

Monitoring mit drahtlosen Sensornetzen

Glauco Feltrin¹, Jonas Meyer², Reinhard Bischoff², Kalliroi Flouri¹ und Khash-Erdene Jalsan¹

¹Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf (CH)

²Decentlab GmbH, Dübendorf (CH)

Zusammenfassung: Drahtlose Sensornetze sind eine vielversprechende Monitoring-Technologie. Die wichtigsten Vorteile von drahtlosen Sensornetzen im Vergleich zu verdrahteten Monitoring-Technologien sind die rasche Installation, die einfache Skalierbarkeit und die Selbstorganisation. Da die Energieversorgung von drahtlosen Sensornetzen mit Batterien erfolgt, beeinflusst bei längerfristigen Monitoring-Anwendungen der sparsame Umgang mit der Energie die Auslegung und den Betrieb eines Sensornetzes. Durch energiesparende Hardware-Komponenten und Betriebsverfahren sowie durch Datenverarbeitung im Sensorknoten ist auch bei datenintensiven Anwendungen eine Lebensdauer von mehreren Monaten oder Jahren möglich. Die Datenqualität ist für die meisten Monitoring-Anwendungen des Bauwesens ausreichend.

1 Drahtlose Sensornetze

Ein drahtloses Sensornetz ist ein Netzwerk, das aus vielen kleinen Computern besteht, die mit einem oder mehreren Sensoren ausgestattet sind (Culler & Wei 2004). Jeder Computer stellt einen Knoten des Netzwerks dar und wird als Sensorknoten bezeichnet. Die Sensorknoten kommunizieren miteinander über Funk: daher der Name drahtlose Sensornetze. Neben den Sensorknoten, die Messdaten generieren (Datenquellen) enthält ein Sensornetz einen oder mehrere Wurzelknoten, welche die Daten, die im Netzwerk generiert werden, an externe Kommunikations- oder Speichersysteme übergeben (Datensenken), und Übertragungsknoten, die Daten von anderen Knoten empfangen und weiterleiten.

1.1 Hardware

Die Hardware eines Sensorknotens (Abb. 1) besteht aus den Sensoren und den zugehörigen Signalaufbereitungseinheiten, einem Analog-Digital-Wandler (ADC), einer zentralen Recheneinheit (CPU) mit RAM-Arbeitspeicher, einem Datenspeicher (Flash-Speicher), einer Sende- und Empfangseinheit (Funk-einheit) und einer Energieversorgung (Batterie). Diese Komponenten erlauben einem Sensorknoten die Erfassung und Verarbeitung von Messdaten sowie die Kommunikation von Daten. Im Gegensatz zu her-

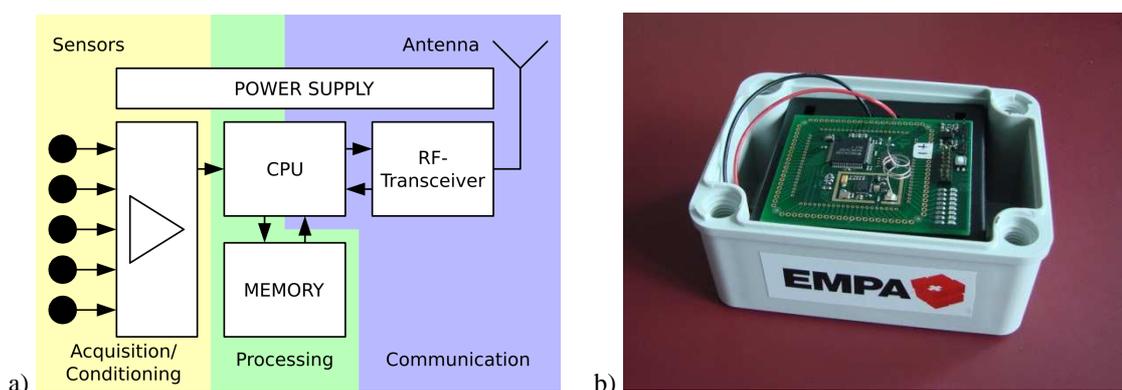


Abb. 1: a) Hardware-Architektur eines Sensorknotens. b) Physische Implementierung eines Sensorknotens.

kömmlichen, verdrahteten Monitoring-Systemen, die in der Regel eine zentralisierte Erfassung und Verarbeitung von Messdaten aufweisen, ist ein drahtloses Sensornetz ein verteiltes Datenerfassungs- und Verarbeitungssystem.

Sensorknoten von verschiedenen Herstellern sind seit einigen Jahren auf dem Markt. Sie unterscheiden sich in der eingesetzten Hardware und der angebotenen Funktionalität. Sensorknoten können in drei verschiedene Kategorien eingestuft werden (Bischoff et al. 2009):

1. *Angepasste Allzweck-Computer*: Diese Sensorknoten sind sogenannte Low-Power-Personal-Computer (PC), Embedded PCs und Personal Digital Assistants (PDA) und laufen vor allem unter Betriebssystemen für mobile Geräte. Sie sind mit herkömmlichen drahtlosen Kommunikationsgeräten wie Wireless LAN und/oder Bluetooth ausgestattet. Wegen der hohen Rechenleistung können höhere Programmiersprachen eingesetzt werden, die es erlauben, relativ einfach anwendungsspezifische Software-Komponenten zu entwickeln. Darüber hinaus unterstützen sie Netzwerkprotokolle wie IP (Internet Protocol), welche die Integration in gängige Kommunikationssysteme vereinfacht. Diese Sensorknoten haben jedoch einen beträchtlichen Energieverbrauch, der ihre Einsatzmöglichkeiten im Bauwerksmonitoring stark einschränkt.
2. *Eingebettete Sensor-Module*: Diese Sensorknoten werden hauptsächlich aus serienmässig produzierten (Off-The-Shelf) Komponenten angefertigt und bieten deshalb mehrere Vorteile. Sie sind weit verbreitet, billig und zuverlässig, da sie in grossen Mengen produziert und von vielen Anwendern genutzt werden. Der Mikrocontroller dieser Sensorknoten wird meist in C programmiert. Dies erlaubt die Entwicklung von Programmen, welche an die beschränkte Speicherkapazität angepasst sind. Anwendungsentwickler haben vollen Zugriff auf die Hardware, müssen sich jedoch gleichzeitig auch um die Verwaltung der Ressourcen kümmern. Beispiele aus dieser Kategorie sind TinyNode von Sensorscope, Tmote von Moteiv, Mica2, MicaZ (Mica-Familie) und Imote2 von Crossbow.
3. *System-on-Chip*: Diese Sensorknoten integrieren elektromechanische Sensoren (MEMS), Mikrocontroller und drahtlose Transceiver-Technologien mit einer anwendungsspezifischen integrierten Schaltung auf einem Chip. Sensorknoten dieser Kategorie haben eine sehr kleine Leistung und einen geringen Platzbedarf. System-on-Chip-Sensorknoten werden meistens für sehr spezialisierte Anwendungen mit kleinen Datenvolumen eingesetzt. Der Smart-Dust-Knoten ist ein solches Beispiel (Kahn et al. 2000).

