

Potenzialanalyse zur Selbstdiagnose von Schallemissionssensoren - experimentelle^[1] und numerische^[2] Studie

Christopher Reinhardt, M. Sc. *, Sebastian Priebe, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Inka Mueller *Christopher.Reinhardt@hs-bochum.de

Einleitung

Schallemission (Acoustic Emission – AE) wird heutzutage im Structural Health Monitoring (SHM) und der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) zur Schadenserkennung und Zustandsbewertung genutzt. Mit AE werden elastische Wellen detektiert und analysiert, die sich infolge einer plötzlichen Energiefreisetzung, beispielsweise durch einen Riss, in der Struktur ausbreiten. Die Messung der Wellen erfolgt innerhalb der zu überwachenden Struktur, beispielsweise einer Brücke, einem Tunnel, eines Drucktanks oder ähnlichem, oder auf deren Oberfläche mittels AE-Sensoren.

Ein SHM System muss zu jedem Zeitpunkt in der Lage sein, automatisiert eine Aussage über den Zustand einer Struktur treffen zu können. Hierfür muss die Sensorik des Systems stets voll funktionsfähig sein. Umwelt- und Betriebsbedingungen wie Temperaturänderungen oder Feuchtigkeit können diese allmählich schädigen, wodurch fehlerhafte Signale entstehen und damit zu unentdeckten Schäden der zu überwachenden Struktur führen können. In situ kann die Sensorik derzeit nur mittels Hsu-Nielsen Quelle getestet werden [3]. Änderungen in den Ergebnissen dieser Methode sind jedoch schwer von statistischen Schwankungen zu trennen, da zur Durchführung Personal vor Ort benötigt wird und ein umfangreicher Datensatz nahezu ausgeschlossen ist. Zuverlässige Methoden zur Überprüfung im Labor werden unter anderem in [4, 5, 6] genannt. Jedoch muss auch hier Personal vor Ort die Sensorik zunächst austauschen und das Ergebnis steht dann erst nach der Überprüfung im Labor zur Verfügung. Die Autoren untersuchen in dieser Arbeit, die auf den Studien [1] und [2] basieren, die grundlegende Machbarkeit zur Entwicklung einer Methode zur in situ Selbstdiagnose ohne menschlichen Einsatz, die mit minimaler zusätzlicher Hardware in bestehende Systeme integriert werden kann.

Die elektromechanische Impedanz (EMI) stellt die komplexwertigen frequenzabhängigen Größen der elektrischen und der mechanischen Impedanz dar. Der elektrische Anteil gibt den Widerstand gegen einen elektrischen Fluss bei einer angelegten Spannung an. In analoger Weise lässt sich die mechanische Impedanz als der Widerstand gegen eine Bewegung bei einwirkender Kraft definieren. Die Messung der EMI des AE-Sensors erlaubt Rückschlüsse auf beide Größen. Die ersten experimentellen Untersuchungen der Ankopplung eines AE-Sensors der Autoren zeigten, dass diese Einflüsse in der EMI ersichtlich sind. Die Nutzung der EMI eines piezoelektrischen Elementes ohne weiterer Komponenten, wie eines Gehäuses, wird bereits in anderen Disziplinen des SHM zur Funktionsüberprüfung eingesetzt [7, 8].

Ergebnisse

Der für die PCA verwendete Datensatz umfasst 29 Sensoren, die jeweils zweimal gemessen wurden, von denen 12 als unbeschädigt und 17 als geschädigt eingestuft wurden. Aufgrund fehlender Referenzen der Sensoren sowie in der Literatur erfolgte die Einteilung manuell anhand der Erfahrung mit EMI Spektren aus vergangenen Projekten. Die Spektren zeigen teils große Unterschiede in Amplitude und Frequenz der Eigenfrequenzen. In einigen Spektren fehlen Merkmale teilweise gänzlich (Abb. 3). Trägt man die T^2 - gegen die Q-Statistik auf, zeigt sich, dass sich die Sensoren auch mit einer automatisierbaren Auswertung in differenzierbaren Gruppen darstellen lassen. Lediglich einer der Sensoren bildet einen Grenzfall (Abb. 4).

