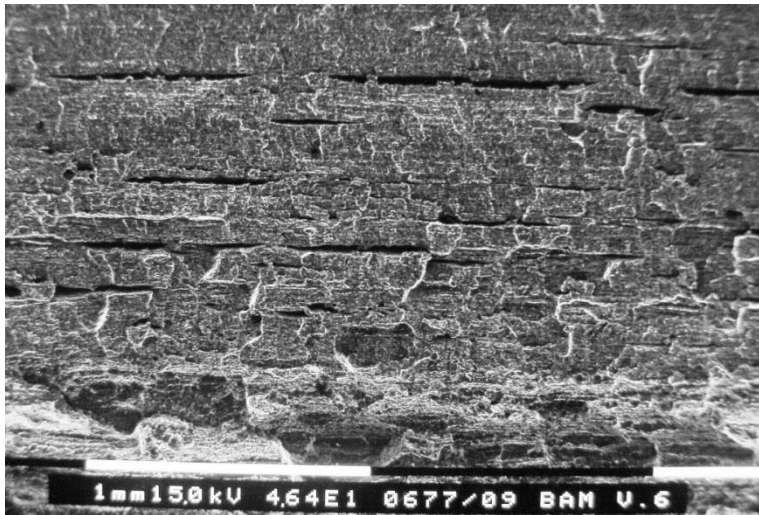


Abb. D-9: REM-Aufnahme der Bruchfläche von Probe P1-1 im Bereich des kritischen Ermüdungsrissswachstums (Position 2)

Topologie der Bruchflächen nach stabilem Ermüdungsrissswachstum mit und ohne Korrosionseinfluss

Die primären SE-Quellen unterscheiden sich bei nicht korrodierten und korrodierten Rissen wenig. In mikroskopischen Aufnahmen ist zu erkennen, warum gerade bei korrodierten Bruchflächen die sekundären SE-Quellen eine so wichtige Rolle spielen.



Abb. D-10: Bruchflächen der Platte 5, Randbereich; Oben: ohne und unten: mit Korrosionseinfluss

Abb. D-10 zeigt die Bruchflächen der Platte 5 nach Versuchsende. Im oberen Bereich beider Flächen ist ein dunkel erscheinender, schroffer Rand auszumachen. Hier sehen wir die Decklage der Schweißnaht, an deren Rand der Rissverlauf stattfindet. Dies wird besonders in den Schlißbildern unten deutlich. An der nicht korrodierten Bruchfläche werden die verschiedenen Versuchsabschnitte durch die Haltelinien deutlich, während der Rissfortschritt in der korrodierten Bruchfläche am Grad der Korrosion auszumachen ist.

Abb. D-11 zeigt einen Ausschnitt der nicht korrodierten Bruchfläche. Es sind die Zustände nach dem Aufbringen verschiedener Rissfortschrittsraten zu sehen. Diese werden diagonal von rechts nach links, wie der Verlauf des Risses, beschrieben:

1. Höchster zyklischer Spannungsintensitätsfaktor von $\Delta K = 1.000 \text{ N/mm}^{3/2}$ und somit höchste Rissfortschrittsrate. Gefügeschichten werden sichtbar, raue Struktur-oberfläche nach starker Verformung.
2. Lastüberhöhung durch statische Belastung $\Delta K+10\%$, dann Ermüdungsrisswachstum mit einem geringen Spannungsintensitätsfaktor von $\Delta K/4 = 250 \text{ N/mm}^{3/2}$. Die Lastüberhöhung erzeugt eine Übergangszone mit starker plastischer Verformung. Im Bereich des Ermüdungsrisses wird das Gefüge durch die geringe Belastung kaum verformt.
3. Ermüdungsrisswachstum mit einem halben ΔK von $500 \text{ N/mm}^{3/2}$. Bei kleineren Rissfortschrittsraten unterliegt das Gefüge geringeren plastischen Verformungen.

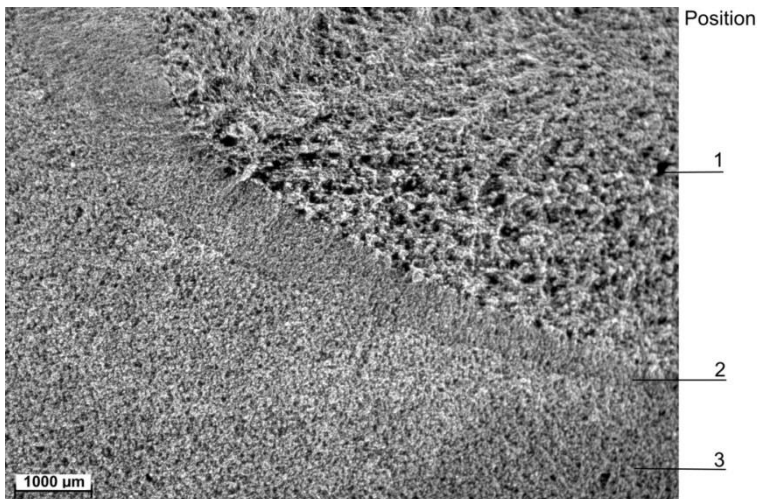


Abb. D-11: Mikroskopische Aufnahmen der Bruchfläche des nicht korrodierten Risses in Platte 5

Aufnahmen einer Haltelinie mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) in einem Abschnitt sehr geringen Ermüdungsrisswachstums (links) sowie eines Abschnittes, in welchem der Riss unter sehr hohen Belastungen stand (rechts), sind in Abb. D-12 dargestellt. Während bei langsamem Ermüdungsrisswachstum eine glatte Struktur-oberfläche entsteht, aus der nur einzelne Körner herausgebrochen sind, ist die Topographie bei schnellerem Risswachstum kantig und zerklüftet.

Strukturen, die nach dem Ermüdungsrisswachstum ohne Einfluss von Korrosion sehr gut auf der Bruchfläche zu sehen sind, werden bei der Schwingkorrosion durch Korrosionsprozesse zerstört oder durch Korrosionsschichten verdeckt. Dafür werden einige sekundäre SE-Quellen deutlich. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen in Abb. D-13 zeigen Korrosionsschichten, wie sie nahezu auf der gesamten Bruchfläche zu finden sind. Je nach Korrosionsgrad variieren die Schichtdicken und können bis auf einige Mikrometer anwachsen. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, sind die Brüche dieser Korrosionsschichten wichtige sekundäre Schallemissionsquellen. Je dicker die Schicht, desto intensiver ist das SE-Ereignis. Auch

das Ablösen der Schichten führt zu Schallemission. Eine Schichtablösung wird durch zyklische Belastung und die dadurch entstehenden Reibeffekte begünstigt.

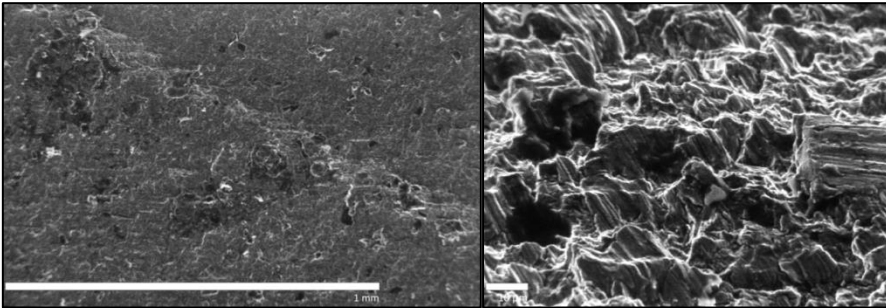


Abb. D-12: REM-Aufnahmen. Links: Stabiles Ermüdungsrisswachstum eines nicht korrodierten Risses unter geringer Belastung; mit Haltelinie. Rechts: instabiler Endrissbereich mit höheren Belastungen

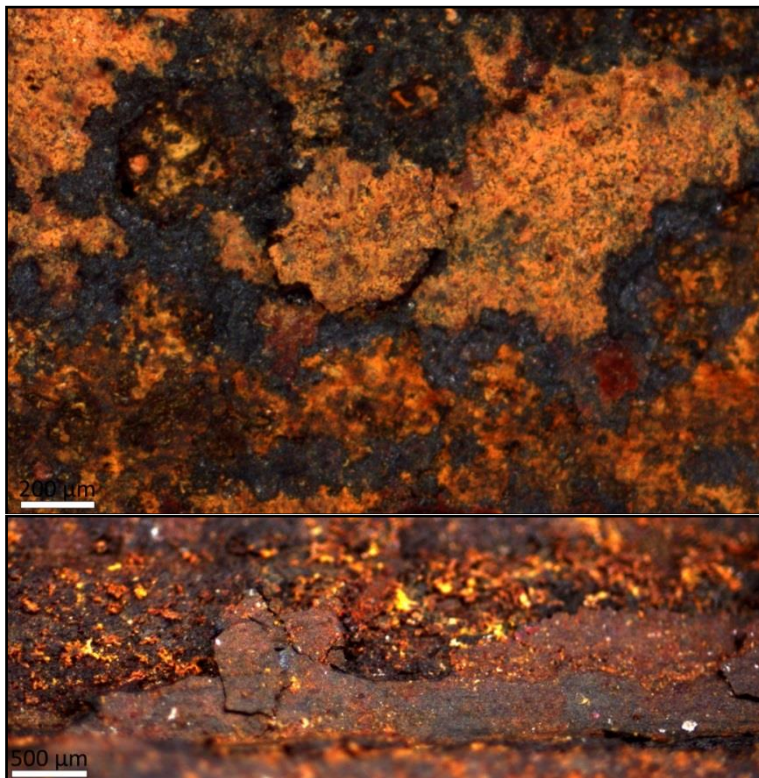


Abb. D-13: Lichtmikroskopische Aufnahmen der korrodierten Bruchfläche (Platte 5); Bildung von Korrosionsschichten (Rost); Abblättern und Bruch ganzer Schichten

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Korrosionsschicht auf der Bruchfläche zeigen Abb. D-14 und Abb. D-15. Während Abb. D-14 eine Aufnahme des äußeren Randbereiches ist, wo der Ermüdungsriss gerade entstanden und die Bruchoberfläche somit am

jüngsten ist, ist in Abb. D-15 eine Aufnahme aus dem mittleren Bruchflächenbereich zu sehen. Dort ist die Korrosionsschicht älter, durch den länger andauernden Korrosionsprozess dicker und unterstand weitaus mehr Belastungszyklen. Dies wird durch die Größe der Risse innerhalb der Korrosionsschicht deutlich. Während sich in der jüngeren Schicht Mikrorisse befinden, ist die ältere Schicht durchfurcht von größeren Rissen. Auch die Ablösung einzelner Schichtelemente ist zu beobachten.

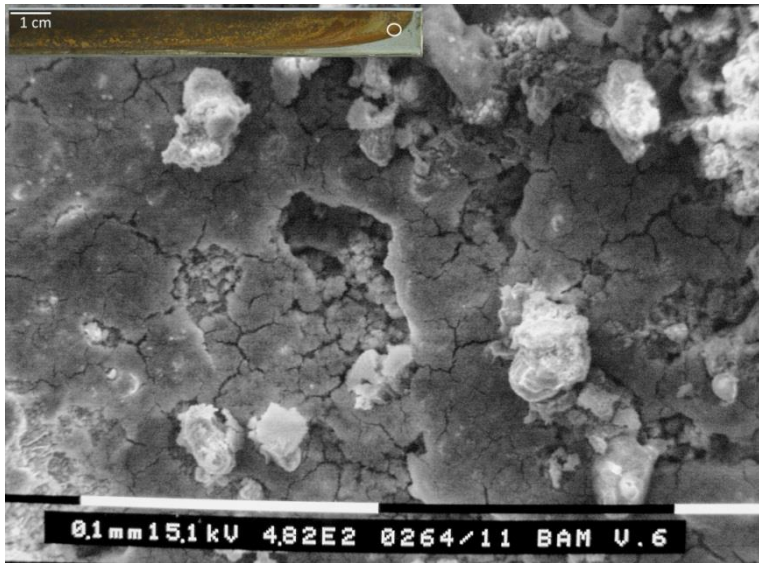


Abb. D-14: REM-Aufnahme des äußeren Randbereiches der neu korrodierten Bruchfläche

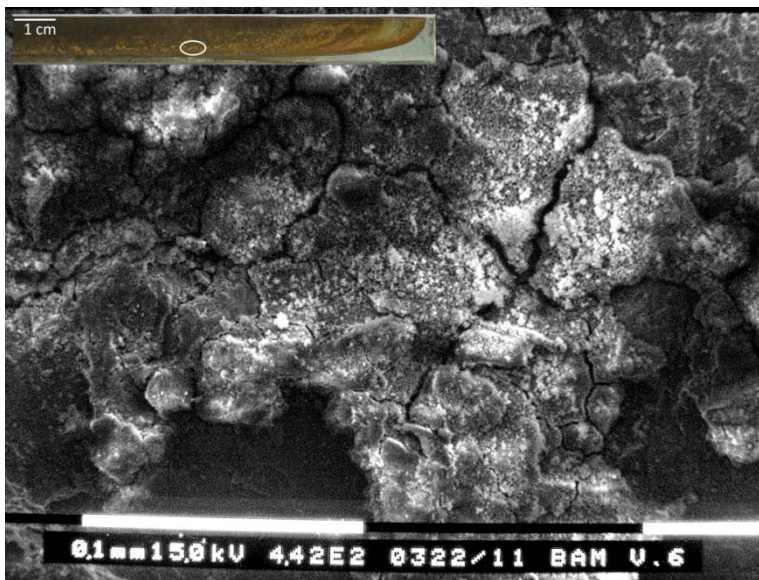


Abb. D-15: REM-Aufnahme einer älteren Korrosionsschicht am unteren Bruchflächenrand

Darstellung des Rissverlaufs anhand metallografischer Schlitte

Um den Rissverlauf makro- und mikroskopisch darzustellen, wurden Proben senkrecht zur Bruchfläche geschnitten und metallografische Schlitte der Rissflanken erstellt. Mit einer Nitalätzung ist das ferritisch- perlitische Gefüge sichtbar gemacht worden, der Bereich der Bruchfläche wurde lichtmikroskopisch dokumentiert. Der Riss verläuft in allen untersuchten Proben, initiiert durch den Starterkerb, entlang der Schweißnaht. Ein Beispiel ist in *Abb. D-16* zu sehen. Darin sind auch die Positionen A und B für die Detailaufnahmen *Abb. D-17* bzw. *Abb. D-18* gekennzeichnet.

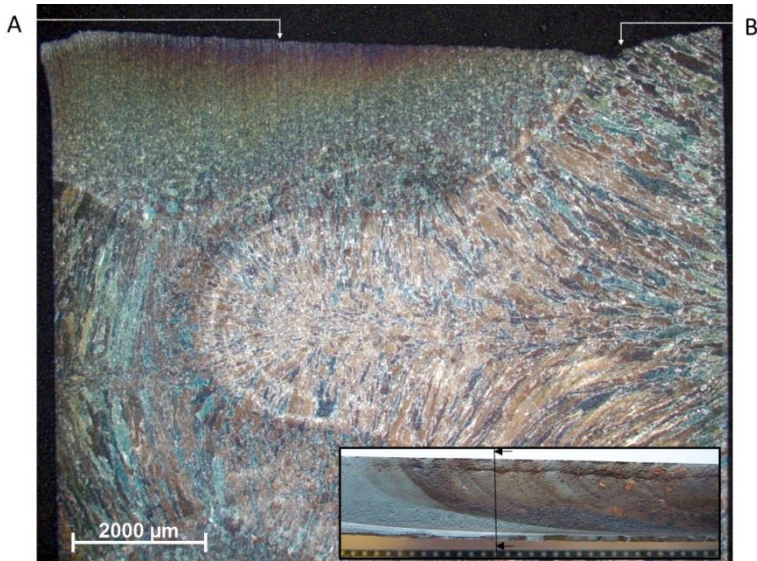


Abb. D-16: Schliffbild eines geätzten Bruchstückes aus Platte 4 im Bereich des fortgeschrittenen, korrodierten Risses, wie im Abschnitt unten rechts zu sehen ist. Die obere Kante zeigt den Rissverlauf entlang der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone; A und B kennzeichnen die Positionen der Detailaufnahmen unten

In *Abb. D-17* ist zu sehen, dass durch den Korrosionsprozess tiefe Furchen im Ferritgefüge entstanden sind, welches besonders korrosionsanfällig ist (vgl. S.49f). *Abb. D-18* zeigt einen Bereich der Schweißnaht, welche aufgrund ihrer Kerbwirkung und Sprödbrechneigung besonders anfällig für Rissbildung ist. Zu sehen ist ein etwa 60 µm transkristalliner Oberflächenriss. Korrodierte und nichtkorrodierte Bruchflächen weisen gleichermaßen transkristalline Anrisse entlang der Bruchfläche auf, wie sie in *Abb. D-19* zu sehen sind. Diese Mikrorisse erzeugen bei ihrer Entstehung primäre sowie weiterhin durch Reibeffekte erzeugte sekundäre Schallemission.

