

# Drahtlose Übertragung von Schallemissionssignalen bei Strukturüberwachung: Anforderungen

Andreas J. BRUNNER<sup>1</sup>, Horst KÜHNICKE<sup>2</sup>, Martin OEMUS<sup>3</sup>, Lars SCHUBERT<sup>3</sup>,  
Horst TRATTNIG<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Empa, Dübendorf, Schweiz

<sup>2</sup> KERT, Kühnicke Embedded Real Time, Dresden

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Systeme für  
Zustandsüberwachung, Dresden

<sup>4</sup> Vallen Systeme GmbH, Icking

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

**Kurzfassung.** Die permanente Überwachung von Strukturen mit Schallemission kann wichtige Hinweise auf Schädigungsentwicklung unter Betriebslasten liefern. Dies generiert aber bei Aufzeichnung der Schallemissions-Wellenformen mit einem für Ortung der Signalquellen geeigneten Sensornetzwerk große Datenmengen. Werden diese Daten mittels lokaler Sensorknoten erfasst und dann drahtlos auf einen Zentralrechner übertragen, stellen die Datenübertragungsraten kommerziell verfügbarer Systeme eine Einschränkung dar. Bei Langzeitüberwachung großer Strukturen mit drahtlosen Sensorsystemen muss auch die Energieversorgung der Sensorknoten entsprechend ausgelegt sein. Im Beitrag werden die Anforderungen an Systeme für drahtlose Signalübertragung für Strukturüberwachung basierend auf Schallemission bzw. Geführten Wellen zusammengefasst und diskutiert.

## Vorbemerkung

Der Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren (FA-SEP) der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) hat 2017 eine Arbeitsgruppe "Drahtlose Sensornetze" gegründet, um den Stand der Technik drahtloser Sensornetze für Schallemission zu erfassen. Die Autoren dieses Beitrags sind Mitglieder dieser Arbeitsgruppe, der Beitrag gibt eine erste Übersicht über die generellen Anforderungen an drahtlose Sensornetze für Schallemissionsüberwachung mit dem Fokus auf Datenübertragungsraten.

## 1. Einleitung

Der Bedarf an Entwicklung bzw. Einsatz geeigneter Methoden für die Überwachung von Infrastruktur generell sowie von Bauwerken im speziellen, ist unbestritten [1,2]. Es gibt in einzelnen Ländern oder Regionen bereits Vorschriften zu Strukturüberwachungssystemen für kritische Infrastruktur, z.B. in Europa [3], oder spezifisch für Bauwerke, z.B. in China [4]. Es wird erwartet, dass der Bedarf an Überwachung wegen zunehmender Alterung der



bestehenden Infrastruktur und dem daher weiter zunehmenden Aufwand für Unterhalt in Zukunft noch ansteigen wird, wie in [5] am Beispiel von Brücken diskutiert wird. Periodische Inspektion oder permanente Überwachung sind aber nicht nur im Bauwesen gefragt [1], sondern auch bei der Energieproduktion, z.B. für Windkraftanlagen [6,7], in der Energieverteilung, z.B. für Rohrleitungen und Rohrleitungssysteme [8], in der Luft- und Raumfahrt [9] oder im Schienenverkehr [10]. Schallemissionsanalyse (SEA) ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode die neben Anwendungen im Transportwesen oder auf Druckbehälter [11] auch für die Langzeit-Überwachung von Strukturen, wie z.B. Bauwerke, genutzt werden kann [12-14]. Aus diesen Prüfbeispielen ergeben sich bei drahtloser Signalübertragung gewisse Anforderungen an die Sensor- und Gerätetechnik für Schallemissionsüberwachung und -analyse.

## **2. Allgemeine Anforderungen an drahtlose Messsysteme für Schallemissionsprüfung**

Die Größe der zu überwachenden Strukturen sowie die Zeitdauer der Überwachung stellen eine Gruppe von Anforderungen an das Schallemissions-Messsystem und dessen Komponenten. Falls das gesamte Prüfobjekt und nicht nur ein Teil überwacht und dabei die Quellen der Schallemissionssignale geortet werden sollen, erfordert dies ein genügend dichtes Netz von Sensoren und somit eine entsprechende Anzahl Messkanäle. Die Installation von Kabeln ist bei bewegten Prüfobjekten, z.B. Rotorblättern von Windkraftanlagen oder Maschinen, oft schwierig. Werden dort oder auch bei sehr großen, stationären Prüfobjekten die Daten der einzelnen Sensoren anstatt mit Drahtverbindung drahtlos zu einer zentralen Datenerfassung gesendet, entfällt der Aufwand für die Verlegung der Kabel, sofern jeder Sensorknoten auch über eine lokale oder drahtlose Energieversorgung verfügt.