Für das Monitoring im Baubereich werden vorwiegend eingebettete Sensor-Module eingesetzt, da sie einen guten Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Energieverbrauch aufweisen. Tmote von Moteiv (Polastre et al. 2005) ist ein typischer Vertreter dieser Kategorie. Sein Ultra-Low-Power-Mikrocontroller MSP430 von Texas Instruments verfügt über 10kB RAM und 48kB Programmspeicher (Flash). Dieser 8 MHz 16-Bit-RISC-Prozessor verfügt über mehrere Power-Down-Modi mit extrem niedrigem Energieverbrauch. Der MSP430 besitzt 8 externe 12bit-ADC-Kanäle mit einem Eingang von 0 bis 3.0V. Die maximale Abtastrate über alle Kanäle beträgt 200kHz bei 12bit Auflösung. Der Tmote-Sensorknoten ist mit dem Chipcon CC2420 Funkeinheit ausgestattet, der eine IEEE802.15.4 standardkonforme drahtlose Kommunikation bereitstellt. Der theoretisch erreichbare maximale Datendurchsatz des Systems ist 250kbps. In der Praxis ist ein Nutzdurchsatz von ca. 50kbps erreichbar. Der Energieverbrauch beim Versenden von Daten beträgt ca. 60mW und im Ruhezustand 5mW.

1.2 Software

Die Software, die auf jedem Sensorknoten ausgeführt wird, hat verschiedene Aufgaben zu bewältigen:

- Organisation des Netzwerkes
- Kommunikation innerhalb des Netzwerkes
- Zeitsynchronisation der Sensorknoten
- Planung und Ausführung der Datenerfassung mit verschiedenen Sensoren

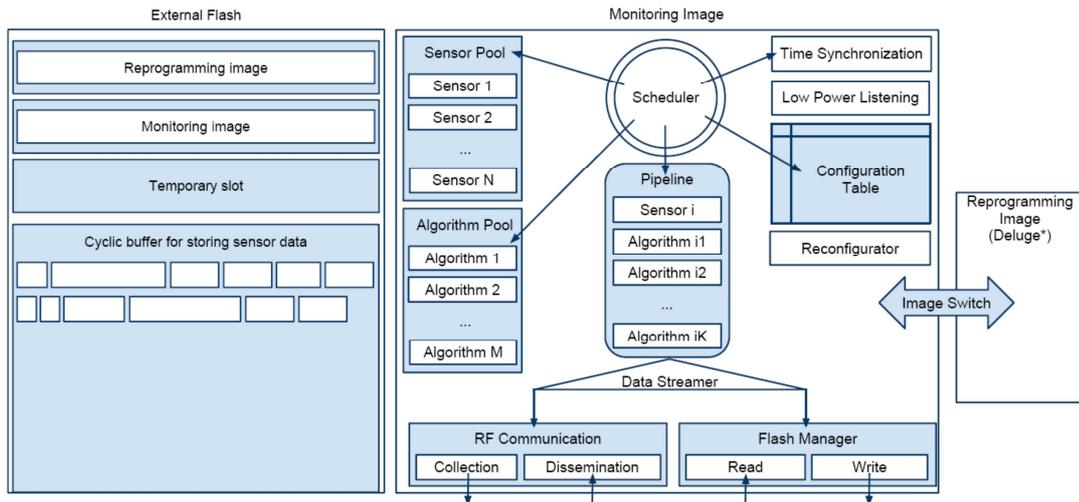


Abb. 2: Architektur der Sensorknoten-Software der Empa.

- Zwischenspeicherung und Verarbeitung der erfassten Daten
- Konfiguration der Datenerfassung und Datenverarbeitung
- Reprogrammierung der Sensorknoten

Die Software wird vielfach in der Programmiersprache NesC geschrieben, eine Erweiterung der Programmiersprache C, die speziell für Sensornetze entwickelt wurde (Gay et al. 2003). Die Basisfunktionalität eines Sensorknotens (MAC- und Routing-Protokolle etc.) wird oft mit TinyOS, ein Open-Source-Betriebssystem für drahtlose Sensornetze, implementiert (Levis et al. 2005, www.TinyOS.net).

Die Architektur der an der Empa entwickelten Monitoring-Software ist in (Abb. 2) dargestellt. Sie unterstützt zwei Arbeitsmodi: den Ausführungsmodus und den Konfigurationsmodus. Der Ausführungsmodus führt die Datenerfassung, -verarbeitung und -kommunikation durch. Das Netzwerk befindet sich fast die ganze Zeit in diesem Modus. Der Konfigurationsmodus erlaubt, Messeinstellungen und Prozessparameter während der Laufzeit des Systems über Funk zu verändern.

Die Scheduler-Komponente ist verantwortlich für die Ausführung von Messaufgaben. Die Aufgaben können in der lokalen Zeit eines Sensorknotens oder in der globalen Zeit des Netzwerks geplant werden, wobei die Zeit der Basisstation als Referenz dient. Die Uhren der einzelnen Sensorknoten können durch den FTSP Zeitsynchronisations-Protokoll synchronisiert werden (Maroti et al. 2004).

Beim Ausführen einer Messaufgabe erfasst der Scheduler eine vordefinierte Datenmenge mit einer bestimmten Abtastrate von einem Sensor. Es ist auch möglich, mehrere Messaufgaben hintereinander zu verketteten. Nach Abschluss der Messaufgaben können die Messdaten über eine Pipeline durch mehrere Verarbeitungsschritte geführt werden. Man kann jedoch auch verlangen, die rohen Messdaten direkt zur Basisstation zu übertragen oder im externen Flash-Speicher abzulegen. Die Spezifikation der Sensoreinstellungen, des Messvorgangs und der Datenverarbeitungsprozesse sind in der Konfigurations-Tabelle gespeichert.

Im Sensor-Pool befinden sich die Programm-Komponenten, welche die Erfassung der Messdaten durchführen. Der Sensor-Pool stellt dem Scheduler auch eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung, um von den verschiedensten Sensoren die Messdaten abfragen zu können. Zurzeit werden 14 verschiedene Sensoren unterstützt.

Analog zum Sensor-Pool enthält der Algorithmus-Pool die Algorithmen, die bei der Datenverarbeitung eingesetzt werden. Die Pipeline-Komponente bietet eine flexible Möglichkeit, mehrere Datenverarbeitungsschritte aneinander zu verketteten. Zusammen mit den verarbeiteten Daten gibt eine Pipeline-Komponente nach der Ausführung einen Statuscode heraus, der es erlaubt, die weitere Ausführung der Verarbeitungsschritte zu stoppen. Dieser Mechanismus wird auch benutzt, um z.B. über eine Triggerschwelle ein Ereignis zu identifizieren.

Um Speicherplatz zu sparen, werden dem ausführbaren Monitoringprogramm nur jene Komponenten beigelegt, für die auch Sensoren physisch vorhanden sind. Allerdings ist es möglich, zusätzliche virtuelle Sensoren und Verarbeitungsalgorithmen vorzusehen, um während der Laufzeit die Komponenten austauschen zu können. Dies kann nützlich sein, um z.B. die Messdaten und Zwischenergebnisse der Verarbeitungsschritte zu überprüfen.

