

Unterscheidung von Quellenmechanismen der Schallemission – Ansätze und Grenzen

Jürgen BOHSE

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
(Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, E-Mail: juergen.bohse@bam.de)

Kurzfassung. Die Interpretation der Ergebnisse aus Schallemissionsprüfungen (AT) beruht gegenwärtig auf einer Analyse der konventionellen Merkmale von Schallemissionssignalen (AE-Signale). Methoden zur erweiterten Signalanalyse könnten zu einer besseren Unterscheidung von Quellenmechanismen beitragen. Diese methodischen Ansätze müssen jedoch berücksichtigen, dass die Form und das Frequenzspektrum der AE-Signale bei der Wellenausbreitung unterschiedlich stark verändert wird und von der verwendeten Messtechnik sowie den Einstellungen zur Signalaufzeichnung abhängen. Anhand von praktischen Beispielen werden einige wesentliche Einflüsse auf die Charakteristik von AE-Signalen und die daraus resultierenden Einschränkungen für die Unterscheidung von Quellenmechanismen diskutiert.

1. Einführung

Eine normative Durchführung von Schallemissionsprüfungen (AT) zur Abnahmeprüfung oder wiederkehrenden Prüfung von Druckgeräten, Tanks oder anderen Strukturen aus Metallen oder Verbundwerkstoffen erfolgt durch deren Beaufschlagung mit ausreichend hohen Belastungen (Überwindung des Kaiser-Effekts) oder mit geeigneten Lastprofilen aus Teilentlastung und Wiederbelastung (Bestimmung von Felicity-Werten) [1 – 4]. Die Bewertung und Klassifizierung von Schallemissionsquellen (AE-Quellen) erfolgt meist auf Grundlage von abstandskorrigierten, d.h. auf den Ort der Quelle zurückgerechneten Maximalamplituden von transienten AE-Signalen (Bursts) in Kombination mit der Anzahl lokalisierter Ereignisse innerhalb von Zonen (Cluster) vordefinierter Größe und Form. Die Maximalamplitude des Signals allein gibt jedoch noch keine zuverlässige Information über die Schwere und vor allem nicht über die Art der Quelle bzw. den Quellenmechanismus [5]. Zur näheren Identifizierung der beteiligten AE-Quellenmechanismen werden Korrelationsplots z.B. in Form von Log (Dauer oder Energie) vs. Log (Maximalamplitude) von Burst-Signalen verwendet [6]. Erfahrungsgemäß ergibt Risswachstum AE-Signale von mittlerer oder hoher Amplitude und kurzer Dauer, während Gleit- oder Reibprozesse Signale von mittlerer oder niedriger Amplitude und langer Dauer erzeugen. Elektromagnetische Interferenzen (EMI) und Hochfrequenzstörungen (RFI) generieren Burst-Signale mit extrem kurzer Dauer und nahezu konstanter Amplitude. Unterschiedliche Anstiege („b-Werte“) in der kumulativen Amplitudenverteilung könnten auf mehrere Quellenmechanismen hinweisen [7]. Diese Art der Datenanalyse im Zeitbereich der Wellenform liefert allerdings nur eine grobe Näherung, da die meisten konventionellen Signalparameter (Anstiegszeit, Dauer, Anzahl der Überschwingungen etc.) von den

Einstellungen zur Signalaufzeichnung (z.B. Nachweisschwelle) und von der Geometrie des Prüfobjekts sowie dem Laufweg zwischen Quelle und Sensor abhängen.

Methoden zur erweiterten Analyse von Burst-Signalen, wie Wellenmodenanalyse („Modal AE“), die spektrale Analyse (Amplituden-/Leistungsspektrum) im Amplituden-Zeit-Bereich (FFT: Fast Fourier Transformation) oder im Frequenz-Zeit-Bereich (WT: Wavelet-Transform, SFFT: Short-Time FFT), die Momenten-Tensor-Analyse (Trennung von Mikrobruchversagen infolge Normal- oder Scherspannungskomponenten) sowie Verfahren der Mustererkennung und Klassifizierung der Signale sollen zu einer besseren Unterscheidung von AE-Quellenmechanismen beitragen [8 – 22]. Dies bedingt jedoch die Aufzeichnung von kompletten Wellenformen (AE-Signalen) sowie eine leistungsfähige Datenverarbeitung, was heutzutage, auch für Online-Analysen, kein Problem mehr darstellen sollte. Die Ergebnisse der Zuordnung von AE-Signalen zu Quelleneignissen (unterschiedliche Arten der Mikroschädigung oder Störgeräusche) wird aber durch eine Anzahl von Effekten erschwert, resultierend aus der

- Art und räumlichen Lage der AE-Quellen (Bandbreite, bevorzugt angeregte Wellentypen/-moden etc.)
- Entstehung und Ausbreitung von Wellenmoden im Prüfobjekt (Geometrie, akustische Eigenschaften und Dämpfungsverhalten der Ausbreitungsmedien etc.)
- Signalaufzeichnung: Messtechnik und Parameter (AE-Sensor, Frequenzfilter etc.).

Im Folgenden werden einige signifikante Einflüsse auf die Charakteristik von AE-Signalen dargestellt sowie die daraus resultierenden physikalischen und technischen Grenzen einer Quellenidentifikation auf Basis von Signalmerkmalen diskutiert. Es werden Schlussfolgerungen für Anforderungen an die AE-Prüftechnik sowie die methodischen Ansätze zur Unterscheidung von AE-Quellenmechanismen abgeleitet.