Andererseits erfordert die Ortung der Signalquellen mit drahtlosen Sensornetzwerken eine genügend genaue Zeitsynchronisation zwischen den einzelnen Sensoren bzw. den drahtlosen Sensorknoten und den Datenkanälen [15-17]. Wenn Drahtlos-Sensorknoten für das Sensornetzwerk genutzt werden, entsteht auch die Frage nach deren Energieversorgung. Dabei spielt je nach Größe des Prüfobjekts die Übertragungsdistanz eine wesentliche Rolle; man stelle sich z.B. eine Brücke mit mehreren km Länge vor, auch wenn darauf nur ausgewählte Strukturelemente überwacht werden sollen. Andererseits erfordert die Messdauer bzw. die Dauer der Überwachung mit einem vorgegebenen, drahtlosen Schallemissions-Messsystem ebenfalls eine entsprechende, kabellose (Langzeit-)Energieversorgung. Batterien für den Betrieb der drahtlosen Sensorknoten bieten einen zeitlich limitierten Energiespeicher bis zu etwa einem Jahr [18] und daher beschränkte Nutzungsdauer und bedingen bei Langzeitüberwachung, z.B. mehrere Jahre, entsprechenden Unterhalt bzw. den Einsatz lokaler Energiegewinnungssysteme. Energiegewinnung aus diversen Quellen für die Versorgung von Überwachungssystemen für Straßen- und Brückenbauwerke wird in [19] diskutiert, allerdings nicht im Zusammenhang mit drahtloser Übertragung bzw. Messung von Schallemissionssignalen. Lokale Photovoltaik-Systeme werden als vielversprechender Lösungsansatz für drahtlose Überwachungssysteme generell eingeschätzt, aber eine Entwicklung entsprechender Prototypen als relativ aufwändig beurteilt. Die Autoren geben Hinweise für weitere Forschung und Entwicklung im Gebiet der Energiegewinnung für Einsatz bei Straßen und Brückenbauwerken, betonen aber auch die Wichtigkeit detaillierter Lebensdaueranalysen zur Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses für solche Systeme [19].

Ein anderer, wesentlicher Aspekt ist die benötigte Datenübertragungsrate, die linear je mit der Anzahl Kanäle, mit der Abtastrate für die Signalaufzeichnung (sofern Wellenformen und nicht nur Signalparametersätze erfasst werden) sowie mit der gewählten Aufzeichnungsdauer (bei "Hit"-basierter SEA) ansteigt. In vielen Fällen ist, neben den Schallemissionssignalen, die zeitsynchrone Aufzeichnung zusätzlicher Messwerte erwünscht. Dies können Daten z.B. zur aufgetragenen Belastung (variable Betriebslasten oder zusätzliche,

spezifisch aufgebrachte Lasten), zu den resultierenden Dehnungen, oder zu Umgebungsbedingungen (Temperatur, Niederschlag, Wind, Sonneneinstrahlung, etc.), sein. Die Umgebungsbedingungen stellen je nach Standort des Prüfobjekts besondere Anforderungen an das Messsystem, ein Beispiel dafür ist der Einsatz bei einer hochalpinen Station ca. 3500 m über Meeresspiegel, wie in [20] diskutiert. Auf Seite der Messtechnik besteht die Frage nach der Art und der Langzeitbeständigkeit der Ankopplung der Sensoren (Koppelmechanismus, Koppelmittel) bzw. deren Konstanz sowie der Sensoren selbst. Idealerweise sollte eine "Selbstüberwachung" [21] des Messsystems, inklusive periodischer Überprüfung der Kopplungsgüte der Sensoren, implementiert werden sowie die Möglichkeit einer Ferndiagnose und eventuell damit verbundener Eingriffsmöglichkeiten bestehen.