Um die Sensorknoten zu modifizieren, ist auf jedem Sensorknoten ein Programm installiert, mit dem die Sensorknoten reprogrammiert werden können. Die Reprogrammierung wird über Funk aktiviert und ersetzt das alte Monitoringprogramm mit einem neuen, das ebenfalls über Funk übertragen wird. Dadurch können kostspielige Unterhaltsarbeiten vor Ort vermieden werden.

2 Messen mit drahtlosen Sensornetzen

2.1 Energieverwaltung

Da die Sensorknoten mit Batterien betrieben werden müssen, sind die Energieressourcen sehr begrenzt. Für längere Einsätze sind Energiesparmassnahmen deshalb von größter Bedeutung für den Entwurf, Bau und Betrieb von drahtlosen Sensornetzen, denn häufige Batteriewechsel erhöhen in erheblichem Masse die Wartungskosten. Dadurch gehen die Vorteile von drahtlosen Sensornetzen verloren.

Der Energieverbrauch wird durch den Einsatz von verbrauchsarmer Hardware (Sensoren, Mikrocontroller, Funkchips etc.) klein gehalten. Sensorknoten, die sich für Langzeiteinsätze eignen, verbrauchen normalerweise bei voller Leistung deutlich weniger als 100 mW (Bischoff et al. 2009). Diese Sparmassnahme begrenzt selbstverständlich die Leistungsfähigkeit der Hardware, da die Leistungsfähigkeit positiv mit dem Energieverbrauch korreliert.

Eine weitere Massnahme, um den Energieverbrauch zu reduzieren, ist die Hardware-Komponenten möglichst nur dann einzuschalten, wenn sie eine Aufgabe auszuführen haben. Die Hardware wird daher immer wieder ein- und ausgeschaltet, worauf darauf geachtet wird, dass sie möglichst lange im ausgeschalteten Zustand bleibt. Da die Kommunikation vielfach die energieintensivste Aufgabe ist, wird z.B. die Funkeinheit gemäss einem vorgegebenem Arbeitszyklus ein- und ausgeschaltet, wobei die Zeit, in der die Funkeinheit eingeschaltet ist (Taktrate), idealerweise einige Prozent der Zykluszeit beträgt. Die Kommunikation im Netzwerk muss dann innerhalb dieser kurzen Zeitspannen erfolgen, was eine sehr gute Zeitsynchronisation der Knoten voraussetzt. Darüber hinaus reduziert diese Massnahme auch den Datendurchsatz im Netzwerk.

Da bei der Kommunikation der Energieverbrauch exponentiell mit der Übertragungsdistanz (Exponent größer als 2) zunimmt, kann Energie eingespart werden, indem das Netzwerk als Multi-Hop-Netzwerk (Culler & Wei 2004) betrieben wird. Die Signalstärke der Funkeinheit eines Knotens wird soweit begrenzt, dass die Übertragungsdistanz nur bis zu den benachbarten Knoten reicht. Die Daten werden somit zu einem benachbarten Knoten gesendet, der sie empfängt und wiederum zu einem seiner Nachbarknoten weiterleitet. Dieser Kommunikationsprozess wird so lange wiederholt, bis die Daten bei einer Datensinke eintreffen. Durch die Verkürzung der Übertragungsdistanz wird der Energieverbrauch signifikant verkleinert. Der Nachteil dieser Kommunikationsstrategie ist, dass die Zahl der Nachbarknoten beschränkt ist und bei deren Ausfall die Kommunikation eines Teils des Netzwerks zum Erliegen kommt.

Zuletzt kann der Energieverbrauch reduziert werden, indem die rohen Messdaten in den Knoten verarbeitet werden mit dem Ziel, die Menge der Daten, die übertragen werden, zu reduzieren (Übertragung von Informationen anstatt von Messdaten). Da das Senden eines Bits etwa so viel Energie kostet wie die Ausführung von 1000 Anweisungen eines sparsamen Mikroprozessors (Culler et al. 2004), stellt bei datenintensiven Anwendungen (z.B. Schwingungsmessungen) die Datenverarbeitung im Knoten die weitaus wichtigste Energiesparmassnahme dar. Sie ist absolut notwendig, wenn eine Lebensdauer der Batterien von mehreren Wochen, Monaten oder Jahren erreicht werden soll.

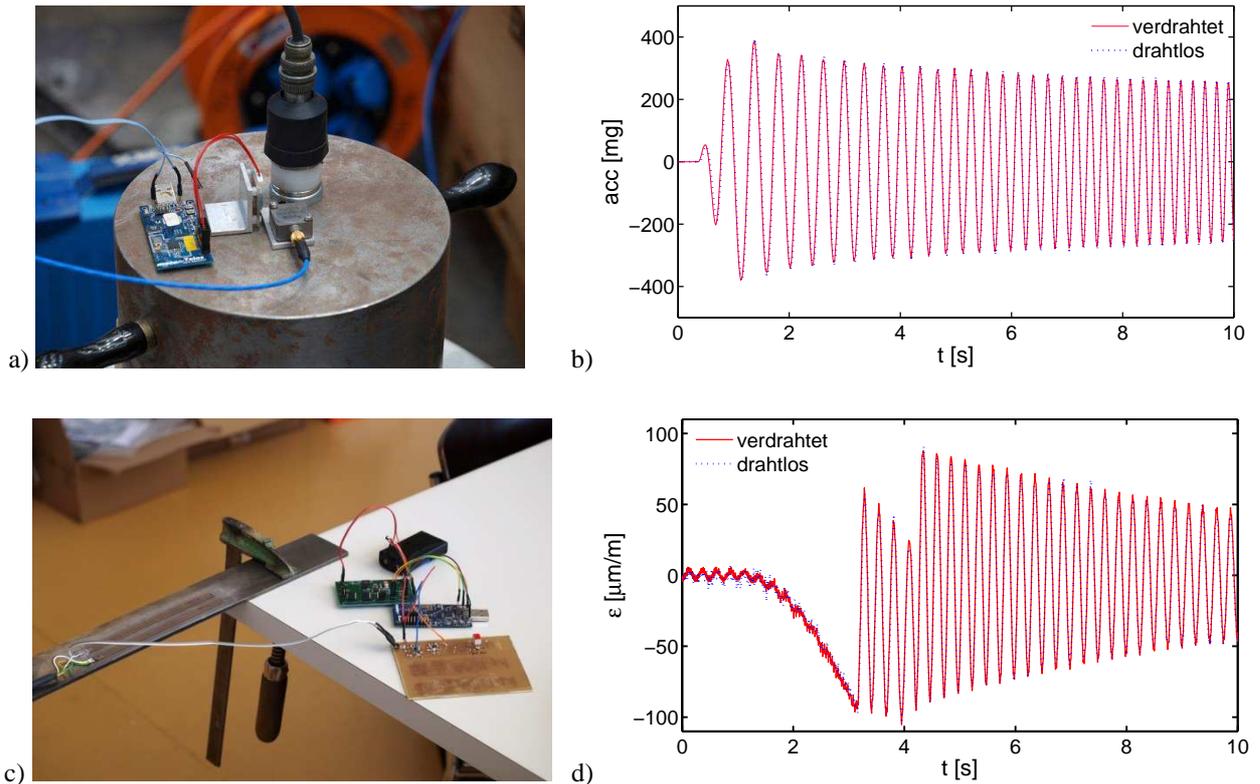


Abb. 3: a) Auf dem Schwingungserreger montierte Beschleunigungssensoren. b) Vergleich einer Beschleunigungsmessung. c) Versuchsaufbau zur Dehnungsmessung mit Batterie, Spannungsregler, Sensorknoten und Signalaufbereitung. d) Vergleich einer Dehnungsmessung.