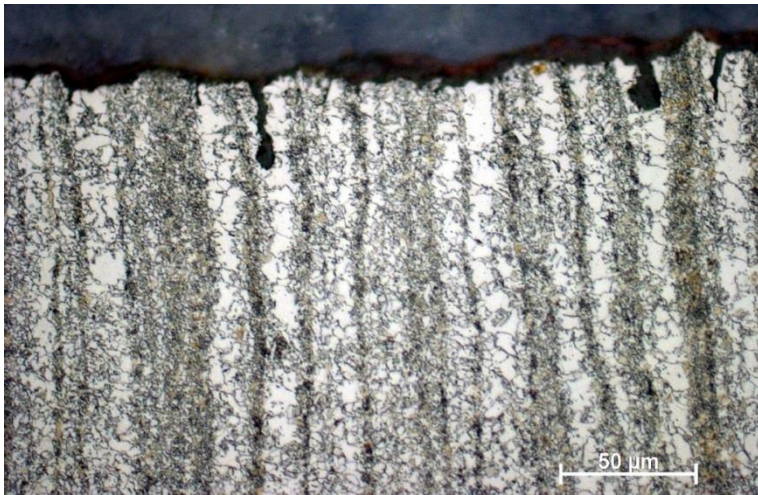


Abb. D-17: Schliffbild des Rissufers aus Platte 4, Position A in Abb. D-16. Oberflächenrisse senkrecht zur Bruchfläche

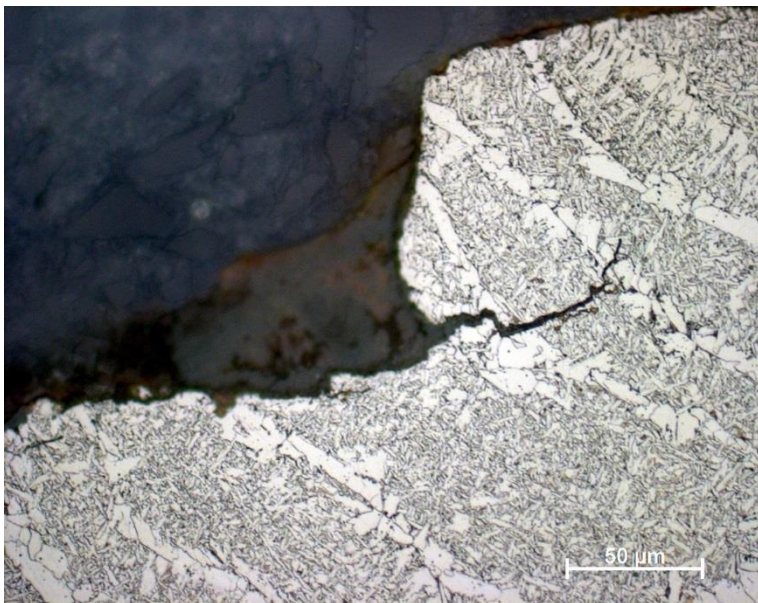


Abb. D-18: Schliffbild des Rissufers aus Platte 4, Position B in Abb. D-16. Bruchfläche im Bereich der Schweißnaht

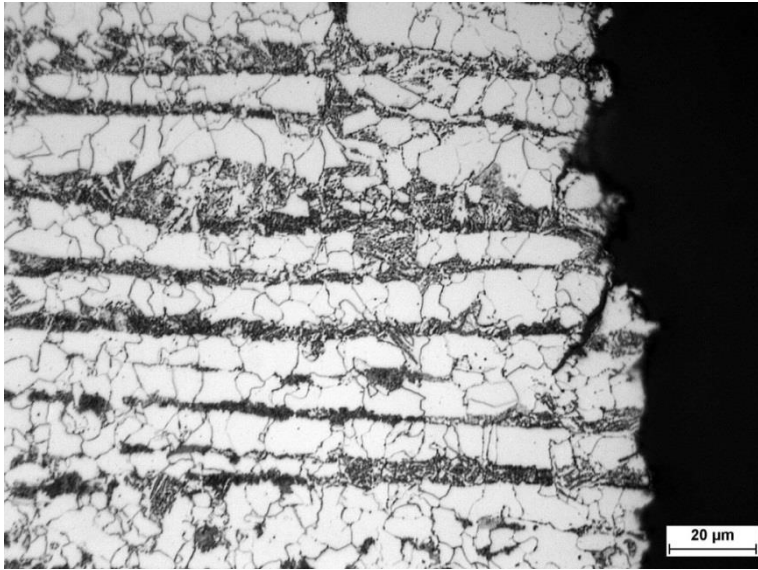


Abb. D-19: Schliffbild des Rissufers einer nicht korrodierten Bruchfläche

Digitalisierung der Bruchflächen

Im Verlauf des Versuches wurde zur Versuchsüberwachung und zur Anpassung der Versuchsparameter die Rissgröße mithilfe von Farbeindringprüfungen überwacht. Des Weiteren wurden im Laufe der Ermüdungsversuche durch das Aufbringen von Überlast zwischen den Ermüdungszyklen Haltelinien auf den Bruchflächen erzeugt, welche nach dem Öffnen der Bruchflächen auf den nicht korrodierten Flächen gut sichtbar sind. Für die Korrelation mit SE-Signalen wird die Größe der Bruchflächen in den jeweiligen Versuchsabschnitten benötigt, um später beispielsweise eine Aussage über die SE-Ereignisse pro entstandener Flächeneinheit machen zu können. Dazu wurden die Bruchflächen digitalisiert, wie ein Beispiel in *Abb. D-20* zeigt.

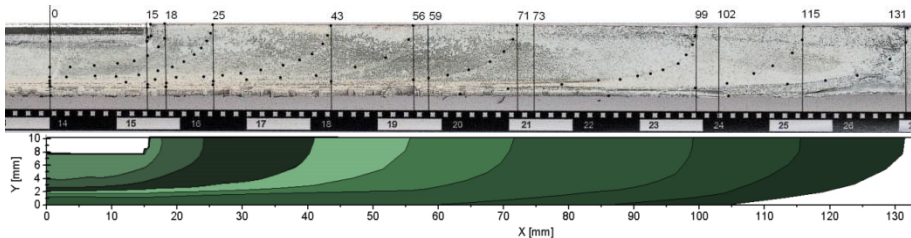


Abb. D-20: Oben: Abbildung der halben, nicht korrodierten Bruchfläche aus Platte 5 und unten: ihr digitales Pendant

Da an den korrodierten Bruchflächen keine Haltelinien zu erkennen sind, wurden die versuchsbezogenen Bruchflächenabschnitte mithilfe der Ergebnisse aus dem Verlauf des nicht korrodierten Risses ermittelt. Die Kurven, welche für die Ermittlung der Bruchfläche und Risstiefe am Scheitelpunkt des Risses aus der Risslänge verwendet wurden, sind in *Abb. D-21* dargestellt.

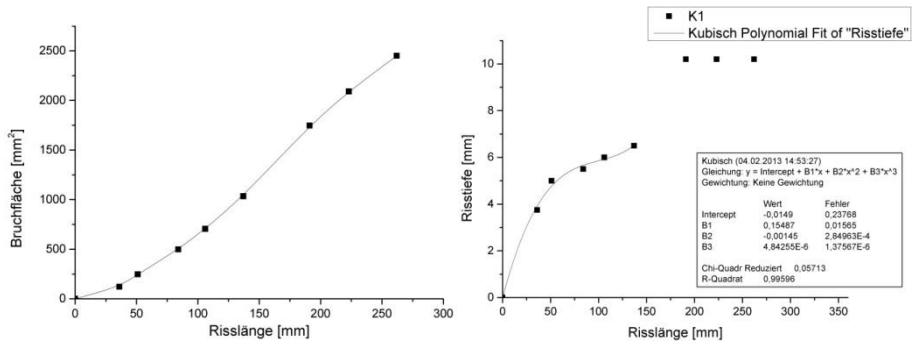


Abb. D-21: Zusammenhänge, gewonnen aus dem nicht korrodierten Riss in Platte 5, welche für die Kalkulation von Bruchfläche und Risstiefe der korrodierten Risse verwendet wurden

D.3 Amplitudenverteilungen von SE-Ereignissen

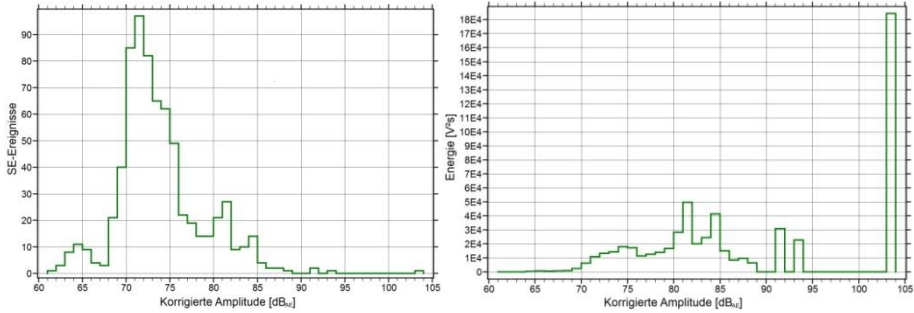


Abb. D-22: Amplitudenverteilung in Abhängigkeit der SE-Ereignisse (links) und der Energie (rechts). Primäre Ereignisse am nicht-korrodierten Riss, 36.000 Lastwechsel, Risswachstum von 45 auf 57 mm (Platte 5)

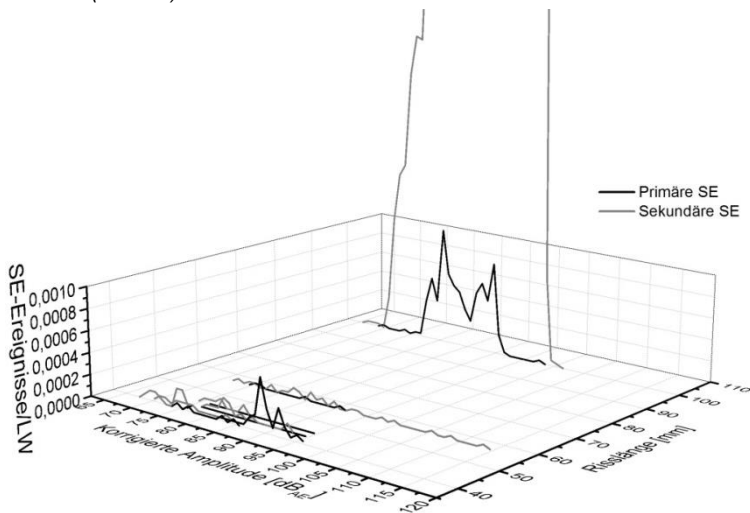


Abb. D-23: Amplitudenverteilung der SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum des korrodierten Risses an Platte 3

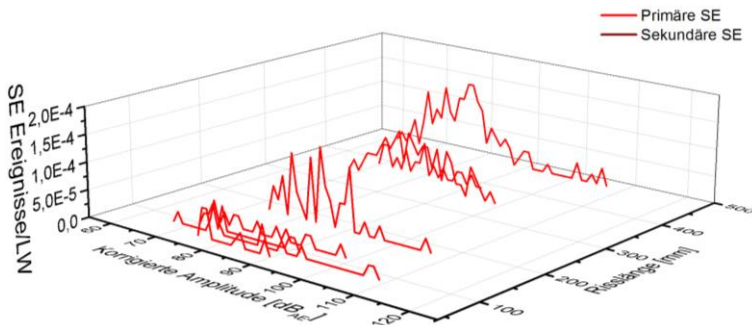


Abb. D-24: Amplitudenverteilung der primären SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum des korrodierten Risses an Platte 4

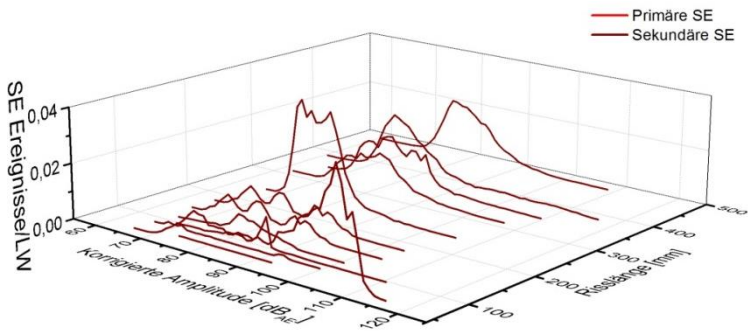


Abb. D-25: Amplitudenverteilung der primären SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum des korrodierten Risses an Platte 4

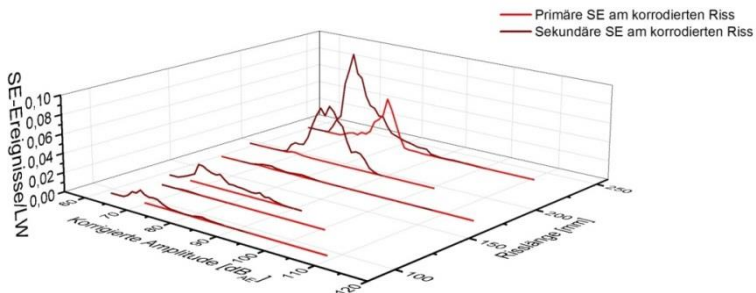


Abb. D-26: Amplitudenverteilung der SE-Ereignisse beim Ermüdungsrisswachstum des korrodierten Risses an Platte 5

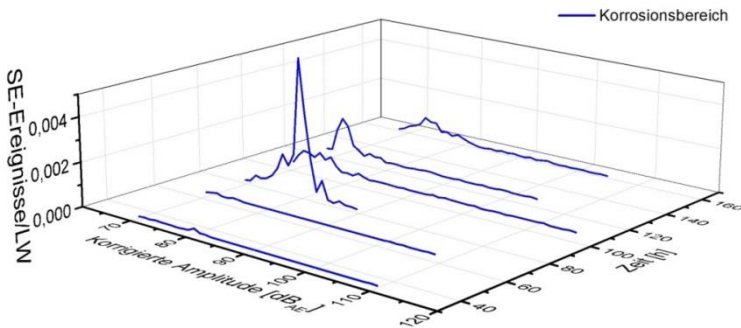


Abb. D-27: Amplitudenverteilung der SE-Ereignisse aus dem Korrosionsbereich auf Platte 5 bei zyklischer Belastung

D.4 Wavelet-Diagramme

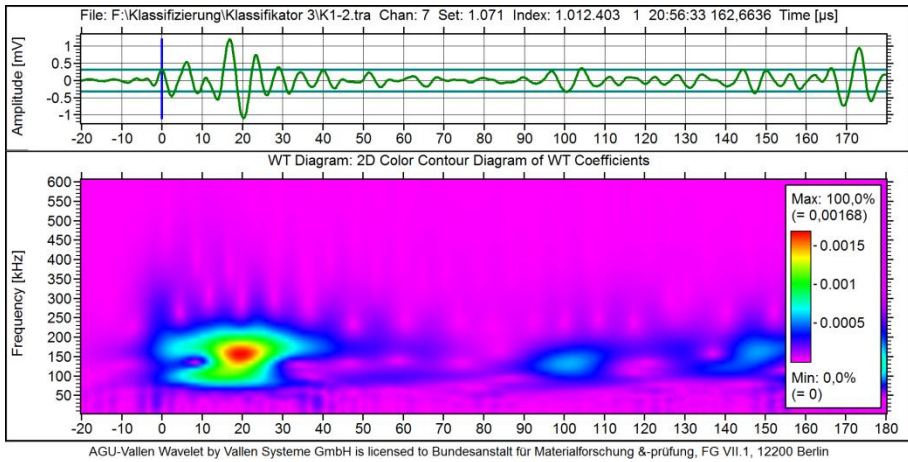


Abb. D-28: Signalform und Wavelet-Diagramm für ein Signal aus der Signalgruppe K1-2, Quelle IP, jedoch Oberflächennahe, da hoher Energiegehalt auch in A_0 -Mode

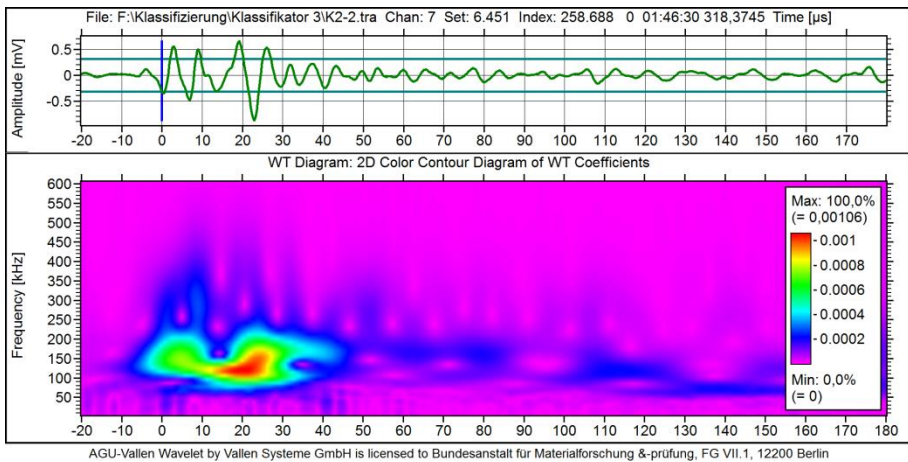


Abb. D-29: Signalform und Wavelet-Diagramm für ein Signal aus der Signalgruppe K2-2

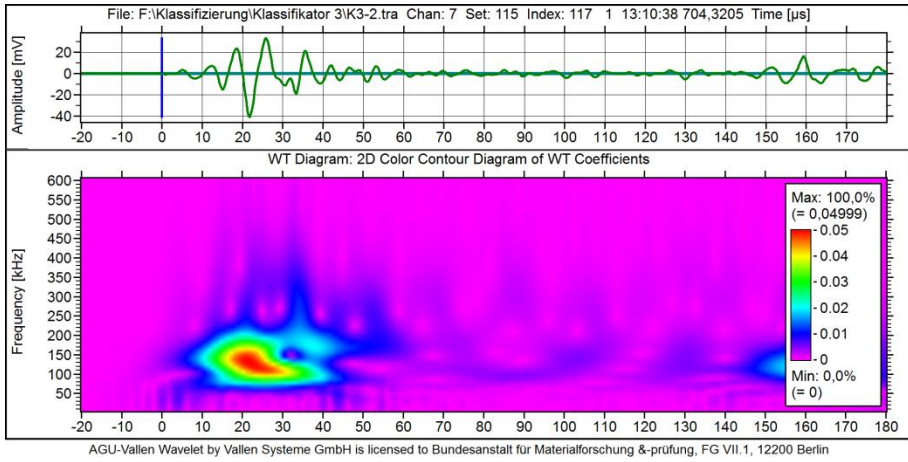


Abb. D-30: Signalform und Wavelet-Diagramm für ein Signal aus der Signalgruppe K3-2

D.5 Daten zur Mustererkennung

Automatisierte Merkmalbestimmung

Tab. D-1: Koordinaten der Merkmale für die verwendeten Klassifikatoren

B-Merkmal Nr.	Zeit- bereich [μ s]	Frequenz- bereich [kHz]
1		19,5
2		58,6
3		97,7
4		136,7
5		175,8
6	2,8	214,8
7		253,9
8		293,0
9		332,0
10		371,1
11		410,2
12		19,5
13		58,6
14		97,7
15		136,7
16		175,8
17	15,6	214,8
18		253,9
19		293,0
20		332,0
21		371,1
22		410,2
23	Energiefaktor	

Test des 6K-Klassifikators beim Ermüdungsversuch

Der erstellte Klassifikator mit sechs Signalklassen wurde an einem Versuchsabschnitt des Ermüdungsversuches an Platte 5 getestet. In dem betrachteten Versuchsabschnitt fand ein Risswachstum von ca. 30 mm statt. Die drei Schadensmechanismen Ermüdungsrisswachstum ohne und mit korrosiven Einfluss sowie Oberflächenkorrosion fanden in den Bereichen K1, K2 und KB statt. In diesen Bereichen wurden insgesamt 1.646 SE-Ereignisse lokalisiert. Die Lokalisierungsgrafik mit einer farblichen Zuordnung zu den jeweiligen Klassen ist in *Abb. D-31* zu sehen. Die Zuordnung der Signalklassen ist oft fehlerhaft. Zum Beispiel die Klasse K3-1, der Korrosionsprozess, welcher bei einer 5-stündigen zyklischen Belastungsprüfung zwar auftreten dürfte, jedoch nicht in diesem Ausmaß und auch nicht in dem Lokalisierungsgebiet des korrosionsfreien Risses. Jedoch lassen sich auch SE-Ereignisse ausmachen, denen prinzipiell eine richtige Klasse zugeordnet wurde. So sind die primären Effekte (grün für den nicht korrodierten Riss und rot für den korrodierten Riss), die mit dem Risswachstum verbunden sind, an den Rissspitzen geortet, so wie es für diese Art von Schallemissionsquellen zu erwarten ist.