### **3. Bestehende drahtlose Sensornetzwerke für Strukturüberwachung mittels Schallemission oder Geführter Wellen**

In der Literatur werden mehrere drahtlose Sensornetzwerke für Strukturüberwachung mittels Schallemission oder geführten Wellen beschrieben. Eines der ersten Produkte für drahtlose Signalübertragung, das auch für Schallemission genutzt wurde, war die sogenannte "Berkeley-Mote", eine offene, generische Hardware-/Software-Plattform, die für Verwendung mit unterschiedlichen Sensorsystemen entwickelt wurde [22]. Die Anwendung dieser Plattform in der Schallemissions-Messtechnik bzw. -Überwachung wird von Grosse und Mitautoren beschrieben [23-25]. Ein weiterer, drahtloser Sensorknoten für Schallemissionsüberwachung, genannt "AEPod" mit vier Schallemissionsmesskanälen wurde von Lédeczi und Mitautoren entwickelt und an ausgewählten Bauwerken getestet [26]. Heinzelmann und Koautoren [27,28] entwickelten einen Sensorknoten mit drahtloser Signalübertragung mit Anschlüssen für acht Kanäle bzw. Sensoren, die mit dem Sensorknoten über Kabel verbunden sind. Dieselbe Gruppe [29] beschreibt auch ein Messsystem für Schallemission oder geführte Wellen mit acht Sensorknoten mit je einem Messkanal. Jeder Sensorknoten kommuniziert drahtlos mit dem zentralen Rechner. Jeder dieser Sensorknoten, der mit einem piezoelektrischen Wandler über ein kurzes Kabel verbunden ist, kann als Emitter oder Sensor betrieben werden, das System eignet sich daher auch für Schallemissionsmessungen. Dieses Messsystem wurde z.B. für Schädigungsnachweis in Faserverbundkunststoffen durch geführte Wellen und Ortung der Schädigung mittels Triangulation oder Trilateration genutzt. Girard und Mitautoren entwickelten ein drahtloses Schallemissions-Messsystem, das für den Einsatz im hochalpinen Bereich (über 3000 m über Meereshöhe) ausgelegt wurde. Sowohl das Messsystem wie die speziellen Schallemissionssensoren sind gegen Umwelteinflüsse geschützt und dienen der Überwachung der Schädigungsentwicklung im Gestein [20]. Chilibon et al. diskutieren ein drahtloses Messsystem basierend auf einem Mikrokontroller (Typ PIC 18F452) mit einer RF-Antenne (Frequenz 433 MHz) [30]. Taylor und Mitautoren diskutieren eine Plattform für drahtlose Signalübertragung, in die mehrere, unterschiedliche Messmethoden (z.B. Dehnungs-Messstreifen, Beschleunigungssensoren, geführte Wellen, Impedanzmessung) integriert werden können [31]. Einen Vergleich von in-situ installierten, drahtlosen Strukturüberwachungssystemen für Schallemission in Windrotorblättern wird von Bouzid et al. [32] präsentiert. Dabei werden auch Ortung von Schallemissionsquellen und die mögliche Reduktion der Samplingrate, auf weniger als durch das Nyquist-Theorem vorgegeben, für die Wellenformaufzeichnung diskutiert. Shen und Mitautoren beschreiben ein drahtloses Schallemissions-Messsystem mit sechzehn Kanälen (je einen pro Sensorknoten) und ausgewählte Anwendungen [33]. Im selben Konferenzband wird ein ähnliches System mit vier Messkanälen in einem einzigen Sensorknoten beschrieben [34], das von MISTRAS Group entwickelt wurde. Nguyen et al. [35] empfehlen das Konzept, faseroptische und piezoelektrische Sensoren zu kombinieren. Dabei werden die Signale der permanent betriebenen,

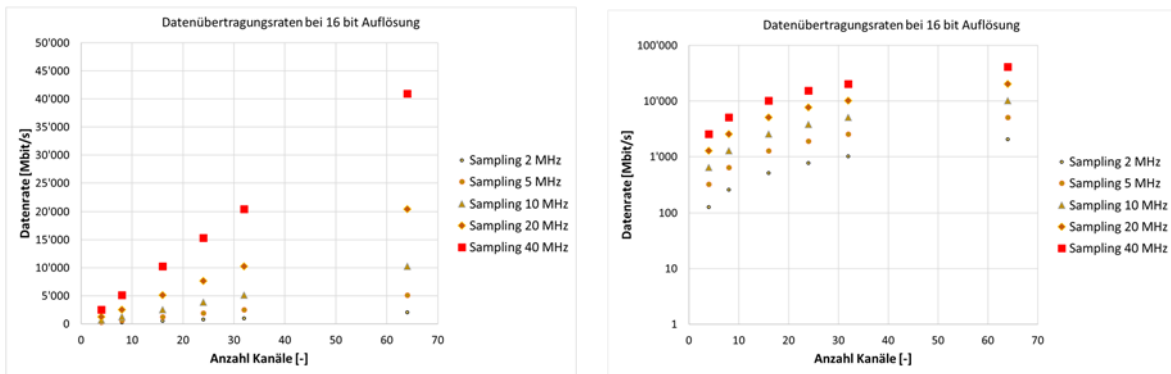
faseroptischen Sensoren als Trigger für Messungen mit Schallemissionssensoren benutzt. Der intermittierende Betrieb der Schallemissionssensoren mit höherem Energiebedarf als die faseroptischen Sensoren soll so zur Energieeinsparung im Messsystem beitragen. Dieses System kann mit einer web-basierten, drahtlosen Signalübermittlung, im Prinzip analog zum "Internet-of-Things", verbunden werden. Details dieser drahtlosen Signalübertragung werden im Artikel aber nicht diskutiert [35]. AE-Sensoren mit integriertem Messsystem wurden beim 21. Schallemissionskolloquium vorgestellt [36]. Der drahtlose Sensortyp KERT-AE-WiFi [37] realisiert IEEE 802.11b/g/n und wird über eine Lithiumzelle versorgt, die Messzeiten bis zu 24 Stunden ermöglicht. Die minimale, zugesicherte Messzeit beträgt 8 Stunden. Mit diesen Sensoren lassen sich AE-Sensornetzwerke ohne Ortung realisieren. Auf dem Kolloquium 2019 werden Sensoren mit integrierten AE-System vorgestellt, die auch eine Ortung erlauben. Ein drahtloses Schallemissionsmesssystem mit zwei Kanälen pro Knoten, 5 MHz Sampling und einer Datenübertragungsrate bis zu 6 Mbit/s wurde kürzlich von Wu und Mitautoren entwickelt [38]. Es wird explizit erwähnt, dass übliche drahtlose Signalübertragungssysteme bzw. -Protokolle meist für Schallemission nicht geeignet sind, da deren Datenübertragungsraten nicht ausreichen. Bisher sind die hier vermerkten Systeme, mit Ausnahme der Berkeley-Mote bzw. der AE-WiFi Sensoren, meist Prototypen oder Einzelanfertigungen. Es gibt aber kommerziell verfügbare drahtlose Strukturüberwachungssysteme mit Schallemissionsmessung, zum Teil mit parametrischen Messkanälen, siehe z.B. [36,37,39].