2.2 Sensoren

Die Knappheit der Energieressourcen hat einen wichtigen Einfluss auf die Wahl der Sensoren, die in drahtlosen Sensornetzen eingesetzt werden. Grundsätzlich werden Sensoren bevorzugt, die einen geringen Energieverbrauch aufweisen. Beliebte sind MEMS-Sensoren, da sie mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen Sensoren haben: Sie sind klein, hoch integriert, weisen in der Regel einen geringen Stromverbrauch und, falls keine sehr hohe Genauigkeit und Auflösung erforderlich ist, auch preiswert.

Es gibt auf dem Markt mehrere MEMS-Beschleunigungssensoren, die grundsätzlich für Anwendungen im Bauingenieurwesen geeignet sind. MEMS-Beschleunigungssensoren mit einem Amplitudenbereich von $\pm 2g$ haben eine Empfindlichkeit von 0.5 bis 1V/g, können mit einer Gleichspannung von 3 bis 5V betrieben werden und haben einen Energieverbrauch von einigen mW. Abb. 3b) zeigt einen Vergleich eines MEMS-Beschleunigungssensor für 10€ mit einem herkömmlichen piezoelektrischen Beschleunigungssensor für 500€. Die Beschleunigungssensoren wurden auf einem Schwingungserreger montiert (Abb. 3a), der eine Sweep-Anregung zwischen 2 und 50 Hz durchführte. Die Beschleunigungen des MEMS-Beschleunigungssensors wurden mit einem Sensorknoten, der mit einem 12bit-ADC ausgerüstet war, aufgezeichnet. Die Signale des piezoelektrischen Beschleunigungssensors wurden mit einem 24bit Datenerfassungsgerät erfasst. Abb. 3b) zeigt, dass im untersuchten Amplitudenbereich beide Beschleunigungssensoren im Wesentlichen gleichwertig sind.

Mit einem Sensorknoten können auch herkömmliche Sensoren betrieben werden. Ein im Bauwerksmonitoring weit verbreiteter Sensor ist z.B. der Dehnmessstreifen (DMS). Abb. 3d) vergleicht Dehnungsmessungen an einem Kragbalken, die mit einem Sensorknoten und mit einem herkömmlichen Datenerfassungsgerät erfasst wurden. Die Qualität der Daten ist vergleichbar. Der durchschnittliche relative Unterschied zwischen den beiden Datensätzen beträgt wenige Prozent. Wegen des geringen elektrischen Widerstands (typischerweise 120 Ω), haben Dehnmessstreifen jedoch einen Energieverbrauch, der etwa 10 Mal grösser ist (ca. 40mW) als der Energieverbrauch eines MEMS-Beschleunigungssensors. Der länger-

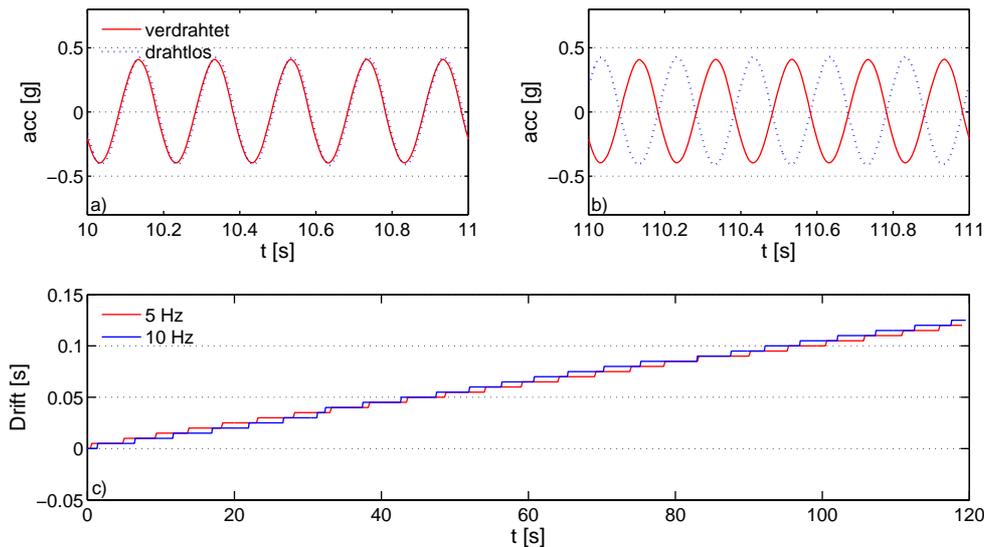


Abb. 4: a) Beschleunigung bei 10 Sekunden. b) Beschleunigung bei 110 Sekunden. c) Drift mit zunehmender Dauer der Messung.

fristige Einsatz von Dehnmessstreifen in Sensornetzen muss daher mit einer effizienten Energieverwaltung einhergehen.

2.3 Messwerterfassung

Ein entscheidender Aspekt der Datenerfassung ist die Analog-Digital-Wandlung (ADC), da sie einen wichtigen Einfluss auf die Auflösung der digitalen Daten hat. Moderne drahtgebundene Datenerfassungsgeräte sind in der Regel mit einem 24bit ADC ausgestattet. Im Gegensatz dazu, hauptsächlich zur Reduzierung des Stromverbrauchs, arbeitet ein Sensorknoten mit einem 8 oder 12bit ADC. Dies stellt eine sehr strenge Einschränkung dar, die einen sorgfältigen Kompromiss zwischen Auflösung und Amplitudenbereich abnötigt. Bei niedrigen Amplituden begrenzt der Quantisierungs-Effekt des ADC in der Regel die Auflösung des Datenerfassungsprozesses. Dieser Effekt zeigt sich als Rauschen und ist bei kleinen Amplituden im Datensatz in Abb. 3d) deutlich sichtbar (0 bis 3 Sekunden). Bei hohen Amplituden hingegen ist in Abb. 3d) kein signifikanter Unterschied zwischen den Daten des Sensorknotens und des verdrahteten Datenerfassungsgeräts erkennbar.

Ein zweiter Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist das Abdriften der Zeit infolge der ungenauen Abtastrate des Sensorknotens. Aufgrund der endlichen Frequenz des Quarzoszillators (32'768 Hz) weicht durch den Quantisierungseffekt die Zeit des Sensorknotens immer mehr von der wahren Zeit ab. Abb. 4c) zeigt das Abdriften aus zwei Sinus-Signalen mit 1 und 5 Hz. Die effektive Abtastrate des ADC des Sensorknotens wurde durch die Änderung der Phasendifferenz eines Sinus-Signals zwischen dem Sensorknoten und einer konventionellen Datenerfassung bestimmt. Für beide Sinus-Signale ist das Abdriften gleich und erreicht 0.13 Sekunden nach 120 Sekunden. Das Abdriften des Sensorknotens ist daher ca. 1.1%. Ein geringer Wert, der aber trotzdem spürbare Auswirkungen auf Messungen hat, die einige Minuten dauern, oder hochfrequente Schwingungen aufweisen. Da das Abdriften linear ist, kann es aber leicht korrigiert werden.