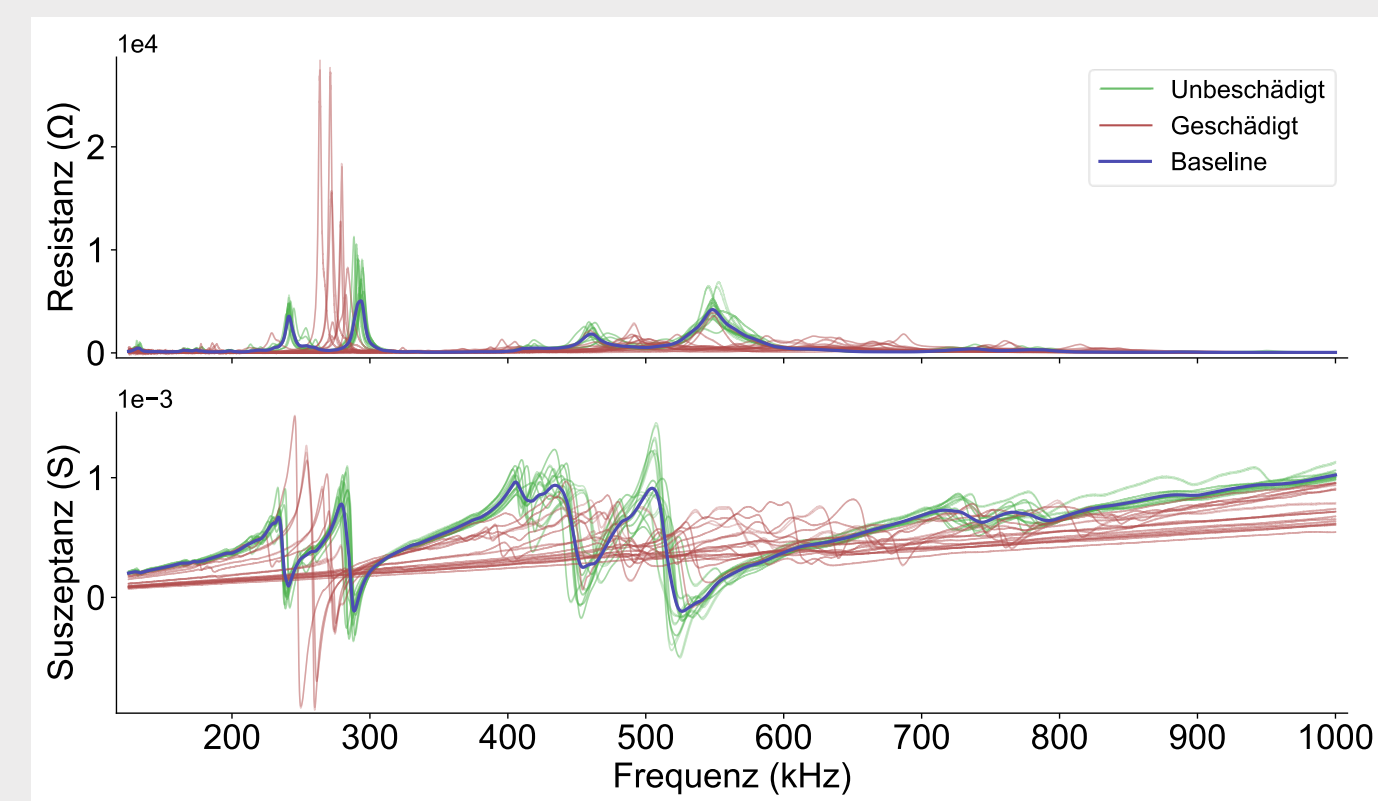


Abbildung 3. EMI-Spektren der 29 WD Sensoren dargestellt als Resistanz (oben) und Suszeptanz (unten). Die Spektren sind unterteilt in unbeschädigt (grün), geschädigt (rot) und Baseline (blau), die aus allen unbeschädigten Messungen berechnet wird.