Die Leistungsfähigkeit der drahtlosen Signalübertragung der in der Literatur beschriebenen Schallemissionssensorknoten lässt sich nicht für alle oben erwähnten Systeme direkt vergleichen, da nicht in allen Publikationen genügend Detailinformation vorliegt. Einen Vergleich drahtloser Signalmesssysteme aus der Zeit zwischen 2007 und 2010 in Bezug auf Dimensionen und Gewicht, den Prozessor, das drahtlose Übertragungssystem und dessen Reichweite sowie die Energieversorgung bietet [27,28]. Die Sensorknoten, die in der neueren Literatur diskutiert werden, verfügen über je einen, oder je vier [34], oder sogar acht Messkanäle [27,28]. Die Signalauflösung beträgt meist 12 oder 16 bit. Die Samplingrate variiert je nach System zwischen etwa 100 kHz [23-26] und 5 MHz [38] und die Datenübertragungsrate zwischen rund 40 kB/s [29] und etwa 6 Mbit/s [38]. Der Energiebedarf für die drahtlose Signalübertragung variiert je nach System und Betriebsmodus (z.B. Senden oder Empfang, bzw. aktiv oder inaktiv); in [29] geben die Autoren für "inaktiv" etwa 50 mW und für "aktiv"/"senden" 1.4 W an. Information zur Reichweite der Datenübertragung findet sich kaum, in [27,28] sind typische Werte im Freien ca. 100 m und im Innern von Gebäuden ca. 50 m. Shen und Mitautoren [33] haben die Reichweite der Datenübertragung ihres Messsystems über Distanzen bis 3000 m getestet und gehen davon aus, dass damit Distanzen bis 10 km möglich sind. Die Datenübertragungsrate für die Distanz von 3000 m liegt bei ca. 3 Mbit/s und die Zeitsynchronisation mittels GPS (etwa 3  $\mu$ s Genauigkeit) erlaubt praktisch in Echtzeit Ortung der Schallemissionsquellen über die Zeitdifferenz. Die Synchronisationsgenauigkeit verursacht Fehler in der Ortung bei einer Stahlplatte dieser wird auf maximal 77 mm geschätzt. Es ist daher für die meisten Anwendungen von einer geforderten Genauigkeit der Zeitsynchronisation in der Größenordnung von 1  $\mu$ s auszugehen, um ausreichende Ortungsgenauigkeit der Signalquellen zu erreichen. Praktisch alle hier diskutierten Messsysteme werden, soweit Angaben vorliegen, mit Batterien betrieben.

