

Miniatursensoren und kabellose Sensornetzwerke: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung in der ZfP

Christian U. Große¹⁾, M. Krüger²⁾, J.H. Kurz³⁾, P. J. Marrón⁴⁾, Florian Finck³⁾

¹⁾ Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA

²⁾ TTI GmbH - TGU *Smartmote*, Stuttgart

³⁾ Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Universität Stuttgart

⁴⁾ Institut für Parallele und Verteilte Systems (IPVS), Universität Stuttgart

Abstract

Die Nanotechnologie ist in aller Munde und es ist nicht abzusehen, welche Aufgaben sie im Bereich der Prüftechnik übernehmen kann. Sehr viel eher wird jedoch der "Große Bruder" der Nanotechnologie, die Mikrosystemtechnik, in der zerstörungsfreien Bauteilprüfung und -überwachung Einzug halten. Sie beruht auf den gleichen Herstellungstechniken, die ursprünglich einmal für die Mikrochip-Herstellung entwickelt wurden. Nur dass dabei statt winziger Transistoren winzige Sensoren und Motoren auf die Siliziumscheiben geätzt werden. Solche mikroelektromechanischen Systeme, sogenannte MEMS, werden bereits heute industriell gefertigt. Moderne Auto-Airbags enthalten Bewegungsmelder, die nicht dicker sind als ein menschliches Haar. Auch andere Sensoren können in Miniaturbauweise gefertigt werden, so dass man damit physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Dehnung, Beschleunigung und Feuchte messen kann.

Die Bedeutung für den ZfP-Bereich liegt vor allem in der kabellosen Datenübertragungstechnik. Netzwerke aus leicht zu applizierenden Miniatursensoren könnten eine Vielzahl von Aufgaben bei der Überwachung von Bauteilen übernehmen. Sensorkluster mit Knoten (Sensoren), die sich selbst kalibrieren und organisieren, können eine Vorverarbeitung der Daten auf integrierten Mikrochips übernehmen. Per Funk werden dann die "relevanten" Daten für die Erkennung einer Schädigung an den Überwachungsingenieur übermittelt. Die personengebundene Inspektion von Bauteilen könnte so deutlich effizienter durchgeführt werden. Bei Kosten von 10 bis 50 € pro Sensor wäre sogar der Verlust des einen oder anderen MEMS u. U. hinnehmbar. Im folgenden Artikel wird exemplarisch eine Anwendung bei der Dauerüberwachung von Bauwerken beschrieben.

Notwendigkeit der Dauerüberwachung von Bauwerken

Die Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken z. B. im Zuge von Bundesfernstraßen ist Sache der Bundesländer. Informationen sammeln deren Straßenbauverwaltungen auf der Grundlage von Regelwerken des BMVBW wie der DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung“ [1]. Dafür werden Programmsysteme (z. B. *SIB-Bauwerke*) benutzt, die für die Bauwerksprüfung von Brücken, Tunneln, Lärmschutzwänden, Stützbauwerken etc. entwickelt wurden. Ähnliche Vorschriften hat die Deutschen Bahn AG entwickelt (Richtlinie 804.8001 – 8004). In der Regel erfolgt dabei die Kontrolle durch Inaugenscheinnahme (wie in Abb. 1 dargestellt) alle drei Jahre als „einfache Prüfung“ und alle sechs Jahre als „Hauptprüfung“ [2]. Die Kriterien sind da-

bei Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit; das Ergebnis ist die Eingruppierung des Bauwerks in eine der sechs Zustandsklassen und die Vergabe einer Zustandsnote zwischen 1 und 4. Ein Ergebnis der Schadensbewertung liefert aktuell ein vergleichsweise besorgniserregendes Bild vom Zustand der Brückenbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen zeigt [Große 2005]. Der Anteil an kritischen Brückenbauwerken macht etwa 12 % des Gesamtbestandes aus.