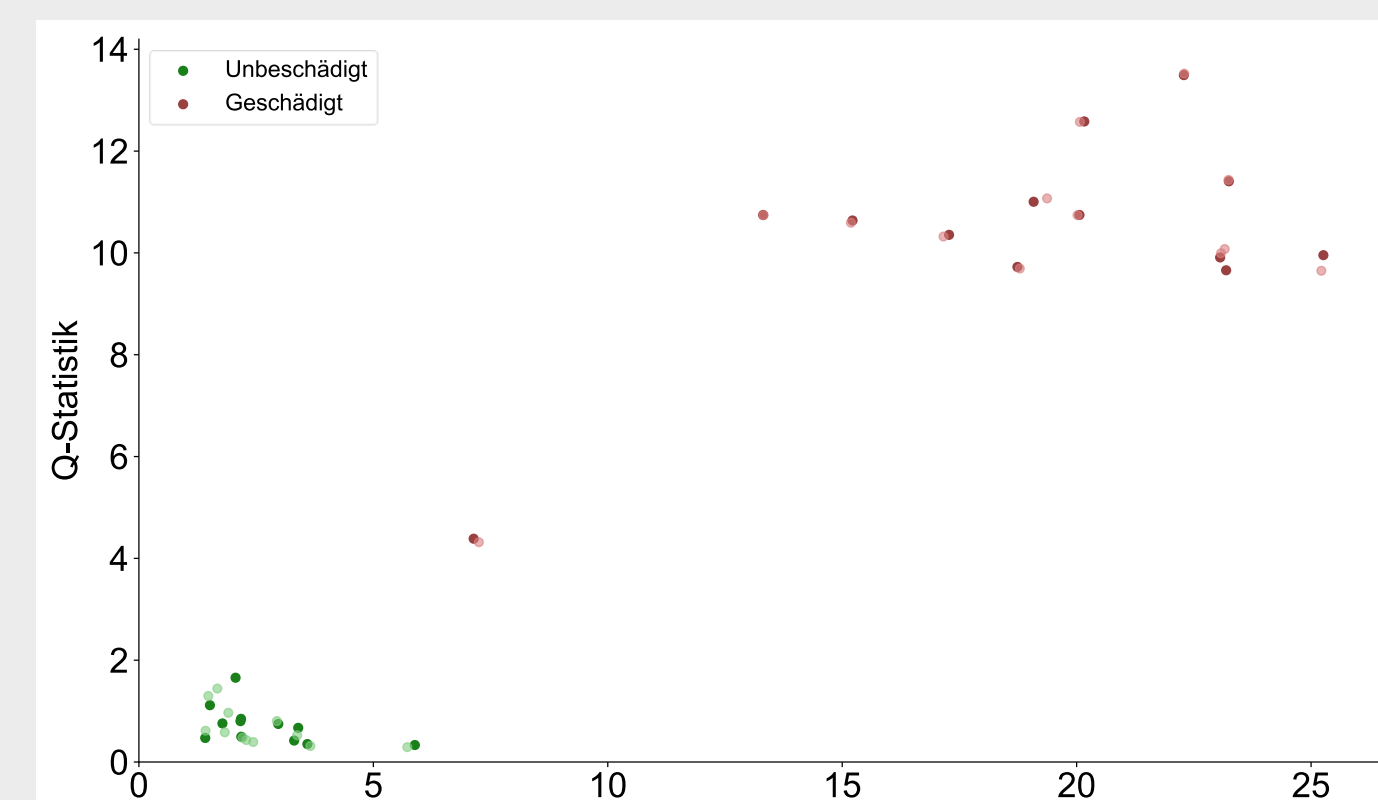


Abbildung 4. Q-Statistik aufgetragen über T^2 -Statistik für PCA Modell, das alle unbeschädigten Messungen als Trainingsdaten verwendet. Unbeschädigte Daten (grün) und geschädigte (rot) sind dargestellt. Hellere Farben deuten die Wiederholungsmessung eines Sensors an.

Die Veränderung des EMI Spektrums durch einen Schaden ist auch in den Ergebnissen der numerischen Simulationen ersichtlich. Die unterschiedlichen Defekte zeigen im EMI Spektrum verschiedene Effekte bezogen auf die Eigenfrequenzen, Amplituden und die Steigung im linearen Bereich der Suszeptanz (Abb. 5). Ein Vergleich der numerischen Simulationen mit experimentellen Messungen zeigt Abweichungen in den Eigenfrequenzen der Resistanz sowie eine Abweichung der Amplituden. Bei Betrachtung der Suszeptanz ist hingegen nur ein reduzierter Frequenzshift zu erkennen sowie keine Abweichung der Steigung des linearen Bereichs (Abb. 6).