#### **4. Herausforderungen bei der Implementierung drahtloser Sensornetzwerke für Schallemissions-Überwachung**

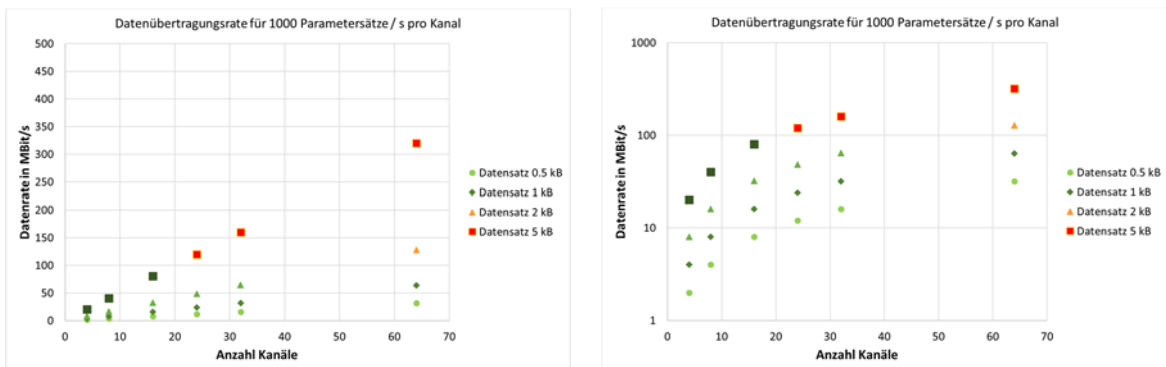
Ein kürzlich publizierter Übersichts-Artikel [40] beschreibt den Stand drahtloser Sensortechnik generell, geht aber, mit Ausnahme akustischer Methoden zum Leckagenachweis in Rohrleitungen, z.B. unter Wasser mit Hydrophonen, nicht auf Schallemissionsanwendungen

ein. Drahtlose Netzwerke im Untergrund werden in [41] diskutiert, aber wieder ohne Bezug zu Schallemissionsmessungen. Wie bereits oben erwähnt, stellen die möglichen Datenübertragungsraten ein Problem dar. Wenn man von einer typischen Übertragungskapazität in der Größenordnung von 100 Mbit/s ausgeht [42], und aus Kanalzahl, Samplingrate und geschätzten Maximalraten für Signale von 1000/s die dafür benötigte Datenübertragungsrate bestimmt, ergeben sich die in Abb. 1 dargestellten Diagramme. Diese zeigen klar, dass drahtlose Übertragung aufgezeichneter Wellenformen in quasi Echtzeit Datenübertragungsraten von  $\gg 1$  Gbit/s erfordern, was mit bestehenden Systemen nicht möglich ist.



**Abb. 1.** Benötigte Datenübertragungsraten in Mbit/s für SE-Wellenformen mit 16 bit Auflösung für unterschiedliche Anzahl Datenerfassungs Kanäle und Sampling-Raten, (links) mit linearer, (rechts) mit logarithmischer Skala der y-Achse, technisch möglich sind etwa 100 Mbit/s.

Ansätze zur Lösung dieses Problems sind z.B. eine lokal implementierte Datenspeicherung, eventuell Datenkomprimierung sowie optimierte Datenübertragungsprotokolle [43]. Dies kann sinnvoll sein, wenn die im Mittel anfallende Datenmenge beschränkt ist, so dass die Zwischenspeicherung nur den Spitzenbedarf, z.B. bei kurzzeitiger, signifikanter Schädigung und entsprechender Erzeugung einer hohen Aktivität von Schallemissionssignalen in der Struktur auffangen muss, im Mittel aber 100 Mbit/s oder weniger ausreichen. Ein anderer Ansatz ist die lokale Reduktion der Datenmenge, z.B. durch die Extraktion von Signalparametersätzen für die Datenübertragung bei weiterer Auswertung ohne Verwendung der Wellenformen. Abb. 2 zeigt den möglichen Umfang solcher Datenparametersätze für unterschiedliche Anzahl der Kanäle unter Annahme, dass jeder Kanal maximal 1000 Parametersätze pro Sekunde generiert. In diesem Fall können Datensätze im Umfang von je etwa 2 kB drahtlos übertragen werden.



**Abb. 2.** Benötigte Datenübertragungsraten für 1000 Parametersätze pro Sekunde und Kanal für unterschiedliche Anzahl Datenerfassungs Kanäle und Umfang der Datensätze, (links) mit linearer, (rechts) mit logarithmischer Skala der y-Achse, technisch möglich sind etwa 100 Mbit/s.



Sollen die aufgezeichneten Daten zur Lokalisierung der Schädigungen genutzt werden, erfordert dies je nach Material des Prüfobjektes Synchronisationsgenauigkeiten der Knoten im Bereich einstelliger Mikrosekunden, um die im Betrieb auftretenden Gangunterschiede lokaler Zeitgeber zu eliminieren. Primär wird zwischen externer und interner Synchronisierung unterschieden [44]. Erstere wird üblicherweise mittels GPS implementiert und erreicht Genauigkeiten  $<1 \mu\text{s}$ . Dies führt aber zu höherem Stromverbrauch und zur eingeschränkten Funktion in Indoor-Szenarien [45]. Bei interner Synchronisierung wird hingegen nur der relative Zeitversatz zwischen Netzwerkteilnehmern eliminiert, was energiesparender über den bereits vorhandenen Datenkanal bewerkstelligt werden kann. Zu diesem Thema sind in den letzten Jahren zahlreiche Veröffentlichungen entstanden, die Genauigkeiten einstelliger Mikrosekunden erreichen [46]. Die praktische Anwendung dieser Ansätze beschränkt sich derzeit allerdings auf proprietäre Funksysteme einzelner Hersteller. In etablierten Funkstandards ist eine Synchronisation derzeit entweder nicht verfügbar oder steht dem Entwickler nicht auf Applikationsebene zur Verfügung (zum Beispiel WirelessHart). Für das weit verbreitete und hohe Datenraten unterstützende WLAN-Protokoll wird aktuell an Ansätzen [47] gearbeitet.

