

Preiswerte Dauerüberwachung von Bauwerken mit drahtloser Sensorik

Markus Krüger, TTI GmbH – TGU Smartmote, Stuttgart
Christian U. Große, University of California, Berkeley (USA)

Zusammenfassung

Dem Bauwerksmonitoring, das heißt der fortlaufenden Überwachung von Bauwerken mittels geeigneter Technologien, kommt insbesondere im Zusammenhang mit dem zunehmenden Alter von Bauwerken wie auch ansteigenden Anforderungen an deren Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eine immer größere Bedeutung zu. An ausgewählten Bauwerken wird bisher vereinzelt eine Technik angewandt, bei der eine Vielzahl von charakteristischen Kennwerten mit konventioneller Sensorik erfasst und ausgewertet wird. Zu diesen Kennwerten gehören vor allem die Luft- und Bauteiltemperatur und -feuchte oder auch Bauteil deformungen, -verschiebungen und -schwingungen.

Problematisch an den bisher eingesetzten Überwachungssystemen sind der hohe Zeitaufwand bei deren Installation sowie der hohe Kostenaufwand. Daher werden Systeme zur Dauerüberwachung meist nur selten eingesetzt. Durch die Verwendung von intelligenten, drahtlosen Sensornetzwerken wird zukünftig hingegen ein breites Anwendungsfeld erschlossen, da derartige Monitoringsysteme gegenüber konventionellen Messsystemen einfacher zu applizieren und deutlich kostengünstiger sind.

Keywords: Drahtlose Sensornetzwerke, Monitoring, Bauwerksüberwachung, MEMS, Sensorik

Einleitung

Der fortlaufenden Überwachung von Bauwerken kommt insbesondere im Zusammenhang mit deren zunehmendem Alter wie auch steigenden Anforderungen an Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eine immer größere Bedeutung zu. Daher werden neben der einfachen visuellen Untersuchung von Bauwerken in kritischen Einzelfällen auch drahtgebundene Monitoringsysteme installiert, die eine Vielzahl von Messwerten aufzeichnen [Hol2004], [Pei2003]. Zu diesen Kennwerten gehören vor allem die Luft- und Bauteiltemperatur und -feuchte bzw. Bauteil deformungen, -verschiebungen und -schwingungen. Der hohe Kostenfaktor für drahtgebundene Monitoringsysteme erweist sich jedoch als Nachteil, weshalb der Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken für eine breitere Anwendung notwendig erscheint. Mit solchen Monitoringsystemen ermittelte Kennwerte können zukünftig dazu beitragen, genauere Aussagen über die Veränderungen des Tragwerks und die Restlebensdauer zuzulassen. Ferner können damit auch gezielt Maßnahmen zur Instandsetzung und zum Bauwerkserhalt ergriffen werden, was langfristig zu einer Kostensenkung führt.

Beispielsweise bietet die Modalanalyse über längere Zeiträume hinweg die Möglichkeit der Charakterisierung und Beurteilung des Bauwerkszustands hinsichtlich sei-



nes Tragverhaltens, wobei insbesondere durch die Dauerüberwachung auch extreme Lastfälle berücksichtigt werden können.

Die Schallemissionsanalyse ist eine weitere Methode, um Bauteilschäden zeitnah zu erfassen und zu beurteilen [Gro2003], [Gro2004], [Kur2006]. Anwendungen liegen hier z.B. im Bereich der Erfassung und Lokalisierung von Spannstahlbrüchen in Brückenbauwerken.

Drahtlose Sensornetzwerke können in Verbindung mit preisgünstigen Miniatursensoren die Kosten für die Dauerüberwachung deutlich reduzieren, da einerseits die Komponenten vergleichsweise billig sind und zudem ein solches System schnell und einfach zu installieren ist. So kann ein drahtloser Sensor mit MEMS-Sensorik momentan mit Preisen zwischen 100 und 400 Euro produziert werden, wobei bei entsprechender Massenproduktion die Kosten hierfür zukünftig eher noch fallen werden.