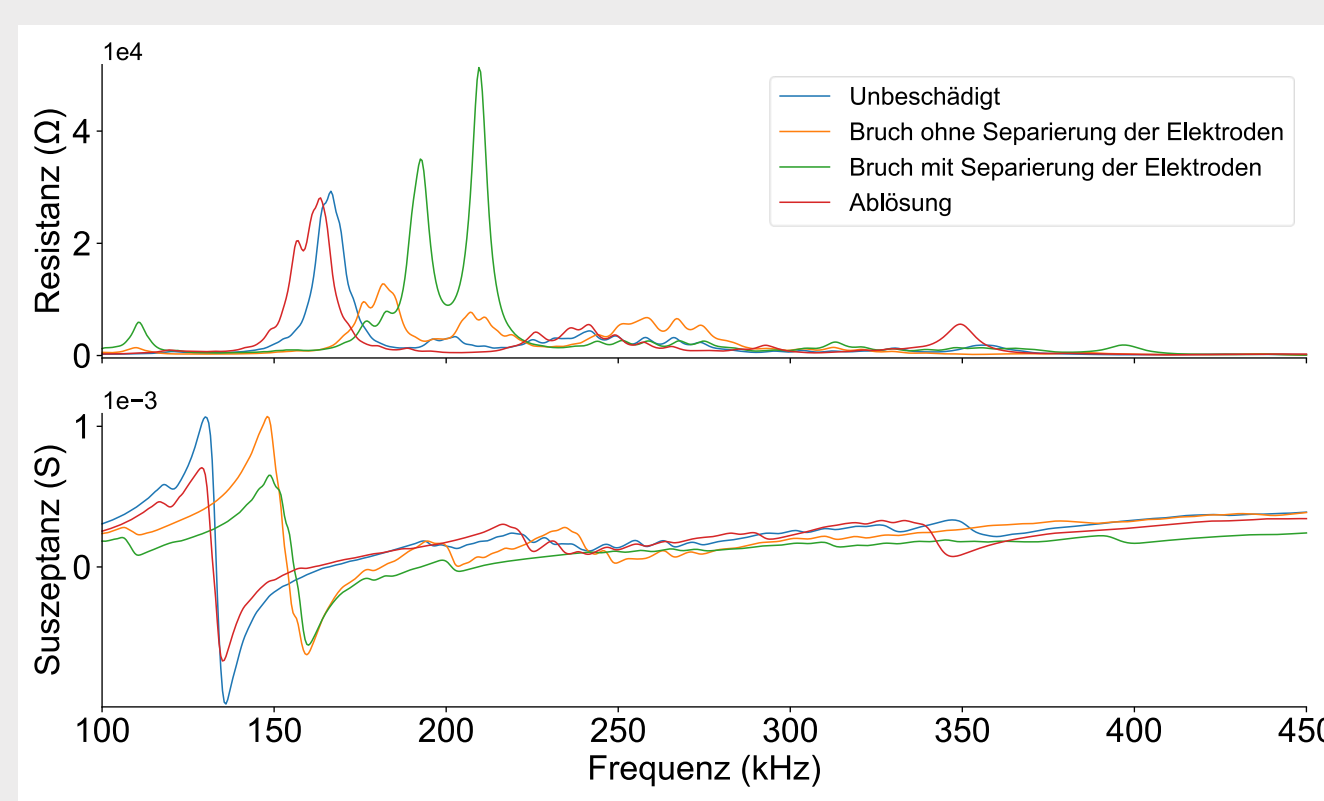


Abbildung 5. Simulation eines AE-Sensors im unbeschädigten Zustand (blau), mit einem Bruch des piezoelektrischen Elements mit Separierung der Elektroden (orange) und ohne Separierung (grün) sowie eine Ablösung des Elements vom Gehäuse (rot).