2. Charakteristik von AE-Quellenmechanismen

AE-Quellenimpulse erzeugen akustische Wellen (mechanische Spannungswellen) im umgebenden Materialvolumen. Zum Beispiel entstehen diese beim Rissfortschritt aus der Oszillation der Rissflanken, welche durch die plötzliche Freisetzung elastisch gespeicherter Energie durch Mikroprozesse in der ggf. existierenden plastischen Zone sowie durch den eigentlichen, sprunghaften Rissfortschritt in der Bruchprozesszone angeregt wird. Nur ein geringer Anteil der Gesamtbruchenergie wird dabei in akustische Energie umgewandelt. Die Amplitude eines Bruchereignisses hängt vom Material und dem pro Zeiteinheit gebildeten Hohlraumvolumen (\sim Größe und Geschwindigkeit der Rissöffnung) ab. Die Dauer der Anregung (= Prozessdauer) ergibt sich aus der Geschwindigkeit und dem Inkrement des aktuellen Rissfortschritts meist auf mikroskopischer Ebene. Die Frequenzanregung ($\sim 1/\text{Prozessdauer}$) durch Mikrobruchquellen reicht dabei bis weit in den MHz-Bereich [9 – 11].

Abb. 1 zeigt das AE-Signal von der „breitbandigen“ Wellenanregung einer Bruchquelle im Vergleich zu einem niederfrequenten Störgeräusch z.B. durch Anschlagen von Gegenständen am Prüfobjekt.

In Faserverbunden mit Polymermatrix ist die Diskriminierung von Signalen aus der unkritischen Mikrorissbildung in der Matrix und von Faserbrüchen bei Erreichen eines versagenskritischen Beanspruchungszustands von großem Interesse. Unter der Annahme, dass sich die Bruchgeschwindigkeiten proportional zu den Geschwindigkeiten transversaler Volumenwellen im Matrix- und Fasermaterial einstellen, sollten Matrixrisse typischerweise AE-Signale von geringerer Bandbreite als Faserbruchereignisse erzeugen. Das konnte statistisch im Experiment bestätigt werden (Abb. 2). Diese Frequenzinformation ist jedoch, wie nachfolgend im Kap. 3 dargestellt, meist nur in Nähe der Quelle verfügbar.

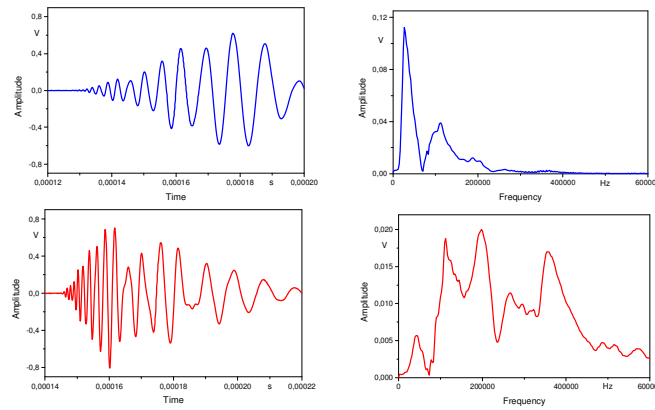


Abb. 1. AE-Signale von Quellenmechanismen unterschiedlicher Bandbreite: Störgeräuschquelle durch Stahlkugelaufprall (oben) und Hsu-Nielsen-Referenzbruchquelle (unten); beide Quellen wurden auf der Oberfläche eines 1mm dünnen Stahlblechs angeregt und mit dem „Breitband“-Sensortyp PAC-Pico in Nähe des Quellenereignisses gemessen.

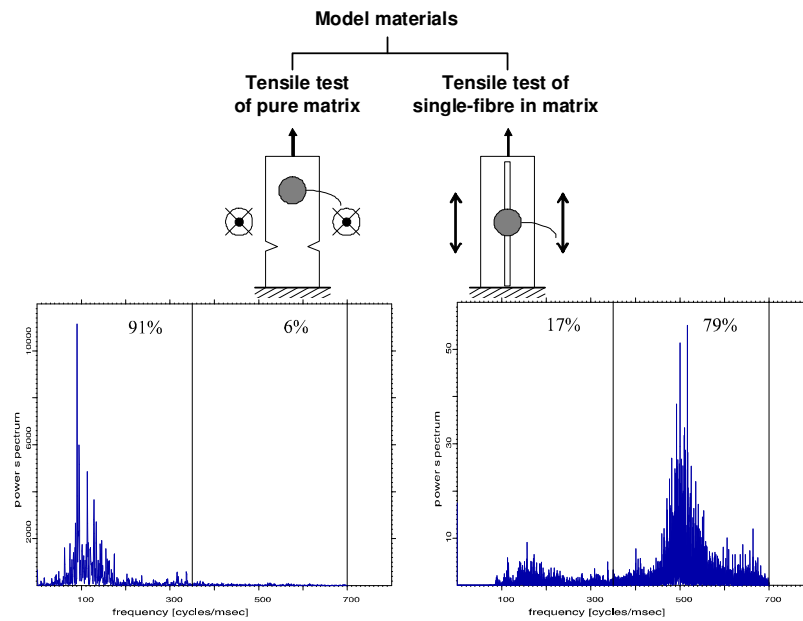


Abb. 2. Gemittelte Leistungsspektren von AE-Signalen und spektrale Leistungsanteile in vorgegebenen Frequenzintervallen, angeregt durch Rissbildungen in Epoxidharz (links) bzw. Brüchen von in einer Epoxidharzmatrix eingebetteten Carbon-Einzelfasern (rechts), gemessen mit dem „Breitband“-Sensortyp PAC-WD direkt am Ort der Quelle.