Sensornetzwerkhardware

Primäre Aufgabe eines Systems zur Bauwerksüberwachung ist zunächst die Erfassung von relevanten Messwerten. Hierzu gehören beispielsweise die Messung von Temperatur und Feuchtigkeit, von Dehnungen und Spannungen oder von Verschiebungen. Solche Kennwerte werden mittels geeigneter Sensorik an verschiedenen Stellen des Bauwerks ermittelt. Bei drahtlosen Sensornetzwerken übernehmen diese Aufgabe die drahtlosen Sensorknoten (Motes), welche dann per Funk die Messwerte an einen oder mehrere Zentralrechner senden. Ein Zentralrechner dient vornehmlich der Datenspeicherung und der erweiterten Datenanalyse. Er besteht in der Regel aus einem Industriecomputer und ist auf einen Stromanschluss angewiesen. Ausgestattet mit einer geeigneten Schnittstelle, beispielsweise einem GPRS-Modem, stellt der Zentralrechner zudem die Verbindung zum Nutzer bzw. zum zuständigen Ingenieur her.

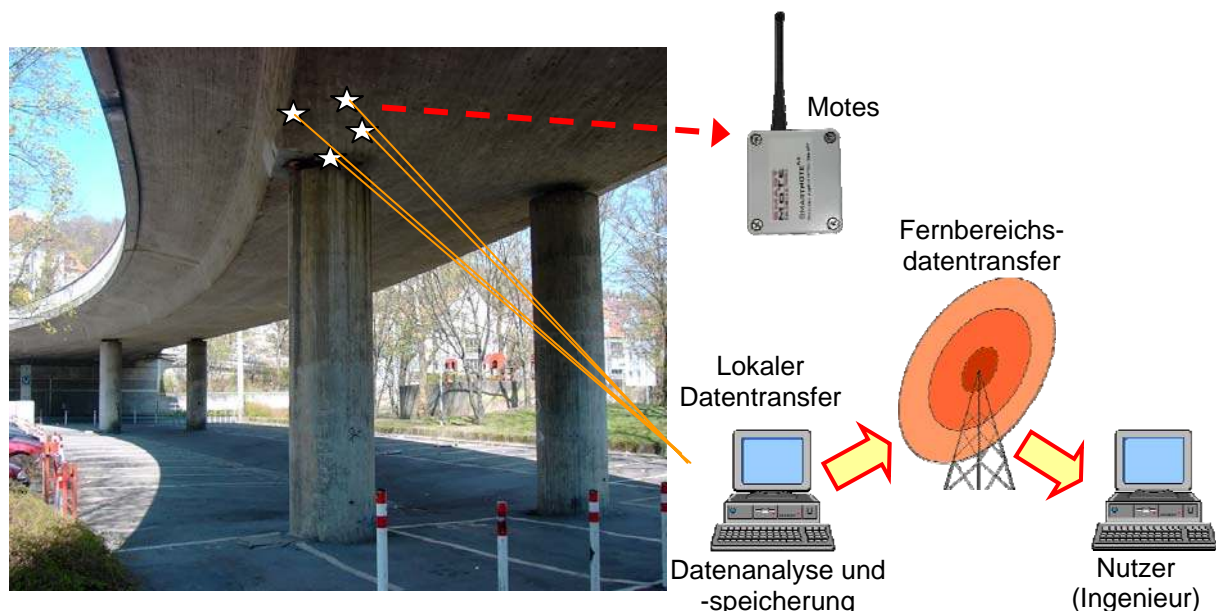


Abbildung 1: Prinzipskizze für die Bauwerksüberwachung mit drahtlosen Sensornetzwerken.