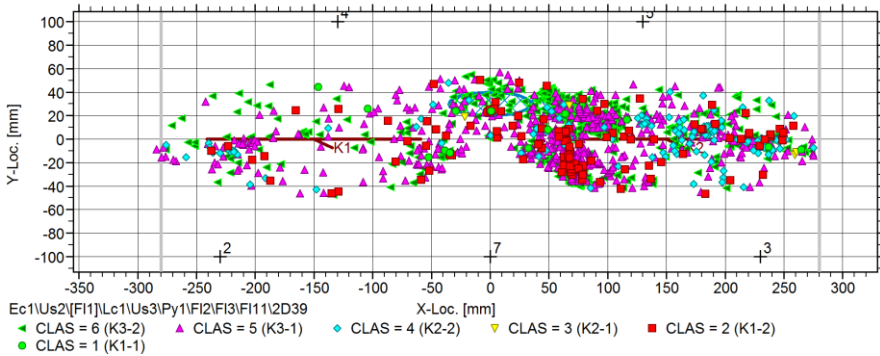


Abb. D-31: Lokalisierung von SE-Ereignissen nach 38.000 Lastzyklen an Platte 5, farblich nach Klassenzugehörigkeit eingeordnet

Abb. D-32 zeigt einen Abschnitt des zyklischen Kraftverlaufes. Wieder sind die SE-Ereignisse gemäß ihres zeitlichen Auftretens und ihrer Klassenzugehörigkeit gekennzeichnet. Hier treten hauptsächlich sekundäre Quellen wiederholt bei unterschiedlichen Kraftwerten auf. Bei etwa 70 kN tritt etwa K3-2 auf, während bei etwa 80 kN K2-2 auftritt. Hier sehen wir jedoch auch wieder K3-1. Die Korrosionsklasse sollte eher stochastisch denn zyklisch auftauchen, hier handelt es sich also um eine Fehlzuordnung der Klasse.

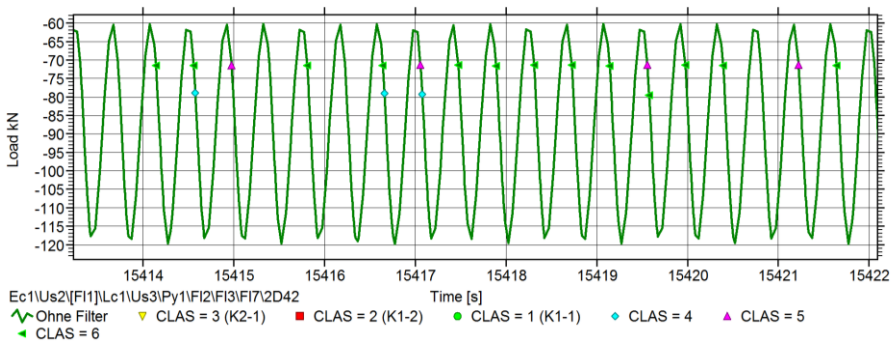


Abb. D-32: Ereignisse innerhalb des Bereiches K2, abhängig vom Kraftverlauf mit Klassenzuordnung; höchste Negativwerte spiegeln höchste Belastung wieder

Tab. D-2 enthält eine Aufschlüsselung über die Zuordnung der Signalklassen in den Lokalisierungsgebieten K1, K2 und KB. Die logische Zugehörigkeit sagt aus, welche Klasse in ein jeweiliges Gebiet gehört. So sind dem Gebiet K2 beispielsweise die Klassen K2-1 und K2-2 zuzuordnen. Daraus lässt sich nun eine Zuordnungsgenauigkeit kalkulieren, die besonders für das Gebiet K2 mit unter 10% sehr gering ausfällt. Im Gebiet des korrodierten Risses können jedoch auch SE-Quellen auftreten, die anderen Klassen zugeordnet werden können. Sowohl der Korrosionsprozess als auch das Brechen von Korrosionsprodukten gehören zu solchen klassenübergreifenden Schadensmechanismen. Also wird eine erweiterte logische Zugehörigkeit eingeführt, die diese Tatsache berücksichtigt. Damit steigt die Trefferquote für den korrodierten Riss auf 92% an. Die Zuordnungsgenauigkeit beim nicht korrodierten Riss liegt allerdings nur bei knapp 17%.

Tab. D-2: Anzahl der Signale in den Bereichen und Klassen und Bewertung des 6K-Klassifikators nach Anwendung auf SE-Signale aus einem Ermüdungsversuch

Signalklasse	Klassen						Gesamt	Logische Zugehörigkeit		Anzahl der Signale	Zuordnungsgenauigkeit [%]
	K1-1	K1-2	K2-1	K2-2	K3-1	K3-2		K1-1	K1-2		
K1	7	31	2	19	108	75	242	K1-1	K1-2	38	15,70
K2	8	82	6	111	411	576	1194	K2-1	K2-2	117	9,80
KB	2	20	2	10	57	119	210	K3-1	K3-2	176	83,81
<i>Gesamt</i>	<i>17</i>	<i>133</i>	<i>10</i>	<i>140</i>	<i>576</i>	<i>770</i>	<i>1646</i>				

Erweiterte logische Zugehörigkeit		Anzahl der Signale	Zuordnungsgenauigkeit [%]
K1-1	K1-2		
K2-1	K2-2	1104	92,46
K3-1	K3-2		83,81

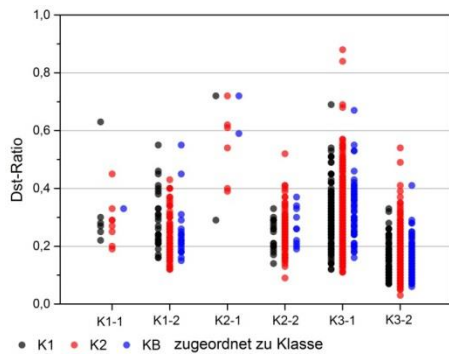


Abb. D-33: Abstands-Verhältnis für die Zuordnung der SE-Ereignisse aus den Schädigungsgebieten K1 (Ermüdungsriß), K2 (korrodierter Ermüdungsriß) und KB (Korrosionsbereich) nach einem Ermüdungsversuch mithilfe des 6K-Klassifikators

Das Abstands-Verhältnis ist ein Indikator dafür, inwiefern ein Signal im Vergleich zu anderen Signalen dieser Klasse zu seiner Klasse passt. Der Wert 1 bedeutet die schlechteste mögliche Zuordnung in der jeweiligen Klasse. Die Verteilung des Abstands-Verhältnisses spiegelt die Verteilung der Merkmale der Muster wieder. In Abb. D-33 ist das Abstands-Verhältnis für alle Klassen nach der Klassifizierung mit dem 6K-Klassifikator dargestellt. SE-Ereignisse aus dem Schädigungsgebiet K1 wurden besonders passend den Klassen K1-1, K2-2 und K3-2 zugeordnet, Ereignisse aus K2 den Klassen K2-2 und K3-2, ebenso wie die Ereignisse aus dem Korrosionsgebiet. Die Zuordnung ist somit in nur wenigen Fällen korrekt. Die Klassen K2-2 und K3-2 sind beides Klassen sekundärer Korrosionsereignisse, deren Quellmechanismen sich ähneln und somit auch die SE-Signale. Daher ist eine gemeinsame Zuordnung dieser Klassen aus den Gebieten K2 und KB durchaus wahrscheinlich. Auffällig ist außerdem, dass die Klasse K3-1 („Korrosionsprozess“) einen sehr hohen Anteil an Zuordnungen erhält. Das hohe Abstands-Verhältnis zeigt, dass diese Zuordnungen sich abseits der Klassenmitte befinden und somit eine geringe Zuordnungsgenauigkeit vorliegt.

Test des 6K-Klassifikators beim Korrosionsprozess

Eine weitere Überprüfung des Klassifikators findet nun während des Prozesses der Oberflächenkorrosion im Ruhezustand der Platte statt. *Abb. D-34* zeigt den Versuchsverlauf mit den distanzkorrigierten Amplituden der SE-Ereignisse sowie ihre kumulierte Anzahl, nach Klassenzugehörigkeit markiert. In der Verteilung der Klassen ist kaum ein zeitliches oder amplitudenbezogenes Muster auszumachen. Jedoch macht die Signalklasse K3-1, „Korrosionsprozess“, den Hauptanteil der SE-Ereignisse aus: 51,8%, wie *Tab. D-3* zu entnehmen ist.

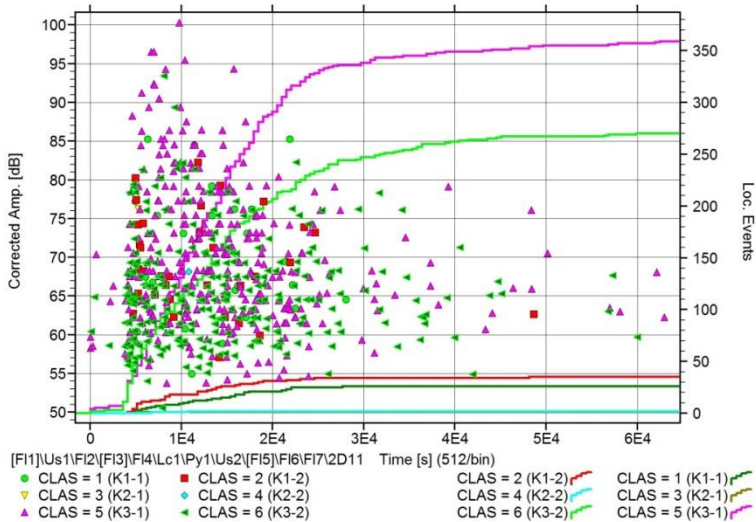


Abb. D-34: Oberflächenkorrosion über 18 Stunden. Distanzkorrigierte Amplitude und kumulierte SE-Ereignisse mit ihrer Klassenzugehörigkeit

Dies ist auch der Wert für die Zuordnungsgenauigkeit, wird allein K3-1 betrachtet. Wird davon ausgegangen, dass das Brechen von Korrosionsprodukten als Schadensmechanismus hinzugefügt werden kann, erhöht sich die Klassifikationsgenauigkeit auf 90,8%. Allerdings tritt das Brechen der Korrosionsprodukte vermehrt nach der Trocknung auf. Diese Klasse K3-2 sollte somit erst nach einigen Versuchsstunden auftreten.

Tab. D-3: Bewertung des 6K-Klassifikators nach Anwendung auf SE-Signale aus einem Korrosionsprozess

Signalklasse	Signalklasse						Gesamt	Logische Zugehörigkeit	Anzahl der Signale	Zuordnungsgenauigkeit [%]
	K1-1	K1-2	K2-1	K2-2	K3-1	K3-2				
Signale	26	35	1	2	359	270	693	K3-1	359	51,80
								Erweiterte logische Zugehörigkeit	Anzahl der Signale	Zuordnungsgenauigkeit [%]
								K3-1		
								K3-2	629	90,76

4K-Klassifikator

Nach der Reduktion der Signalklassen werden zunächst aus den verbleibenden Sparten vier Signalklassen gebildet. Diese sind:

1. Primäre Effekte Ermüdungsrisswachstum (K1-1 + K2-1), 9.879 Signale,
2. Sekundäre Effekte Ermüdungsrisswachstum ohne Korrosionseinfluss (K1-2), 9.540 Signale,
3. Sekundäre Effekte Korrosion (K1-2 + K3-2), 28.752 Signale,
4. Korrosionsprozess (K3-1), 600 Signale.

Der 4K-Klassifikator besitzt dieselben Rahmenbedingungen wie der IP/OOP-Klassifikator (vgl. Tab. 4-3) mit seinen auf Wellenmoden angepassten Zeitsegmenten TS1 und TS2.

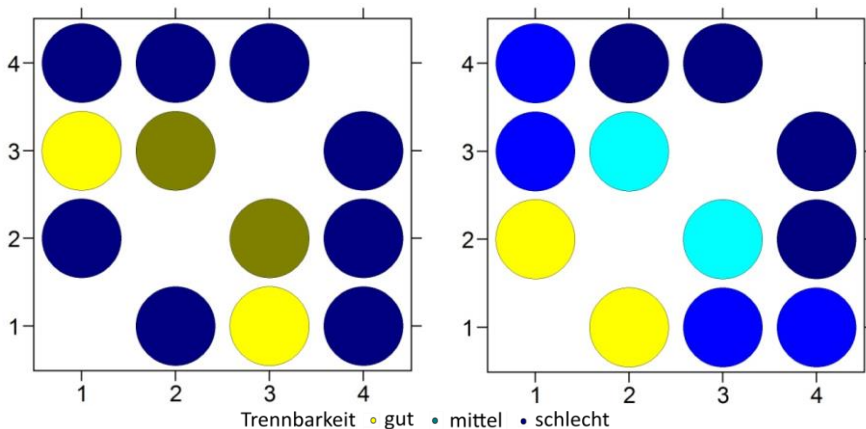


Abb. D-35: Class Couple Ranking. B-Features (links) und T-Features (rechts)

Die Trennbarkeit der einzelnen Klassen mithilfe der B- bzw. T-Merkmale ist in Abb. D-35 zu sehen. Besonders gute Merkmale für die Klassifikation besitzt vor der Transformation demnach Klasse 3, „sekundäre Effekte der Korrosion“, die jedoch noch schwer von der Klasse 4, dem „Korrosionsprozess“, zu unterscheiden ist. Nach der Transformation besitzt die Klasse 2 die besten Werte für die Klassentrennung.

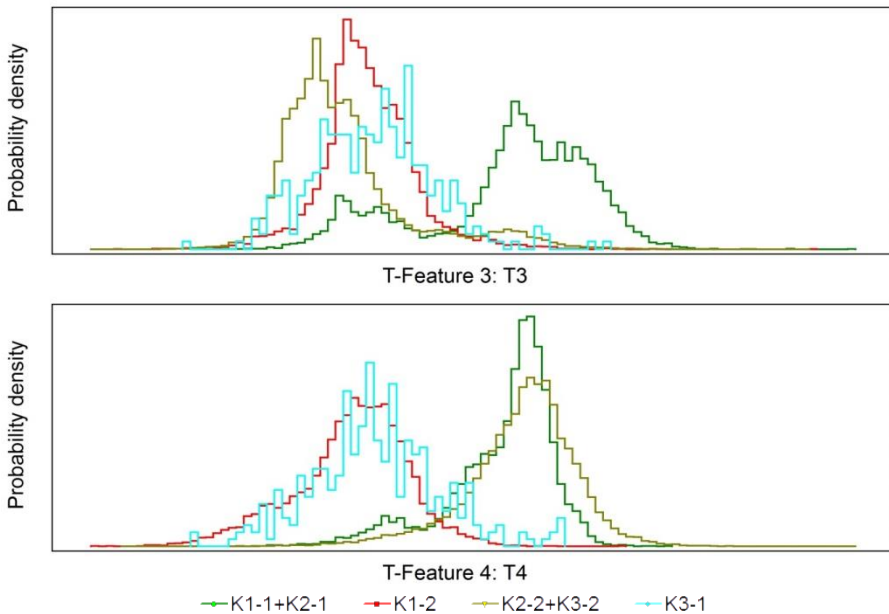


Abb. D-36: Häufigkeitsverteilung der transformierten Merkmale T3 und T4

Abb. D-36 stellt die Häufigkeitsverteilungen mit den augenscheinlich besten Merkmalen für die Klassentrennung dar. Das sind die transformierten Merkmale T3 und T4. Bei der Verteilung von T3 (oben) besitzt die Klasse 1 („Primäre Effekte Ermüdungsrisswachstum“) eine sich von den anderen Klassen unterscheidende Anordnung. In T4 überdecken sich die Eigenschaften der Klassen 2 und 4, sowie der Klassen 1 und 3. Die Projektion der beiden transformierten Merkmale T3 und T4 in den Merkmalsraum ist in Abb. D-37 zu sehen. Es ist eine Clusterbildung zu beobachten, bei der es jedoch insbesondere bei den Klassen 1 und 3 (K1-1+K2-1 und K2-2+K3-2) sichtliche Überschneidungen der Klassengebiete gibt.

Im Ergebnis der Klassifizierung (Abb. D-38) wird dem Korrosionsprozess jedoch die besten Eigenschaften für die Klassentrennung zugesprochen; hier wurden 88 % der Signalformen der richtigen Klasse zugeordnet. Die geringsten Werte in der Zuordnung besitzt die Klasse K1-2.

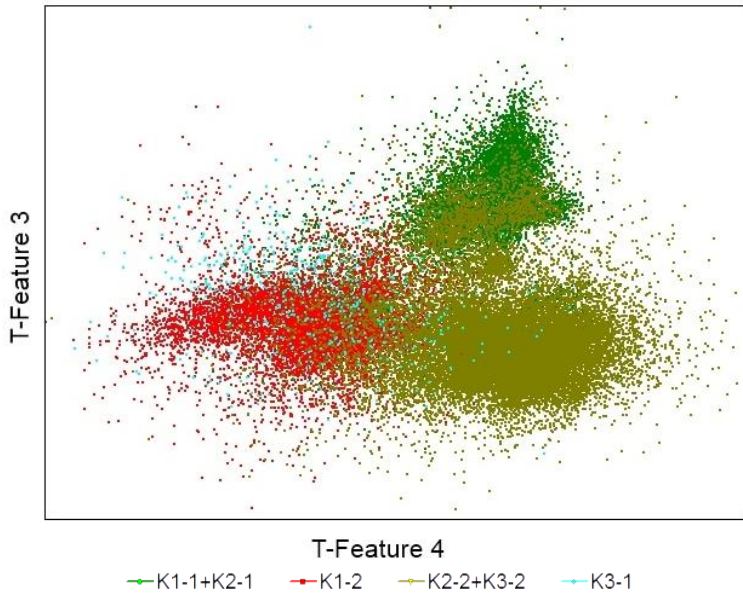


Abb. D-37: Projektion im Merkmalsraum der transformierten Merkmale T3 und T4

	K1-1+K2-1	K1-2	K2-2+K3-2	K3-1	Results:
K1-1+K2-1 (9879)	7576	466	1276	561	76,7%
K1-2 (9540)	145	6749	222	2424	70,7%
K2-2+K3-2 (28752)	2353	522	23574	2303	82,0%
K3-1 (600)	0	53	17	530	88,3%
	(10074)	(7790)	(25089)	(5818)	

Abb. D-38: Ergebnis der 4K-Klassifizierung

Test des 3K-Klassifikators beim Ermüdungsversuch

In der Lokalisierungsgrafik *Abb. D-39* sind die georteten SE-Ereignisse in den Bereichen K1, K2 und KB, farblich nach den ihnen zugeordneten Klassen, dargestellt. Die Anzahl der den drei Klassen zugeordneten Signale in den verschiedenen Gebieten ist detailliert in *Tab. D-4* gelistet. So tauchen Ereignisse der Klasse 3, „Korrosionsprozess“, in allen Gebieten auf; vermehrt jedoch in K2 und KB, wo tatsächlich Korrosion stattfand. Klasse 1, primäre Effekte des Ermüdungsrisswachstums, wird oft an den Rissspitzen lokalisiert, wie es für die Riss auslösenden Ereignisse zu erwarten ist, jedoch auch in allen anderen Bereichen.