3. Entstehung und Ausbreitung von Wellenmoden in plattenförmigen Strukturen

In ihrer direkten Umgebung regen AE-Quellen zunächst Volumen- und Oberflächenwellen an. Allein die Geometrie des Prüfobjekts (Modenwandlung, geometrische Divergenz) sowie die akustischen Eigenschaften und das Dämpfungsverhalten des Ausbreitungsmediums (Dissipation, Reflexion, Absorption) entscheiden danach darüber, welche weiteren Wellentypen bzw. Wellenmoden daraus entstehen können und wie stark deren Form und Spektrum während der Wellenausbreitung verändert werden.

Die Bedämpfung der Amplitude und spektraler Anteile von Schallwellen hängt hauptsächlich vom Material, von evtl. Beschichtungen auf und dem jeweiligen Füllmedium in der zu prüfenden Struktur ab. Die Füllung mit flüssigen Medien führt zu einer höheren Schalldämpfung durch Energieübertragung in die Flüssigkeit. In Abb. 3 ist der Einfluss einer stark dämpfenden Oberflächenbeschichtung dargestellt. Darüber hinaus ist das

anisotrope, d.h. richtungsabhängige akustische Verhalten von Polymer-Matrix-Verbunden mit einer geringeren Dämpfung der hochmoduligen Glas- oder Carbonfasern in Faserrichtung und einem stärkeren Dämpfungseinfluss der niedermoduligen Harzmatrix senkrecht zur Faserorientierung verbunden. Dadurch ist auch die Übertragung hochfrequenter spektraler Komponenten bei der Wellenausbreitung oft auf extrem kurze Laufwege (teilweise nur wenige Zentimeter) begrenzt und betrifft bei Vorliegen einer ausgeprägten Anisotropie insbesondere die Ausbreitungsrichtung senkrecht zur Faserorientierung.

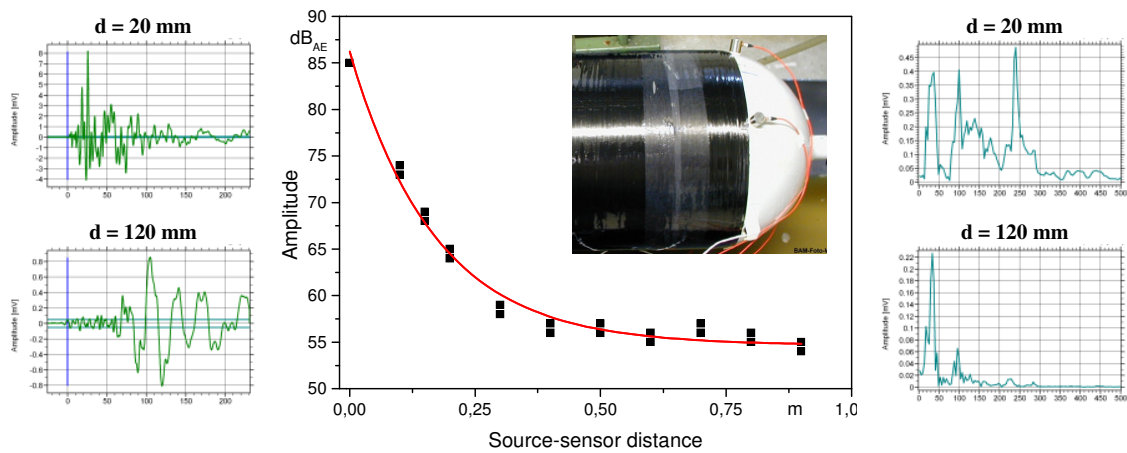


Abb. 3. Dämpfungsverhalten eines Druckgasbehälters (Typ II) aus Stahl, umwickelt mit einer dicken, in Umfangsrichtung unidirektional orientierten Carbonfaser/Epoxidharz-Schicht: Behälterabschnitt (Foto, Mitte) und abstandsabhängige Dämpfung der Maximalamplitude (Grafik, Mitte) sowie Wellenformen und Spektren der AE-Signale, gemessen nach axialer Wellenausbreitung, d.h. senkrecht zur Faserorientierung im Abstand 0,02 m (oben, links und rechts) und 0,12 m (unten, links und rechts) von der Quelle mit dem Sensortyp PAC-WD.

Technische Bauteile besitzen oft eine plattenförmige Geometrie und führen somit zur Entstehung von Lamb-Wellen mit material- und plattendickenabhängigen Oszillationsmoden. Diese geführten Wellen unterliegen der Dispersion, d.h. die frequenzabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lamb-Wellenmoden verursachen ein Zerfließen des Wellenpakets während der Wellenausbreitung (Abb. 4).

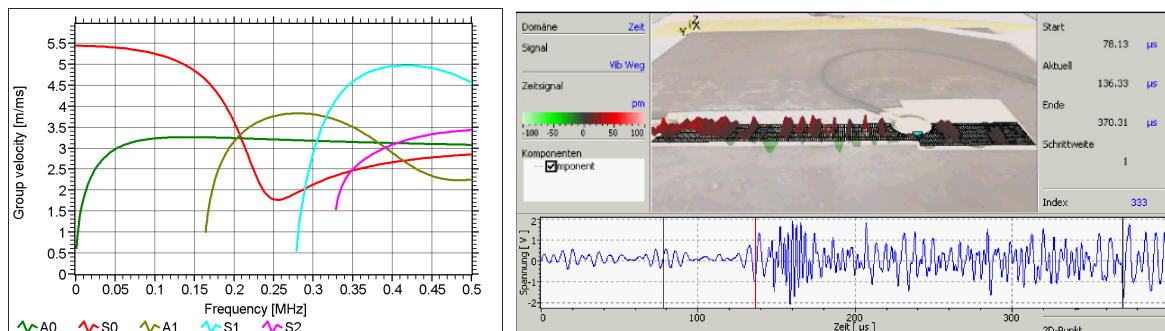


Abb. 4. Lamb-Wellenmoden in einer Stahlplatte ($e = 10$ mm), angeregt durch den Impuls eines 0,5 MHz Ultraschallprükkopfes: berechnete Gruppengeschwindigkeiten der Wellenmoden (Grafik, links) sowie Signale, gemessen mittels Laser-Doppler Vibrometer (System OFV-5000, Polytec GmbH) (Teilbild rechts oben) und einem Resonanzsensor VS150-RIC (Teilbild rechts unten) in einer Entfernung von 0,2 m vom Ort der Quelle.