Der Sensorknoten (Mote)

Neben der reinen Erfassung verschiedener Messwerte hat ein Mote Aufgaben zu erfüllen, welche sich vornehmlich aus der Anforderung an einen geringen Stromverbrauch ergeben. Den höchsten Stromverbrauch weist in der Regel die Daten-

fekt nutzen, weswegen sie keine Speisespannung benötigen. Allerdings ist zu beachten, dass für die Signalverstärkung und auch die A/D-Wandlung in Abhängigkeit von der Samplingrate und Amplitudenauflösung eine nicht unbeträchtliche Menge an Energie benötigt wird.

Eine wesentliche Weiterentwicklung im Hinblick auf geeignete Sensorik stellen MEMS-Sensoren dar. MEMS sind mikroelektromechanische Systeme, bei denen elektrische und mechanische Komponenten auf kleinen Chips integriert werden [War2005], [Zho2001], [Krü2005]. Bei Massenfertigung sind solche MEMS mit Preisen von wenigen Euro sehr kostengünstig, wobei sie zudem aufgrund der integrierten Signalkonditionierung sowie weiterer Elektronik einfach in die Motes integriert werden können (siehe auch Abbildung 3). Weiterhin verfügen viele MEMS-Sensoren über eine integrierte Temperaturkompensation sowie Kalibrierungsmechanismen, weshalb sich deren Anwendung recht einfach gestaltet. Ein weiterer Vorteil, der sich aus der Integration der Signalkonditionierung ergibt, ist die Optimierung hinsichtlich des Stromverbrauchs. Dieser liegt bei einigen MEMS nur bei wenigen Mikro- bzw. Milliwatt.



Abbildung 3: Konventionelle und MEMS-basierte Sensorik für das Bauwerksmonitoring

Für Temperatur- und Feuchtemessungen sowie für diverse andere Einsatzmöglichkeiten ist bereits eine Vielzahl von zweckmäßigen MEMS-Sensoren verfügbar. Auch für Schwingungsmessungen im niedrigen Frequenzbereich, wie er beispielsweise für die Modalanalyse verwendet wird, sind verschiedene MEMS-Sensoren erhältlich. Im Bereich der Schwingungsmesstechnik für mittlere bis hohe Frequenzen sind hingegen häufig nur proprietäre MEMS-Sensoren verfügbar, wie beispielsweise Schocksensoren für die Automobilindustrie. Zudem besteht hier noch die Problematik der nutzbaren Bandbreite, der Empfindlichkeit sowie des Stromverbrauchs. Entwicklungen im Bereich der MEMS-Sensorik schreiten jedoch rasant voran, so dass zukünftig preisgünstige MEMS-Sensorik für zahlreiche Messaufgaben erhältlich sein wird.

Sensornetzwerksoftware

Ein drahtloses Sensornetzwerk besteht aus vielen einzelnen Sensorknoten, die jeweils mit verschiedenen Sensoren bestückt sein können. Nach der Erfassung und ersten Analyse der Messdaten muss über eine drahtlose Funkverbindung erreicht werden, dass die einzelnen Sensordaten zuverlässig an den Nutzer bzw. den verantwortlichen Ingenieur übertragen werden. Grundsätzlich kommen für diesen

drahtlosen Datentransfer einfache Star-Topologien oder Multihop-Topologien in Frage [Cul2003].