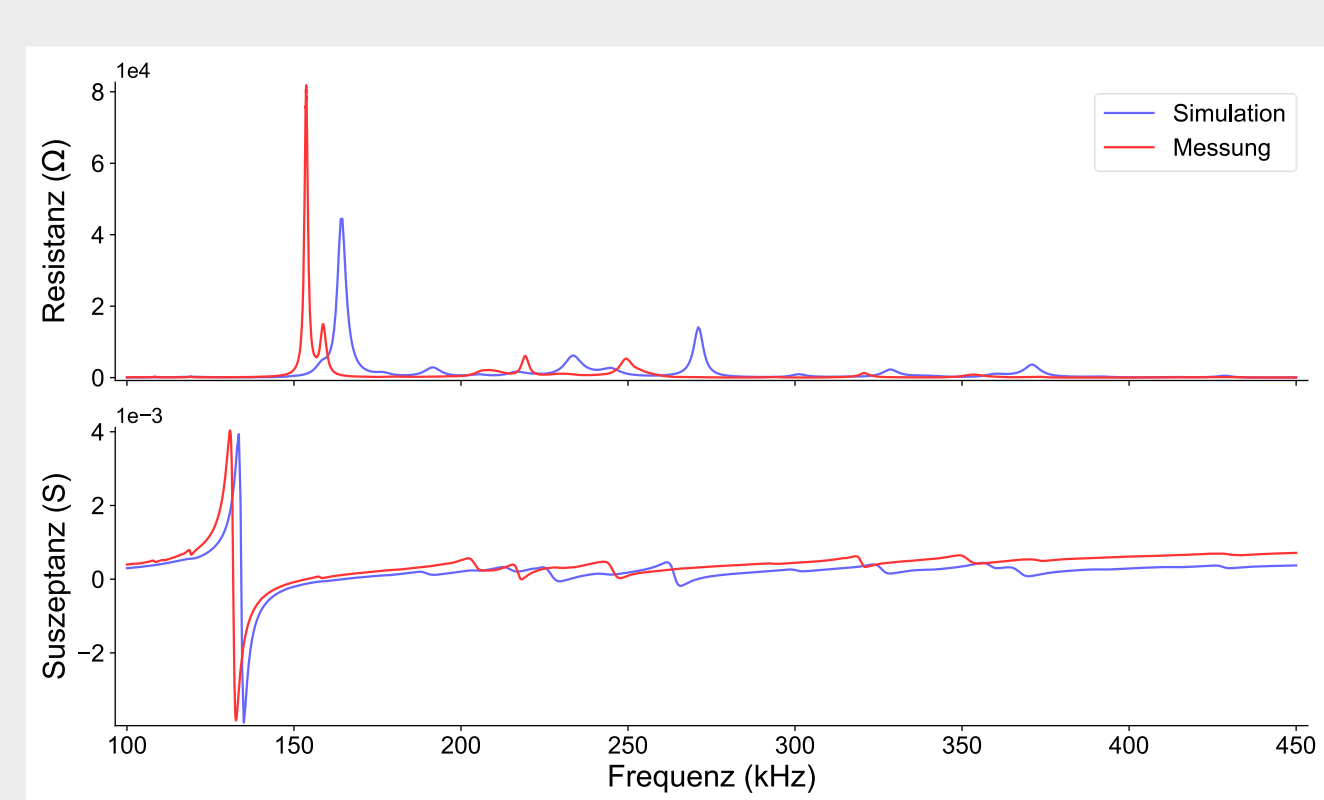


Abbildung 6. Vergleich des EMI Spektrums eines frei schwingenden AE-Sensors zwischen simulierten und gemessenen Daten. Das gemessene Spektrum ist ein Durchschnitt von 11 verschiedenen Sensoren, die jeweils dreimal gemessen sind.

Methoden

Als erster Ansatz zur Bestimmung des Potenzials zur Selbstdiagnose von AE-Sensoren wurden experimentelle Untersuchungen an frei schwingenden differentiellen Breitbandsensoren (WD – 100–900 kHz) der Firma Mistras durchgeführt. Das genutzte Frequenzband entspricht dem für die AE-Anwendung und erstreckt sich von 100 bis 900 kHz. In vorangegangenen Experimenten wurden die Sensoren für Berstversuche von Druckbehältern verwendet, weshalb der Zustand dieser teilweise stark unterschiedlich ist. Eine Referenz zum unbeschädigten Zustand liegt nicht vor. Im Rahmen der Untersuchung der Selbstdiagnose werden die Resistanz, der Realteil der elektromechanischen Impedanz, sowie die Suszeptanz, der Imaginärteil des Kehrwerts der Impedanz, herangezogen. Das typische EMI-Spektrum eines AE-Sensors im frei schwingenden Zustand zeigt Peaks in beiden Spektren bei den Eigenfrequenzen sowie nahezu lineare Bereiche zwischen den Eigenfrequenzen in der Suszeptanz (Abb. 1).

Aus den EMI Spektren der AE-Sensoren werden Merkmale extrahiert und eine Baseline von unbeschädigten Sensoren ermittelt, die zur Zustandsbestimmung des Sensors genutzt werden. Die Klassifizierung der Sensoren wurde mittels einer Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis – PCA) nachvollzogen. Hierzu wurden vier unterschiedliche Merkmale aus Resistanz und Suszeptanz sowie ein weiteres aus der Suszeptanz extrahiert. Diese sind

- Korrelationskoeffizient (Correlation Coefficient – CC),
- Quadratischer Mittelwert (Root-Mean-Square – RMS),
- Ähnlichkeit der Eigenfrequenzen anhand des Jaccardkoeffizienten (Jaccard Coefficient – JC),
- Summe der Peak Amplituden (PA),
- Steigung des linearen Bereichs (SL, von 140 kHz bis 160 kHz, nur Suszeptanz).

Die extrahierten Merkmale werden in der PCA nach Entfernung des Mittelwertes und Standardisierung verwendet, um die Hauptkomponenten zu ermitteln. Die Schadensindizes werden analog zu [9] ermittelt. Hierbei werden die T^2 - und Q-Statistik als Maß für die Anpassung innerhalb und außerhalb des statistischen Modells herangezogen.