Das Zerfließen von Wellenpaketen und die Veränderungen der AE-Signalspektren während der Wellenausbreitung im Mantel eines Transporttanks für Gas zeigt Abb. 5.

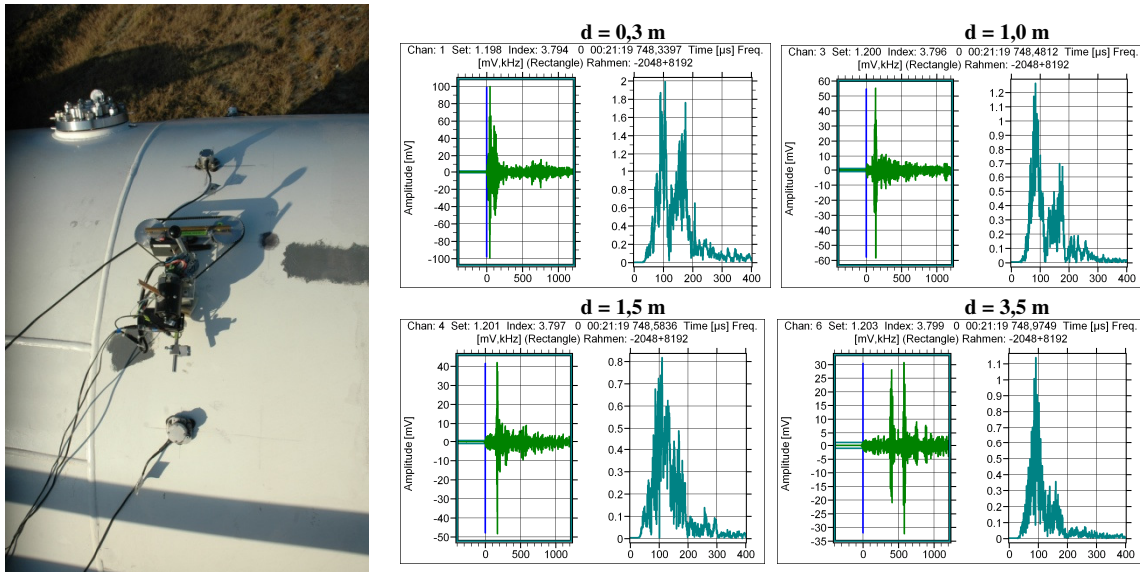


Abb. 5. Out-of-plane-Anregung an der Oberfläche eines leeren Stahltanks ($e = 14$ mm) durch den Bruch feiner Sandkörner in einer linienförmigen Quellenausdehnung (ferngesteuerte BAM-Artificial Crack Source, Foto links) und mit dem Sensortyp VS150-RIC in unterschiedlichen Abständen „ d “ vom selben Quellereignis gemessene AE-Signale (rechts).

Welche Wellenmoden sich bevorzugt ausprägen, ist verbunden mit der Art der Quelle und deren Hauptrichtung der Wellenanregung (in der Ebene = in-plane oder aus der Ebene heraus = out-of-plane) und hängt weiterhin ab von der räumlichen Lage der Quelle im Bauteil (Oberflächennähe oder Volumeninneres) sowie der Abmessung des Prüfobjekts (Wanddicke bei plattenförmigen Strukturen). Je dicker die Platte, umso mehr Oszillationen (Lamb-Wellenmoden) höherer Ordnung werden erzeugt. Diese wiederum verändern die Wellenform (AE-Signalforn) durch das Auftreten von immer mehr hochfrequenten Signalanteilen. Rayleigh-Wellen sind insbesondere das Resultat oberflächennaher Rissquellen. Abb. 6 zeigt zwei Beispiele für die bevorzugte Anregung von symmetrischen (S) und antisymmetrischen (A) Wellenmoden in einer Platte. Die out-of-plane-Anregung erzeugt dabei eine niedrige Amplitude des S_0 -Mode und eine signifikant höhere Peak-Amplitude des A_0 -Mode (Abb. 6, links). Im Unterschied dazu besitzen die aus dem S_0 - und A_0 -Mode erzeugten Signalanteile bei einer in-plane-Anregung ähnlich hohe Amplituden (Abb. 6, rechts).