Da die Kommunikation sehr viel Strom verbraucht, wird, um Energie zu sparen, die Funkeinheit des Sensorknotens periodisch ein- und ausgeschaltet. Ist die Funkeinheit eingeschaltet, so führt der hohe Stromverbrauch wegen des Innenwiderstands der Stromversorgung zu einer kleinen Reduktion der Versorgungsspannung (ca. 0.1V). Dies ist in Abb. 5a) dargestellt, in der die Batteriespannung über 180 Tagen aufgezeichnet ist. Der Spannungsabfall ist insbesondere an der Doppellinie in der zweiten Hälfte des Datensatzes erkennbar. Wenn die Sensoren am gleichen Stromkreis angeschlossen sind, was die Standard-Lösung bei kommerziellen Sensorknoten ist, wirkt sich der Spannungsabfall auf die Stromversorgung der

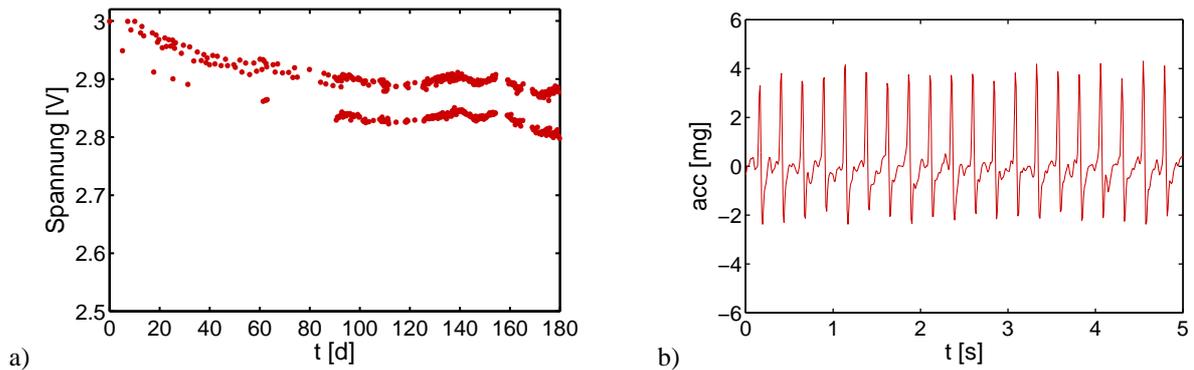


Abb. 5: a) Abnahme der Batteriespannung infolge Kommunikation. b) Störung des Ausgangssignals eines Beschleunigungssensors.

Sensoren aus und stört dadurch das Ausgangssignal. Abb. 5b) zeigt eine solche Störung des Ausgangssignals eines Beschleunigungssensors.

Die Störung kann dadurch behoben werden, indem die Versorgung der Sensoren über einen Spannungsregler erfolgt, der unabhängig von der aktuellen Versorgungsspannung der Batterien eine konstante Ausgangsspannung (z.B. 3V) hält. Außerdem können mit einem Spannungsregler Sensoren betrieben werden, die eine höhere Versorgungsspannung benötigen als die Ausgangsspannung der Batterien. Der Spannungsregler eliminiert auch den Einfluss des steten Abfalls der Ausgangsspannung der Batterien infolge des Verbrauchs (Abb. 5a) und den Einfluss der Temperatur auf die Ausgangsspannung, der typisch für Batterien ist.

3 Anwendungen

Der Einsatz von drahtlosen Sensornetzen zur Erfassung von langsam variierenden Messgrößen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit etc.) ist heute im wesentlichen Stand der Technik. Verschiedene Hersteller und Dienstleister bieten seit einigen Jahren kommerzielle Lösungen an. Drahtlose Monitoringsysteme für längerfristige, datenintensive Anwendungen sind hingegen noch Gegenstand der Forschung. Die Leistungsfähigkeit von drahtlosen Sensornetzen bei datenintensiven Anwendungen des Bauwerksmonitoring wurde zwar in mehreren kurzfristigen Feldversuchen untersucht (Glaser 2004, Lynch et al. 2006, Mechitov et al. 2006, Kim et al. 2007, Gangone et al. 2008, Pakzad et al. 2008), doch gibt es sehr wenig Erfahrung mit langfristigen Einsätzen (mehrere Tage und länger). In diesem Abschnitt werden zwei Feldversuche vorgestellt, die von der Empa durchgeführt wurden.

3.1 Dehnungsmessungen an einer Eisenbahnbrücke

Die Brücke über den Fluss Keräsjöck befindet sich auf der Bahnstrecke Haparanda-Kiruna (eingleisig, nicht elektrifiziert) in Nordschweden. Es ist eine einfeldrige, einfach gelagerte, genietete Stahl-Fachwerkbrücke mit einer Länge von 31.6 m (Abb. 6a). Die Brücke wurde im Jahr 1911 gebaut. Die Gleise liegen auf Holzschwellen, die direkt auf der Stahlkonstruktion (kein Schotterbett) befestigt sind. Die Brücke wird von schweren Güterzügen, die vor allem Eisenerz transportieren, benutzt. Der Bauherr beabsichtigte, die maximale Achslast der Züge von 22.5 auf 25.0 Tonnen zu erhöhen. Die rechnerische Untersuchung ergab, dass die Ermüdungsfestigkeit der Sekundärträger, welche die Geleise trugen, rechnerisch ungenügend war. Um die tatsächliche Beanspruchung der Sekundärträger festzustellen, wurde ein Bauwerksmonitoring durchgeführt.

3.1.1 Monitoring-System

Das drahtlose Sensornetz, das auf der Brücke eingesetzt wurde, bestand aus 8 Sensorknoten und einem Wurzelknoten, der mit der Basisstation verbunden war. Sechs Dehnungssensoren wurden auf einem Längsträger und zwei Dehnungssensoren auf einem Querträger montiert. Die Sensoren waren gelötete DMS mit einem Widerstand von 120 Ω . Abb. 6b zeigt zwei Sensorknoten und vier DMS auf einem Se-



Abb. 6: a) Eisenbahnbrücke. b) Auf einem Stahlträger montierte Dehnmessstreifen mit Sensorknoten. c) Basisstation (links); Energieversorgung der Basisstation mit Autobatterien und Photovoltaik-Panel (Mitte); Sensorknoten auf dem Längsträger.

kundärlängsträger. Die DMS wurden mit Kabeln über einen externen Anschluss im Gehäuse an die Sensorknoten angeschlossen. Die Gehäuse der Sensorknoten waren mit vier Magnetfüßen ausgerüstet, die eine einfache und schnelle Montage erlaubten.