Im Folgenden wird ein numerisches Modell eines applizierten VS150-M-Sensors der Firma Vallen verwendet, um die Möglichkeiten der Selbstdiagnose definierter Defekte zu untersuchen. Ein VS150-M ist ein breitbandiger AE-Sensor mit einem Frequenzband von 100 bis 450 kHz, welches ebenfalls für die Simulationen der EMI genutzt wurde. Das numerische Modell ist rotationssymmetrisch, was zur Reduktion der Simulationsdauer beiträgt, jedoch mit Vereinfachungen einhergeht. Diese sind der Wegfall des elektrischen Anschlusses und der internen Verdrahtung sowie die Einbringung rotationssymmetrischer Defekte. Das Modell besteht aus dem piezoelektrischen Element, einem Gehäuse mit Schutzring, Verschleißplatte und Vergussmasse sowie einer Aluminiumplatte, auf welcher der Sensor appliziert ist. Als Defekte des AE-Sensors sind ein Bruch des piezoelektrischen Elementes mit und ohne Separierung der Elektroden des Piezoelements sowie eine Ablösung des Elementes vom Gehäuse simuliert (Abb. 2).

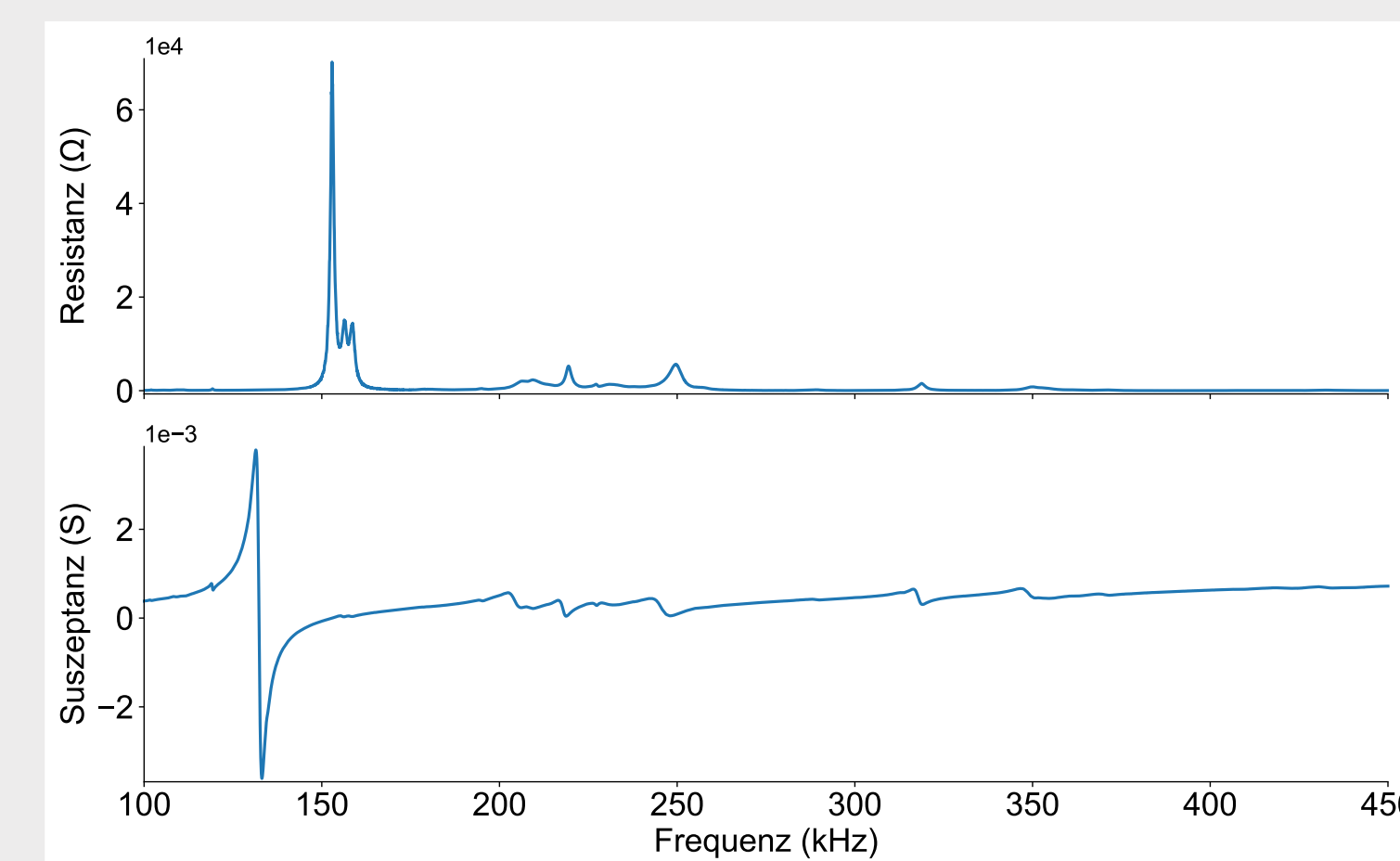


Abbildung 1. Beispiel eines typischen EMI-Spektrums eines AE-Sensors, dargestellt als Resistanz (oben) und Suszeptanz (unten). Das Spektrum wurde an einem ungenutzten VS150-M Sensor der Firma Vallen gemessen.