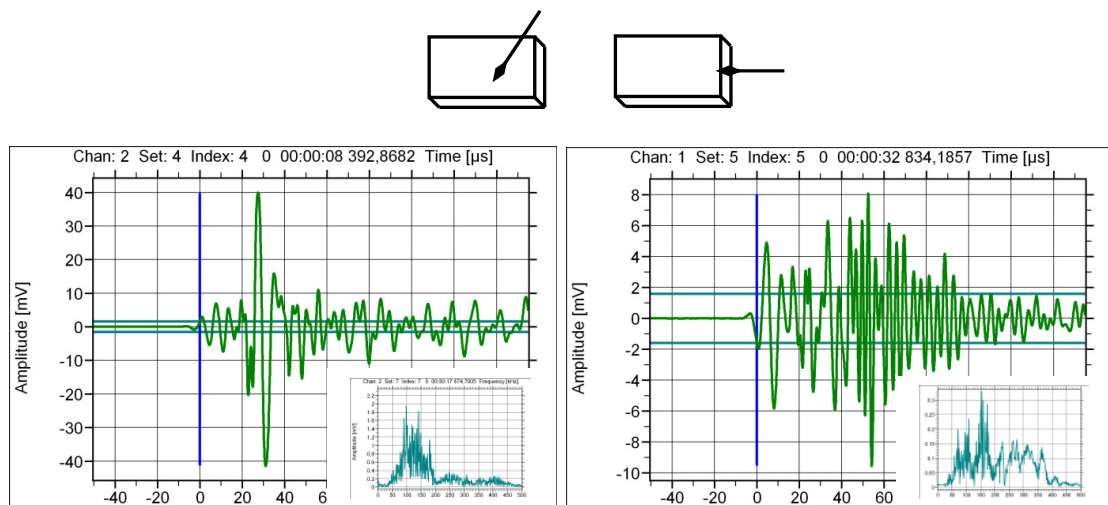


Abb. 6. AE-Signale, erzeugt von Hsu-Nielsen-Quellen mit out-of-plane-Anregung an der Oberfläche (links) und in-plane-Anregung in der Mittenebene der Plattendicke (rechts) an einer Stahlplatte ($e=10$ mm), gemessen mit dem Sensortyp VS150-RIC in gleichem von Abstand 0,25 m vom Ort der Quelle.

Bei gleicher Art des Quellenmechanismus generiert die in-plane-Anregung somit Wellenmoden mit höheren Frequenzen. Informationen aus Modalanalysen der AE-Signale könnten auch zur Entwicklung genauerer Ortungsprozeduren auf Grundlage der Ankunftszeiten und Geschwindigkeiten individuell zugeordneter Lamb-Wellenmoden genutzt werden [23, 24]. Für Polymer-Matrix-Verbunde erwachsen daraus jedoch weitere spezifische Probleme [25, 26].

Messungen an Tanks, gefüllt mit Wasser, zeigen signifikante Unterschiede in der Wellenform und im Frequenz-Zeit-Verhalten zwischen AE-Signalen, erzeugt durch dispersive Lamb-Wellenmoden der metallischen Wandung und von Kompressions-(P-) Wellen bei der Wellenübertragung durch die Flüssigkeit. Dies ist in Abb. 7 dargestellt, wo in der sehr dünnen Wandung ($e = 0,85 \text{ mm}$) eines Stahlfasses im Frequenzbereich der Messung nur die S_0 - und A_0 -Grundmoden existieren.

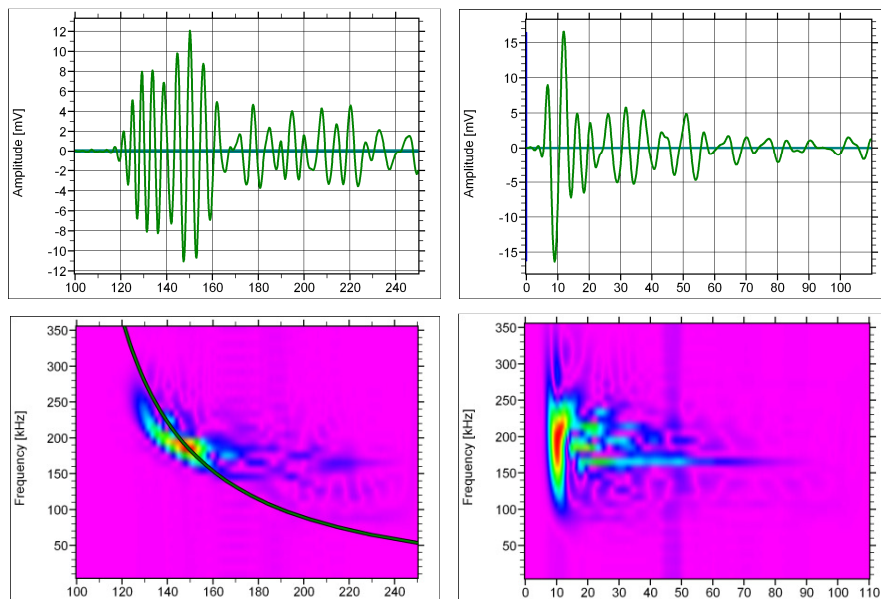


Abb. 7. AE-Signalformen (oben: Amplitude-Zeit-Bereich; Zeitachse x in μs) und Choi-Williams-Verteilungen (unten: Frequenz-Zeit-Bereich) aus Hsu-Hielsens-Quellen, gemessen mit dem Sensortyp VS150-RIC angesetzt an der Außenwand (links; es ist nur der starke, später einlaufende A_0 -Wellenmode mit der berechneten Gruppengeschwindigkeit dargestellt) und eingetaucht in die Wasserfüllung des Fasses (rechts).

Druckwellen in Flüssigkeiten zeigen keine Dispersion und weisen eine wesentlich geringere Dämpfung als Plattenwellen auf. Eine derartige Trennung von AE-Signalen aus unterschiedlichen Laufwegen bzw. Ausbreitungsmedien (Stahlwand oder Flüssigkeit) und die Zuordnung der entsprechenden Wellengeschwindigkeiten könnten dazu dienen, die Zuverlässigkeit der Ortungsergebnisse zu erhöhen. Die Anwendung des interessanten Ansatzes zur Quellenortung mittels künstlicher neuronaler Netzwerke wäre ein möglicher Lösungsweg [27].