Im Kraftverlauf in *Abb. D-40* ist zu sehen, dass sekundäre Effekte, wie zu erwarten, bei niedrigen Kräften und primäre Effekte bei Maximalkräften auftauchen. Es ist jedoch auch deutlich zu sehen, dass Ereignisse der Klasse „Korrosionsprozess“ in einer Reihe, d.h. auf einem Kraftniveau, in zyklischen Abständen zusammen mit sekundären Effekten auftauchen. Es findet eine Falschzuordnung statt.

Bei Ermittlung der Zuordnungsgenauigkeit wurde wieder eine Einteilung in eine logische und eine erweiterte logische Klassenzugehörigkeit vorgenommen. Da in K2 theoretisch alle Klassen vorkommen können, liegt die Zuordnungsgenauigkeit nach erweiterter logischer

Zuordnung bei 100%. Aussagekräftiger ist wohl eher die Wahrscheinlichkeit von 33% im Gebiet K1, wo nur Klasse 1 vorkommen darf. Im Korrosionsgebiet werden zu knapp 80% auch Korrosionsklassen zugeordnet.

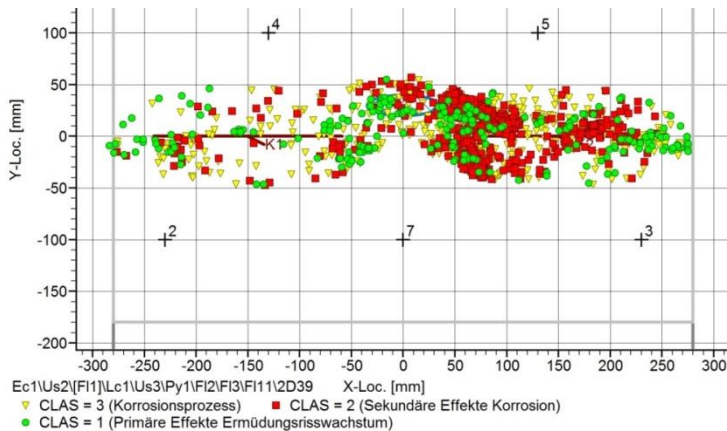


Abb. D-39: Lokalisierung von SE-Ereignissen nach 38.000 Lastzyklen an Platte 5, farblich nach Klassenzugehörigkeit eingeordnet

Hier wird deutlich, dass durch das Zusammenlegen der Klassen keine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Schadensmechanismen mehr möglich ist, und so eine Verifikation über Ortungsergebnisse erschwert wird.

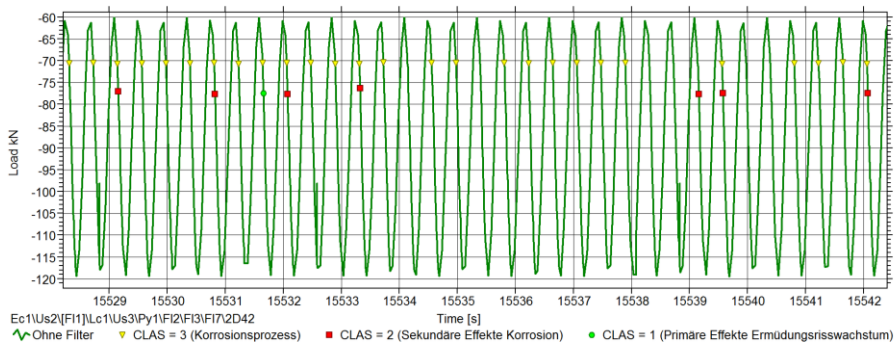


Abb. D-40: Kraftverlauf und SE-Ereignisse, die im Gebiet des korrodierten Risses (K2) lokalisiert wurden; farbliche Zuordnung nach Klassen; höchste Negativwerte spiegeln höchste Belastung wieder

Tab. D-4: Bewertung des 3K-Klassifikators nach Anwendung auf SE-Signale aus einem Ermüdungsversuch

	K1-1 +	K2-2 +	K3-1	Gesamt	Logische Zugehörigkeit	Anzahl der Signale	Zuordnungs- genauigkeit [%]
K1	80	47	115	242	K1-1 K1-2	80	33,06
K2	134	642	418	1194	K1-1 K1-2 K2-2 K3-2	776	64,99
KB	43	102	65	210	K3-2	102	48,57
Gesamt	257	791	598				

	Erweiterte logische Zugehörigkeit	Anzahl der Signale	Zuordnungs- genauigkeit [%]
	K1-1 K1-2	80	33,06
	alle Klassen	1194	100,00
	K3-1 K3-2	167	79,52

Statistische Betrachtung der SE-Parameter

Die Mittelwerte einer Auswahl an SE-Parametern ist in Abb. D-41 dargestellt. Die SE-Signale in den Schädigungsklassen Ermüdungsriss (K1), Ermüdungsriss mit Korrosion (K2) und Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung (K3) werden darin verglichen. Daraus lassen sich bereits Tendenzen für den Nutzen zur Klassentrennung der SE-Parameter ableiten.

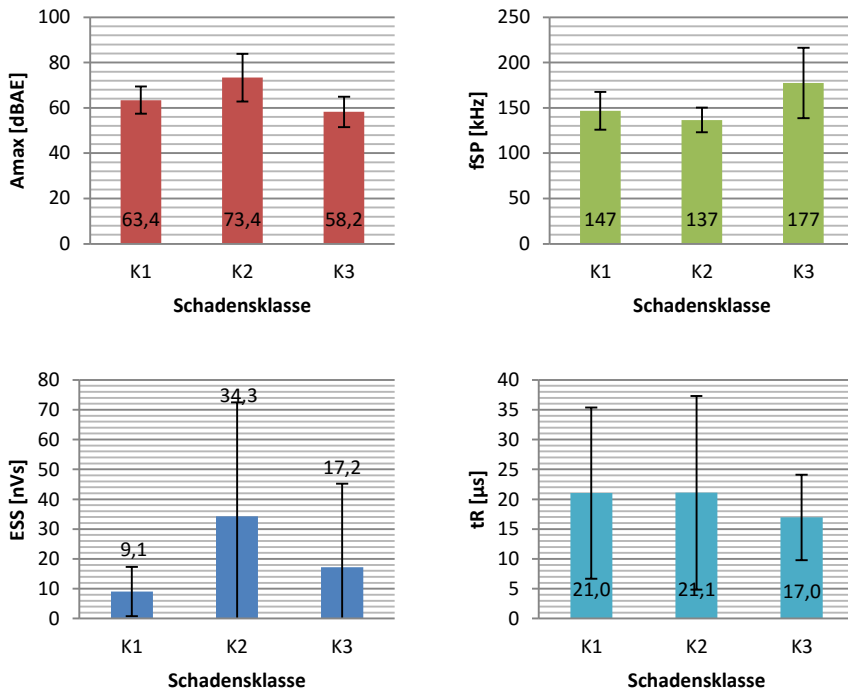


Abb. D-41: Mittelwerte der SE-Parameter Maximalamplitude A_{max} (rot), Schwerpunktsfrequenz f_{SP} (grün), Signalstärke E_{SS} (blau) und Anstiegszeit t_R (türkis); Schadensklassen K1: Ermüdungsriss, K2 Ermüdungsriss mit Korrosion und K3: Korrosionsfläche unter zyklischer Belastung

Tab. D-5: Signalklassen, Klassengrößen und Mittelwerte verschiedener SE-Parameter. Dargestellt sind der arithmetische Mittelwert \bar{x} , die Standardabweichung σ_x sowie die SE-Parameter: Maximalamplitude A_{max} , Anstiegszeit t_r , Signalstärke E_{SS} , Anzahl der Counts N_C , Schwerpunktfrequenz f_{SP} und Maximalfrequenz f_{max} , Verhältnis von Amplituden der A_0 - und S_0 -Moden A_{Ratio}

Klasse		Klasse 1-1		Klasse 1-2		Klasse 2-1		Klasse 2-2		Klasse 3-1		Klasse 3-2	
Anzahl der SE-Signale		624		9.540		9.255		28.486		324		266	
Parameter	Einheit	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x	\bar{x}	σ_x
A_{max}	[dB _{AE}]	63,8	5,0	63,4	6,1	65,0	7,7	76,1	11,4	56,2	5,2	62,4	9,7
t_r	[μ s]	22,6	12,1	20,9	14,5	18,7	11,0	21,9	17,9	16,7	5,6	17,4	10,3
E_{SS}	[nVs]	10,2	7,56	8,98	8,27	11,8	29,9	41,6	40,8	18,1	25	15,3	34,1
N_C	[-]	13,8	10,6	12,3	9,3	8,6	9,4	25,4	19,2	46,6	76,0	15,1	14,5
f_{SP}	[kHz]	137,9	13,0	147,4	21,2	153,3	12,3	131,2	13,9	183,2	44,3	165,6	27,8
f_{max}	[kHz]	126,4	25,7	143,2	32,0	137,2	34,5	110,6	24,7	159,6	48,5	144,4	41,3
A_{Ratio}	[-]	1,18	0,05	1,11	0,08	1,13	0,08	1,18	0,11	1,10	0,07	1,06	0,14

Parameterverteilungen für sechs Signalklassen

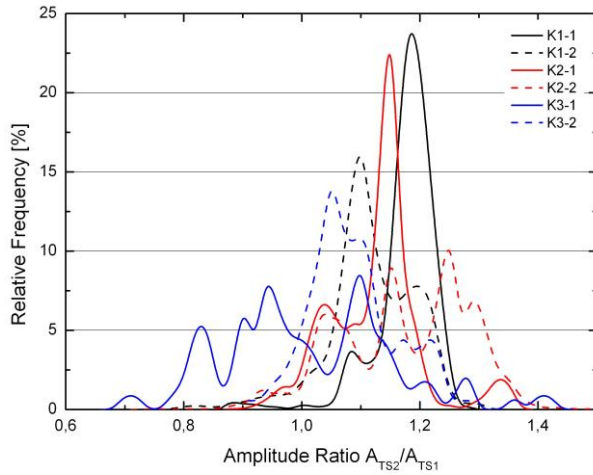


Abb. D-42: Häufigkeitsverteilung des Amplitudenverhältnisses A_{TS2}/A_{TS1} (sechs Klassen)

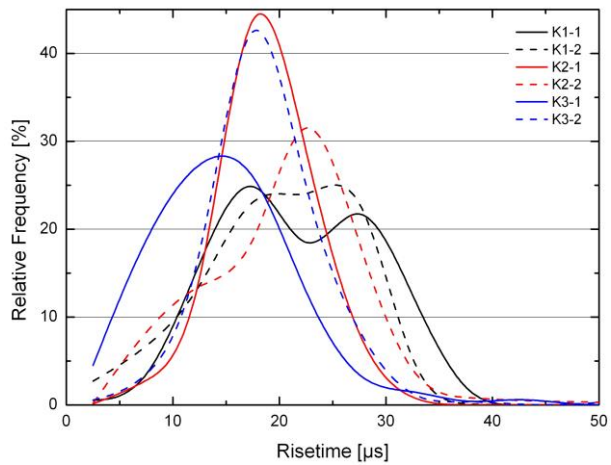


Abb. D-43: Häufigkeitsverteilung der Anstiegszeit (sechs Klassen)

Parameterverteilungen für drei Signalklassen mit eingezeichneten Entscheidungsgrenzen

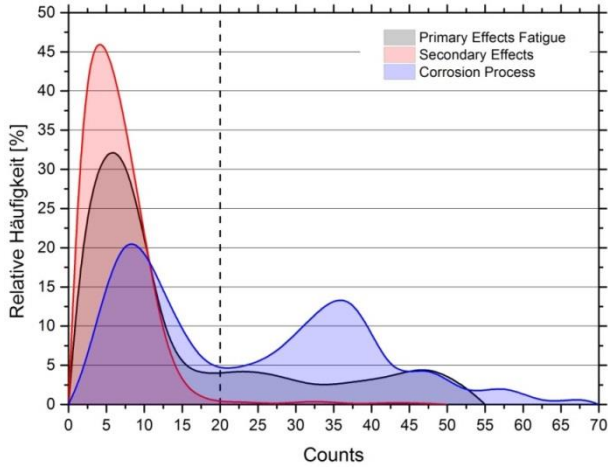


Abb. D-44: Häufigkeitsverteilung der Counts mit eingezeichneter Entscheidungsgrenze

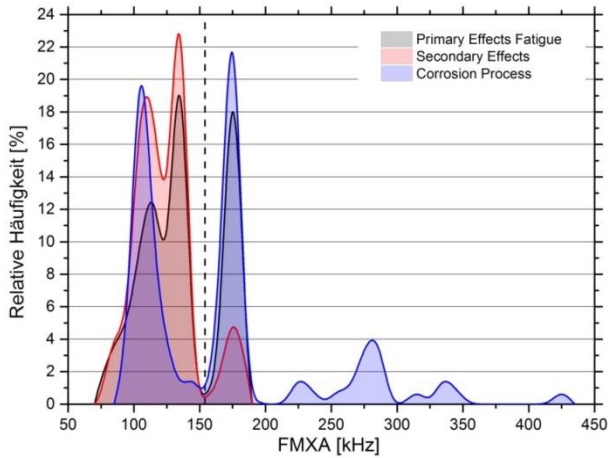


Abb. D-45: Häufigkeitsverteilung der Maximalfrequenz mit eingezeichneter Entscheidungsgrenze

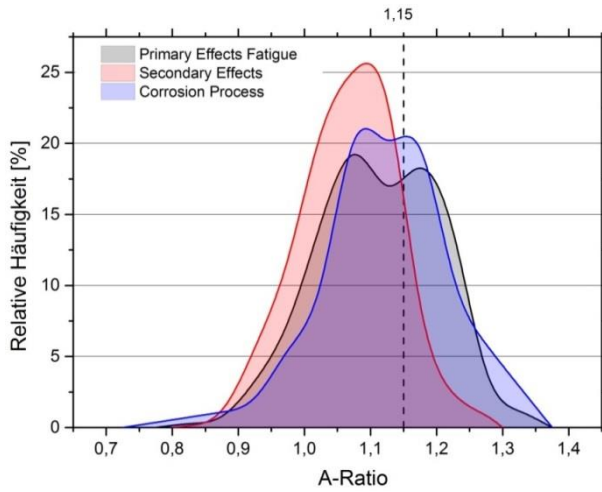


Abb. D-46: Häufigkeitsverteilung des Amplitudenverhältnisses AT_2/AT_1 . Die Grenze von In-plane (IP)- zu Out-of-plane (OOP)-Effekten ist gekennzeichnet

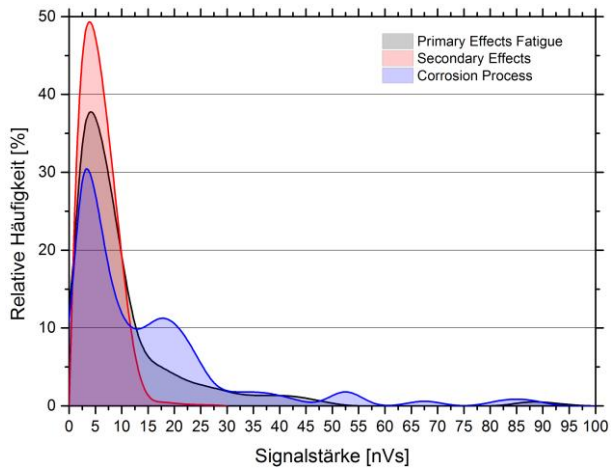


Abb. D-47: Häufigkeitsverteilung der Signalstärke

D.6 Die simulierte Druckprüfung

Die Überdruckprüfung an Druckbehältern ist eines der SE-Verfahren, welches normativ definiert und in der Praxis angewendet wird. Durch statische Belastungen zwischen Abschnitten der Ermüdungsversuche werden Druckprüfungen simuliert. Es soll ein Vergleich zwischen der Nachweisbarkeit von SE durch Druckprüfung und dem SE-Monitoring während des Ermüdungsversuches angestellt werden.

Vor der Belastung wurden die Korrosionsbereiche durch Druckluft gereinigt, so dass sich keine lockeren Korrosionsprodukte mehr im Riss oder im Korrosionsbereich befanden. Beide Korrosionsbereiche sind während der Belastung trocken. Die Nachweisschwelle wurde auf 46 dB_{AE} eingestellt. Die Belastung betrug die maximale Schwingbelastung +10%. Dies entspricht der Belastung einer normgerechten Druckprüfung [Dine05]. Für die durchgeführten Versuche an Platte 5, die hier aufgrund der direkten Vergleichbarkeit der Schadensmechanismen betrachtet wird, ist das ein Kraftwert, der stets einem mittleren Spannungsintensitätsfaktor von $K = 2.500 \text{ N/mm}^{3/2}$ erzeugt und sich darum mit wachsendem Riss verkleinert (vgl. die Belastungsfolge auf S. 75).

Abb. D-48 ist die Lokalisierungsgrafik der statischen Erstbelastung von Versuchsplatte 5. In keinem der drei Ortungsellipsen ist eine signifikante Anzahl von SE-Ereignissen geortet worden. Jedoch erzeugt die Auflagerreibung auch bei der statischen Belastung eine hohe Anzahl an Störgeräuschen.

