

Herausforderungen für Langzeitüberwachung von Strukturen und Komponenten mit Schallemission

Andreas J. BRUNNER¹, Horst TRATTNIG²

¹ privat, Zürich, (ehemals Empa Dübendorf) Schweiz

² Vallen Systeme GmbH, Wolfratshausen

Kontakt E-Mail: andreas.brunner@empa.ch

Kurzfassung. Alternde Infrastruktur in vielen Ländern stellt bei beschränkten Mitteln für Unterhalt oder Sanierungen die Herausforderung, mit einfachen und zuverlässigen Methoden die Strukturintegrität zu untersuchen und quantitativ zu bewerten. Die Anforderungen an die Dauer entsprechender Langzeit-Strukturüberwachung gehen tendenziell zu mehreren Jahren oder gar bis zu Jahrzehnten. Schallemissionsüberwachung ist eine Methode, die dafür gut geeignet erscheint. Daher sind dazu in den letzten Jahren Forschungs- und Entwicklungsprojekte an unterschiedlichen Prüfobjekten durchgeführt worden. Ein wichtiger Aspekt, über den bisher aber nur wenig publiziert worden ist, sind die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Schallemissions-Messsysteme und Sensoren selbst. Publierte Beispiele umfassen meist Messzeiten von etwa einem Jahr oder weniger und Hinweise auf dabei aufgetretene Probleme mit der Messtechnik sind rar. In diesem Beitrag werden Erkenntnisse aus der Literatur sowie aus einem innerhalb des Fachausschusses Schallemissionsprüfung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung versandten Fragebogens zum Thema Langzeitüberwachung mit Schallemission zusammengefasst. Einen wesentlichen Einfluss haben die Umwelt- und Betriebsbedingungen der Prüfobjekte, z.B. Temperaturvariation, Vibrationen, Schadstoffe, oder unsachgemäße Bedienung des Messsystems. Dadurch induzierte Probleme betreffen mehrheitlich die Sensorhalterung oder die Computer-Steuerung bzw. die Datenspeicherung und weniger die spezifischen Sensoren und die Datenerfassung. Daraus werden Empfehlungen für die Planung und Implementierung von Langzeitüberwachungs-Systemen mit Schallemission abgeleitet.

Einführung

Für den sicheren, zuverlässigen Betrieb von Infrastrukturanlagen wie Rohrleitungssysteme oder Lagerbehälter für diverse Medien, z.B. Gase oder Betriebsstoffe, gibt es seit längerem standardisierte Prozeduren für Schallemissionsprüfung (SEP), einerseits für Abnahmeprüfungen vor der Inbetriebnahme und andererseits für periodische Inspektionen im Betrieb, z.B. [1-5]. Für langfristige, im Wesentlichen kontinuierliche Zustands- oder Prozessüberwachung an industriellen Produktionsanlagen gibt es weniger Standards, z.B. [6-10], wobei nicht alle explizit Schallemission beinhalten. ISO 22096 [9] beschreibt die Anwendung der Schallemission auf die Zustandsüberwachung und Diagnostik von Maschinen im Betrieb und ISO 18436-6 [10] die entsprechenden Anforderungen an das Prüfpersonal. Für die Überwachung von Bauwerken wie Brücken und Tunnels, für die im Vergleich zu Maschinen



deutlich längere Betriebsdauern gelten, werden nun vermehrt Standards entwickelt, z.B. [11,12]. Im Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren (FA-SEP) der DGZfP wird in Zusammenarbeit mit weiteren Fachgremien eine Richtlinie zur Überwachung vorgespannter Betonbrücken auf Spanndrahtbrüche mittels Schallemissionsprüfung vorbereitet, diese basiert u.a. auf Arbeiten der BAM [13]. Eine Studie der ETH Zürich an einer 1952 erbauten Spannbetonbrücke wies in einem Jahr elf Spanndrahtbrüche nach, die mit Potentialmessungen bzw. visueller Inspektion verifiziert wurden [14].

Die Überwachung von Bauwerken mit Schallemission gilt als ein vielversprechender Ansatz für die Bewertung der Betriebstauglichkeit. Die langfristige Nutzungsdauer von Bauwerken von fünf oder mehr Jahrzehnten stellt eine Herausforderung für die Überwachungs-Systeme dar. Zwei Literaturstudien haben gezeigt, dass zum Langzeitverhalten der Schallemissions-Messsysteme für solche Anwendungen in den meisten Normen bzw. Richtlinien bisher kaum quantitative Angaben zu Problemen bzw. deren Vermeidung verfügbar sind [15,16]. Wichtig und in mehreren Dokumenten mindestens qualitativ erwähnt ist die Kopplung der Sensoren an das Prüfobjekt. Die dazu publizierten Hinweise betreffen einerseits das Koppelmittel und andererseits die Vorrichtung, welche die Sensoren auf dem Prüfobjekt fixiert und den notwendigen Anpressdruck garantiert.