Die Abtastrate der Datenerfassung war 100 Hz und die Messdauer betrug 30 Sekunden. Der Speicherbedarf eines Datensatzes betrug 6kB oder 60% des RAM-Speichers des Mikrocontrollers des Sensorknotens. Die Funkverbindung wurde periodisch ein- und ausgeschaltet, um Energie zu sparen. Das Verhältnis zwischen Einschaltzeit und Periode betrug 10%. Das Netzwerk wurde zeitsynchronisiert betrieben.

Das Netzwerk erfasste auch die Temperatur, die Feuchtigkeit, die Versorgungsspannung sowie Informationen zum Netzwerk mit einer Messperiode von 2 Minuten. Alle von den acht Knoten aufgezeichneten Messdaten wurden an die Basisstation gesendet. Zur Vermeidung von Datenverlusten durch Paketkollisionen erhielt jeder Sensorknoten ein Zeitfenster zur Übertragung seiner Daten. Die Basisstation wurde mit einem Embedded-PC realisiert (Abb. 6c), der etwa 2W verbrauchte und über zwei Autobatterien mit Strom versorgt wurde. Die Batterien wurden mit einem Photovoltaikmodul wieder aufgeladen (Abb. 6c).

Das Netzwerk war 8 Tage in Betrieb. Da die DMS bereits vorgängig appliziert wurden, war die Installation recht schnell und dauerte etwa 5 Stunden. Die zeitraubende Arbeit war die Verbindung zwischen den DMS und den Sensorknoten (Löten von Drähten, Überprüfung der Funktionalität).

3.1.2 Messkonzept

Da ein elektrischer Dehnmessstreifen (120Ω) ca. 40mW verbraucht, erfordert ein langfristiger Betrieb einen Energiespar-Mechanismus. Aufgrund des geringen Verkehrs auf der Brücke (ein oder zwei Züge pro Tag), war es naheliegend, die Dehnmessstreifen nur dann einzuschalten, wenn ein Zug über die Brücke fuhr. Dieses Messkonzept erfordert jedoch einen Auslösemechanismus, der deutlich weniger Strom verbraucht als ein DMS. Die Lösung bestand darin, einen Sensorknoten mit einem Beschleunigungssensor (Bosch Sensortec SMB380) auszurüsten, der $500\mu\text{W}$ verbrauchte. Dieser war die ganze Zeit in Betrieb und erfasste die Schwingungen der Brücke am Ort des Sensorknotens. Der Sensor verfügt über eine integrierte Signalverarbeitung zur Analyse der erfassten Beschleunigungen. Diese Funktion wurde verwendet, um einen Interrupt zu generieren, sobald ein Schwellenwert überschritten wurde. Mit diesem Interrupt wurde die Messung mit den DMS ausgelöst. Die Auslösezeit betrug ca. 100ms. Die Messung wurde für jeden Knoten individuell ausgelöst.

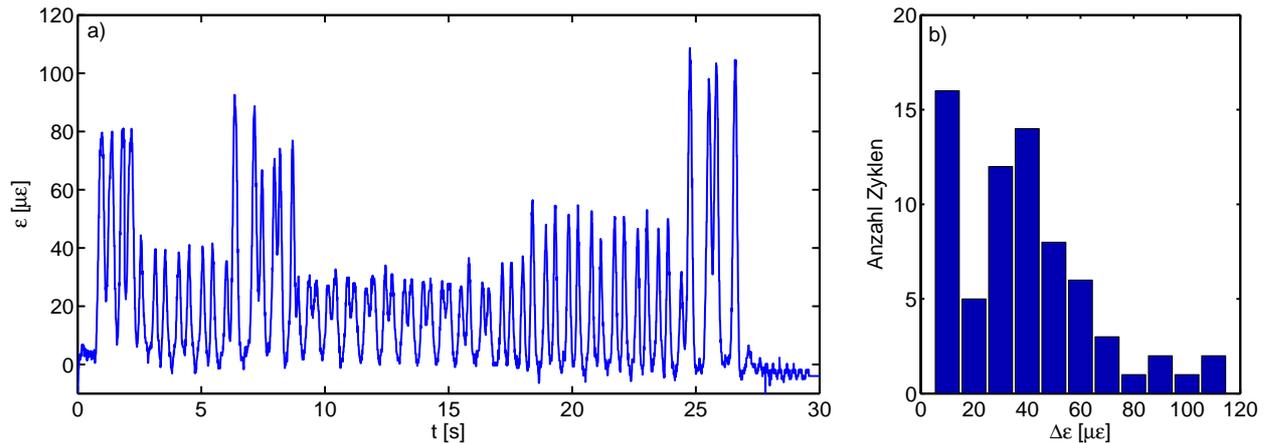


Abb. 7: a) Zeitreihe der Dehnungen. b) Häufigkeit der Dehnungszyklen.

3.1.3 Ergebnisse

Eine aufgezeichnete Zeitreihe der Dehnungen ist in Abb. 7a) dargestellt. Jede Achse des Zuges ist deutlich sichtbar. Die Auflösung der Dehnungen betrug ca. $1\mu\epsilon$ und die Genauigkeit war etwa $\pm 3\mu\epsilon$. Die erzielte Genauigkeit ist ausreichend für die Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit auf der Grundlage von Spannungszyklen.

Da nur wenige Züge pro Tag die Brücke passierten und die Messungen nur während 8 Tagen durchgeführt wurden, konnten die Rohdaten (Zeitreihen der Dehnungen) an die Basisstation versendet werden. Darüber hinaus konnte auch ein sehr konservatives Zeitmultiplexverfahren eingesetzt werden, um Datenverluste durch Paketkollisionen zu minimieren. Für das längerfristige Monitoring einer stark befahrenen Brücke wäre dieses Messkonzept jedoch unzureichend.

Da zur Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit und Restlebensdauer die Zahl der Spannungszyklen mit verschiedenen Amplituden ausreichend sind, ist es sinnvoll, im Sensorknoten aus den erfassten Zeitreihen direkt die Spannungszyklen zu berechnen und nur noch diese an die Basisstation zu übertragen (Abb. 7b). Dadurch lässt sich die zu übertragende Datenmenge auf ca. 1% der Rohdaten reduzieren. Der Energieverbrauch zur Kommunikation der Daten nimmt daher auch um ca. den Faktor 100 ab. Die Berechnung der Häufigkeit der Dehnungszyklen im Sensorknoten aus einer Zeitreihe mit 3000 Messpunkten mittels eines Rainflow-Counting-Verfahrens beträgt ca. 0.5 Sekunden und verbraucht sehr wenig Energie. Die Lebenszeit eines Knotens bis zu einem Batteriewechsels kann dadurch wesentlich verlängert werden.

3.2 Überwachung der Zugkräfte von Schrägseilen

Die Zugkraft eines Schrägseiles kann durch die Eigenfrequenzen eines Seiles ermittelt werden, indem die gemessenen Eigenfrequenzen mit den Eigenfrequenzen eines theoretischen Modells korreliert werden (Casas 1994, Feltrin et al. 2006). Da die Eigenfrequenzen die einzige erforderliche Information ist, können diese mittels Datenverarbeitung im Sensorknoten bestimmt werden. Die von den Sensorknoten zu übermittelnden Daten reduzieren sich somit auf die Eigenfrequenzen. Die Datenreduktion ist erheblich und beträgt weniger als 1% der rohen Messdaten.