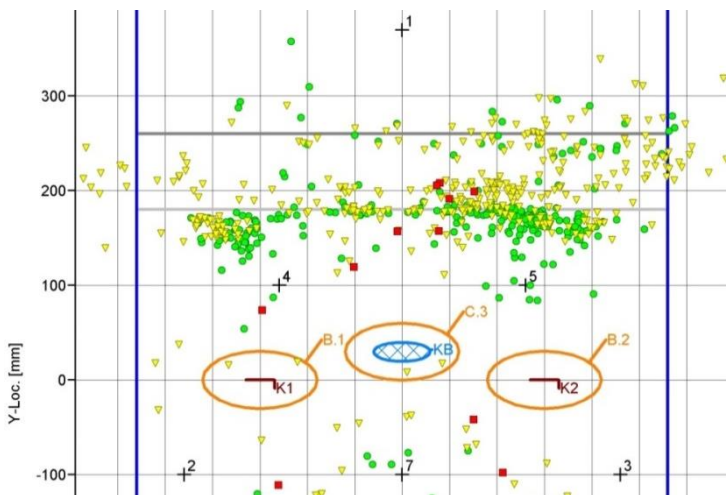


Abb. D-48: Erste statische Belastung der Platte von 0 auf 132 kN mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min; es ist noch kein Riss vorhanden

Erste Indikationen bei der statischen Belastung der Versuchsplatte zeigen sich beim korrodierten Riss bei einer Rissgröße von 51 mm und im Korrosionsbereich nach aktiver Korrosionszeit von 24 Stunden. Die Lokalisierungsgrafik der Belastung ist in Abb. D-49, der Kraftverlauf sowie die kumulierten SE-Ereignisse, die in den Schädigungsellipsen lokalisiert wurden, in Abb. D-50 dargestellt. Hier ist zu beobachten, dass der Riss einen Großteil der SE-Ereignisse zu Beginn des Versuches erzeugt. Danach steigt die Anzahl der SE-Ereignisse mit dem Belastungswert an. Ein ähnliches Verhalten ist auch für die SE-

Ereignisse aus dem Korrosionsbereich erkennbar. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass es sich um sekundäre SE-Quellen wie das Aneinanderreiben und Brechen von Korrosionsprodukten handelt und nicht etwa um die Detektion der Risserweiterung oder der plastischen Deformation des Risses.

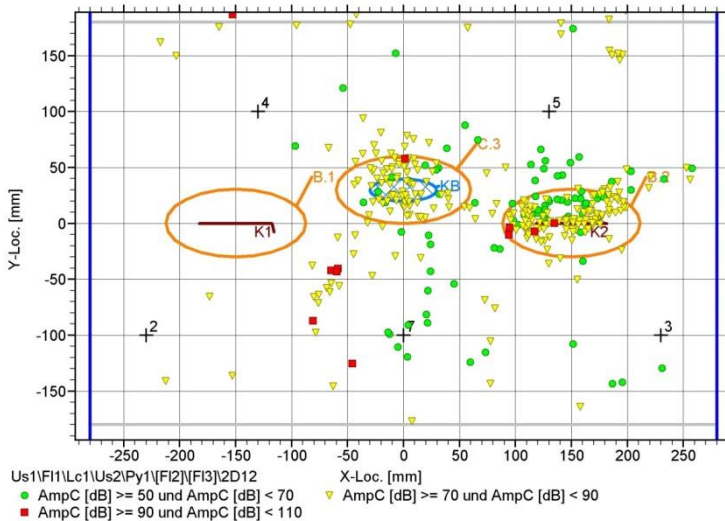


Abb. D-49: Belastung der Platte von 0 auf 132 kN mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm/min; Rissgrößen von K1 und K2: 51 mm

Tab. D-6: Anzahl der SE-Signale und Mittelwerte einiger SE-Parameter sowie Ergebnisse der Klassen-zuteilung nach Klassifizierung mit Klassifikator aus Kap. 4.3 nach statischer Belastung der Versuchsplatte 5 (11 Versuchsdurchgänge, Risslängen von 51 bis 210 mm)

Bereich	Anzahl der SE-Signale	A _{max} [dB _{AE}]	E _{ss} [nVs]	N _c	f _{SP} [kHz]	f _{max} [kHz]	Zuteilung zu Klasse
Mittelwert K1	33	49,99	37,72	21,33	177,18	158,27	1,85
Standartabweichung		5,86	156,48	93,03	24,83	30,97	0,97
Mittelwert K2	659	56,68	139,50	84,46	178,04	152,04	2,18
Standartabweichung		7,26	389,84	210,02	36,27	40,25	0,43
Mittelwert KB	136	54,61	202,17	144,63	220,16	205,82	2,59
Standartabweichung		6,98	452,57	304,04	58,29	77,89	0,72

Erste signifikante SE-Ereignisse produziert der nicht-korrodierte Riss erst bei einer Rissgröße von 191 mm. Bei dieser Rissgröße ist bereits ein Durchbruch der Platte erfolgt; an der Plattenunterseite befinden sich Risse von 127 bzw. 108 mm in K1 und K2. Abb. D-51 zeigt, dass hier eine gleiche Anzahl von SE-Ereignissen von beiden Rissen produziert wird. In K1 werden wegen der Größe des Risses vorrangig sekundäre Effekte auftauchen (Zusammenquetschen der Rissufer auf der Plattenunterseite); diese Annahme wird durch die Ortungsergebnisse unterstützt. Die Amplituden des korrodierten Risses sind höher als diejenigen, die der nicht-korrodierte Riss produziert. Aus K1 kommen Signale mit einer distanzkorrigierten Amplitude bis zu 72 dB_{AE}, aus K2 bis zu 88 dB_{AE}.

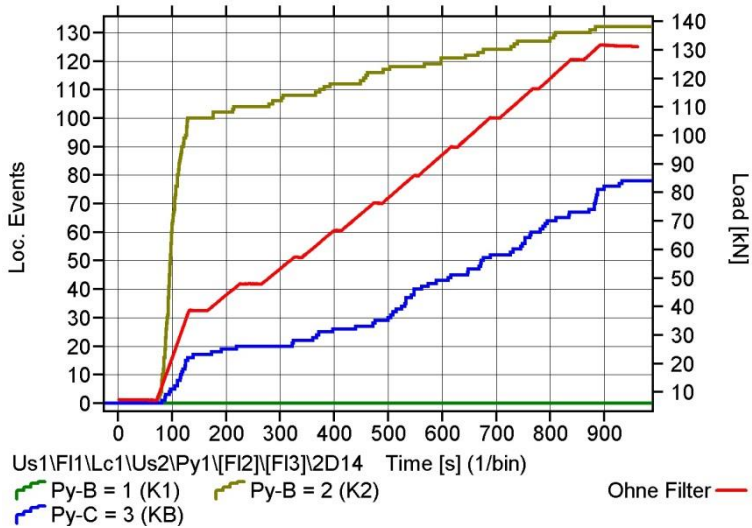


Abb. D-50: Kraftverlauf (rot) und kumulierte Anzahl der in den Schädigungsellipsen lokalisierten SE-Ereignisse; grün: der nicht-korrodierte Riss ($K1 = 51$ mm), gelb: der korrodierte Riss ($K2 = 15$ mm) und blau: der Korrosionsbereich KB

Die Anzahl der SE-Signale, welche in 11 statischen Belastungsprüfungen in den Schädigungsgebieten an Platte 5 nachgewiesen wurden sowie einige SE-Parametermittelwerte dieser Signale sind in Tab. D-6 gelistet. Ferner wurde der in Kapitel 4.3 erstellte 3K-Klassifikator auf die SE-Signale der statischen Prüfungen angewendet. Die Signale aus den Bereichen K1, K2 und KB konnten den Klassen 1 (*primäre Effekte Ermüdungsrisswachstum*), Klasse 2 (*sekundäre Effekte Korrosion*) oder Klasse 3 (*Korrosionsprozess*) eingeteilt werden. Durch die dem Ermüdungsversuch angepassten Klassen passt die Zuordnung nicht genau, jedoch sind die Quellmechanismen ähnlich. Tendenziell scheint die Zuordnung der Schädigungsbereiche in die 3 Klassen richtig. So passen auch die auftretenden Frequenzen in der Tendenz zu den Schadensmechanismen der Ermüdungsversuche.

Abb. D-52 zeigt zusammenfassend die während der Belastung (rot) auftretenden distanzkorrigierten Amplituden der SE-Ereignisse, welchen im Bereich des nicht-korrodierten Risses (grün), des korrodierten Risses (gelb) und im Korrosionsbereich (blau) lokalisiert wurden.

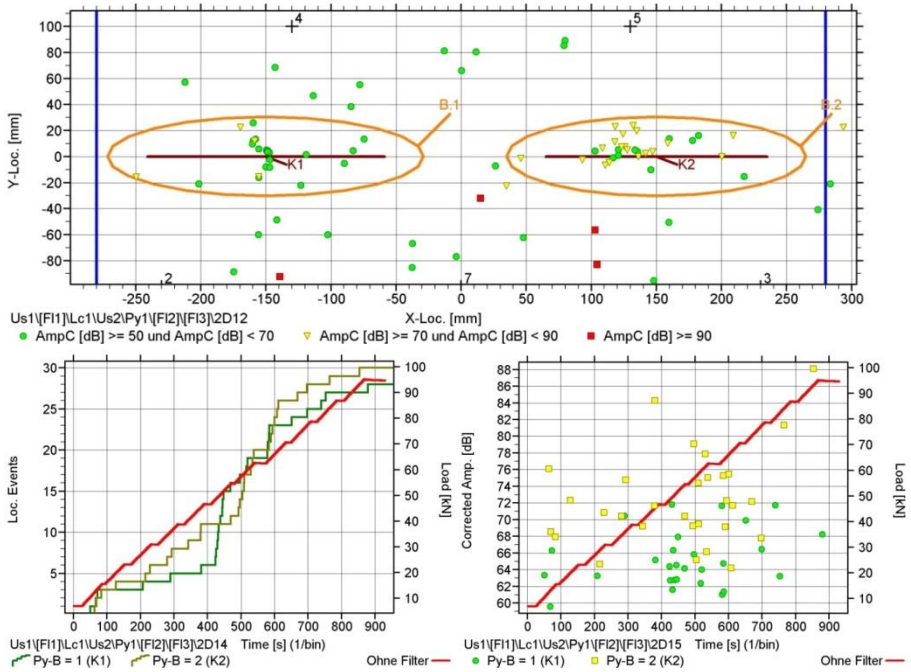


Abb. D-51: Versuchsergebnisse nach statischer Belastung (0 bis 95 kN mit 0,5 mm/min) bei Risslängen von $K1 = 191$ mm und $K2 = 176$ mm. Lokalisierungsgrafik (oben), Kraftverlauf im Vergleich zur Anzahl der in den Schädigungsellipsen lokalisierten SE-Ereignisse (links) und deren distanzkorrigierte Amplituden (rechts)

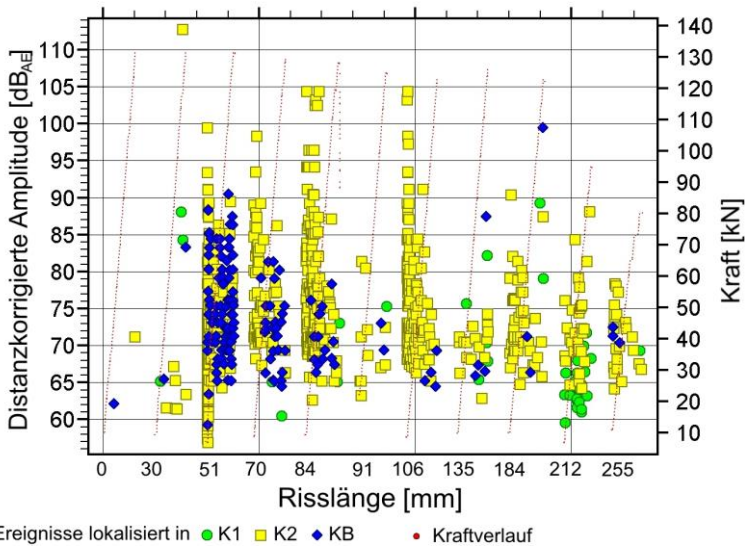


Abb. D-52: Statische Belastungen an Platte 5; Distanzkorrigierte Amplituden der in den jeweiligen Schädigungsellipsen lokalisierten SE-Ereignisse während der Belastungszyklen aus dem nicht-korrodierten Riss (K1), dem korrodierten Riss (K2) und dem Korrosionsbereich (KB); als Risslänge ist jeweils der Mittelwert von K1 und K2 angegeben

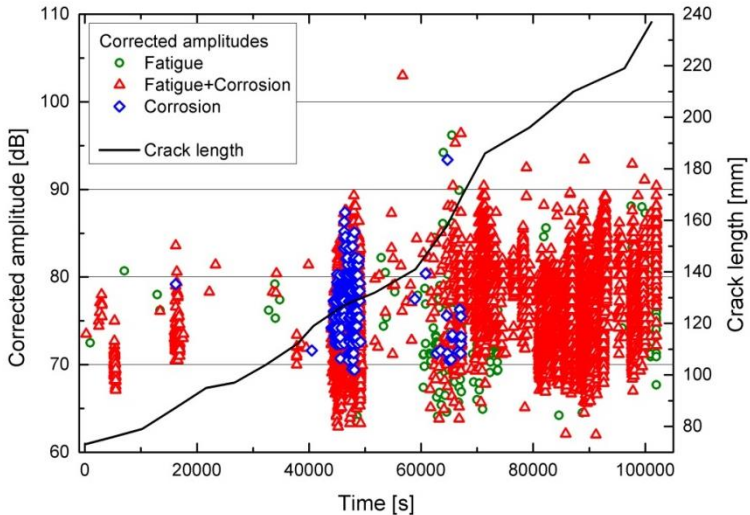


Abb. D-53: Ermüdungsbelastung bei Risswachstum an Platte 5; Distanzkorrigierte Amplituden der in den jeweiligen Schädigungsellipsen lokalisierten SE-Ereignisse aus dem nicht-korrodierten Riss (grün), dem korrodierten Riss (rot) und dem Korrosionsbereich (blau)

D.7 Akustische Messungen im Wasser

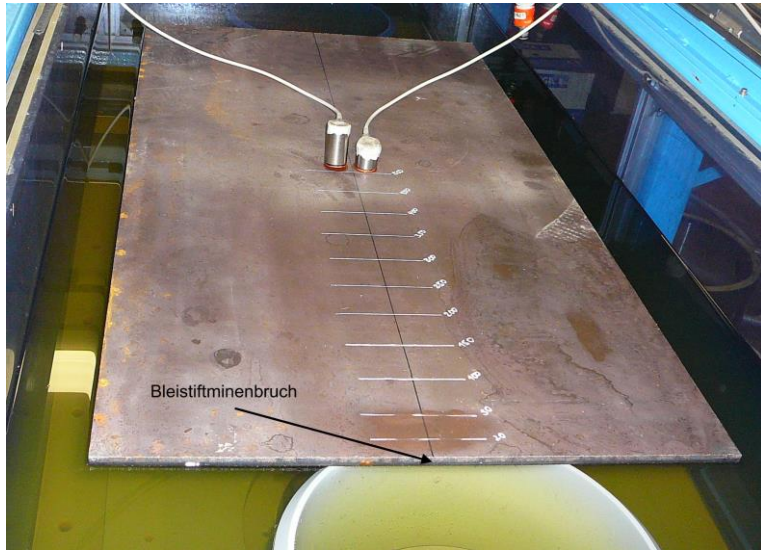


Abb. D-54: Versuchsaufbau für die Messung der Schallschwächung an einer Versuchsplatte, die sich einseitig im Wasser befindet; gemessene Laufwege und somit die Sensorpositionen sind auf der Platte markiert, die Anregung erfolgte in-plane in Platten- und Querschnittsmitte

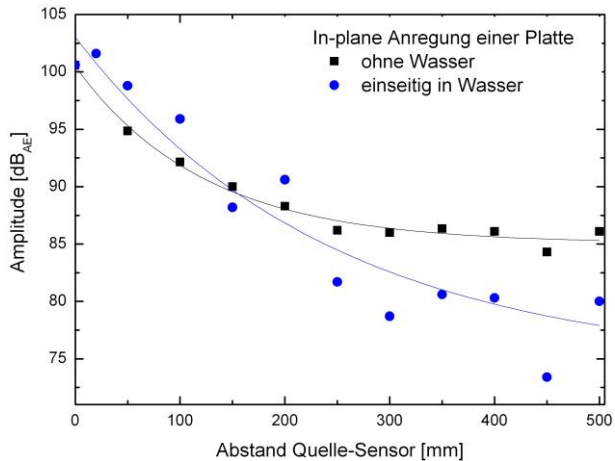


Abb. D-55: Gemessene Schallschwächung nach in-plane-Anregungen einer Versuchsplatte an Luft (schwarz) und einseitig in Wasser (blau); die Messpunkte sind Mittelwert aus jeweils 5 unabhängigen Messungen

D.8 Messungen am Tankfahrzeug

Um einen besseren Einblick in praxisbezogene Bauteile zu bekommen, wurden Messungen an einem Tankfahrzeug durchgeführt. Während diesen Messungen im statischen und bewegten Zustand des Tankfahrzeugs wurden künstliche SE-Quellen aktiviert und der Tank mittels SEP überwacht. Dabei waren von besonderem Interesse:

- Welche Quellen können im Ruhezustand/ in Bewegung detektiert werden?
- Ist eine Lokalisierung der verwendeten SE-Quellen möglich?
- Ist eine Klassifizierung der verwendeten SE-Quellen möglich?

Behältercharakteristika, Messsystem und verwendete Schallemissionsquellen

Der zu prüfende Tankcontainer 20' UN Portable Tank wurde für den Transport von flüssigem Stickstoff verwendet. Das in *Abb. D-56* zu sehende Sonnendeck wurde für die SE-Prüfung entfernt, um eine vollständige Abdeckung des Behältermantels mittels SE-Sensoren zu gewährleisten und künstliche SE-Quellen zu platzieren. Seit 2010 wurde der Tank ausschließlich mit Druckluft belastet. Einmalig wurde der Tank mit Wasser befüllt, was die Oberflächenkorrosion in Inneren des Tanks erklärt, wie sie in *Abb. D-57* zu sehen ist.



Abb. D-56: Aufnahme des zu prüfenden Tankcontainers 20' UN Portable Tank

Messsystem

Da der Tank während der Test mit nicht explosiven Medien (Wasser und Luft) gefüllt ist und ausschließlich in nichtexplosionsgefährdeten Bereichen geprüft wird, ist es möglich, das auch für die Versuchsplatten verwendete Testequipment zu verwenden (s. *Tab. D-7*). Für Messungen in Gefahrzonen müssen nach ATEX zertifizierte, eigensichere Sensoren verwendet werden, wie sie unter anderem innerhalb des Projektes CORFAT entwickelt wurden [VaTh11]. Die Sensorpositionen sind in *Abb. D-58* dargestellt. Es wurde mit sechs Sensoren gemessen, die eine Abdeckung des halben zylindrischen Tankmantels ermöglichten. Die Deckplatten wurden nicht überwacht. Der Sensor auf Position 4 ist der höchst positionierte Sensor und der Einzige mit Luft zu Luft Bedingungen.