## 5. Schlussfolgerungen

Für kabelgebundene Schallemissions-Systeme existieren kommerzielle Geräte, die fast alle Anwendungsfälle ausreichend abdecken. Unabhängig von der Dauer der Schallemissionsüberwachung großer Prüfobjekte stellt bei 32 Kanälen die drahtlose Übertragung der aufgezeichneten Wellenformen bereits bei 16 bit Signalauflösung und 10 MHz Samplingrate (kommerzielle Systeme gehen bis 40 MHz) eine Herausforderung dar. Bei der Entwicklung drahtloser Schallemissions-Systeme sind aufgrund der erzielbaren Datenraten und der vorhandenen Möglichkeiten zur Energieversorgung heute und in naher Zukunft Kompromisse notwendig, welche vom Anwendungsfall abhängige, unterschiedliche Datenreduktion vornehmen. Eine universelle Lösung für alle Anwendungen ist nicht in Sicht. Datenübertragungsraten von  $>1 \text{ Gbit/s}$  werden voraussichtlich erst mit der nächsten Generation mobiler Datenübertragung (5G-Netz) möglich. Ob dies in naher Zukunft eine Perspektive für die Entwicklung neuer, drahtloser Sensornetzwerke für Schallemissionsüberwachung bietet, ist fraglich. Auch wenn solche Systeme zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar werden, stellen je nach Anwendung, speziell je nach Größe des Prüfobjekts und der geforderten Ortungsgenauigkeit der Schallemissionsquellen, die benötigte Anzahl Messkanäle sowie deren Synchronisation eine weitere Beschränkung dar. Für Langzeitüberwachung spielen die Beständigkeit der Komponenten des Schallemissionssystems sowie der Sensorkopplung, je nach den Umgebungsbedingungen am Einsatzort, auch eine wichtige Rolle.

## Referenzen

- [1] H.N. Li, L. Ren, Z.G. Jia, T.-H. Yi, D.-S. Li: "State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, pp. 3–16 (2016), doi: 10.1007/s13349-015-0108-9
- [2] F. Bazzucchi, L. Restuccia, G.A. Ferro: "Considerations over the Italian road bridge infrastructure safety after the Polcevera viaduct collapse: past errors and future perspectives", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 46, pp. 400-421 (2018), doi: 10.3221/IGF-ESIS.46.37
- [3] D. Rehak, M. Hromada, P. Novotny: "European Critical Infrastructure Risk and Safety Management: Directive Implementation in Practice", *Chemical Engineering Transactions*, 48, pp. 943-948 (2016), doi: 10.3303/CET1648158
- [4] Y. Yang, Q.S. Li, B.W. Yan: "Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China", *Advances in Mechanical Engineering*, 9(1), pp. 1–10 (2017), doi: 10.1177/1687814016684272