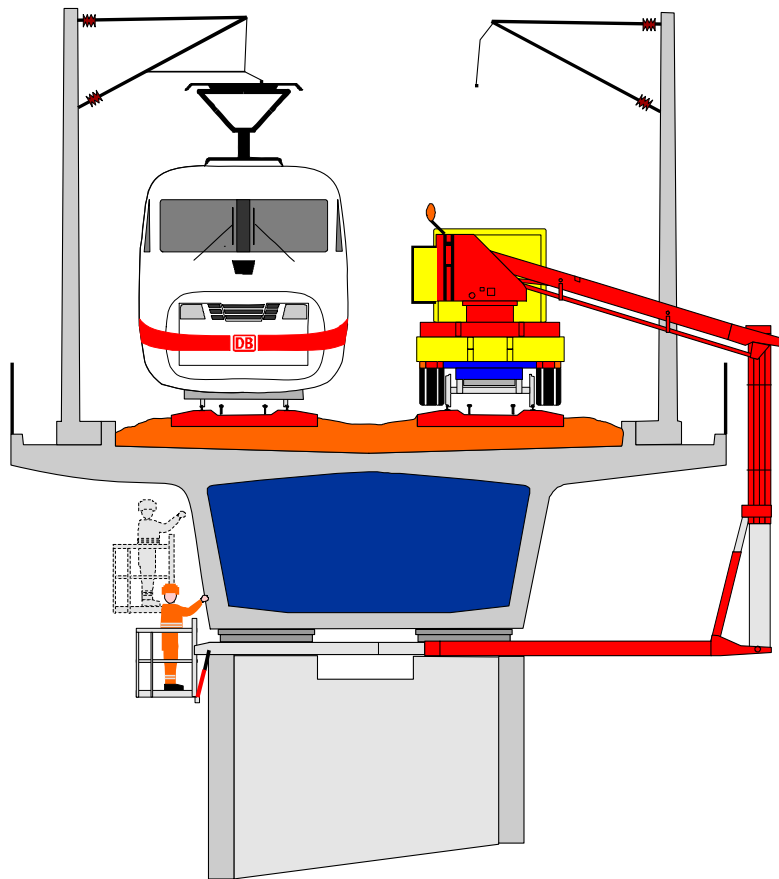


Abb. 1 Prinzip der visuellen Untersuchung des Schädigungszustandes von Bauwerken, hier Brücken der Deutschen Bahn AG. Routineinspektion durch optische Kontrolle (Quelle: Deutsche Bahn AG, 2002).

Durch visuelle Inspektionen lassen sich allerdings nur oberflächennahe Schäden erfassen. Außerdem sind die Kosten für die Prüfung immens und die Zuverlässigkeit gering, so dass die dargestellten Zahlen unsicher sind. In jedem Fall liefert die Inaugenscheinnahme nur ein Momentbild des Bauwerkzustands.

Im Bereich des Bauwerksmonitoring werden derzeit nur wenige ausgewählte Bauwerke, wie z. B. Brücken, mit autonomen Verfahren überwacht. Im Hinblick auf das Bauwerksmonitoring mit nicht-visuellen Verfahren, kommen dabei bislang Sensoren zum Einsatz, die z. B. die Temperatur, die Feuchte, die Dehnung oder das Eigenschwingungsverhalten messen. Am aufwändigsten sind Verfahren der Eigenschwingungs- oder Modalanalyse. Teilweise wird dafür eine Technik eingesetzt, bei der Glasfasersensoren im Bauwerk bei der Herstellung eingegossen werden, die eine Schädigung durch Verformung und die dadurch verursachte Lichtschwächung in Bragg-Gitter-Sensoren anzeigen. Nachteile dieser Technik sind die hohen Installationskosten, der komplizierte und störanfällige Einbau, die hohen Betriebskosten und die geringe Lebensdauer.