3.2.1 Monitoring-System

Um die Leistungsfähigkeit eines datenintensiven Monitorings mit Datenverarbeitung im Sensorknoten zu untersuchen, wurde im 2006 von der Empa ein Langzeitversuch an der Storchenbrücke in Winterthur begonnen (Abb. 8a). Das Netzwerk besteht aus 6 Sensorknoten (C1 bis C6), die an 6 Schrägseilen montiert wurden, einem Wurzelknoten (C0), der sich am nördlichen Widerlager unter der Brückenplatte befindet und ein Übertragungsknoten (C7), der neben der Brücke montiert ist und eine Sichtverbindung zu allen anderen Knoten hat. Abb. 8b) zeigt den Aufbau und Abb. 8c) die Sensorknoten auf den Schrägseilen der Storchenbrücke. Der Wurzelknoten (Abb. 8d) ist mit einer Basisstation (Mikro-PC) verbunden, die

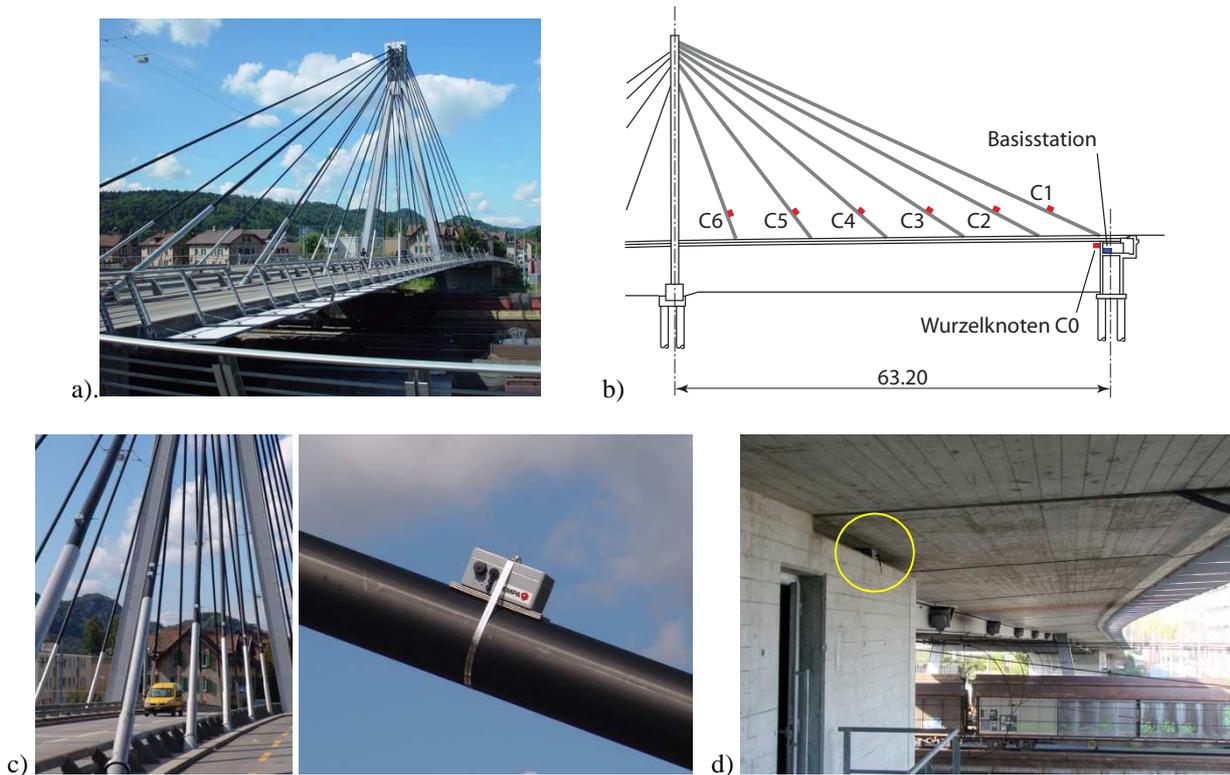


Abb. 8: a) Storchenbrücke in Winterthur. b) Lage der Netzwerkknoten. c) Sensorknoten an den Seilen. d) Wurzelknoten beim Auflager unterhalb der Brückenplatte.

mit Netzstrom versorgt wird. Die Basisstation stellt über das Mobilfunknetz die Kommunikationsverbindung mit einem Computer an der Empa her, der die Datenbank des Monitoring-Systems betreibt.

Die ambienten Schwingungen eines Schrägseiles werden mit dem MEMS-Beschleunigungssensor LIS2L06 von ST Microelectronics gemessen. Die Signalaufbereitung verfügt über einen Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 20 Hz und einen Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor von 50. Der Energieverbrauch des Beschleunigungssensors und der Signalaufbereitung beträgt ca. 4mW. Die Schwingungen werden mit einer Abtastrate von 50Hz über eine Dauer von 20.5 Sekunden aufgezeichnet. Ein Datensatz enthält 1024 16bit-Daten. Eine typische Zeitreihe ist in Abb. 9a) dargestellt.

Ausser den Schwingungen werden periodisch die Temperatur und Feuchtigkeit mit einem Single-Chip-Sensirion SHT11 Sensor gemessen. Einige Sensoren sind im Gehäuse der Sensorknoten angebracht, um die Luftfeuchtigkeit im Innern des Gehäuses zu überwachen. Andere sind in einer Öffnung des Gehäuses angebracht, um die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung zu messen. Darüber hinaus werden periodisch die Versorgungsspannung der Sensorknoten sowie das Routing und die Verbindungsqualität zwischen den Knoten überwacht. Alle Messdaten werden regelmäßig mit einer Periode von 5 Minuten erfasst.

3.2.2 Berechnung der Eigenfrequenzen

Die Berechnung der Eigenfrequenzen erfolgt über ein Frequenzspektrum und wird in drei Schritten durchgeführt. Zuerst werden mit einem FFT-Algorithmus die Fourier-Koeffizienten der Messdaten berechnet. Danach wird mit den realen und imaginären Fourier-Koeffizienten das Frequenzspektrum berechnet. Der letzte Schritt identifiziert mit einem Peak-Picking-Algorithmus die isolierten Spitzen des Frequenzspektrums.