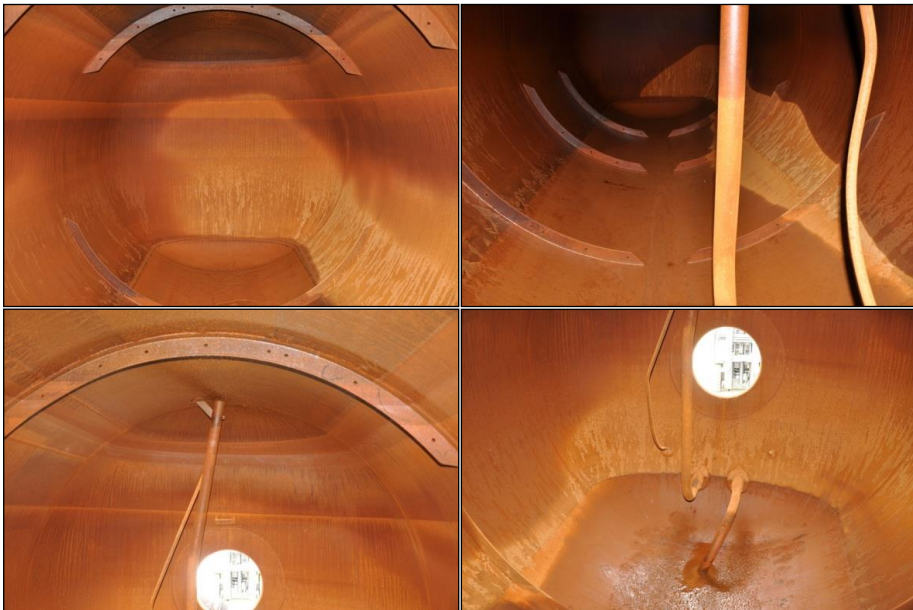


Abb. D-57: Innenansicht des Tankcontainers

Tab. D-7: SE-Messausrüstung

SE-Prüfsystem	PAC-DiSP
SE-Sensoren	VS150-RIC
Koppelmittel	Montage Paste Typ AKS 2000 COPA
Energieversorgung während mobiler Messungen	Generator Typ Mittronik C3000SHHPS-0000Y

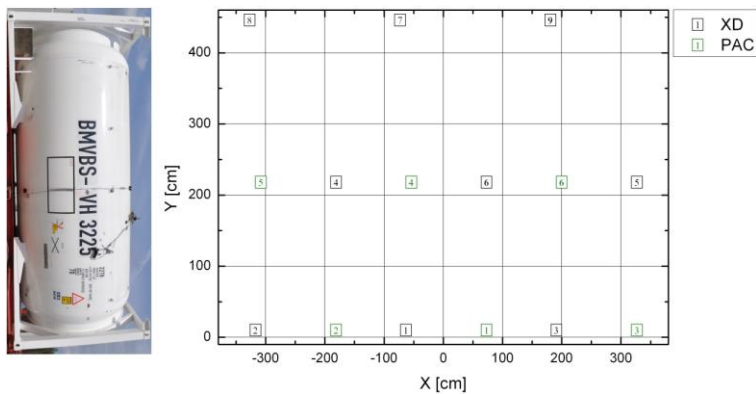


Abb. D-58: Positionen der Sensoren auf dem Tankmantel; schwarz: Sensoren des Projektpartner TÜV Österreich und grün: eigene Sensoren

SE-Systemspezifikationen

Die Beschichtung des Tanks wurde an allen Positionen der SE-Sensoren und künstlichen Quellen vor den Tests entfernt. Für die Ankopplung der Sensoren wurde die Hochtemperatur Montagepaste AKS 2000 COPA verwendet. System- und Ortungsspezifikationen des Prüfsystems sind in *Tab. D-8* und *Tab. D-9* gelistet.

Tab. D-8: SE-Systemspezifikationen

Frequenzfilter	20...400 kHz
Vorverstärkung	34 dB
Nachweisschwelle	(28)...32 dB _{AE} (stationäre Tests) / 40 dB _{AE} (Bewegte Tests)
Hit definition:	
Rearm time (HLT)	2 µs
Duration discrimination time (HDT)	400 µs
Waveform recording:	
Sample rate	5 MHz
Samples per TR-set	2048 ≙ 409.6 µs
Pre-trigger	102.4 µs

Tab. D-9: SE-Ortungsspezifikationen

1st-hit discrimination time (FHCDT)	2 ms
Gruppengeschwindigkeit	5000 m/s
Ortungstyp	Planar, zylinder
Max. Hitanzahl für Ortung	4

Verwendete Schallemissionsquellen

Für die Prüfung wurde ein rissfreier Tankcontainer verwendet. Korrosion ist dagegen im gesamten Innenraum vorhanden. Um definiert lokalisierte SE-Quellen zu messen, müssen diese künstlich am Tank erzeugt werden. Quellen des Projektpartner TÜV-Österreich sind im Folgenden gekennzeichnet. Dazu wurden folgende künstliche SE-Quellen verwendet, deren Positionen am Tank in *Tab. D-10* angegeben sind:

- Bleistiftminenbruchttest (Ø 0.5 mm / 2H) für die
 - Systemüberprüfung (Sensoren und Messsystem)
 - Indikationsüberprüfung (der Ort lokalisierter Ereignisse (Cluster) wird festgestellt)
- Auto-Puls der Sensoren (TÜV)
- Ultraschallpulser (BAM)
 - Prüfkopf: G0,25G [Gein14]
 - Resonanzfrequenz: 174 kHz
 - Bandbreite: 102 %
 - Signaldauer: 8 µs
- Sandquelle, künstlicher Ermüdungsriß (BAM)
 - Durch eine schmale Finne werden Sandkörner auf der Tankoberfläche zerdrückt

- Wird elektrisch gesteuert
- Geometrie natürlichem Riss nachempfunden
- Entwickelt an der BAM von J. Bohse
- Künstliche Korrosionsquelle (TÜV)
 - Korrosion wird mithilfe einer Säure innerhalb eines Behälters erzeugt, der an die Tankoberfläche angekoppelt wird

Tab. D-10: Verwendete künstliche SE-Quellen und ihre Positionen am Tank

Quelle	Kürzel	Position am Tank [mm]
Hsu-Nielsen-Quelle	HSU	variabel
Auto-Puls (XD-Sensoren)	TUV AP	Positionen der XD-Sensoren (s.u.)
US Pulser	P	y = 1000 x = -2510
Sandquelle (künstlicher Ermüdungsriß)	SQ	1430 ≤ y ≤ 1630 x = -300
Korrosionsquelle 1	KQ1	900 ≤ y ≤ 1100 -2535 ≤ x ≤ -2485
Korrosionsquelle 2	KQ2	650 ≤ y ≤ 850 -325 ≤ x ≤ -275

Vorversuche

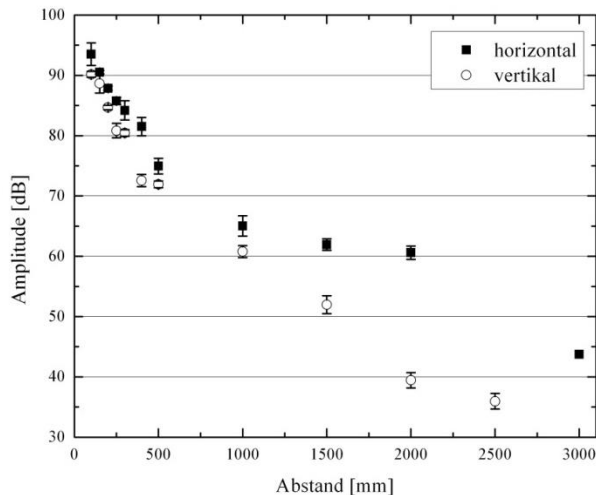


Abb. D-59: Schallschwächungskurve am Tankcontainer in horizontale und vertikale Richtung

In Vorversuchen wurde die Schallgeschwindigkeit (s. Tab. D-11) und Schallschwächung (s. Abb. D-59) über Anregung mit der HN-Quelle gemessen. Ferner wurden die künstlichen SE-Quellen getestet. Während dieser Vorversuche war der Tank bis ca. zu 90 % seines Volumens mit Wasser befüllt. Der Tank wurde während der Vorversuche nicht bewegt und die Motoren der Zugmaschine und des Stromgenerators waren ausgeschaltet.

Bei der Messung der Schallschwächung ist eine Richtungsabhängigkeit vorhanden. Die Schallschwächung in vertikale Richtung ist höher als in horizontale Richtung, zur Berech-

nung der distanzkorrigierten Amplitude wurde ein Mittelwertes für die Schallschwächungskurve gebildet.

Tab. D-11: Gemessene Schallgeschwindigkeit in am Tankcontainer

Material	Messrichtung	Wellengeschwindigkeit [m/s]	Messabweichungen [m/s]
Stahl	horizontal	5104	67
	vertikal	5053	181
Wasser		1488	52

Systemüberprüfung mit HN-Quelle und Auto-Puls

HN-Anregungen an allen Sensorpositionen und Auto-Puls der TÜV-Sensoren wurden vor und nach jedem Fahrtstest als Systemüberprüfung durchgeführt. Die Ortungsergebnisse passen sehr gut zu den Sensorpositionen. Beispielhaft zeigt *Abb. D-60* die Ortungsergebnisse nach HN-Anregungen und *Abb. D-61* nach dem Auto-Puls.

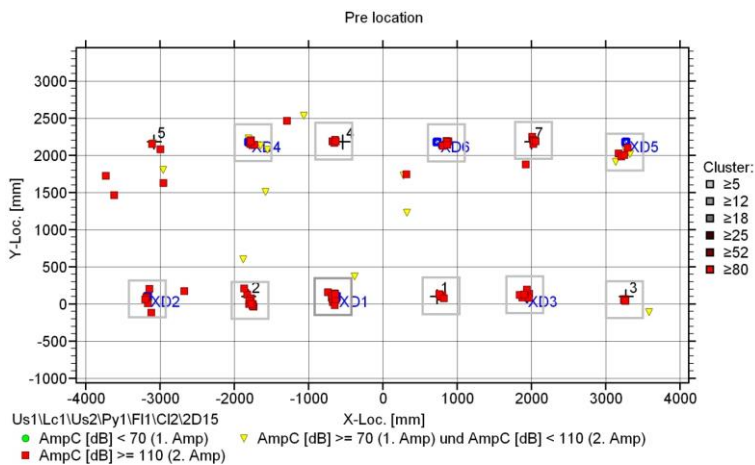


Abb. D-60: SE-Ortung der HN-Quellen an den Sensorpositionen; eigene Sensoren sind durch schwarze Kreuze, TÜV-Sensoren durch blaue Quadrate gekennzeichnet; Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

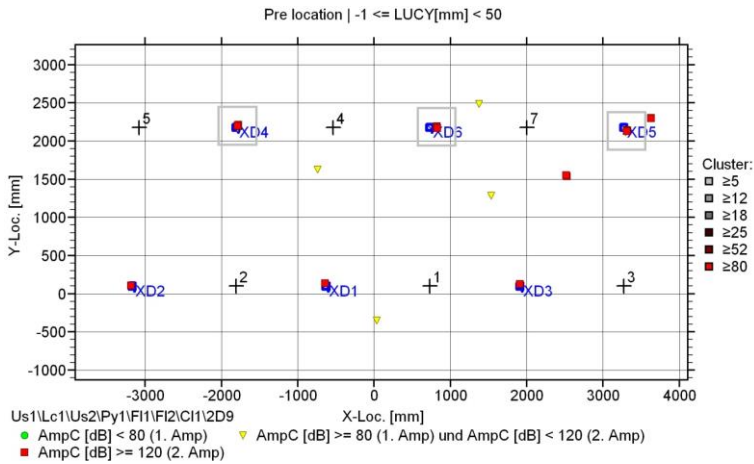


Abb. D-61: SE-Ortung vom Auto-Puls der TÜV-Sensoren; eigene Sensoren sind durch schwarze Kreuze, TÜV-Sensoren durch blaue Quadrate gekennzeichnet; Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

Ultraschallpulsler



Abb. D-62: Aufbau des Pulsgenerators, eines Funktionsgenerators zur Triggerung der Puls-Rate und den Ultraschallpulsler am Tank

Mithilfe eines Pulsgenerators zur Anregung des US-Prüfkopfes wurden Pulse auf vier verschiedenen Energieniveaus generiert mit einer Pulsrate von 1 Puls/Sekunde (s. Abb. D-62). Aufgrund des Niveaus der Maximalamplituden lassen sich die vier verschiedenen Energieniveaus des Pulsgenerators unterscheiden (s. Abb. D-63). Die Ortungsgenauigkeit nimmt mit dem Energieniveau ab (Abb. D-64). Die Anregungen des niedrigsten Energieniveaus mit einer distanzkorrigierten Amplitude AmpC = 96 dB_{AE} kann nur geortet werden, wenn eine geringere Schallgeschwindigkeit angenommen wird. In Abb. D-65 können alle Energieniveaus geortet werden. Dort wurde mit einer Schallgeschwindigkeit von 3.300 m/s gearbeitet, welche bei der Ankunftszeit von der energiereichen A₀-Wellenmode ausgeht.

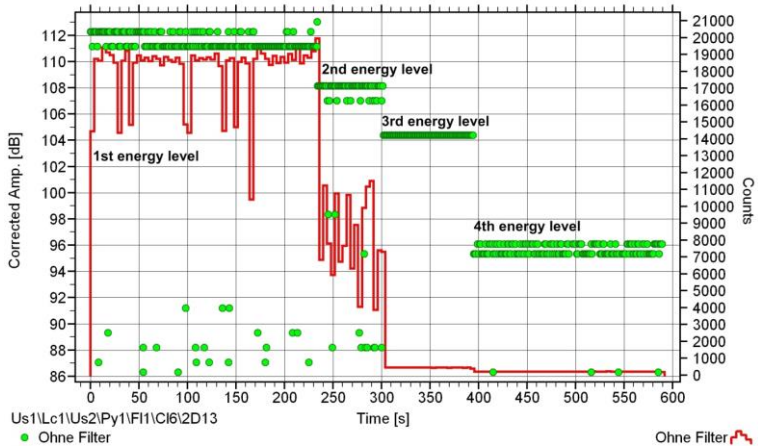


Abb. D-63: Distanzkorrigierte Amplituden und Counts nach Anregung durch US-Puls; Puls auf 4 Energieniveaus; Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

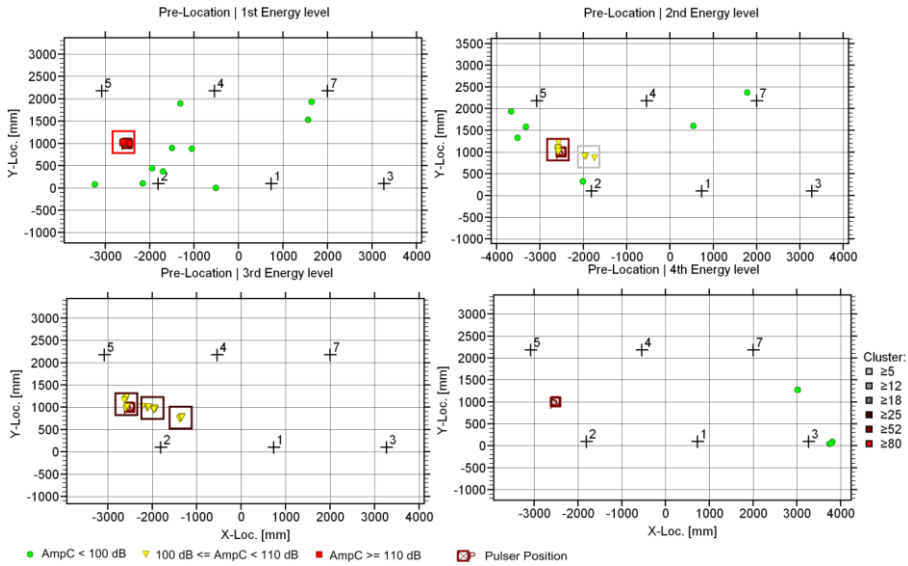


Abb. D-64: SE-Ortung des Ultraschallpulsers, abhängig vom Energieniveau des Pulses; Schallgeschwindigkeit: 5000 m/s

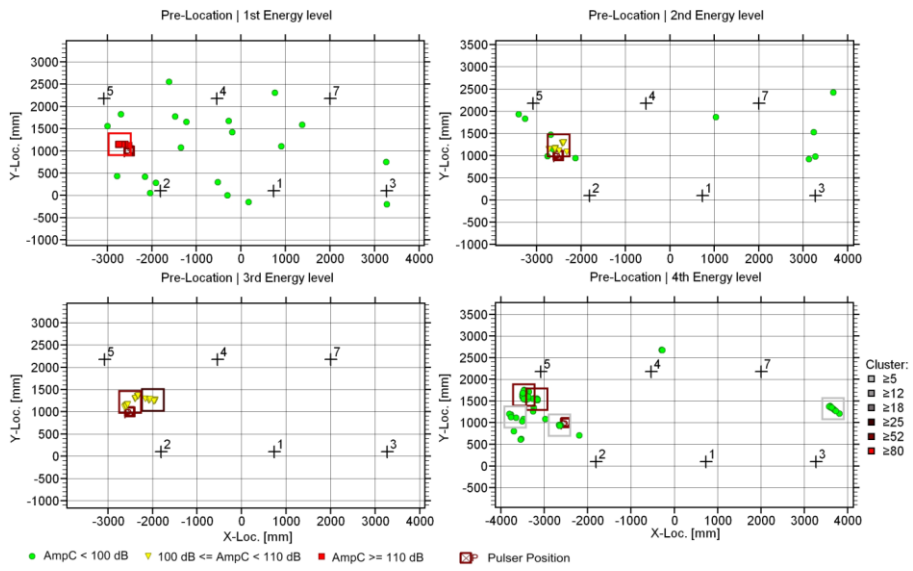


Abb. D-65: SE-Ortung des Ultraschallpulsers, abhängig vom Energieniveau des Pulses; Schallgeschwindigkeit: 3300 m/s

Künstliche Rissquelle

Die künstliche Rissquelle, oder auch Sandquelle (Abb. D-66) wurde drei Mal herunter- und wieder hochgefahren. Die Maximalamplituden und die Ortungsergebnisse sind in Abb. D-67 und Abb. D-69 zu sehen.