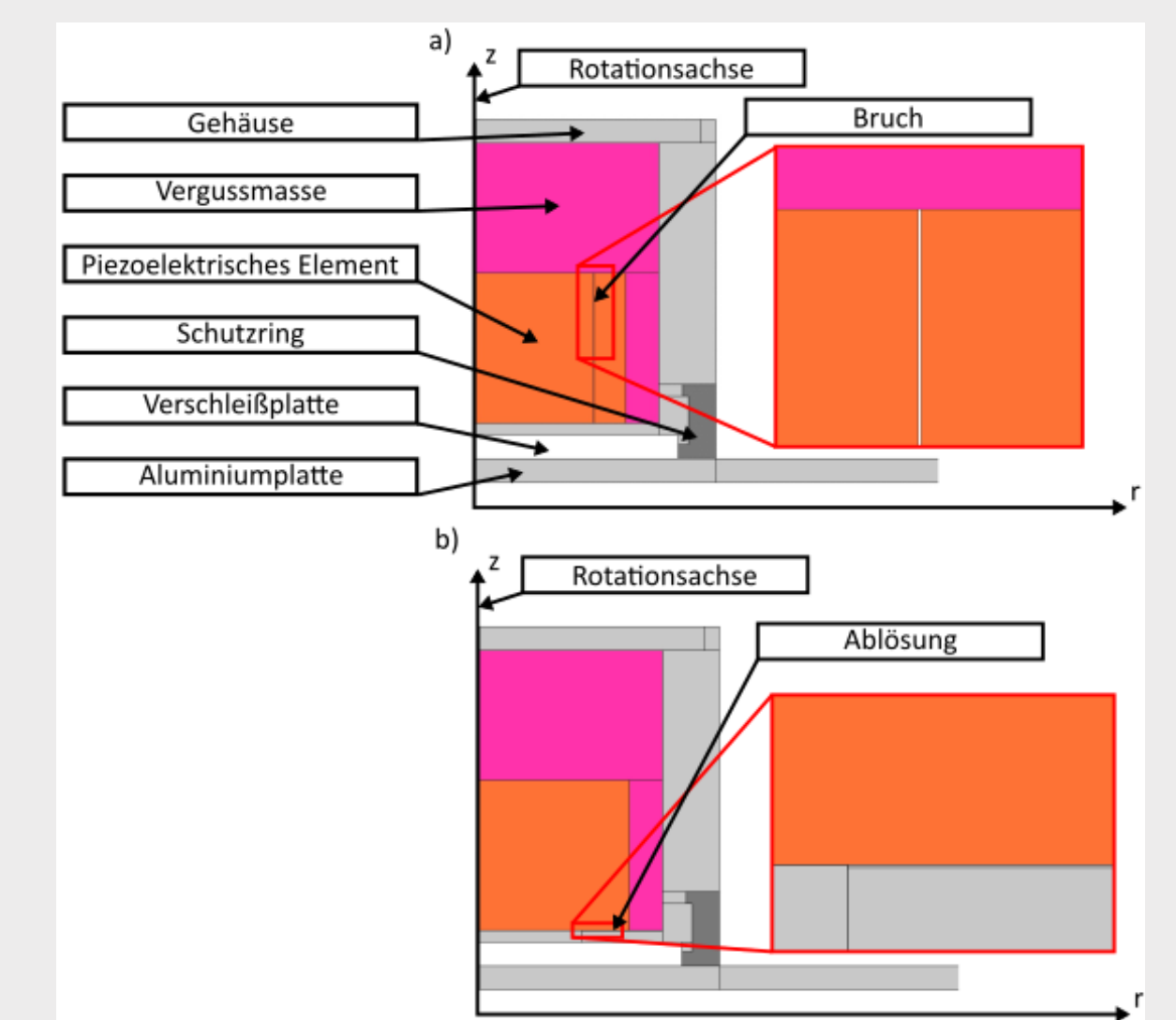


Abbildung 2. Rotationssymmetrisches numerisches Modell des AE-Sensors mit den Defekten a) Bruch des piezoelektrischen Elements und b) Ablösung des piezoelektrischen Elements vom Gehäuse.