Auf dem Gebiet der Schallemissions- und Datenanalyse hat die Entwicklung von Verfahren zur umfassenden Schädigungscharakterisierung in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht. Die Verwendung schneller Transientenrekorder und schneller Auswerteprogramme sind Voraussetzungen für Anwendungen der signal-basierten Schallemissionsanalyse. Zwei weitere zentrale Punkte sind damit jedoch noch nicht gelöst. Zum einen ist die heutige Sensortechnik nicht in der Lage, Daten kostengünstig und in hinreichender Qualität für die Anwendung komplexer Inversionsmethoden zu liefern. Aufgrund der Dämpfung der Schallwellen in Beton ist für die vollständige Überwachung eines Bauwerks eine Vielzahl von Sensoren notwendig. Diese Aussage trifft auch dann noch zu, wenn nur zentrale besonders kritische Punkte der Konstruktion untersucht und mit Sensoren appliziert werden. Andererseits ist die kabelgebundene Datenübertragung von Sensoren an verschiedenen Messpunkten, die bei großen Bauwerken weit von einander entfernt sein können, zum Aufzeichnungsgerät ein Problem. Deswegen besteht aktueller Bedarf an neuen Sensortechniken und Auswertemethoden, die für ein dauerhaftes Monitoring von Bauwerken technisch geeignet und finanziell attraktiv sind.

Neue MEMS-basierte kabellose Sensortechniken

Eine Lösung zeichnet sich durch die Adaption verschiedener neuer Entwicklungen aus anderen Bereichen wie der Kommunikations- oder der Mikrosystemtechnik bzw. Nanotechnologie ab. Das Problem der Datenübertragung kann durch den Einsatz geeigneter kabelungebundener Lösungen („wireless LAN“) in Verbindung mit adaptiven Netzwerken („adaptive self configuring wireless systems“) gelöst werden.

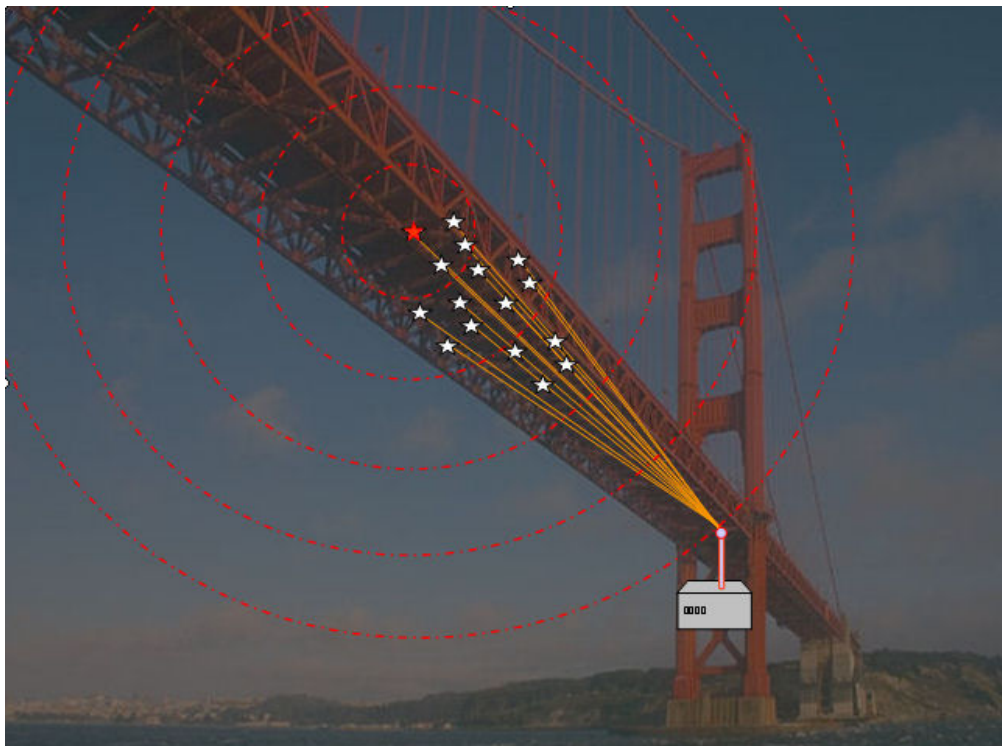


Abb. 2 Schema der kabellosen Funk-Übertragung mit Sensornetzwerken.