In diesem Beitrag werden ausgewählte Literatur und Normen präsentiert und bezüglich quantitativer Aspekte der Langzeitbeständigkeit der Schallemissions-Messsysteme diskutiert, die in den beiden Studien [15,16] nicht erfasst wurden.

1. Quantitative Daten zum Langzeitverhalten von SE-Systemen

1.1 Zusätzliche Literatur zu Brückenüberwachungen mit SEP

Von der in [15] bzw. [16] zur Überwachung von Brücken zitierten Literatur (total elf Publikationen) geben nur wenige quantitative Information bezüglich Langzeitverhalten des Messsystems. Die längste Überwachungsdauer in diesen Publikationen ist (zum Zeitpunkt der Publikation 2021) jene von Niederleithinger et al. [17] mit etwa drei Jahren. In diesem Zeitraum wurde in einer 1950 erbauten Betonbrücke ein Spanndrahtbruch nachgewiesen, der aber als strukturell nicht kritisch bewertet wurde. Probleme mit dem Mess-System werden nicht erwähnt. Weitere, in [15,16] nicht zitierte Publikationen zu diesem Thema sind [13,14,18-19]. Die Erkenntnisse daraus werden hier kurz zusammengefasst.

Pirskawetz et al. [13] nutzten den Rückbau einer Spannbetonbrücke (Baujahr 1969) für Versuche mit gezielter, stufenweiser Schädigung von zwei Spanngliedern durch Ansägen und somit zur Querschnittsreduktion einzelner Spanndrähte. Neben Schallemission wurden noch Fotogrammetrie und Faseroptik für lokale Deformationsmessungen eingesetzt. Zusätzlich wurde auch eine globale Schwingungsanalyse durchgeführt. Als Schlussfolgerung wird vermerkt, dass die Schallemission zurzeit als einzige Methode Spanndrahtbrüche zuverlässig detektiert und lokalisiert. Die Schwingungsanalyse müsste weiter entwickelt werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Messtechnische Probleme werden nicht vermerkt, die Messdauer war aber auf wenige Tage beschränkt.

Fricker und Vogel [14] behandeln eine Überwachung während ca. einem Jahr (Juni 2004 bis Juni 2005), bei der mit sechzehn Sensoren in einer stark geschädigten Brücke (Baujahr 1952) mehrere Spanndrahtbrüche nachgewiesen wurden. Die Publikation beschreibt eine sogenannte "Vergleichsquelle". Eine unter der überwachten Brücke installierte elektrolytische Zelle induzierte in einzelnen, freigelegten und vom Bündel isolierten Spanndrähten innerhalb 20 bis 40 Stunden Brüche, die als Vergleichssignale aufgezeichnet wurden. Wie in [17] werden auch hier keine Probleme mit der Messtechnik erwähnt.

Tillman et al. [18] untersuchten die Eignung von Schallemissionsmessungen für die Überwachung eines Teils einer Stahlbogenbrücke (Baujahr 1979). Dafür wurde zwischen dem 1. November 2012 und 31. Oktober 2014 ein Mess-System mit sechzehn Sensoren eingesetzt. Ein zweites Mess-System wurde im Mai 2013 auf dem zweiten Brückenbogen installiert. Für Vergleichssignale von Rissbildung wurden bruchmechanische Prüfkörper an die Brücke gekoppelt und belastet, bis Rissbildung auftrat. Die Publikation enthält eine detaillierte Liste der während den Messungen aufgetretenen Probleme ("Appendix D: Troubleshooting and Maintenance Timeline"). Nach ca. acht Monaten wurde z.B. festgestellt, dass nicht alle vier Batterien aufgeladen werden konnten. Dies führte zu Datenverlust. Einen Monat später wurden lose Verbindungen an zwei Solarpaneelen gefunden. Diese wurden vermutlich von Arbeitern verursacht. Es gab aber auch die Vermutung, dass Schneefall oder Bewölkung zeitweise die Effizienz der Solarpaneele reduzierte. Gleichzeitig gab es Probleme mit der Modemverbindung für die Datenübertragung. Nach 14 Monaten musste die Antenne ersetzt werden. Als nächstes wurde dann das Modem ersetzt. Für einzelne, weitere Datenverluste konnten keine eindeutige, technische Gründe gefunden werden.