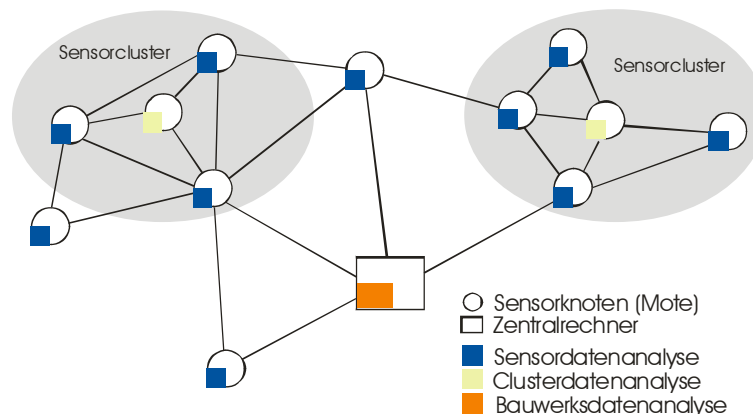


Abbildung 4: Schema eines Multihop-Sensornetzwerkes mit Clusterbildung

Multihop-Topologien bieten den Vorteil eines geringeren Stromverbrauchs sowie der geringeren Anforderungen an die Funktechnologie in Verbindung mit größeren Funkstrecken, da für die Datenübertragung durch die Nutzung von Sensorknoten als Zwischenstation nur geringe Sendeleistungen erforderlich sind. Da ein Sensorknoten so nur mit einigen wenigen Knoten kommuniziert, kann die Sendeleistung und zugleich die gegenseitige Störung bei der Funkübertragung minimiert werden. Nachteilig ist allerdings der erhöhte Aufwand bezüglich der Programmierung und Konfiguration eines solchen Multihop-Netzwerkes, da sich ein drahtloses Sensornetzwerk möglichst selbsttätig aufbauen (ad hoc Netzwerk) und dann die Netzwerkfunktionalität über einen längeren Zeitraum bereitstellen sollte.

Der Festlegung der Netzwerkstrukturen und Übertragungsregeln, dem so genannten Routing, sowie der Zeitsynchronisation ist deswegen erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Für das Routing müssen Softwaremetriken bereitgestellt werden, die neben dem Stromverbrauch eine definierbare Datenverlustrate berücksichtigen, welche gerade noch akzeptabel ist. Die aktuellen Netzwerkpfade müssen daher kontinuierlich durch geeignete Softwarealgorithmen überprüft und gegebenenfalls automatisch angepasst werden, ohne dass der Nutzer hierauf aktiv reagieren muss [Röm2004], [Min2005] und [Cul2003]. Aktuelle Entwicklungen gehen hier sogar noch einen Schritt weiter [Sau2006]. So werden bereits erweiterte Softwaremetriken entwickelt, die auch anwendungsspezifische Informationen berücksichtigen und durch den Nutzer vorher definiert werden. Beispielsweise können Übertragungsprioritäten für ereignisbasierte Messwerte festgelegt werden, oder aber es wird erst eine gewisse Menge an Messwerten zwischengespeichert, zu einem Paket zusammengefasst und dann per Funk weiter übertragen.

Eine Zeitsynchronisation ist immer dann erforderlich, wenn Messwerte von verschiedenen Motes unter Verwendung einer gemeinsamen Zeitbasis miteinander kombiniert und analysiert werden. Eine Zeitsynchronisation wird beispielsweise bei der Detektion und Lokalisierung von Schädigungen mittels der Schallemissionsanalyse oder der Untersuchung des Tragverhaltens mit der Modalanalyse benötigt. Die geforderten Genauigkeiten liegen hier in der Größenordnung von Millisekunden bis hin zu einigen Mikrosekunden. Solche Genauigkeiten sind in der Regel nur mit speziellen Algorithmen zu erreichen, wobei der Aufwand für die Zeitsynchronisation und damit der Strombedarf mit zunehmender Anzahl der Motes im Netzwerk deutlich ansteigen [Est2002], [Röm2003] und [Mar2004].

Methodik der Messwerterfassung und Auswertung

Messdatenaggregation

Das Bauwerksmonitoring beschreibt definitionsgemäß eine quasi kontinuierliche Erfassung relevanter Messwerte über einen längeren Zeitraum hinweg. Zu klären ist dabei, wie ein kontinuierliches Monitoring unter Berücksichtigung der Hardwarebeschränkungen mittels einer diskreten Messwerterfassung abgebildet werden kann. Grundsätzlich bieten sich für das drahtlose Monitoring zwei wesentliche Arten der Diskretisierung an, die ereignisbasierte Messwerterfassung und, als Spezialfall der ereignisbasierten Messwerterfassung, die zeitdiskrete Messwerterfassung.