4. Frequenzgang und Messempfindlichkeit von AE-Sensoren

Die akustischen Wellen werden derzeit mit hochempfindlichen Piezokristallen detektiert. Das Ansprechverhalten dieser speziellen piezoelektrischen AE-Sensoren hängt im Wesentlichen ab von deren Aufbau, vom Typ bzw. Mode der anregenden akustischen Welle (Rayleigh/Oberflächenwelle, Lamb/Platten-Wellenmode, longitudinale oder transversale Volumenwelle) sowie von der Bezugsgröße für die Messung der Sensorempfindlichkeit (Verschiebung, Geschwindigkeit oder Druck) [9, 28]. Der hauptsächliche Einfluss dieser piezoelektrischen Sensoren auf die gemessenen AE-Signale

resultiert aus der bevorzugten Verstärkung von spektralen Wellenanteilen im Bereich ihrer Resonanzfrequenz (Abb. 8).

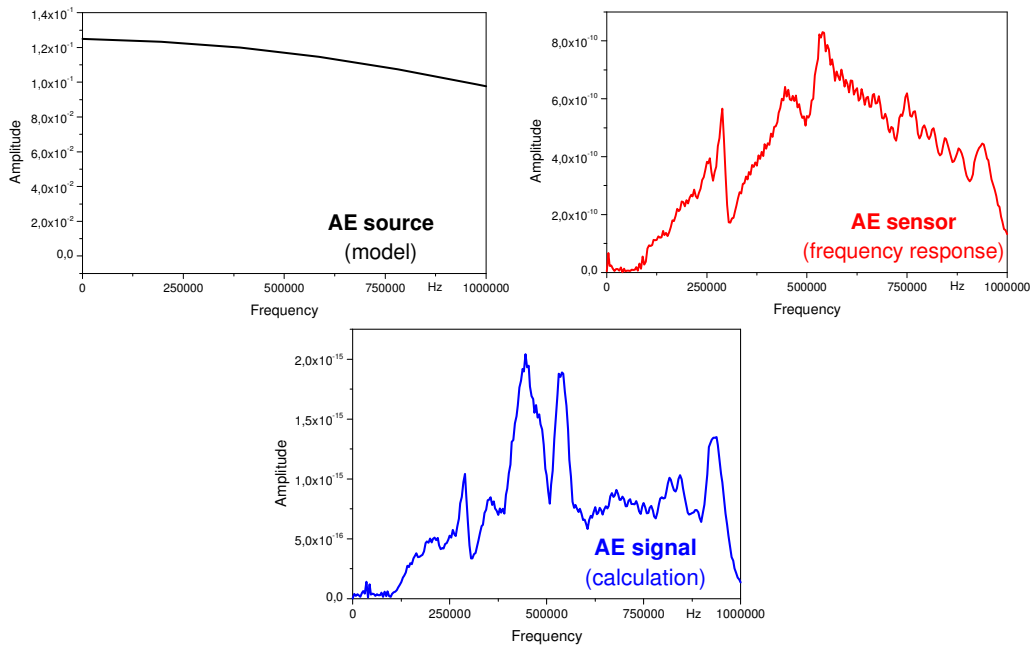


Abb. 8. Spektrum eines AE-Signals, berechnet aus dem Produkt einer theoretisch angenommenen AE-Quelle (Bandbreite = 2 MHz) und experimentell bestimmten Übertragungsfunktionen von AE-Sensor, Material und Geometrie des Ausbreitungsmediums*) sowie der Messelektronik*) – (*) in der Abb. nicht dargestellt).

Weiterhin müssen Einflüsse durch Methoden und Bedingungen der Sensorankopplung am Prüfobjekt, insbesondere beim Einsatz von Wellenleitern berücksichtigt werden [29, 30]. Wellenleiter können eine hohe Schallschwächung in bestimmten Frequenzbereichen sowie eine Pulsverbreiterung hervorrufen.

Für technische Anwendungen liegt die Bandbreite von AE-Messungen im Bereich von ca. 20 bis 300 kHz. Die untere Grenze resultiert aus der Notwendigkeit, die Aufzeichnung meist äußerer, niederfrequenter Störgeräusche zu vermeiden. Die obere Grenze ergibt sich aus der Tatsache, dass höherfrequente spektrale Komponenten bei der Wellenausbreitung stärker bedämpft werden. Das trifft besonders für Bauteile aus Polymer-Matrix-Verbunde zu.

5. Klassifizierung von AE-Signalen

Gegenwärtig werden für technische Anwendungen kommerziell verfügbare piezoelektrische AE-Resonanzsensoren mit niedrigen Resonanzfrequenzen (ca. 50 bis 150 kHz) und hoher Sensitivität eingesetzt. Dies ist einerseits notwendig, um AE-Quellen noch über möglichst große Entfernungen zu detektieren und auch noch zu orten. Andererseits erschwert dies jedoch die Unterscheidung „falscher“ (häufig niederfrequente Betriebs- oder Umgebungsgeräusche) von „richtigen“ Anzeigen (z.B. breitbandige Ereignisse aus Risswachstum). Von besonderem Interesse wäre diese Möglichkeit für die Zustandsüberwachung von Strukturen mittels AE-Messungen unter Betriebsbedingungen. Dies wurde u.a. im Rahmen des EU-Projekts CORFAT an Transportmitteln zur Beförderung gefährlicher Güter (Tankfahrzeuge für Straße bzw. Schiene und Tankschiffe) untersucht [31 – 33]. Die Abb. 9 zeigt Klassifikationsergebnisse der statistischen Analyse spektraler Merkmale von AE-Signalen aus diesbezüglichen Laborprüfungen unter Verwendung der Software VisualClass® [34].