Ein zentrales Element der Sensornetzwerke (Abb. 2) ist, dass sie aus vielen kleinen Rechnersystemen (sogenannten Sensorknoten) bestehen, die drahtlos miteinander kommunizieren [3, 8]. Da sie über einen längeren Zeitraum hinweg eingesetzt werden und die Energieversorgung häufig über Batterien erfolgt, muss besonders auf die Energieeffizienz der Hardware und der verwendeten Algorithmen geachtet werden. Deshalb muss beispielsweise die Kommunikation zwischen den Sensorknoten gering gehalten werden, da diese vergleichsweise energieaufwändig ist. Eine Möglichkeit ist die Verwendung sogenannter *multi-hop* Netzwerke (Abb. 3), bei denen eine Kommunikation nicht mehr von jedem einzelnen Knoten (Sensor) zur Basisstation erfolgt, sondern nur zum nächstgelegenen Sensor, der die Information seinerseits zum nächsten Sensor weitergibt usw.

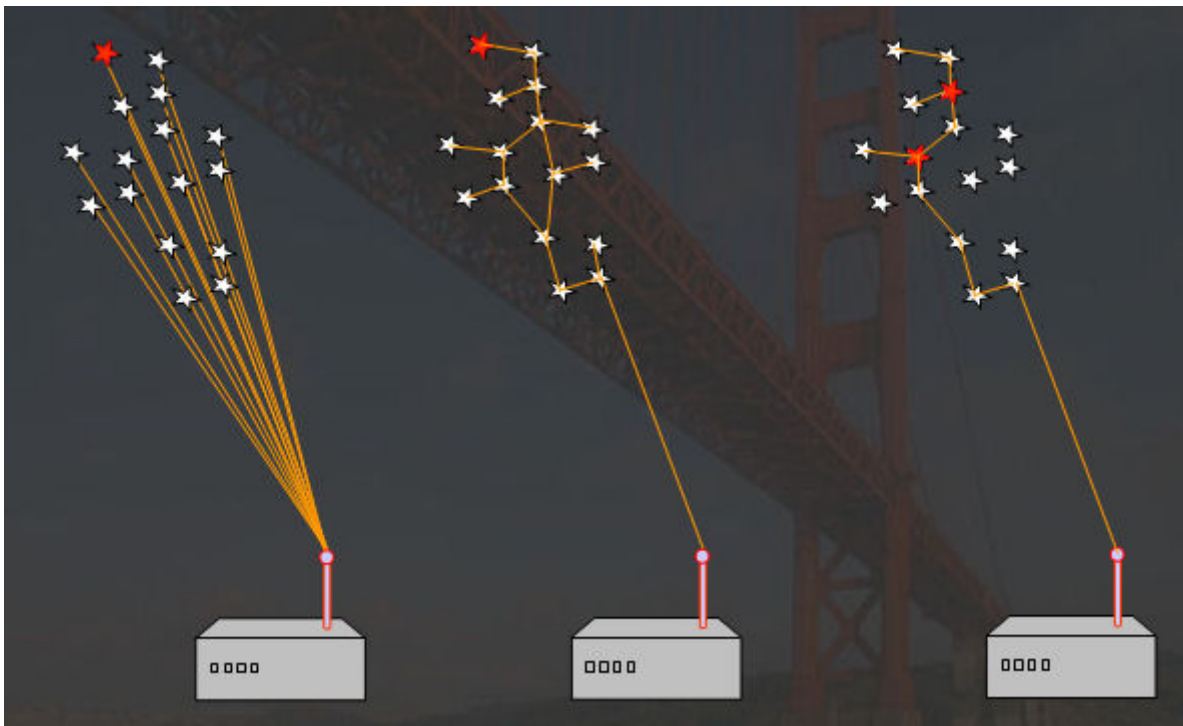


Abb. 3 Schema der direkten (links) und der multi-hop (Mitte) kabellosen Funk-Übertragung mit Sensornetzwerken. Im rechten Teil ist schematisch ein Netzwerk mit Sensorknoten dargestellt, die ein effizientes Pre-processing von Messdaten ermöglichen.