Abb. D-66: Künstliche SE-Quellen am Tank: Sandquelle SQ (links) mit Funkverbindung (mitte) und Korrosionsquelle KQ2 (rechts)

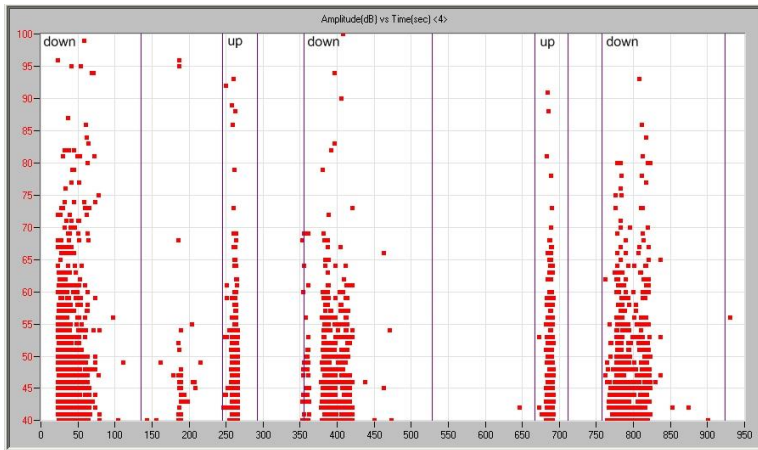


Abb. D-67: Maximalamplituden über der Zeit, detektiert vom nächsten Sensor, Kanal 4, während ferngesteuerter Aktivierung der Sandquelle SQ. Nachweisschwelle: 28...30 dB_{AE}

Künstliche Korrosionsquelle

Die künstlichen Korrosionsquellen KQ1 und KQ2 wurden über 1 Stunde auf der Tankmanteloberfläche aktiviert (Abb. D-68). Die Ortungsergebnisse sind in Abb. D-70 dargestellt. Es konnte nur KQ2 geortet werden, was vermutlich an der Position von KQ1 liegt, die kopfüber an der Tankwand mit Magnethaltern befestigt wurde. Der Druck mag für eine gute Ankopplung zu gering sein, so dass die Übertragung des Körperschalls auf die Tankwand nicht ausreichte. Die Position von KQ2 konnte jedoch durch die Ortung bestimmt werden.



Abb. D-68: Korrosionsquellen KQ1 (links) und KQ2 (rechts)

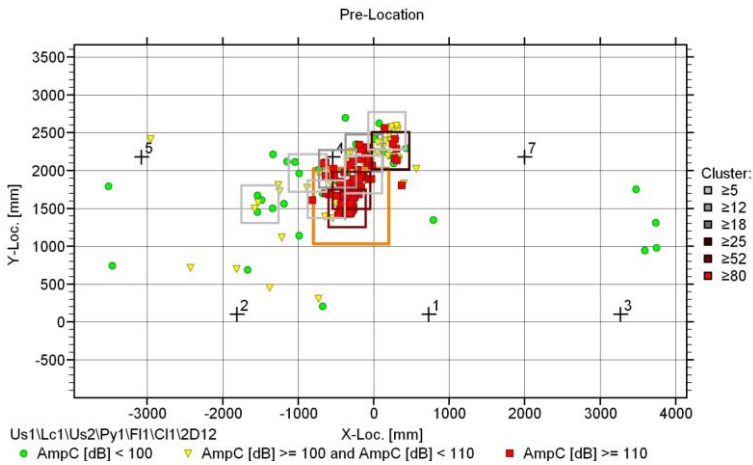


Abb. D-69: SE-Ortung der künstlichen Rissquelle SQ

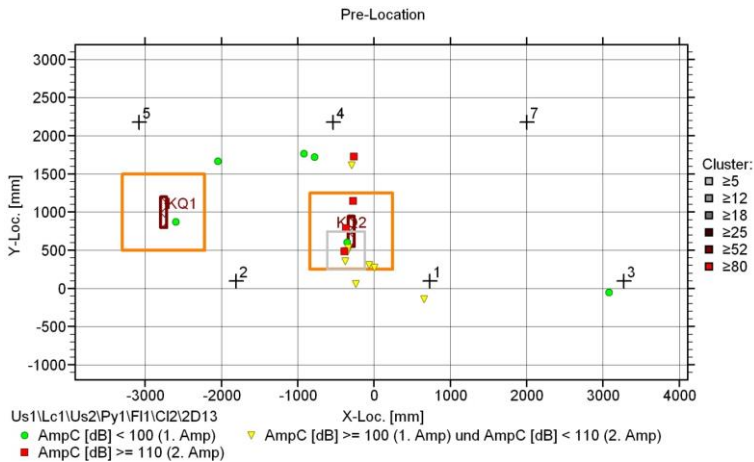


Abb. D-70: SE-Ortung durch aktive künstliche Korrosionsquellen KQ1 und KQ2 über eine Stunde. Die dunkelroten Rechtecke zeigen die Quellenpositionen. Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

SE-Überwachung während der Fahrt

Die Fahrversuche mit dem Tankwagen wurden auf einer asphaltierten Teststrecke und einer Kieselstraße durchgeführt. Während der Tests war der Tank nicht druckbeaufschlagt und zu 90 % seines Volumens mit Wasser befüllt. Für die Stromversorgung des SE-Messsystems wurde ein Stromgenerator verwendet, der jedoch bezüglich der Tankstruktur akustisch isoliert werden konnte.

Die Asphaltstrecke besitzt eine Länge von etwa 2.000 m und war in einem sehr guten Zustand (s. Abb. D-71). In zwei Testphasen wurde mit Geschwindigkeiten von 20 bis 30 km/h, bzw. 50 km/h gefahren.



Abb. D-71: Asphaltstraße für die Testfahrt

Im ersten Testabschnitt mit einer Fahrgeschwindigkeit von 20 bis 30 km/h auf gerade Asphaltstraße wurden mit einer Nachweisschwelle von 40 dB_{AE} nur wenige SE-Ereignisse lokalisiert (vgl. Abb. D-72). Die Ereignisse wurden ausnahmslos an und um der Sandquelle lokalisiert, die jedoch in diesem Versuchsabschnitt noch nicht aktiviert wurde. Die entstandenen SE-Ereignisse können aus der Bewegung der Sandkörner in der Quelle während der Fahrt resultieren oder von der Regenabdeckung der Quelle stammen (vgl. Abb. D-73).

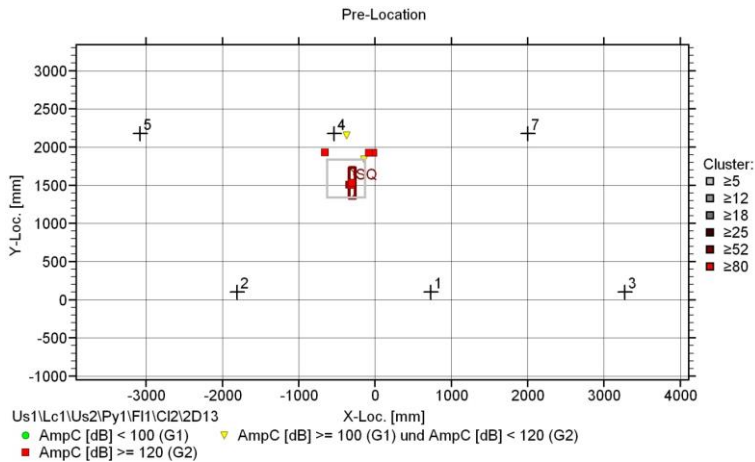


Abb. D-72: Ortungsergebnisse: langsames Fahren auf Asphalt ohne Quellaktivierung. Die Position der Sandquelle SQ ist als dunkelrotes Rechteck markiert. Nachweisschwelle: 40 dB_{AE}



Abb. D-73: Fahrtst auf einer Asphaltstraße; die am Tank installierte Sandquelle ist zum Schutz vor Regen mit einer Plastikfolie bedeckt

In einem zweiten Versuchsabschnitt wurde eine Fahrgeschwindigkeit von bis zu 50 km/h erreicht. Es wurde ein Wendemanöver durchgeführt und die Sandquelle über Funk aktiviert. Die Ortungsergebnisse in Abb. D-74 zeigen hauptsächlich drei Ortungsbereiche, in denen sich Cluster anhäufen oder starke Amplituden auftauchen. An und um der künstlichen Rissquelle SQ wurden einige Ereignisse mit distanzkorrigierten Amplituden über 120 dB_{AE} lokalisiert. Die anderen beiden Bereiche sind gekennzeichnet durch ein hohes Aufkommen an Clustern, innerhalb derer sich Ereignisse mit geringeren Amplituden befinden. Diese Bereiche befinden sich am Tanksattel, dort, wo der Tankmantel ans Gestell geschweißt wurde. Wie in der zeitlichen Auflösung in Abb. D-75 zu sehen ist, werden der Hauptteil der SE-Ereignisse auf gerade Asphaltstrecke bei einer hohen Fahrgeschwindigkeit erzeugt.

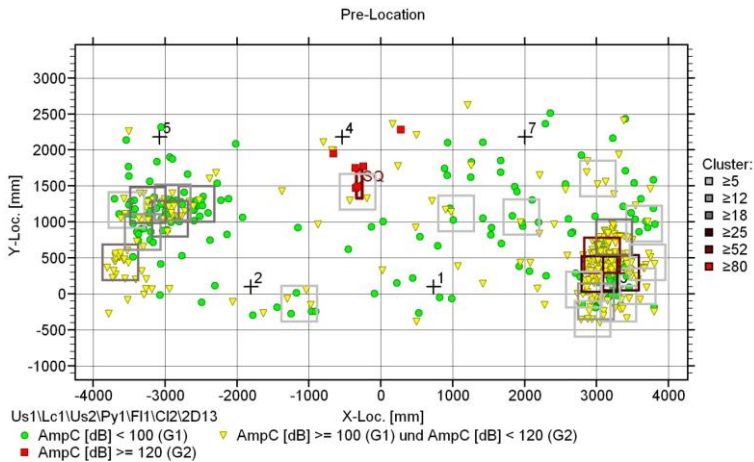


Abb. D-74: Ortungsergebnisse: Fahren auf Asphalt mit einmaliger Aktivierung der Sandquelle. Nachweisschwelle: 40 dB_{AE}

Auf der Teststrecke Kieselstraße (Abb. D-76) wurde ein Weg von 500 Metern zurückgelegt, auf dem durch mehrere Schlaglöcher und mit einer Geschwindigkeit von 10 bis 20 km/h gefahren wurde. Im Ortungsgraph (Abb. D-77) sind die SE-Ereignisse eingetragen, die distanzkorrigierte Amplituden von 90 bis 120 dB_{AE} besitzen und nahezu statistisch auf dem gesamten Tankmantel auftauchen. Es können jedoch einige Cluster geformt werden, die mit der Position der Tanksädel übereinstimmen, wie sie bereits vom Fahrttest auf der Asphaltstraße bekannt waren. Insgesamt entstehen bei unebenen Straßenverhältnissen sehr viel mehr Störgeräusche als auf ebener Straße.

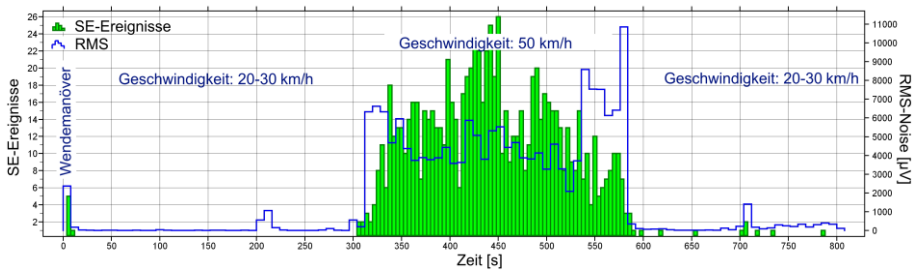


Abb. D-75: Zeitabhängige Darstellung der SE-Ereignisse und des RMS-Noise-Wertes während der SE-Überwachung einer Fahrt auf der Asphaltstraße. Der Wert RMS-Noise (RMS = Root Mean Square = $\sqrt{1/T \int_0^T U(t)^2 dt}$ in μV) ist das kontinuierliche Signal vor einer Überschreitung der Nachweisschwelle und somit einer Hit-Aktivierung und repräsentiert einen Wert für das Hintergrundgeräusch einer Messung



Abb. D-76: Fahren auf einer Kieselstraße

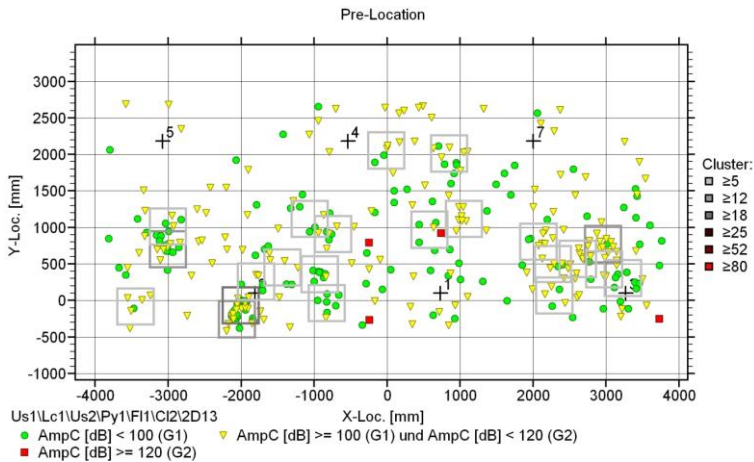


Abb. D-77: Lokalisierte SE-Ereignisse beim Fahren auf eine Kieselstraße. Nachweisschwelle: 40 dB_{AE}

Hydraulische Druckprüfung

Nach den Fahrtests wurde eine hydraulische Druckprüfung durchgeführt. Die Korrosionsquelle KQ1 wurde während der Druckprüfung aktiviert. Bei einem Innendruck von 23 bar erschien ein Leck am Dichtungsring des Mannloches.

Die Druckaufbringungsrate variierte mit dem Druckniveau, betrug jedoch für Drücke ≥ 10 bar ca. 0,5 bar/min. Die Druckaufbringung wurde bei Druckniveaus von 50 % (=11 bar) und 65 % (=15 bar) des Arbeitsdruckes gestoppt und etwa 5 Minuten gehalten.

Abb. D-78 zeigt, dass die lokalisierten SE-Ereignisse mit dem Verlauf des steigenden Innendruckes korrelieren. In Abb. D-79 zeigt eine Ortungsgrafik die Verteilung der SE-Ereignisse auf dem Mantel und stellt eine Verbindung zu den Bereichen des Tanks her, von denen diese Ereignisse ausgehen.

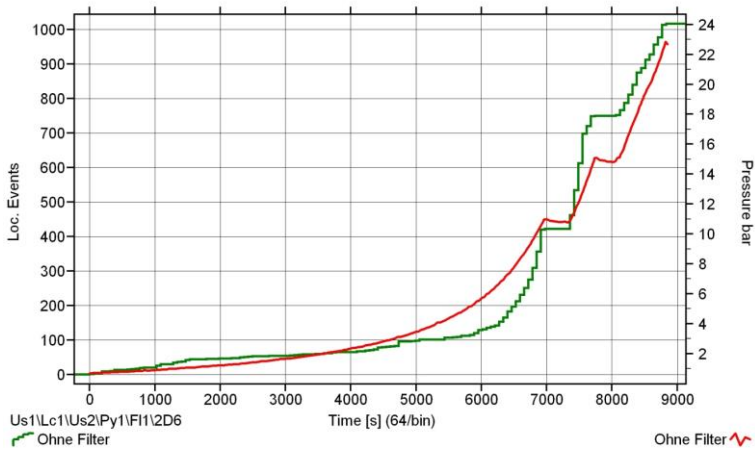


Abb. D-78: Lokalisierte SE-Ereignisse Amplituden im Vergleich zum angelegten Druck beim hydraulischer Drucktest. Nachweisschwelle: 32 dB_{AE}

BMT-Überprüfung von SE-aktiven Bereichen

Die Bereiche, die in den Fahr- und Druckprüfungen durch eine hohe SE-Aktivität (Clusterbildung) aufgefallen sind, werden durch die Anregung mit einem Bleistiftminenbruch auf dem Tank lokalisiert. Die Korrelation der Ortung in der SE-Überwachung und BMT-Überprüfung zeigt die Bereiche hoher SE-Aktivität an. So kann in der Praxis an diesen Stellen eine Follow-up-Prüfung mit anderen ZfP-Methoden vorgenommen werden, um die SEP-Indikationen zu verifizieren oder falsifizieren. Die Ortungsergebnisse der BMT-Überprüfung sind in *Abb. D-80* dargestellt.

Durch visuelle Überprüfung konnte weder innen noch außen ein Riss erkannt werden. Um die hier durch die Schallemissionsprüfung markierten Bereiche zu überprüfen, bedarf es weiteren Methoden der zerstörungsfreien Prüfung. Die meisten Cluster entstanden an Schweißnähten. Aufgebrachte Spannungen können diverse SE-Quellen in Schweißnähten aktivieren, ohne dass eine sich aktiv entwickelnde Fehlstelle darunter ist.