Tonelli et al. [19] analysierten Schallemissionssignale, die durch in fünf Stufen zunehmende Belastung einer Spannbetonbrücke (Baujahr 1968, 2005 nach einem Erdbeben ausser Betrieb genommen) bis zu zwei- bzw. dreifacher Designlast generiert wurden. Neben Schallemission wurden weitere Messmethoden verwendet und die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit) wurden ebenfalls aufgezeichnet. Die Analyse der SEP verwendete einfache Signalparameter, nämlich Amplitude, MARSE und Spitzenfrequenz. Damit konnte eindeutig bestimmt werden, ob in der Brücke Risse existieren oder nicht, ebenso das Auftreten des ersten Risses. Weiter konnte die maximale Last, welche auf die Brücke bisher aufgebracht worden war, ermittelt werden. Eventuell können die Daten zudem durch Clusterbildung in den Amplituden-Spitzenfrequenz-Grafiken Hinweise auf die Art der Defekte liefern, dafür müssten aber weitere Experimente durchgeführt und analysiert werden. Die Versuchsdauer ist in der Publikation nicht erwähnt, aber es kann von Kurzzeit-Belastungen ausgegangen werden. Probleme mit der Messtechnik werden nicht erwähnt, sind aber unter diesen Umständen auch wenig wahrscheinlich.

1.2 Zusätzliche Literatur zu Anlagen- und Prozessüberwachung mit SEP

Schon seit vielen Jahren wird Schallemissionsprüfung als geeignetes Mittel zur Prozess- oder Anlagenüberwachung untersucht. Beispiele dazu finden sich in [20], u.a. Werkzeugabnutzung, Lagerschäden an rotierenden Komponenten, Degradation von Dichtungen, etc. Die Autoren betonen, dass es für viele dieser Anwendungen keine brauchbare Alternative zur SEP gibt. Wegen der Komplexität der Signale und dem relativ hohen Anteil an Störsignalen werden jetzt für diese Signalanalysen intensiv Methoden der künstlichen Intelligenz entwickelt, siehe z.B. [21-23]. Allerdings scheint dabei das Langzeitverhalten des Schallemissions-Mess-Systems kein Thema zu sein. Keine der referenzierten Publikationen weist darauf hin, dass die Messtechnik speziell in Bearbeitungs- oder Prozessanlagen variablen mechanischen oder thermischen Belastungen ausgesetzt sein kann. Dass ein solches Umfeld durchaus zu Problemen bei der Datenerfassung führen kann, wird z.B. in [24] diskutiert. Obwohl die Sensorkopplung an einer Heizkraftwerkkomponente mit signifikanter Temperaturvariation über einen Zeitraum von drei Jahren (August 2018 bis September 2021) durch Bleistiftminentests vor und nach den Versuchen bei vier der sechs Sensoren deutlich abgenommen hatte (Amplitudenreduktion zwischen 6 und 15 dB_{AE}), konnten damit über die ganze Versuchsdauer Signale aufgezeichnet werden. Es gab aber Datenverluste, da der PC, auf dem die Daten gespeichert wurden, defekt wurde. Ebenso musste der Bildschirm einmal ersetzt werden [15]. Möglicherweise spielten die Vibrationen im Umfeld der Messung dabei eine Rolle.

1.3 Zusätzliche quantitative Information aus Normen

Zusätzlich zur bisher diskutierten Literatur gibt es einige Normen, die quantitative Hinweise geben. Ein Beispiel ist ASTM E2374 [25] mit empirisch ermittelten Werten für die Änderung der Sensorempfindlichkeit bei Temperaturänderungen oder mit zunehmender Überwachungsdauer (Tabelle 1).

Tabelle 1. Einfluss von Zeit oder Temperatur auf die Sensorempfindlichkeit

Einflussgrösse	Einfluss auf	Art der Wirkung	Mögliche Variation *
– Kurzzeit [min]	– Koppelmittel	– Schichtdickenreduktion	– 0 bis +2 dB _{AE}
– Längere Dauer [h]	– Koppelmittel	– Durchsacken	– 0 bis -10 dB _{AE}
– Langzeit [Tage]	– Koppelmittel	– Austrocknen	– 0 bis -70 dB _{AE}
– Erhöhte Temperatur	– Koppelmittel	– Verdunstung	– 0 bis -70 dB _{AE}
– Temperaturreduktion	– Koppelmittel	– Verhärtung	– 0 bis +5 dB _{AE}
– Langzeitbetrieb	– Messelektronik	– Versagen	– 0 bis -70 dB _{AE}
– Erhöhte Temperatur	– Messelektronik	– (zeitweises) Versagen	– 0 bis -70 dB _{AE}
– Erhöhte Temperatur	– Prüfobjekt	– Abnahme Materialdichte	– 0 bis 2%
– Erhöhte Temperatur	– Signalgeschwindigkeit	– Abnahme	– 0 bis 2% oder mehr

* Quantitative Schätzwerte aus [25]

Die Daten in Tabelle 1 zeigen, dass viele Einflüsse das Koppelmittel betreffen. Die Wahl geeigneter Koppelmittel wird im Detail in [26] diskutiert. Für Langzeit-Überwachung werden Klebstoffe empfohlen, wobei bei der Auswahl ihr Verhalten unter Temperaturvariation und eventuell die Einwirkung von Medien berücksichtigt werden müssen.