Noch effizienter ist es, wenn die einzelnen Sensorknoten Messdaten selbst auswerten und nur wichtige Einzelwerte oder Ergebnisse an externe Rechner weiterleiten (Abb. 3, rechts). Auf diese Weise werden sie als Basis für intelligente Algorithmen eingesetzt. Prinzipiell ist es auch möglich, die notwendige Energie für den Betrieb der Sensoren ebenfalls kabelungebunden über Radiosignale bereit zu stellen, Hochleistungsbatterien mit langer Lebensdauer oder Solarzellen zu verwenden. Dadurch kann dann von entfernten Standorten eine Übertragung der Daten z. B. an eine Zentralstation erfolgen.

Sensorik

Voraussetzung für die Anwendung dieser Techniken ist der Einsatz von geeigneten Sensoren, die einerseits qualitativ hochwertige Daten liefern, andererseits kostengünstig und klein sein müssen bei gleichzeitig geringem Stromverbrauch. Die Mikrosystemtechnik ist in der Lage, hochintegrierte Sensoren auf Silikonbasis

herzustellen – sogenannte Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) –, die sich vor allem durch geringe Abmessungen und Stromaufnahme auszeichnen (Abb. 4). MEMS-Systeme der neuen Generation beinhalten in einem Gehäuse die Sensorik (z. B. Temperatur- oder Beschleunigungssensor), die Stromversorgung und die Radiübertragungstechnik – man spricht dann von sogenannten „motes“.

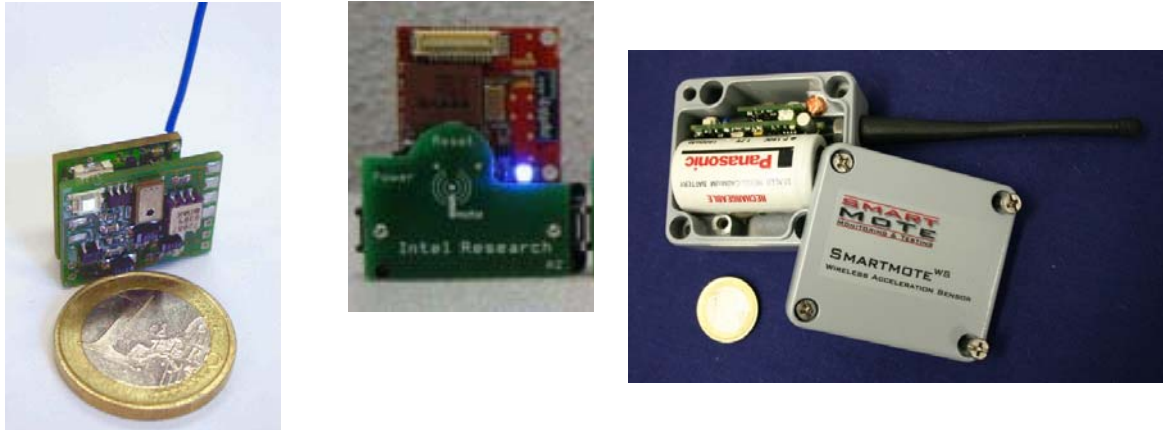


Abb. 4 Beispiele für MEMS-Sensoren; Fa. Teco (links), Fa. Intel (Mitte) und rechts „mote“ der Fa. Smartmote (www.smartmote.de).

Abb. 5 zeigt beispielhaft den Aufbau eines *motes*. Da der Fabrikationsprozess von MEMS ähnlich dem von Computermikrochips ist, lassen sich prinzipiell sehr geringe Herstellungskosten realisieren. Realisiert wurden bislang Sensoren, die auf MEMS-Technik basieren, für die Messung von Temperatur, Feuchte, Ort (GPS), Magnetfeld, Druck, Verformung und Beschleunigung. Auch Miniaturkameras lassen sich herstellen. Systeme für Messungen des elektrochemischen Potentials (Korrosion) und von hochfrequenten Schwingungen (Schall) sind in der Entwicklung.