Bei der zeitdiskreten Bauwerksüberwachung dient die Zeit als Basis, wobei sich praktikable Messintervalle aufgrund des Strombedarfs und der Datenmenge im Bereich von Stunden bis hin zu Monaten bewegen. Ist eine Messwerterfassung in kürzeren Abständen notwendig, so ist eher eine ereignisbasierte Messwerterfassung geeignet.

Ein auslösendes Ereignis, beispielsweise die Überfahrt eines bestimmten Zuges über eine Brücke, ein Erdbeben, Wind, Regen oder aber auch das Versagen einzelner Tragstrukturen wird hierbei als Anlass genommen, eine Reaktion auszulösen. Eine ereignisbasierte Messwerterfassung eignet sich demnach für solche Messungen, bei denen eine Vielzahl von Einzelwerten gemessen werden sollen, die nur unter bestimmten Bedingungen auftreten. Der Vorteil einer ereignisbasierten Messwerterfassung liegt in der Staffelung sowie der Vielfalt der möglichen Reaktionen auf das Ereignis. Diese reichen von dem Einschalten von diversen Elektronikkomponenten und benachbarter Motes zur weiteren Messwerterfassung über die Signalanalyse bis hin zur Sendung einer Alarmmeldung an den Nutzer.

Von Bedeutung ist hierbei, dass das maßgebende Ereignis selbst als solches vom Monitoringsystem auch erkannt wird. Die Ereigniserkennung erweist sich in diesem Zusammenhang teilweise als problematisch, da alle stromverbrauchenden Komponenten eines Motes so lange und so oft wie möglich ausgeschaltet werden sollten. In Verbindung mit der Ereigniserkennung sind daher vorzugsweise solche Sensoren einzusetzen, die bei einem sehr geringen Strombedarf in der Lage sind, die maßgebenden Ereignisse zuverlässig zu detektieren und die notwendigen Reaktionen zu bewirken.

Daten- und Signalanalyse

Im Gegensatz zu Telemetriesystemen kann bei Sensornetzwerken ein Teil der Datenanalyse lokal in einem Mote oder auf dem Zentralrechner durchgeführt werden. Zu den Aufgaben eines Motes gehört daher neben der Datenerfassung auch die Daten- bzw. Signalanalyse zur Ermittlung möglicher Schädigungen oder Bauteilveränderungen, wobei im Hinblick auf die Stromeinsparung und die beschränkte Bandbreite bei der Funkübertragung zudem die Datenreduktion eine große Rolle spielt. Der Aspekt der teilautomatisierten Datenanalyse ist aber auch für den Nutzer selbst von hoher Bedeutung, da dieser sonst kontinuierlich eine enorme Menge von Daten analysieren müsste, bevor er Aussagen zum Bauwerkszustand machen kann.

Die Datenreduktion reicht von einfachen Funktionen wie MAX, MIN, AVERAGE usw. bis hin zu komplexeren Analysen wie beispielsweise maßgebenden Eigenfrequenzen oder der Dämpfung im Zusammenhang mit der Modalanalyse. Auch die gezielte Messwerterfassung sowie das Sensorclustering zielen in erster Linie auf die Reduktion der Datenmengen und damit auf einen möglichst geringen Stromverbrauch.

Sensorclustering

Bei großen Sensornetzwerken bietet es sich an, eine Datenanalyse nicht nur lokal auf einem Mote durchzuführen, sondern auch so genannte Clusteranalysen vorzunehmen, bei denen die Daten von mehreren benachbarten Motes analysiert werden [Liu2004]. Dabei übernimmt einer der in einem Cluster enthaltenen Motes die Datenanalyse für dieses Cluster und sendet danach erst die maßgebenden Informationen an den Zentralrechner bzw. den Nutzer. Ein solches Cluster kann sowohl statisch sein als auch erst dynamisch als Folge von besonderen Ereignissen erstellt werden.