Bezüglich Signalanalyse definiert ASTM E1419/E1419-M [27] ein Kontrollintervall von einem Monat für die korrekte Funktion des Signalprozessors. Dieser soll mit Signalen aus einem elektronischen Funktionsgenerator überprüft werden, wobei die Amplitude der aufgezeichneten Signale um maximal ± 2 dB_{AE} von jener des Funktionsgenerator-Ausgangs abweichen darf. Oft wird in Normen oder Richtlinien aber ein Kontrollintervall von einem Jahr vorgeschlagen oder gefordert.

2. Diskussion

2.1 Sensorüberprüfung

In [16] werden auch mögliche Temperatureffekte diskutiert, welche die Empfindlichkeit piezokeramischer Sensoren reduzieren können. Solche Effekte können einerseits durch Prüfungen bei erhöhten oder tiefen Temperaturen außerhalb konstanter Labortemperatur (ca. +20°C bis +25°C) oder durch Prüfungen in einem Umfeld mit deutlich variierender Temperatur induziert werden. Ein Beispiel für Prüfung bei erhöhter Temperatur in [16] ist die Überwachung eines chemischen Reaktorbehälters aus Stahl mit einer Oberflächentemperatur zwischen etwa +100°C und +110°C mit Sensoren, die für Messungen bis +150°C spezifiziert waren. Vergleichende Messungen bei +20°C und erhöhter Temperatur zeigten eine deutliche Reduktion der mittels Bleistiftminenbrüchen generierten Signale. Dies führte dazu, dass die Sensorabstände für die Überwachung reduziert werden mussten, um eine ausreichende Messempfindlichkeit zu erzielen.

Ein anderes Beispiel sind Untersuchungen an zwei Typen piezokeramischer Materialien (nicht an daraus hergestellten Sensoren) mit Curie-Temperaturen von +325°C bzw. +360°C [28], bei der nach kurzzeitiger Exposition (ca. 10 Minuten) bei erhöhten Temperaturen zwischen 30% und 80% der Curie-Temperaturen deutliche Alterungseffekte

nachgewiesen wurden. Andererseits zeigten Kurzzeit-Messungen (Abb. 1) an einem piezokeramischen Sensor (spezifizierte Betriebstemperatur zwischen -5°C und $+85^{\circ}\text{C}$) bei mehrmaliger Temperaturvariation zwischen -40°C und $+110^{\circ}\text{C}$ zwar eine Abnahme von ca. 5 dB_{AE} bei -40°C bzw. eine Zunahme von ca. +3 dB_{AE} bei $+110^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zur Messung bei $+25^{\circ}\text{C}$. Eine permanente Veränderung wurde nach diesen Versuchen nicht beobachtet.