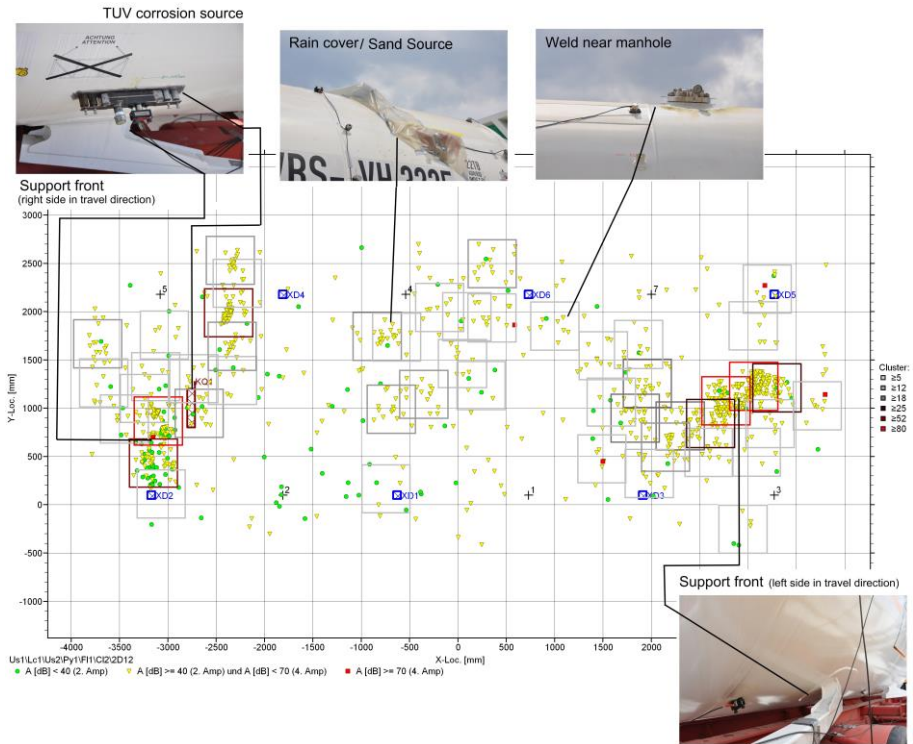


Abb. D-79: Lokalisierung von SE-Clustern durch Druckaufbau bis 23 bar und die korrelierenden Bereiche am Tank

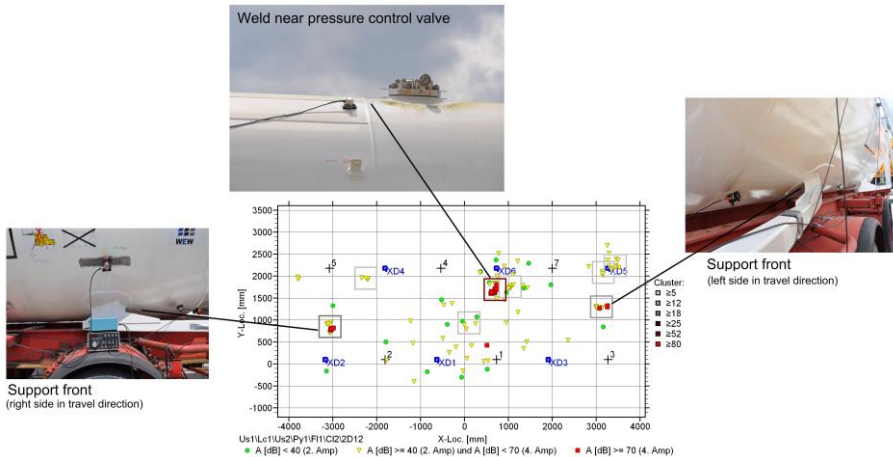


Abb. D-80: Verifikation durch HN-Quellen der Cluster-Positionen, welche durch die Druckprüfung erzeugt wurden, und ihre Positionen am Tank

Evaluation der Schallemissionsdaten

Der Wert **RMS-Noise** (RMS = Root Mean Square) ist das kontinuierliche Signal vor einer Überschreitung der Nachweisschwelle und somit einer Hit-Aktivierung und repräsentiert einen Wert für das Hintergrundgeräusch einer Messung.

$$RMS = \sqrt{1/T \int_0^T U(t)^2 dt} \text{ in } \mu V$$

Gemessene Maximalwerte für den RMS-Noise Wert:

- Stationäre Prüfungen: 20 dB_{AE}
- Fahrt auf Asphaltstraße: 20 dB_{AE}
- Fahrt auf Kieselstraße: 21,6 dB_{AE},
- Wendemanöver auf Asphaltstraße: 23,5 dB_{AE}

Aus der gemessenen Schallschwächungskurve, den gemessenen maximalen Hintergrundgeräuschen (RMS-Noise), der gewählten Nachweisschwelle und einem K-Wert von 12 dBAE wurden die **maximalen Sensorabstände und die Evaluationsschwelle** nach [Dine05] berechnet (s. Abb. D-81 und Abb. D-82).

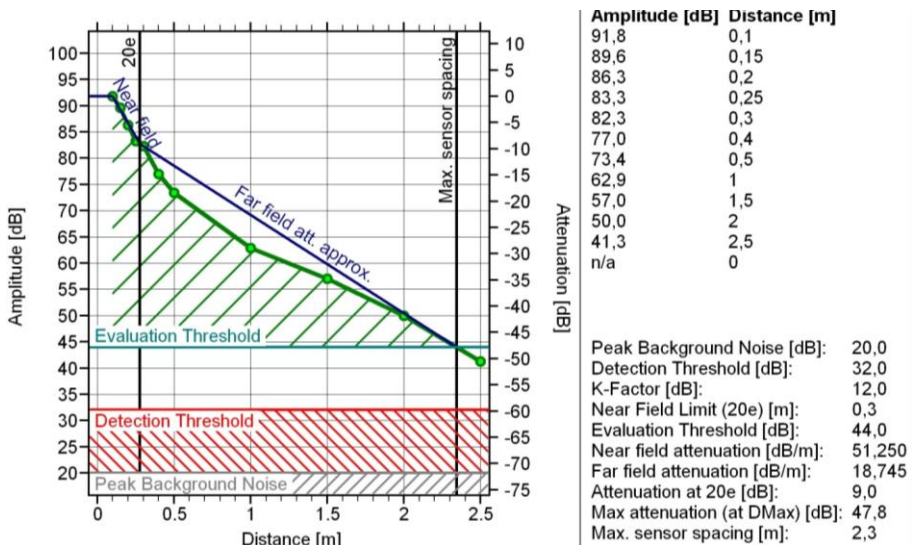


Abb. D-81: Berechneter maximaler Quelle-Sensor-Abstand und der Evaluationsschwelle nach Vorversuchen mit BMT, wassergefüllter Tank

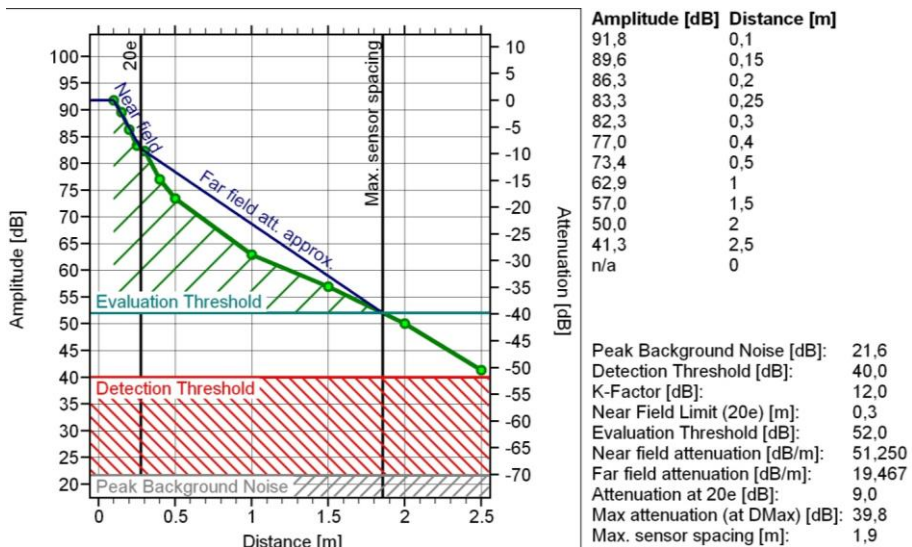


Abb. D-82: Berechneter maximaler Quelle-Sensor-Abstand und der Evaluationsschwelle nach Vorversuchen mit BMT, wassergefüllter Tank während der Fahrttests

Für die vorhandenen Versuchsbedingungen der stationären Tests ergaben sich folgende Werte:

- Maximaler Sensorabstand d_{\max} : 2,3 m
- Evaluationsschwelle: 44 dB_{AE}
- Maximale Schallschwächung bei d_{\max} : 47,8 dB.

Für die Versuche während der Fahrt ergaben sich:

- Maximaler Sensorabstand d_{\max} : 1,9 m
- Evaluationsschwelle: 52 dB_{AE}
- Maximale Schallschwächung bei d_{\max} : 39,8 dB.

Ortungsergebnisse

- Die Ortungsgenauigkeit lag mit maximal 0,25 m bei den nach [Dine05] erlaubten $\pm 5\%$ des Sensorabstandes (2,54 m) für die Ortung mit sechs SE-Sensoren für die Schadensquellen
 - Bleistiftminenbruch,
 - Sensor Auto-Puls,
 - Ultraschallpuls,
 - Künstliche Rissquelle (Sandquelle),
 - Künstliche Korrosionsquelle KQ2.
- Die künstliche Korrosionsquelle KQ1 konnte, vermutlich aufgrund niedriger Amplituden durch schlechte Ankopplung, nicht nachgewiesen werden.
- Während der Fahr- und des Druckversuche wurden Bereiche hoher Spannungen durch die planare Ortung von SE-Ereignisse angezeigt (Sattel, Schweißnähte).

- Die detektierten Bereiche wiesen nach Sichtprüfung keine Fehlstellen auf; diese Bereiche müssten mit nachfolgenden ZfP-Methoden überprüft werden.
- Aufgrund einer Nachweisschwelle von 40 dB_{AE} konnten während der Fahrversuche nur korrigierte Amplituden von $A_{\text{kor}} \geq 90$ dB_{AE} korrekt geortet werden.

Klassifikation von SE-Quellen

Eine Klassifizierung der nachgewiesenen Quellen fand anhand der automatisierten Mustererkennung statt. Der für die Plattenversuche erstellte Klassifikator wurde auch hier verwendet (Tab. 4-3), obgleich sich die Materialdicke verändert hat und die Quelle-Sensorabstände sich mit dem Ort der Quelle ändern (wenngleich immer das Signal des Sensors für die Klassifizierung verwendet wird, der der Quelle am nächsten ist).

Die SE-Aktivität der **künstlichen Rissquelle** basiert auf das Brechen und Reiben von Sandkörnern auf der Oberfläche der Tankwand und ist ein out-of-plane Effekt. Die Ergebnisse der Klassifikation mit dem 6K-Klassifikator sind in Abb. D-83 sowie Abb. D-84 dargestellt. 14% der SE-Ereignisse wurden der Klasse „Korrosionsprozess“ zugeordnet, während beinahe 60% der Signale dem Mechanismus „Brechen von Korrosionsprodukten“ und 24% dem „Ermüdungswachstum“ zugeteilt wurden. Da sowohl K3-1 als auch K3-2 OOP-Klassen sind, ergibt diese Zuteilung für die Sandquelle durchaus Sinn.

Tab. D-12: Klassifikationsergebnisse der SE-Ereignisse aus der künstlichen Rissquelle. Gesamtanzahl der lokalisierten Ereignisse: 319

SE-Ereignis in Klasse			Anteil an Ereignissen [%]
Klassennummer	Klassenname	SE-Quellmechanismus	
1	K1-1	Ermüdungsrisswachstum/ plastische Deformation	24,1
2	K1-2	Bruchflächenreibung	2,5
3	K2-1	Ermüdungsrisswachstum/ plastische Deformation unter Korrosion	0
4	K2-2	Bruchflächenreibung eines korrodierten Risses, Brechen von Korrosionsprodukten	0
5	K3-1	Korrosionsprozess	14,4
6	K3-2	Brechen von Korrosionsprodukten	58,9

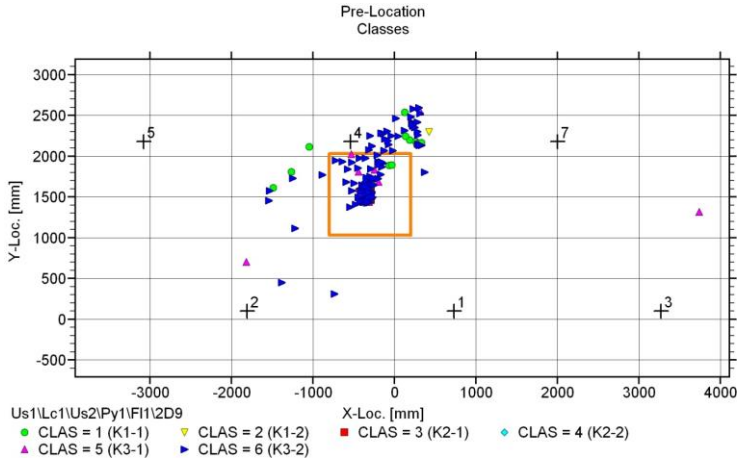


Abb. D-83: Klassifikation der lokalisierten SE-Ereignisse um die künstliche Rissquelle (orangefarbenes Quadrat)

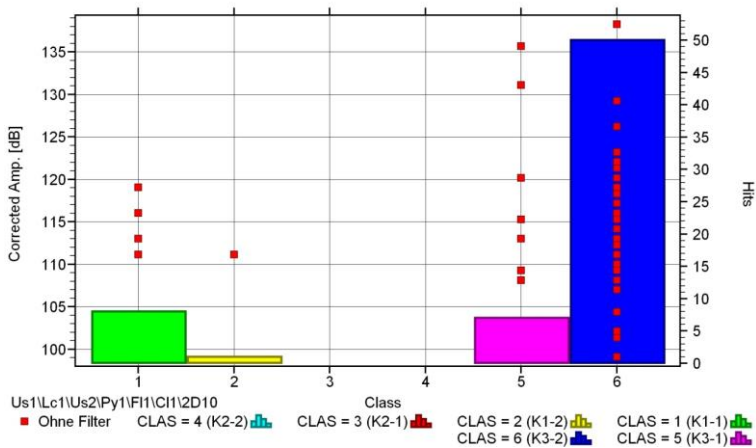


Abb. D-84: Anzahl der SE-Hits in den sechs untersuchten Signalklassen und ihre distanzkorrigierten Amplituden nach der Anregung durch die künstliche Rissquelle im Lokalisationsgebiet (orangefarbenes Quadrat in Abb. D-83)

Die **Korrosionsquelle**, wieder ein OOP-Effekt, wurde mit 19% der entstandenen Signale dem „Korrosionsprozess“ und mit etwa 65% dem „Brechen von Korrosionsprodukten“ zugeordnet (vgl. *Tab. D-13*, *Abb. D-85* und *Abb. D-86*). Das Klassifikationsergebnis passt auch hier zur Anregungsform.

Tab. D-13: Klassifikationsergebnisse der SE-Ereignisse aus künstlichen Korrosionsquellen. Gesamtanzahl der lokalisierten Ereignisse: 43

SE-Ereignis in Klasse	SE-Quellmechanismus		Anteil an Ereignissen [%]
Klassen-nummer	Klassen-name		
1	K1-1	Ermüdungsrisswachstum/ plastische Deformation	14
2	K1-2	Bruchflächenreibung	2,3
3	K2-1	Ermüdungsrisswachstum/ plastische Deformation unter Korrosion	0
4	K2-2	Bruchflächenreibung eines korrodierten Risses, Brechen von Korrosionsprodukten	0
5	K3-1	Korrosionsprozess	18,6
6	K3-2	Brechen von Korrosionsprodukten	65,5

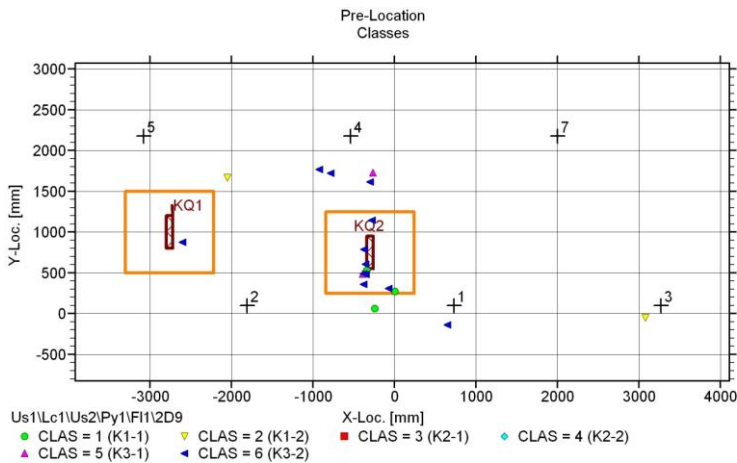


Abb. D-85: Klassifikation der lokalisierten SE-Ereignisse um die künstlichen Korrosionsquellen KQ1 und KQ2

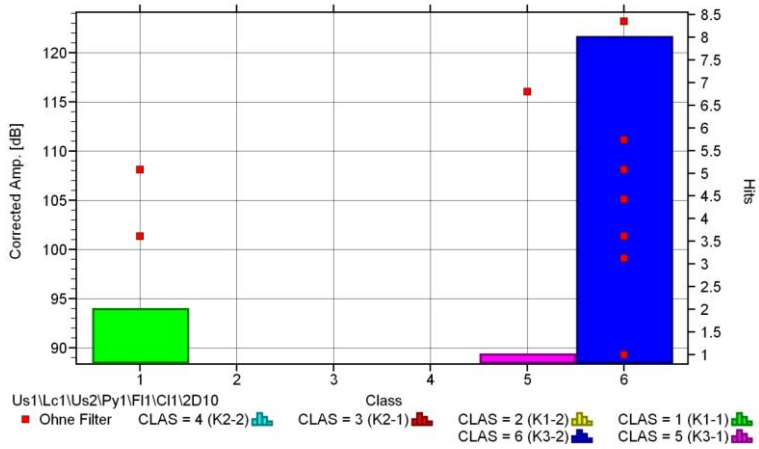


Abb. D-86: Anzahl der SE-Hits in den sechs untersuchten Signalklassen und ihre distanzkorrigierten Amplituden nach der Anregung durch die künstlichen Korrosionsquellen in den Lokalisationsgebieten

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bedanken bei

- **Dr.-Ing. habil. Jürgen Bohse** für die vielen fachlichen Diskussionen über die Schallemissionsprüfung und die gute Zusammenarbeit sowie für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und die Erstellung des Gutachtens auch nach Eintritt in den Ruhestand,
- **Professor Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck** für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung der Arbeit,
- allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung, die mir bei der Durchführung meiner Arbeit geholfen haben und ohne die ihre Umsetzung nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere **Dipl.-Ing. Astrid Zunkel** für die Durchführung der Funkenspektroanalyse, **Dipl.-Ing. Thomas Michael** und **Stefan Brunow** für das professionelle Schweißen der Platten und Proben, **Dipl.-Ing. Behboud Abbasi** und **Dipl.-Ing. Peter Wossidlo** für die Durchführung erster Biegeversuche an den Versuchsplatten sowie Herrn Abbasi für die Auslegung und Montage der Vorrichtung für die 4-Punkt-Biegeversuche,
- **Rita Breu**, **Dipl.-Ing. Astrid Zunkel** und **Sibylle Engel** für die metallographische Untersuchung der Proben und ihre lichtmikroskopische Dokumentation und **Rüdiger Sernow** für die Erstellung der REM-Aufnahmen,
- **Martin Hollesch**, **Stefan Froese** und die Kollegen der Zentralwerkstatt für die oft schnelle und unkomplizierte Herstellung und Bearbeitung der Proben und des Versuchszubehörs,
- **Dipl.-Ing. Andreas Hackbarth** für die große Unterstützung und die vielen guten Tipps bei der Arbeit an den Prüfmaschinen,
- **Dr.-Ing. Hans-Peter Ortwein** , mit dem ich in fünf Jahren Bürogemeinschaft viele fachlich relevanten und irrelevanten Themen besprechen konnte,
- meinem Mann **Christian Wachsmuth** für viele Gespräche, das Korrekturlesen und die ganze Geduld; meinen lieben Töchtern, die täglich dafür sorgten, dass ich nicht in meiner Arbeit versinke und allen meinen Eltern, von denen ich ein Leben lang große Unterstützung erfahren durfte.