Ein Sensorclustering bietet neben der Datenreduktion den Vorteil, dass nur die Sensorknoten aus dem betrachteten Cluster synchronisiert werden müssen. Dadurch kann eine höhere Genauigkeit bei einem vergleichsweise geringen Strombedarf erreicht werden, was insbesondere in Anbetracht einer Modalanalyse oder Schallemissionsanalyse von Bedeutung ist [Mar2004]. Aus der Kombination von einzelnen Messwerten ergibt sich beim Sensorclustering jedoch noch ein weiterer Vorteil. Während ein einzelner Messwert fehlerbehaftet sein kann und zudem meist nicht aussagekräftig ist, bietet die Vielzahl von Messwerten die Möglichkeit, mittels automatisierter Algorithmen kritische Bauwerksveränderungen bereits vorab herauszufiltern und zu charakterisieren. Zudem ist die Erfassung absoluter Messwerte zu jedem Zeitpunkt nicht erforderlich. Beachtung ist hier vielmehr den relativen Veränderungen zu schenken, weswegen hier ebenso mit einer deutlichen Reduktion der Datenmenge gerechnet werden kann.

Ausblick

Der Einsatz drahtloser Sensornetzwerke in Verbindung mit kostengünstiger Sensorik wie beispielsweise MEMS-Sensorik kann gegenüber der Verwendung von drahtgebundenen Monitoringsystemen die Kosten für die Dauerüberwachung von Bauwerken deutlich senken. Ein wesentlicher Vorteil ist vor allem die höhere Flexibilität eines kabelungebundenen Überwachungssystems, welches sich leicht installieren, demontieren und an anderer Stelle wieder aufbauen lässt – entsprechend den sich verändernden Anforderungen der Bauwerksüberwachung. Damit erschließt sich eine breitere Anwendung von Monitoringsystemen im Bauwesen, so dass langfristig detailliertere Informationen über Bauwerkszustände gewonnen werden können. Voraussetzung hierfür ist neben geeigneter Hard- und Software die Entwicklung geeigneter Analyseverfahren, bei denen eine Vielzahl von charakteristischen Messwerten berücksichtigt und in einen Gesamtzusammenhang gesetzt werden. Ziel solcher Analyseverfahren, die die Auswertungen möglichst teilautomatisch oder automatisch vornehmen, ist die Reduktion der hohen Datenmengen auf die wesentlichen Informationen. Erst solche Informationen können Ingenieure sinnvoll bei der Beurteilung des Tragverhaltens und der Tragwerkssicherheit, der Lebensdauerprognose und der Planung von bauwerkserhaltenden Maßnahmen nutzen, was zukünftig zur Reduktion der Unterhaltskosten für Bauwerke führen kann. Bedingung ist allerdings, dass zunächst in solche Monitoringtechnologien investiert wird. Das Bauwerksmonitoring wird damit die visuelle Überprüfung von Bauwerken zwar nicht ersetzen, jedoch sinnvoll als ein neues und wichtiges Instrument ergänzen.

Literatur

- [Cul2003] Culler, D., Woo, A., Tong, T., Taming the Underlying Challenges of Reliable Multihop Routing in Sensor Networks. In: Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003.