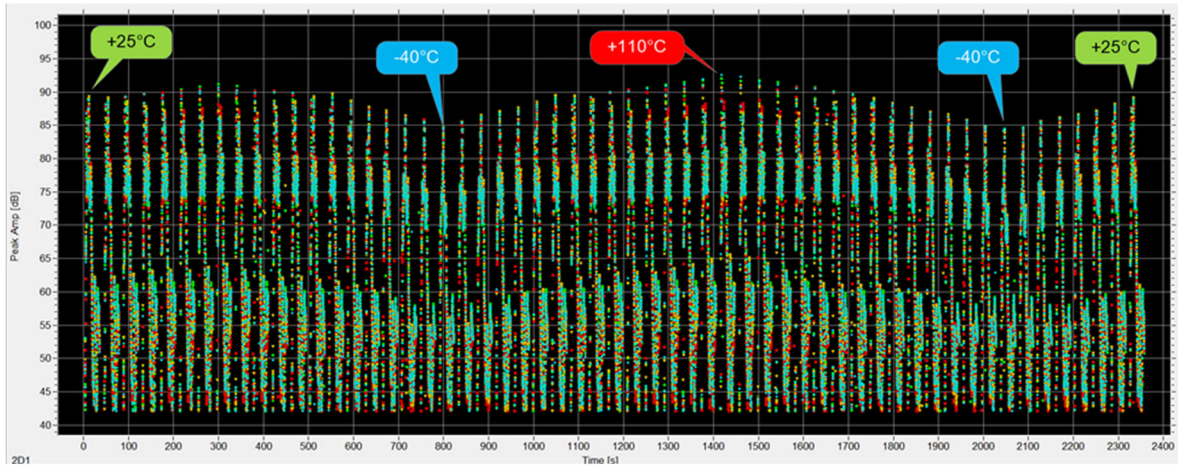


Abb. 1. Sensor-Empfindlichkeitsprüfung für einen Sensor VS75-V bei mehrfachem Zyklen zwischen -40°C und $+10^{\circ}\text{C}$, die Amplituden nehmen bei Temperaturabnahme ab und bei Zunahme zu, die Messungen erfolgten bei jeder Temperatur nach einem Zeitintervall, das genügenden Temperatúrausgleich

Bei Langzeitüberwachung ist eine periodische Überprüfung der Sensorempfindlichkeit essentiell, die entsprechenden Messverfahren geben Informationen sowohl zur Kopplungsqualität als auch zum Sensorverhalten selbst. Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer solchen Prüfung im Labor, der Sensor war zwischen den zwei Messungen 15 Jahre im Gebrauch. Die Unterschiede zwischen den zwei Kurven liegen innerhalb der zulässigen Variation, die in vielen Normen mit 3 dB_{AE} definiert wird.

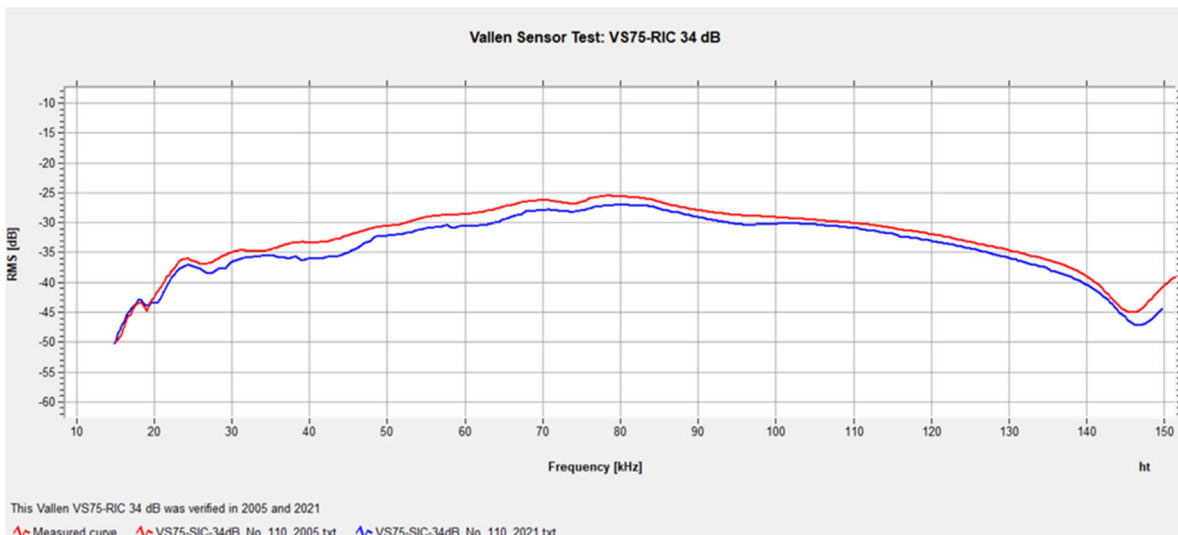


Abb. 2. Periodische Überprüfung eines Sensors (Typ Vallen VS75-RIC 34 dB) mit integriertem Vorverstärker nach 15 Jahren mit dem gleichen Testgerät, die Unterschiede zwischen den Messkurven liegen innerhalb der zulässigen Variation.

Abb. 3. zeigt eine vergleichbare Messung für einen anderen Sensor (Typ SE-150M von Dunegan) nach 18 Jahren Nutzung, im Wesentlichen in einem Laborumfeld. Wie in Abb.

2 sind Unterschiede zwischen den Kurven erkennbar. Die zwei Kurven stammen in diesem Fall aber von zwei unterschiedlichen Prüfgeräten. Daher stellt sich die Frage, welche Rolle eventuelle Unterschiede in der Kopplung (z.B. durch das verwendete Koppelmittel oder den Anpressdruck), dem verwendeten Wandler für die Anregung und den Messeinstellungen spielen. Die 2009 aufgezeichnete Kurve erscheint im Vergleich zur Herstellerkurve geglättet, höchstwahrscheinlich war die Messauflösung unterschiedlich. Daher ist es wichtig, neu gelieferte Sensoren mit dem beim Anwender genutzten Testgerät und identischen Messparametern zu überprüfen, um später aussagekräftige Vergleichskurven zu erhalten.