- [5] M. Vagnoli, R. Remenyte, J. Andrews: "Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges", *Structural Health Monitoring*, 17(4), pp. 971–1007 (2018), doi: 10.1177/1475921717721137
- [6] J. Van Dam, L.J. Bond (2015) Economics of Online Structural Health Monitoring of Wind Turbines: Cost Benefit Analysis, 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conference Proceedings 1650, pp. 899-908, doi: 10.1063/1.4914695
- [7] N. Beganovic, D. Söffker: "Structural health management utilization for life time prognosis and advanced control strategy deployment of wind turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp. 68–83 (2016), doi: 10.1016/j.rser.2016.05.083
- [8] A.M. Obeid, F. Karray, M. Wassim Jmal, M. Abid, S. Manzoor Qasim, M.S. BenSaleh: "Towards realisation of wireless sensor network-based water pipeline monitoring systems: a comprehensive review of techniques and platforms", *IET Science, Measurement & Technology*, 10(5), pp. 420–426 (2016), doi: 10.1049/iet-smt.2015.0255
- [9] T. Dong, N.H. Kim: "Cost-Effectiveness of Structural Health Monitoring in Fuselage Maintenance of the Civil Aviation Industry", *Aerospace*, 5, 87, pp. 1-24 (2018), doi:10.3390/aerospace5030087
- [10] V.J. Hodge, S. O’Keefe, M. Weeks, A. Moulds: "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), pp. 1088-1106 (2015), doi: 10.1109/TITS.2014.2366512
- [11] K. Ono: "Review on Structural Health Evaluation with Acoustic Emission", *Applied Sciences*, 8, 958, pp. 1-33 (2018), doi:10.3390/app8060958
- [12] S. Fricker, Th. Vogel. "Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring", *Construction and Building Materials*, 21, pp. 501–510 (2007), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.04.008
- [13] C.U. Grosse, M. Ohtsu: "Acoustic Emission Testing", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. I-VII, 1-402 (2008), doi: 10.1007/978-3-540-69972-9
- [14] M.W. Felux: "Acoustic Emission Monitoring on Bridges Under Regular Operating Conditions", ETH Dissertation Nr. 23502, pp. 1-151 (2016), (keine doi)
- [15] M.A. Sarvghadi, T.-C. Wan: "Message Passing Based Time Synchronization in Wireless Sensor Networks: A Survey", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2016, Article ID 1280904, pp. 1-21 (2016), doi: 10.1155/2016/1280904
- [16] V. Le Cam, A. Bouche, D. Pallier. "Wireless Sensors Synchronization: an accurate and deterministic GPS-based algorithm", *Proceedings IWSHM 2017 - 11th international workshop on structural health monitoring 2017*, pp. 1-10 (2017), (keine doi)
- [17] L. Tavares Bruscato, T. Heimfarth, E. Pignaton de Freitas: "Enhancing Time Synchronization Support in Wireless Sensor Networks", *Sensors*, 17, paper-ID 2956, pp. 1-18 (2017), doi: 10.3390/s17122956
- [18] C. Knight, J. Davidson, S. Behrens: "Energy Options for Wireless Sensor Nodes", *Sensors*, 8, pp. 8037-8066 (2008), doi: 10.3390/s8128037
- [19] H. Wang, A. Jasim, X.D. Chen. "Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review", *Applied Energy*, 212, pp. 1083–1094 (2018), doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.125
- [20] L. Girard, J. Beutel, S. Gruber, J. Hunziker, R. Lim, S. Weber: "A custom acoustic emission monitoring system for harsh environments: application to freezing-induced damage in alpine rock walls, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*", 1(2), pp. 155-167 (2012), doi: 10.5194/gi-1-155-2012
- [21] I.L. Santos, L. Pirmez, L.R. Carmo, P.F. Pires, F.C. Delicato, S.U. Khan, A.Y. Zomaya: "A Decentralized Damage Detection System for Wireless Sensor and Actuator Networks, *IEEE Transactions on Computers*, 65(5), pp. 1363-376 (2016), doi: 10.1109/TC.2015.2479608
- [22] M. Ruiz-Sandoval, T. Nagayama, B.F. Spencer: "Sensor Development Using Berkeley Mote Platform", *Journal of Earthquake Engineering*, 10(2), pp. 289–309 (2006), (keine doi)
- [23] C.U. Grosse, M. Krüger, S.D. Glaser: "Wireless Acoustic Emission Sensor Networks for Structural Health Monitoring in Civil Engineering", *Proceedings, European Conference on Nondestructive testing (ECNDT 2006)*, DGZfP Berichtsband BB 103-CD, paper Tu.I.7.3, pp. 1-8 (2006), (keine doi)
- [24] C.U. Grosse, G. McLaskey, S. Bachmaier, S.D. Glaser, M. Krüger: "A hybrid wireless sensor network for acoustic emission testing in SHM", *Proceedings SPIE 6932, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, Paper-ID 693238, pp. 1-9 (2009), doi: 10.1117/12.775641
- [25] C. Grosse, S. Glaser, M. Kruger: "Initial development of wireless acoustic emission sensor Motes for civil infrastructure state monitoring", *Smart Structures and Systems*, 6(3), pp. 197–209 (2010), doi:
- [26] A. Ledeczki, Th. Hay, P. Völgyesi, D.R. Hay, A. Nádas, S. Jayaraman: "Wireless acoustic emission sensor network for structural monitoring", *IEEE Sens. J.*, 9(11), pp. 1370–1377 (2009), doi: 10.1109/JSEN.2009.2019315
- [27] A. Heinzelmann, C. Dürager: "Elektronisches Messsystem zur Strukturzustandsüberwachung", *tm – Technisches Messen* 80(9), pp. 290-298 (2013), doi: 10.1524/teme.2013.0036