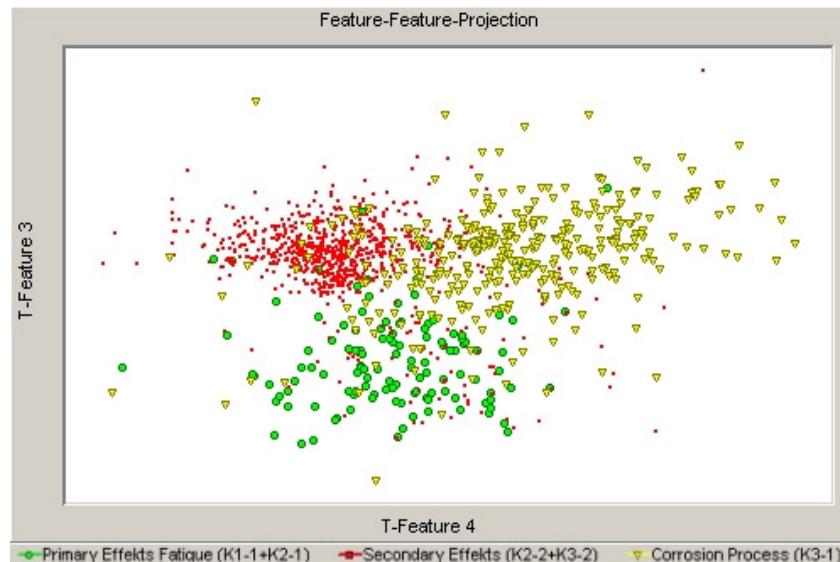


Abb. 9. Überwachte Klassifizierung mittels Ortungs- und Lastniveau-Filtern vorselektierter AE-Signale aus Ermüdungsrisswachstum, Reibungs- bzw. Korrosionsprozessen, gemessen bei Labortests an geschweißten Stahlplatten ($e = 10 \text{ mm}$) mit dem Sensortyp VS150-RIC in sehr geringer Entfernung ($< 0,12 \text{ m}$) vom Ort der Quelle [32, 33].

Ein Zerfließen von Wellenpaketen mit fortschreitender Wellenausbreitung und die daraus resultierenden längeren AE-Signale verändern die modalen und spektralen Komponenten innerhalb vorgegebener Zeitsegmente im Signal, welche für die Klassifizierung verwendet werden.

Zur Klassifizierung sollten die Signale deshalb u.a. in hinreichend großen Zeitsegmenten mit vergleichbaren Moden- und Frequenzanteilen analysiert und wenn möglich nur Signale mit ausreichend hohem Signal/Rausch-Verhältnis einbezogen werden. Ein Entrauschen, speziell von schwachen Signalen aus “weit entfernten” Quellen, könnte hilfreich sein.

6. Schlussfolgerungen

- Eine bessere Unterscheidung von Quellenmechanismen wird erwartet, wenn neue Wandlerprinzipien oder robuste, praxistaugliche Sensordesigns mit flachen Frequenzgängen über einen breiten Frequenzbereich, ggf. unter Verwendung neuartiger, hochempfindlicher Materialien, zur Detektion akustischer Wellen an Bauteiloberflächen verfügbar sind.
- Dabei wären Sensoren für die empfindliche Messung möglichst einfacher Wellenformen besonders interessant. Zum Beispiel sollen horizontal polarisierte Transversalwellen (H-Wellen) keine Modenwandlung zeigen und eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen [35].
- Als Folge der stärkeren Dämpfung von Wellenanteilen höherer Frequenz bleibt eine Mustererkennung, die auf spektralen Analysen beruht, evtl. auf vergleichsweise kurze Laufwege der akustischen Wellen zwischen Quelle und Sensor begrenzt. Aus diesem Grund sollten die AE-Sensoren bei technischen Anwendungen mit dem Ziel einer Quellenidentifikation möglichst in der Nähe von berechneten oder bekannten, versagenskritischen Strukturbereichen („hot spots“) appliziert werden.
- Eine Analyse von Quellenmechanismen anhand von AE-Signalen ist nur sinnvoll, wenn die Signale unter gleichen messtechnischen Bedingungen (gleicher Sensortyp und Frequenzbereich) aufgezeichnet wurden.

- Erweiterte Methoden einer merkmalsbasierten Klassifizierung von AE-Signalen sollten auf der statistischen Analyse im Zeit- und Frequenzbereich beruhen. Sie müssen jedoch die Beeinflussung der Signalmerkmale durch die geometrisch bedingte Bildung von Wellenmoden sowie durch Effekte bei der Wellenausbreitung, analysiert z.B. mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen, berücksichtigen.