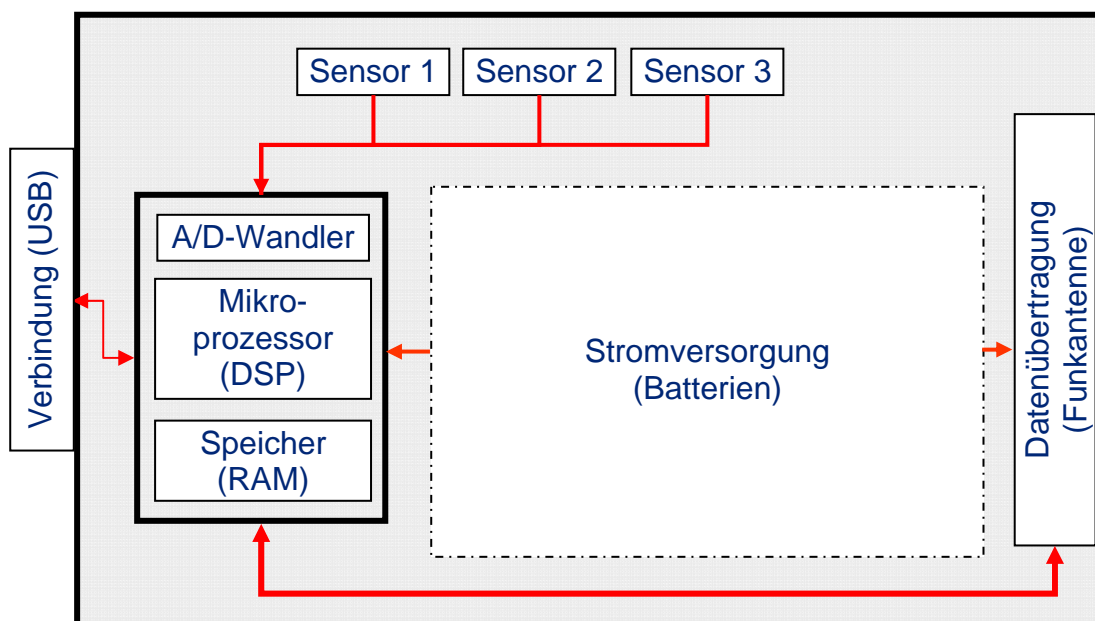


Abb. 5 Aufbau eines „mote“ mit Sensorbausteinen, Datenverarbeitungseinheit und Datenübertragung. Sofern der mote an eine Basisstation angeschlossen wird, erfolgt er z. B. über eine Standard-USB-Schnittstelle.

Eine vergleichsweise neue Entwicklung ist die Kombination von MEMS basierten *motes* mit konventionellen Sensoren, wie z. B. piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern oder Dehnungsmessstreifen. Abb. 5 zeigt den Prototyp eines *motes* mit Dehnungsmessstreifen, mit dem die DMS-Daten in Echtzeit drahtlos übertragen werden können.