- [28] C. Dürager, A. Heinzelmann, D. Riederer: "Wireless Sensor network for guided Wave propagation with Piezoelectric Transducers", *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 9(11), pp. 1177-1186 (2013), doi: 10.1080/15732479.2012.671833
- [29] Ch. Dürager, A. Heinzelmann, D. Riederer: "Wireless Sensor Network for Guided Wave Propagation with Piezoelectric Transducers", *Proceedings International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*, pp. 2028-2034 (2011), (keine doi)
- [30] I. Chilibon, M. Mogildea, G. Mogildea: "Wireless Acoustic Emission Sensor Device with Micro-controller", *Procedia Engineering*, 47, pp. 829 -832 (2012), doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.275
- [31] S.G. Taylor, E.Y. Rabi, K.M. Farinholt, G.H. Park, M.D. Todd: "Active-sensing platform for structural health monitoring: Development and deployment", *Structural Health Monitoring*, 15(4), pp. 413–422 (2016), doi: 10.1177/1475921716642171
- [32] O.M. Bouzid, G:Y. Tian, K. Cumanan, D. Moore: "Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades: Acoustic Source Localization Using Wireless Sensor Networks", *Journal of Sensors*, Volume 2015, Article ID 139695, pp. 1-11 (2015), doi: 10.1155/2015/139695
- [33] G.T. Shen, Y.J. Zhang, Y.B. Dong, S.F. Liu: "Development of High-Speed Wi-Fi Wireless Acoustic Emission System", *Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission–2013: Advances in Acoustic Emission*, Springer Proceedings in Physics, Vol. 158, pp. 3-14 (2015), doi: 10.1007/978-1-4939-1239-1
- [34] J. Dong, E. Lowenhar, V. Godinez, M. Carlos: "State-of-the-Art Wireless Acoustic Emission System for Structural Health Monitoring", *Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission–2013: Advances in Acoustic Emission*, Springer Proceedings in Physics, Vol. 158, pp. 15-22 (2015), doi: 10.1007/978-1-4939-1239-1
- [35] A.D. Nguyen, C. Page, C.L. Wilson: "A new strategy toward Internet of Things: structural health monitoring using a combined fiber optic and acoustic emission wireless sensor platform", *Proceedings SPIE 9803, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2016*, paper-ID 98031M, pp. 98031M-1 - 98031M-10 (2016), doi: 10.1117/12.2235637
- [36] H. Kühnicke (2017) "AE-Sensor mit integriertem Schallemissionssystem", *Proceedings 21. Kolloquium Schallemission, Berichtsband BB-159*, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), pp. 1-8 (keine doi)
- [37] [www.kert.u-boehm.de/p2.html](http://www.kert.u-boehm.de/p2.html)
- [38] Y. Wu, W.B. Liu, K.Y. Li: "A Novel Wireless Acoustic Emission Sensor System for Distributed Wooden Structural Health Monitoring", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 13(4), pp. 1289-1306 (2017), (keine doi)
- [39] Physical Acoustics Corporation (PAC). Micro SHM Structural Health Monitoring System data sheet (URL [www.physicalacoustics.com/by-product/micro-shm-structural-health-monitoring-system](http://www.physicalacoustics.com/by-product/micro-shm-structural-health-monitoring-system), Zugriff 2018-11-19)
- [40] M. Ayaz, M. Ammad-uddin, I. Baig, E.-H.M. Aggoune: "Wireless Sensor's Civil Applications, Prototypes, and Future Integration Possibilities: A Review", *IEEE Sensors Journal*, 18, pp. 4\_30 (2018), doi: 10.1109/JSEN.2017.2766364
- [41] H.T. Huyen Trang, L.T. Dung, S.O. Hwang: "Connectivity analysis of underground sensors in wireless underground sensor networks", *Ad Hoc Networks*, 71, pp. 104–116 (2018), doi: 10.1016/j.adhoc.2018.01.002
- [42] L. Alonso, J. Barbarán, J. Chen, M. Diaz, L. Llopis, B. Rubio. "Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey", *Computer Standards & Interfaces*, 56, pp. 83–100 (2018), doi: 10.1016/j.csi.2017.09.007
- [43] Z. Wang, L.C. Wang, S. Liu, G.L. Wei: "Encoding-Decoding-Based Control and Filtering of Networked Systems: Insights, Developments and Opportunities", *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5(1), pp. 3-18 (2018), doi: 10.1109/JAS.2017.7510727
- [44] F. Cristian: "Probabilistic clock synchronization", *Distributed Computing* (1989) Volume 3, pp 146–158, <https://doi.org/10.1007/BF01784024>
- [45] M. King, D. Busch, M. Miranian: "Test Results and Analysis of a Low Cost Core GPS Receiver for Time Transfer Application", *Proceedings of the 1994 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. San Diego, CA, Jan. 1994, pp. 99–109.
- [46] M.A. Sarvghadi, T. Wan: "Overview of time synchronization protocols in wireless sensor networks", *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Electronic Design (ICED)*, Penang, 2014, pp. 204-209, doi: 10.1109/ICED.2014.7015799
- [47] A. Mahmood, R. Exel, H. Trsek, T. Sauter: "Clock Synchronization Over IEEE 802.11—A Survey of Methodologies and Protocols", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(2), pp. 907-922 (2017), doi: 10.1109/TII.2016.2629669