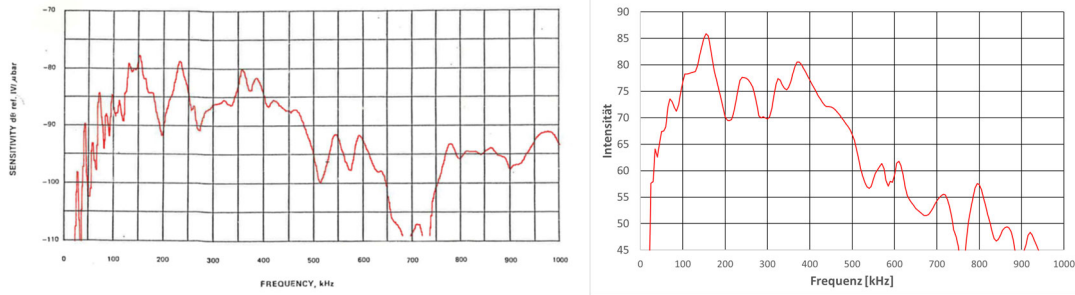


Abb. 3. Empfindlichkeit in Funktion der Frequenz (Sensortyp SE-150M #456 von Dunegan) links Messung des Herstellers vom 25.09.1991, rechts Messung mit Vallen Sensortest vom 01.12.2009 nach 18 Jahren Gebrauch, mehrheitlich bei Labormessungen mit relativ geringer Variation der Umweltbedingungen.

Für Messungen bei tiefen Temperaturen, z.B. an Behältern für Lagerung und Transport von Flüssiggasen mit Temperaturen unterhalb -196°C wurde ein spezieller Tieftemperatursensor entwickelt [29]. Dieser Sensor ergab nach zwanzig Zyklen mit Eintauchen in Flüssigstickstoff (nominell bei -196°C) und nachfolgender Messung bei Raumtemperatur keine signifikante Veränderung der Empfindlichkeit. Die Anwendung zeigte dann, dass die üblichen Koppelmittel wie Öle, Silikonpaste oder Teflonpaste beim Abkühlen unterhalb 0°C deutliche Schallemission produzierten. Daraus ergab sich die Empfehlung, die Sensoren "trocken", d.h. ohne Koppelmittel, direkt auf die Oberfläche des Behälters zu koppeln.

2.2 Überprüfung der restlichen Messkette

Für die Überprüfung der restlichen Teile der Messkette (Datenerfassung, Signalauswertung und –Darstellung sowie Datenspeicher) gibt es für die Datenerfassungs- und Signalauswertungs-Geräte Normen für die Überprüfung der korrekten Gerätefunktion, z.B. [25,30]. Die in [15] diskutierten Daten weisen darauf hin, dass bei Langzeitüberwachungen mittels SEP eher die Peripheriegeräte (z.B. Mess-PC, Datenspeicher, Datenübertragung) als die Datenerfassung bzw. Auswerteeinheit fehleranfällig sind. Ein wichtiger Aspekt ist, in welchen Zeitintervallen alle diese Komponenten überprüft werden sollen. Für die Definition der Intervalle sind die Zuverlässigkeit der Geräte und die geforderte technische Verfügbarkeit und die eventuell eingebaute Redundanz zu betrachten [15].

3. Schlussfolgerungen

Die aus Literatur und Normen gewonnenen Informationen zum Langzeitverhalten der SEP-Messkette, die in [15,16] sowie in dieser Publikation dargestellt werden, deuten auf folgende Aspekte als wesentlich hin:

- (1) Probleme mit der SEP-Messkette bzw. einzelnen Komponenten des Mess-Systems können bereits bei kurzzeitigen Überwachungen von weniger als einem Jahr auftreten. Über das Langzeitverhalten der SEP-Messkette über mehr als einige Jahre

ist nichts publiziert, auch wenn einzelne Dienstleister über Erfahrungen mit Langzeitüberwachung von mehr als zehn Jahren verfügen.