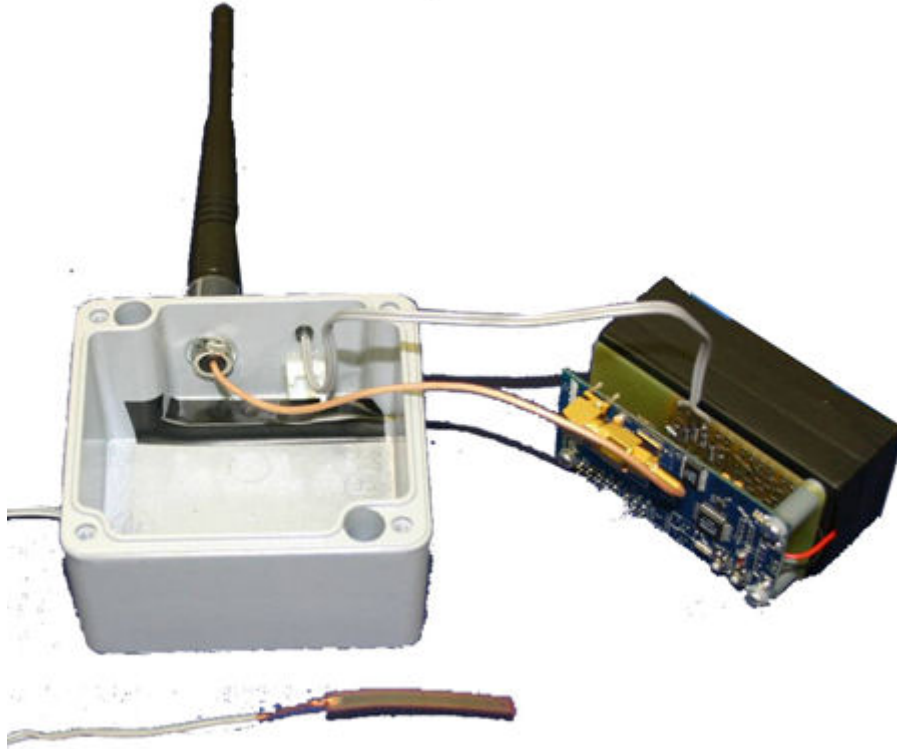


Abb. 6 „mote“ Fa. Smartmote mit angeschlossenem DMS [5].

Diese preiswerten Sensoren können mit einer entsprechenden Intelligenz versehen werden (Computerchips lassen sich problemlos im selben Gehäuse integrieren), die wichtige von unwichtigen Daten trennt, bevor Daten über z. B. Funkverbindungen versandt werden. Die dabei verwendeten digitalen Signalprozessoren (DSP) können so programmiert werden, dass beispielsweise ein Teil der Signalanalyse (s. o.) bereits unmittelbar nach der Signalaufzeichnung durchgeführt wird, so dass nur noch relevante Daten weiterverarbeitet werden. Durch Sensornetzwerke können mit Hilfe dieser so genannten „motes“ z. B. redundante Signale herausgefiltert („collaborative signal processing“) und so Informationen verdichtet werden. Erste effiziente Sensornetzwerke zur Messung von Temperatur, Feuchte oder Position (GPS) werden derzeit am *Center for Embedded Networked Sensing* (University of California in Los Angeles, u. a.) sowie an der *University of California in Berkeley* entwickelt. Sie wurden mit Hochleistungsbatterien versehen, die einen Betrieb von mehr als fünf Jahren gewährleisten.

Ziel ist dabei die Entwicklung eines Vorort-Systems zur Gebäudeüberwachung (*structural health monitoring*). Bereits existierende Systeme werden derzeit u. a. bei der Überwachung von Gebäuden im Rahmen der Bestimmung ihres seismischen Gefährdungspotentials bei Erdbeben eingesetzt. Hier fehlte allerdings die Implementierung des Schallemissions-Know-Hows hinsichtlich der Schwingungseigenschaften des Untersuchungsobjekts. Dies würde wesentliche Informationen

über den Schädigungsgrad eines Bauwerks bzw. Bauteils liefern. Es bieten sich noch weitere Innovationsmöglichkeiten durch die Verknüpfung mit der quantitativen Schallemissionsanalyse an.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine wichtige Aufgabe in den Ingenieurwissenschaften ist die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von Konstruktionen, zum Beispiel bei Eisenbahnbrücken oder an Luftfahrzeugen, um ihrer Fehlerfreiheit zu gewährleisten. Im Interesse einer erhöhten Sicherheit muss es das Ziel sein, diese Prüfungen nicht nur bei regelmäßigen Wartungsarbeiten und Inspektionen durchzuführen, sondern die Strukturen kontinuierlich zu überwachen (structural health monitoring). Anwendungen können von einer drahtlosen Übertragung der Messergebnisse profitieren, denn drahtlose Sensoren können mit wenig Aufwand und geringen Kosten angebracht werden. In vielen Fällen wird die Durchführung von Messungen so überhaupt erst möglich gemacht. Heutige kabelgebundene Lösungsansätze bestehen meist aus einem zentralen Gerät, das nur eine bestimmte Anzahl von Sensoren unterstützt, so dass die Einsatzorte und die Anzahl von Sensoren, die installiert werden können, stark eingeschränkt sind. Diese Einschränkungen treten bei der Verwendung von drahtlosen Sensornetzen nicht auf.