Referenzen

- [1] DIN EN 13554: Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze.
- [2] DIN EN 14584: Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Planare Ortung von Schallemissionsquellen.
- [3] DIN EN 15856: Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze der Schallemissionsprüfung zum Nachweis der Korrosion innerhalb von mit Flüssigkeit gefüllten metallischen Umschließungen.
- [4] DIN EN 15857: Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen – Spezifische Vorgehensweise und allgemeine Bewertungskriterien.
- [5] Ono K, Gallego A (2012). Research and Applications of AE on Advanced Composites. *J. Acoustic Emission*, 30, 180-229.
- [6] CARP (1999). Recommended Practice For Acoustic Emission Evaluation Of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Tanks And Pressure Vessels. *Committee on Acoustic Emission from Reinforced Plastics (CARP)*, a Division of the Technical Council of The American Society for Nondestructive Testing, Inc., Columbus, Ohio, Draft I, October 1999.
- [7] Pollock AA (1981). Acoustic Emission Amplitude Distributions. *International Advances in Nondestructive Testing* (Editor: Warren J. McGonnagle), Volume 7, pp. 215-240, May 1981. Reprinted as Technical Report DE 79-10, Dunegan/Endevco, San Juan Capistrano, California. Redistributed as PAC TR-103-91-5/89.
- [8] Miller RK, Hill EvK, Moore PO (eds. 3rd ed. 2005). *Nondestructive Testing Handbook*. volume 6: Acoustic Emission Testing. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, OH/USA.
- [9] Liptai RG, Harris DO, Engle RB, Tatro CA (1970). Acoustic Emission Techniques in Materials Research. University of California Livermore, *UCLR-72582 Preprint*.
- [10] Wadley HNG, Mehrabian R (1984). Acoustic Emission of Materials Processing: a Review. *Materials Science and Engineering*, 65, 245-263.
- [11] Ono K (2011). Acoustic Emission in Materials Research – A Review. *J. Acoustic Emission*, 29, 284-308.
- [12] Gorman MG (2011). Modal AE Analysis of Fracture and Failure in Composite Materials and the Quality and Life of High Pressure Composite Pressure Vessels. *J. Acoustic Emission*, 29, 1-28.
- [13] Hamstad MA (2010). On Lamb Modes as a Function of a Acoustic Emission Source Rise Time. *J. Acoustic Emission*, 28, 41-58.
- [14] Sause MGR, Horn S (2010). Simulation of Lamb Wave Excitation for different Elastic Properties and Acoustic Emission Source Geometries. *J. Acoustic Emission*, 28, 142-154.
- [15] Bohse J, Brunner AJ (2008). Chap. 8: Acoustic emission in delamination investigation. in: Sridharan S (ed.) *Delamination behaviour of composites*. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 217-277.
- [16] Banerjee S, Mal AK (2005). Acoustic emission waveform simulation in multilayered composites. *J. Strain Analysis*, 14 (1), 25-32.
- [17] Bohse J (2004). Acoustic Emission Examination of Polymer-Matrix Composites. *J. Acoustic Emission*, 22, 208-223.
- [18] Mal AK (2002). Elastic waves from localized sources in composite laminates. *Int. J. of Solids and Structures*, 39, 5481-5494.
- [19] Bohse J, Chen J (2001). Acoustic emission examination of mode I, mode II and mixed-mode I/II interlaminar fracture of unidirectional fiber-reinforced polymers. *J. Acoustic Emission*, 19, 1-10.
- [20] Bohse J, Krietsch T, Chen J, Brunner AJ (2000). Acoustic emission analysis and micro-mechanical interpretation of mode I fracture toughness on composite materials. in: Williams JG and Pavan A (eds.). *Fracture of Polymers, Composites and Adhesives*. ESIS Publication 27, 15-26, Elsevier 2000b.
- [21] Krietsch T, Bohse J (1998). Classification of Damage Mechanisms in Fibre Composites by Acoustic Emissions. *Proceedings EWGAE-23*, 9-14, Vienna/Austria, 6.-8. May 1998.
- [22] Krietsch T, Bohse J (1998). Selection of Acoustic Emissions and Classification of Damage

- Mechanisms in Fiber Composite Materials. *Progress in Acoustic Emission IX, Proceedings International Acoustic Emission Conference*, IV-30-39, Big Island, Hawaii/USA, 9.-14. August 1998.
- [23] Hamstad MA (2008). Comparison of wavelet transform and Choi-Williams distribution to determine group velocities for different acoustic emission sensors. *J. Acoustic Emission*, 26, 40-59.
- [24] Mohd S, Holford KM, Pullin R (2012). Acoustic emission source location in steel structures using a wavelet transform analysis and modal location theory. *Proceedings EWGAE-30 and ICAE-7*, 206-216, Granada/Spain, 12.-15. September 2012.
- [25] Hamstad MA (2012). A waveform based study of AE wave propagation by use of eight wideband sensors on a composite pressure vessel. *Proceedings EWGAE-30 and ICAE-7*, 548-561, Granada/Spain, 12.-15. September 2012.
- [26] Gallego A, Ono K (2012). An improved acousto-ultrasonic scheme with Lamb wave mode separation and damping factor in CFRP plates. *Proceedings EWGAE-30 and ICAE-7*, 573-580, Granada/Spain, 12.-15. September 2012
- [27] Kalafat S (2013). Lokalisierung von Schallemissionsquellen mit künstlichen neuronalen Netzwerken in Faserverbundwerkstoffen. *Masterarbeit*, Lehrstuhl für Experimentalphysik II, Institut für Physik, Universität Augsburg.
- [28] Ono K, Cho H, Matsuo T (2008). Experimental transfer functions of acoustic emission sensors. *J. Acoustic Emission*, 26, 72-90.
- [29] Ono K (2004). Rods and tubes as AE waveguides. *J. Acoustic Emission*, 22, 243-252.
- [30] Hamstad MA (2006). Small diameter waveguide for wideband acoustic emission. *J. Acoustic Emission*, 24, 234-247.
- [31] EU Project CORFAT (2012). Detecting corrosion and fatigue cracks during service. *Projects Magazine*, Insight Publishers I Projects, 30, 62-65.
- [32] Wachsmuth J, Malikoutsakis M, Savaidis G, Savaidis A, Bohse J (November 2012). Corrosion and fatigue crack monitoring by means of acoustic emission for application in transport means. *Int. Journal of Terraspace Science and Engineering*, 5(1), 9-17.
- [33] Jagenbrein A, Tscheliesnig P, Wachsmuth J, Bohse J (2012). Detection of Corrosion Processes and Fatigue Cracks by Means of Acoustic Emission Monitoring. *MP_Materials Testing*, 54/11-12, 769-778.
- [34] VisualClass[®]-Software, Vallen Systeme GmbH, Icking, Germany.
- [35] Kühnicke E, Kühnicke H (1986). Untersuchung der Ausbreitungseffekte von Schallemissionsimpulsen mit dem Programmpaket „Transiente Wellen in Platten“, *Wiss. Berichte Ingenieurhochschule Zittau*, Nr. 679, Heft 11, 13-18.