- (2) Kommerzielle SE-Sensoren und Datenerfassungsgeräte können für Langzeitversuche eingesetzt werden, die bisher publizierten Daten umfassen Überwachungen von etwa drei bis vier Jahren. Eine periodische Überprüfung der Sensorkopplung ist wichtig, Sensoren können, mindestens unter Laborbedingungen, eine Nutzungsdauer von 20 oder mehr Jahren erreichen. Bei nicht oder nur schwierig zugänglichen Sensorpositionen (z.B. in der Nuklear- bzw. Energietechnik oder in der Raumfahrt) kann eine gewisse Redundanz sinnvoll sein, vor allem, wenn eine genügend genaue Ortung der SE-Quellen von Bedeutung ist.
- (3) Erhöhte Temperaturen oder Temperaturvariation, auch im für die Sensoren als zulässig spezifizierten Bereich, können durch Depolarisation des Piezomaterials im Langzeitbetrieb zur Reduktion der Sensorempfindlichkeit führen. Zum Einfluss von Messungen bei Kryotemperaturen wurden bisher kaum Informationen publiziert.
- (4) Die Qualität der Sensorkopplung kann durch Umwelteinflüsse (z.B. Temperaturvariation, Schlageinwirkung, und eventuell Medienexposition) reduziert werden. Sensorkabel und eventuell Sensorhalterungen können auch durch unabsichtliche Berührungen durch Personen beschädigt werden. Vandalismus wurde in der Literatur bisher nicht erwähnt, ist aber als mögliche Problemursache denkbar.
- (5) Technische Probleme in der Messkette, die zu Datenverlust geführt haben, sind in mehreren Fällen beobachtet worden, diese betrafen im Wesentlichen den Mess-PC und die Datenspeicher, aber auch Komponenten zur Datenübertragung (z.B. Modem) oder zur Energieversorgung (z.B. Solarpaneele, Batterien). Es kann daher sinnvoll sein, Teile der Messkette in speziell geschützten Räumen zu platzieren und periodisch Kopien der Daten abzulegen. Redundante Energieversorgung des Mess-Systems, z.B. mit Batterien, kann ebenfalls dazu beitragen, Datenverluste zu vermeiden.
- (6) Die Sensorkopplung, die Sensorempfindlichkeit und die korrekte Funktion der Messkette müssen periodisch überprüft werden. Diese Kontrollintervalle müssen für jede Überwachung je nach Messanforderungen und Umweltbedingungen definiert werden.
- (7) Bei der Planung der Überwachung sind Reparaturmöglichkeiten und Ersatzteilbeschaffung bzw. Ersatzteillager zu berücksichtigen. Bei beschränktem Zugang zum Prüfobjekt sind unter Umständen redundante Mess-Stellen bzw. Sensoren sinnvoll, um eine bestimmte Nachweisempfindlichkeit oder, wie oben bereits erwähnt, die Genauigkeit der Quellenortung zu garantieren.

Referenzen

- [1] EN 13445-5: Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 5: Inspektion und Prüfung. Beuth-Verlag (2021) 1-85. doi: 10.31030/3296034
- [2] EN 13480-5 Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 5: Prüfung; Deutsche Fassung. Beuth-Verlag (2017) 1-38. doi: 10.31030/2778195
- [3] EN 14584 Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung - Planare Ortung von Schallemissionsquellen. Beuth-Verlag (2013) 1-19. doi: 10.31030/1926307
- [4] EN 15856 Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Allgemeine Grundsätze der Schallemissionsprüfung zum Nachweis von Korrosion innerhalb von mit Flüssigkeit gefüllten metallischen Umschließungen. Beuth-Verlag (2010) 1-14. doi: 10.31030/1541531
- [5] prEN 17391 Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Überwachung der Schallemission von metallischen Druckgeräten und -strukturen im Betrieb - Allgemeine Grundsätze. Beuth-Verlag (2019) 1-85. doi: 10.31030/3049019
- [6] ISO 13373-1 Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures. International Organization for Standardization (2002), bestätigt 2018. 1-51.