Ein Ziel bei der Anwendung von kabelungebundenen Sensornetzwerken ist allerdings nicht in jedem Fall der vollständige Ersatz der visuellen Prüfung oder anderer Zerstörungsfreier Prüfverfahren. Vielmehr ist es sinnvoll, damit den Einsatz dieser personal und kostenintensiven Techniken auf ein Mindestmaß zu beschränken und so insgesamt die Effizienz der Prüfung und Überwachung zu erhöhen. Der kombinierte Einsatz von ZfP-Verfahren und Dauerüberwachung ist sicherlich ein zukunftssträchtiges Konzept, an dem aktuell gearbeitet wird [4-5]. In diesem Zusammenhang wird z. B. auch ein System entwickelt, welches intelligente Algorithmen nutzt, um Schallemissionsanalyseverfahren der vorgestellten Netzwerktechnik zugänglich zu machen [6-7].

Danksagung

Für ihre Beiträge zu diesem Artikel möchten die Autoren sich bedanken bei Olga Saukh, Hans-Wolf Reinhardt, Kurt Rothermel, Glauco Feltrin, Jonas Meyer und Gerhard Bahr. Der erstgenannte Autor ist der Deutschen Forschungsgemeinschaft zu Dank verpflichtet, die ihm im Rahmen eines Stipendiums (Bewilligungsnummer GR1664/2-1) den Forschungsaufenthalt an der University of California, Berkeley, Department of Civil and Environmental, USA, ermöglicht.

Literatur

1. **C. Grosse:** *Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Analyse von Baustoffen und Bauteilen*. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart, 2005, 150 S.
2. **C. Grosse:** *Monitoring of large structures using acoustic emission techniques*. Symposium "Niet-destructief onderzoek in de bouwsector", Proceedings, Antwerpen, 23.10.2003, S. 15-24.
3. **C. Grosse, J. Kurz, H.-W. Reinhardt, M. Krüger, P. J. Marrón, K. Rothermel, J. Meyer, G. Feltrin:** *Wireless monitoring of concrete structures using micro-electro-mechanical sensors (MEMS)*. Int. Conf. on Conc. Repair,

- Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa, Nov. 2005, Balkema Publ., Rotterdam, (in print).
4. **C. Grosse, R. Beutel, H.-W. Reinhardt, M. Krüger:** *Impact-echo techniques for non-destructive inspection of concrete structures*. Int. Conf. on Conc. Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, South Africa, Nov. 2005, Balkema Publ., Rotterdam, (in print).
 5. **C. Grosse, J. Kurz, R. Beutel, H.-W. Reinhardt, M. Krüger, P. J. Marrón, O. Saukh, K. Rothermel, J. Meyer, G. Feltrin:** *Combined Inspection and Monitoring Techniques for SHM of Bridges*. International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM) 2005, Stanford University, Stanford, CA, September 12-14, 2005, (in print).
 6. **J. Kurz, C. Grosse, H.-W. Reinhardt:** *Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete*. Ultrasonics, Volume 43, Issue 7, Juni 2005, S. 538-546
 7. **J. Kurz, F. Finck, C. Grosse, H.-W. Reinhardt:** *Ansätze zum Monitoring von Betonbauwerken mit der Schallemissionsanalyse*. Proc. DACH Jahrestagung 2004, Salzburg, Österreich, DGZfP: Berlin, BB89 (2004).
 8. **M. Krüger, C. Grosse:** *Structural health monitoring with wireless sensor networks*. Otto-Graf-Journal 14 (2004), S. 77-90.