Diskussion

Die für die PCA herangezogene Datengrundlage von 29 Sensoren ist für eine fundierte statistische Aussage vergleichsweise klein. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen der PCA sowie den beiden Schadensindizes T^2 - und Q-Statistik eine Aussage über den Zustand des AE-Sensors treffen. In den vollständigen Ergebnissen der Autoren [1] wird außerdem gezeigt, dass sich der Trainingsdatensatz auch noch weiter verringern lässt und die dadurch zur Verfügung stehenden unbeschädigten Testdaten sich dennoch von den geschädigten Sensoren unterscheiden lassen. Dabei wird ebenfalls deutlich, dass es bei der Methode noch Verbesserungsmöglichkeiten gibt, unter anderem bei der Berechnung der Baseline. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zeigen, dass ein geschädigter AE-Sensor von einem unbeschädigten Sensor differenziert werden kann. Zusätzlich zeigen alle simulierten Defekte unterschiedliche charakteristische Merkmale, anhand derer sie sich unterscheiden lassen. Die Verschiebung der ersten Eigenfrequenz erlaubt die Unterscheidung zwischen einem Bruch des piezoelektrischen Elements und einer Ablösung desselben. Zur Unterscheidung eines Bruchs mit und ohne Separierung der Elektroden können sowohl die Amplitude als auch die Steigung des linearen Bereichs der Suszeptanz herangezogen werden. Die Änderung der Steigung ist, wie aus den Ergebnissen von [10] zu erwarten, sichtbar und durch eine Änderung der elektrischen Eigenschaften begründet. Das numerische Modell des freien AE-Sensors bildet die experimentellen Messungen in einigen Aspekten gut ab. In anderen Aspekten besteht noch Optimierungsbedarf bezüglich Materialparameter, insbesondere der Dämpfungsparameter, und Art der Simulation. Details hierzu finden sich auch in [2].

Quellen

- [1] S. Priebe et al. Electromechanical Impedance of Acoustic Emission Sensors used for Self-Diagnosis. 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024), June 10-13, 2024 in Potsdam, Germany.
- [2] C. Reinhardt. Self verification capabilities of acoustic emission sensors using the electro-mechanical impedance spectrum – an FEM-based study. Master's thesis, Bochum University of Applied Sciences, 2023.
- [3] DIN EN 15495. Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemission – Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Beanspruchung – Zonenortung von Schallemissionsquellen, February 2008.
- [4] H. Vallen. A new iso standard for ae sensor sensitivity determination uses the face-to-face stimulation method. e-Journal of Nondestructive Testing, 28(1), January 2023.
- [5] M. G. R. Sause et al. Kontinuierliche und wiederkehrende Prüfung von Schallemissionssensoren. In 21. Kolloquium Schallemission, Fulda, Germany, March 2017.
- [6] Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren DGZFP. Richtlinie SE 02 - Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., July 2014.
- [7] I. Mueller and C.-P. Fritzen. Inspection of piezoceramic transducers used for structural health monitoring. Materials, 10(1):71, January 2017.
- [8] G. H. Park et al. Piezosensor self-diagnostics using electrical impedance measurements. Submission to the Proceedings of 1st International Conference on Adaptive Structures and Technologies, January 2004.
- [9] R. Penha et al. Using Principal Component Analysis Modeling to Monitor Temperature Sensors in a Nuclear Research Reactor. Maintenance and reliability conference (MARCON 2001), 2001.
- [10] I. Buethle et al. Model-based detection of sensor faults under changing temperature conditions. Structural Health Monitoring, 13(2):109–119, December 2013.

Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchungen von 29 WD-Sensoren in unterschiedlichen Zuständen wurden auf das Potenzial zur Selbstdiagnose untersucht. Die ermittelten Schadensindizes, T^2 - und Q-Statistik, zeigen, dass eine automatisierbare Auswertung des Zustands möglich ist. Trotz der großen Bandbreite an Schädigungen ist die Zahl der Sensoren für eine zuverlässige statistische Aussage zu gering. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema sind notwendig, um zugrundeliegende physikalische Effekte erfassen zu können.

Die numerischen Modellierungen der unterschiedlichen Defekte von AE-Sensoren verdeutlichen, dass neben der Detektion eines Defekts mittels der EMI ebenfalls eine Klassifizierung möglich ist. Zur Überprüfung des numerischen Modells wurde dieses mit experimentellen Untersuchungen verglichen. Dies zeigt die grundlegende Realisierbarkeit jedoch auch Abweichungen potentiell aufgrund von unbekanntem Materialparametern und Vereinfachungen des numerischen Modells.