- [7] ISO 13381-1 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Prognose - Teil 1: Allgemeine Anleitungen. International Organization for Standardization (2015) 1-21.
- [8] ISO 14830-1 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Überwachung und Diagnostik auf der Basis tribologischer Analysen - Teil 1: Allgemeine Anleitung. International Organization for Standardization (2019). 1-49.
- [9] ISO 22096 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen – Schallemissionsverfahren (2007) 1-8.
- [10] ISO 18436-6 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Anforderungen an die Qualifizierung und Bewertung von Personal - Teil 6: Schallemission (2021) 1-11.
- [11] NDIS 2421 Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission.
- [12] ISO 16838 Non-destructive testing -- Acoustic emission testing -- Test method for classification of active cracks in concrete structures. International Organization for Standardization (2019) 1-5.
- [13] S. Pirskawetz, O. Steinbock, F. Hille, S. Schmidt, D. Hofmann: Erfahrungen aus dem Rückbau der Brücke am Altstädter Bahnhof in der Stadt Brandenburg Teil 2: Schadensmonitoring bei zerstörenden Versuchen. Beton- und Stahlbetonbau 117, Heft 8 (2022) 581-589. doi: 10.1002/best.202200052
- [14] S. Fricker, Th. Vogel: Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring. Construction and Building Materials 21 (2007) 501–510. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.04.008
- [15] A.J. Brunner: Structural Health and Condition Monitoring with Acoustic Emission and Guided Ultrasonic Waves: What about Long-term Durability of Sensors, Sensor Coupling and Measurement Chain? Applied Sciences, 11(24) (2021), 11648, 1-20. doi: 10.3390/app112411648
- [16] A.J. Brunner, H. Trattnig: Evaluation of experience from long-term AE monitoring, Proceedings 35th European Conference on Acoustic Emission Testing and 10th International Conference on Acoustic Emission (Eds. Roman Šturm, Tomaž Kek), ndt-net 2023 Issue 1 (2023) 27620 1-8. doi: 10.58286/27620
- [17] Niederleithinger, E., Sodeikat, Ch., Eppele, N., Liao, C.-M., Hindersmann, I. (2021) Acoustic emission and ultrasonic monitoring of a prestressed concrete bridge in its final years. Proceedings 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures (Eurostruct), Padua, Italy, August 29 – September 1, 2021, p. 1-10.
- [18] A.S. Tillman, A.E. Schultz, J.E. Campos: Protocols and Criteria for Acoustic Emission Monitoring of Fracture-Critical Steel Bridges. Minnesota Department of Transportation Technical Report MN/RC 2015-36 (2015) 1-164. Verfügbar unter <https://www.researchgate.net/publication/282912497>
- [19] D. Tonelli, M. Luchetta, F. Rossi, P. Migliorino, D. Zonta: Structural Health Monitoring Based on Acoustic Emissions: Validation on a Prestressed Concrete Bridge Tested to Failure. Sensors 20 (2020) 7272, 1-20. doi: 10.3390/s20247272
- [20] J.Z. Sikorska, D. Mba: AE Condition Monitoring Challenges and Opportunities. Proceedings of the First World Congress on Engineering Asset Management WCEAM (2006) Paper 020, 1-12.
- [21] G. Ciaburro, G. Iannace. Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review. Applied Sciences 12 (2022) 10476, 1-30. doi: 10.3390/app122010476
- [22] Padmakumar Muthuswamy, K. Shunmugesh. Artificial intelligence based tool condition monitoring for digital twins and industry 4.0 applications. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) verfügbar on-line. doi: 10.1007/s12008-022-01050-5
- [23] Z. Li, X.F. Zou, F.B. Bao, F.S. Gu, A.D. Ball: A Review of Acoustic Emission Monitoring on Additive Manufacturing. H. Zhang et al. (eds.), Proceedings of InCoME-VI and TEPEN 2021, Mechanisms and Machine Science 117, 867-878. doi: 10.1007/978-3-030-99075-6_70
- [24] A. Juengert, M. Friedrich, A. Klenk. Long Term Coupling of AE Sensors in High Temperature Environment. Proceedings 35th European Conference on Acoustic Emission Testing and 10th International Conference on Acoustic Emission (Eds. Roman Šturm, Tomaž Kek), ndt-net 2023 Issue 1 (2023) 25597, 1-10. doi: 10.58286/27597
- [25] ASTM E2374 Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification. American Society for Testing and Materials, Intl. (2016), bestätigt 2021, 1-5. doi: 10.1520/E2374-16R21
- [26] ASTM E650/E650-M Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors. American Society for Testing and Materials, Intl. (2017) 1-4. doi: 10.1520/E0650-17
- [27] ASTM E1419/E1419-M Standard Practice for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission. American Society for Testing and Materials, Intl. (2015), bestätigt 2020, 1-8. doi: 10.1520/E1419_E1419M-15AR20
- [28] Promsawat, N., Promsawat, M., Janphuang, P., Marungsri, B., Luo, Z.H., Pojprapai, S.: Investigation of the effect of temperature on aging behavior of Fe-doped lead zirconate titanate. Functional Materials Letters, 10(3), (2017)1750026, 1-4. doi: 10.1142/S1793604717500266
- [29] M. Sause, S. Schmitt, I. Nagaev, H. Trattnig: Schallemissionsprüfung an Faserverbundwerkstoffen bei kryogenen Temperaturen. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Tagung Schall21, Vortrag V11, Berichtsband 175 (2021) 1-8.
- [30] EN 13477-2 Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Charakterisierung der Prüfausrüstung - Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen. Beuth Verlag (2021) 1-84. doi: 10.31030/3238632