- [Doh2001] Doherty, L., Warneke, B.A., Boser, B., Pister, K.S.J., Energy and Performance Considerations for Smart Dust. *International Journal of Parallel and Distributed Sensor Networks*, Dec 2001.
- [Est2002] Estrin, D., Elson, J., Girod, L., File-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. In *Proceedings of the 5th symposium on Operating systems design and implementation*, 2002.
- [Gro2003] Grosse, C.U., Monitoring of large structures using acoustic emission techniques. Symposium "Niet-destructief onderzoek in de bouwsector", *Proceedings*, Antwerpen, 23.10.2003, pp 15-24.
- [Gro2004] Grosse, C.U., Finck, F., Kurz, J., Reinhardt, H.-W., Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering. *Proc. EWGAE 2004 symposium in Berlin*, DGZfP: Berlin, BB90 (2004), pp 843-856.
- [Gro2005] Grosse, C.U., Kurz, J., Beutel, R., Reinhardt, H.-W., Krüger, M., Marrón, P. J., Saukh, O., Rothermel, K., Meyer, J., Feltrin, G.: 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, Ed: Fu-Kuo Chang; Lancaster PA: DEStech Publications Inc. (2005), 1403-1410.
- [Hol2004] Holst, A., Hariri, K., Wichmann, H.-J., Budelmann, H., Innovative Non-Destructive Techniques for the Monitoring of Prestressed Concrete Structures. 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, September 22-23, 2004, Fort Garry Hotel, Winnipeg, Manitoba, Canada, pp. 513-523
- [Krü2004] Krüger, M., Grosse, C.U., Structural Health Monitoring with Wireless Sensor Networks. In: H.W. Reinhardt (ed.). *Otto-Graf-Journal 15* (2004), Stuttgart: IWB.
- [Krü2005] Krüger, M., Grosse, C.U., Marrón, P.J., Wireless Structural Health Monitoring using MEMS. In: W.M. Ostachowicz et al. (eds). *Damage Assessment of Structures*, 4th – 6th July 2005, Proc. Intern. Symp., Gdansk, Poland, Zürich: Trans Tech.
- [Kur2006] Kurz, J.H. 2006: Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton. *Doctoral Thesis*, Institute of Construction Materials, Stuttgart University, 2006, in print.
- [Liu2004] Liu, J., Chen, Y., Liestman, A., Clustering Algorithms for Ad Hoc Wireless Networks. In: *Ad Hoc and Sensor Networks*, 2004.
- [Liu2005] Liu, L., Yuan, F.G., Design of Wireless Sensor for High Frequency Applications. In: Fu-Kuo Chang (ed.), *Structural Health Monitoring 2005*; Proc. Intern. Symp., Stanford, 12-14 September 2005. Lancaster: DEStech Publications.
- [Lyn2004] Lynch, J.P., Design of a Wireless Active Sensing Unit for Localized Structural Health Monitoring. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, John Wiley & Sons, 12 (3-4): 405-423.
- [Mar2004] Maroti, M., Kusy, B., Simon, G., Ledeczki, A., The flooding time synchronization protocol. In: *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 2004.

- [Min2005] Minder, D., Hähner, J., Sauter, R., Rothermel, K., Marrón, P.J., Lachenmann, A., Tinycubus - A Flexible and Adaptive Framework for Sensor Networks. In: Proceedings of the Second European Workshop on Sensor Networks (EWSN2005), 2005.
- [Pei2003] Peil, U., Lebensdauererlängerung von Bauwerken mit Hilfe von Bauwerksüberwachung. Bautechnik 80 (2003), Heft 9, S. 614-630.
- [Röm2003] Römer, K., Elson, J., Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 33(1), 2003, pp 149-154.
- [Röm2004] Römer, K., Frank, C., Marrón, P.J., Becker, C., Generic role assignment for wireless sensor networks. In Proc. of the 11th ACM SIGOPS European Workshop, 2004, pp 7-12.
- [Sau2006] Saukh, O., Marrón, P.J., Lachenmann, A., Gauger, M., Minder, D., Rothermel, K., Generic Routing Metric and Policies for WSNs. In: Proceedings of the European Workshop on Sensor Networks 2006, in print.
- [War2005] Warneke, B.A., Pister, K.S.J., MEMS for Distributed Wireless Sensor Networks. International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 15-18.09.2002.
- [Zho2001] Zhou, N., Zhu, B., Pister, K.S.J., Agogino, A.M., Evolutionary Synthesis of MEMS (Microelectronic Mechanical Systems) Design. IEEE Neural Networks Council and Smart Engineering Systems Laboratory, 4-7.11.2001.