Die Implementierung dieses Algorithmus auf einem Mikrocontroller mit 10kB Arbeitsspeicher ist keine einfache Übung, da eine Zeitreihe mit 1024 16bit-Daten 2kB Speicher beansprucht. Da der Arbeitsspeicher auch die Programme des Sensorknotens aufnehmen muss, bleibt nur wenig Speicherplatz für den Speicherbedarf der Datenverarbeitung. Glücklicherweise kommt der FFT-Algorithmus, der den an-

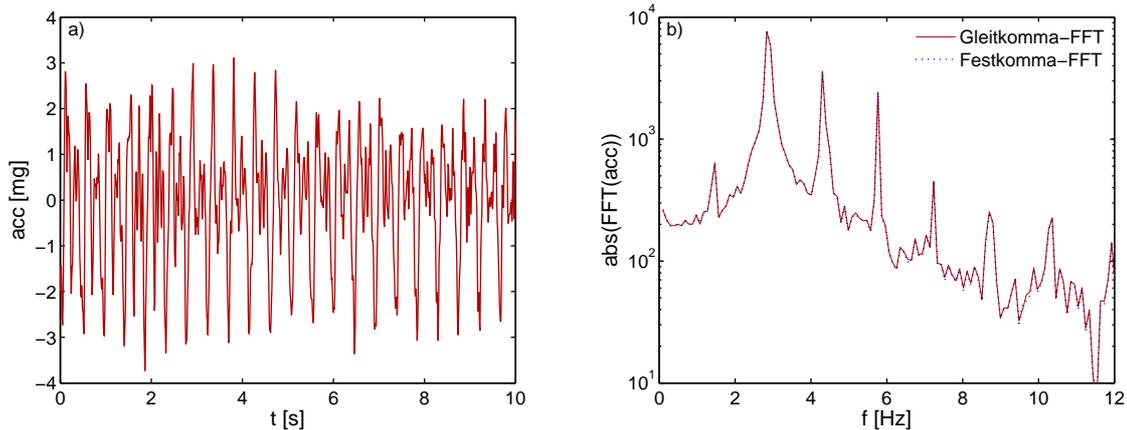


Abb. 9: a) Zeitreihe der Beschleunigung an einem Seil. b) Fourier-Spektren der Beschleunigung.

spruchsvollsten Datenverarbeitungs-Schritt darstellt, nur mit wenig zusätzlichem Speicherbedarf aus, da die Zwischen- und Endergebnisse im gleichen Speicher abgelegt werden können, der die Messdaten aufnimmt.

Üblicherweise wird der FFT-Algorithmus mit Gleitkomma-Arithmetik durchgeführt. Gleitkomma-Operationen werden mit dem Mikrocontroller jedoch sehr langsam durchgeführt, da sie durch Festkomma-Operationen emuliert werden müssen. Dieser Umstand führt zu einem grösseren Programmspeicherbedarf und langen Ausführungszeiten.

Viel effizienter ist es, den FFT-Algorithmus vollständig in Festkomma-Operationen zu implementieren. Dadurch können sich jedoch Fehler einschleusen (z.B. durch Zählerüberlauf). Durch Skalierung der aufgezeichneten Messdaten kann der Zählerüberlauf vermieden und der Approximationsfehler minimiert werden. Abb. 9b) vergleicht die Frequenzspektren der Zeitreihe, die in Abb. 9a) dargestellt ist, welche mit 16bit-Festkommaoperationen und mit 32bit-Gleitkommaoperationen berechnet wurden. Wie ersichtlich ist, sind kaum Unterschiede festzustellen. Die Ausführungszeit der FFT wurde durch die Festkommaoperationen von 5.8 Sekunden auf 0.55 Sekunden reduziert.

Die Berechnung des Frequenzspektrums benötigt 0.19 Sekunden und die Bestimmung von 8 Eigenfrequenzen mit dem Peak-Picking-Algorithmus erfordert weitere 0.21 Sekunden. Daher wird das Endergebnis, die Eigenfrequenzen, in weniger als einer Sekunde berechnet. Im Vergleich zur Aufnahmezeit von 20.5 Sekunden, ist die Datenverarbeitung sehr schnell und benötigt daher auch sehr wenig Energie.

Abb. 10 zeigt die erfassten Eigenfrequenzen der Seile C2 und C5 über 5 Tagen. 6 Eigenfrequenzen konnten regelmäßig für das Seil C2 und 3 Eigenfrequenzen für das Seil C5 identifiziert werden. Eigenfrequenzen, die grösser als 12 Hz sind, waren schwierig zu bestimmen, da die zugehörigen Eigenschwingungen durch die ambienten Anregungsquellen (vor allem Verkehr) kaum angeregt wurden. Die Standardabweichung der Eigenfrequenzschätzungen des Seiles C2 betragen weniger als 0.05 Hz und sind somit ungefähr von der gleichen Grössenordnung wie die Frequenzauflösung des Spektrums, das 0.05 Hz ist. Eine stärkere Streuung ist bei den Eigenfrequenzen des Seiles C5 festzustellen, die für die drei Eigenfrequenzen zwischen 0.05 und 0.13 Hz beträgt. Dieser Effekt ist einerseits auf die Kürze des Kabels C5, dass die Amplituden der ambienten Schwingungen begrenzt, und andererseits auf die höhere Dämpfung, da das Seil aus CFK-Drähten besteht, zurückzuführen. Die Auflösung der Eigenfrequenzen ist ausreichend, um den Einfluss der Temperatur auf die Seilkräfte zu erkennen.

Der gleitende Durchschnitt der Eigenfrequenzen (12 Schätzungen) des Seiles C2 unterscheidet sich von Referenzmessungen mit einem verdrahteten Messsystem um weniger als 2%. Für das Seil C5 beträgt die Differenz zwischen dem gleitenden Mittelwert und der Referenzmessung weniger als 4%. In Abb. 10 erkennt man, dass täglich jeweils zwischen ca. 0 und 5 Uhr die automatische Erkennung der Eigenfrequenzen teilweise versagt. Dies ist auf die sehr kleinen Schwingungsamplituden zurückzuführen, da um diese Zeit kaum Verkehr auf der Brücke herrscht. Mit einem 16bit ADC und einem grösseren Arbeits-

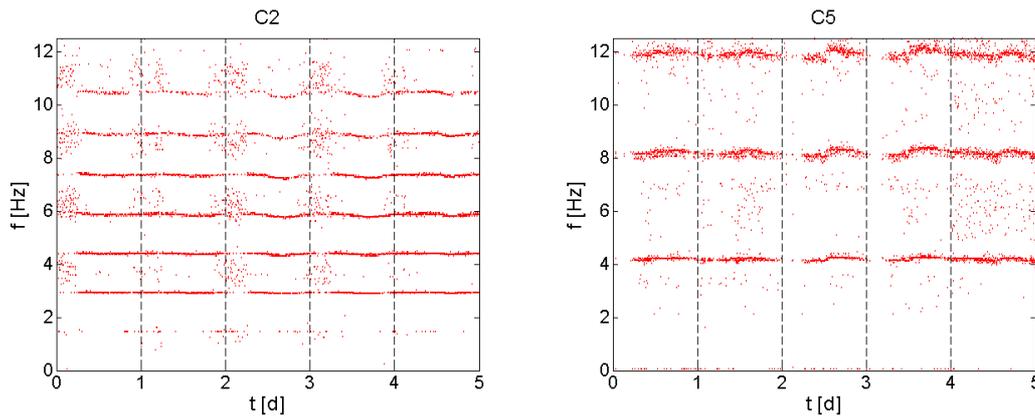


Abb. 10: Eigenfrequenzen der Seile C2 und C5.

speicher kann die Auflösungsgrenze verbessert werden, sodass auch diese Eigenfrequenzen besser erfasst werden können.

3.2.3 Stabilität und Zuverlässigkeit

Vom Beginn weg war die grösste Herausforderung, das Monitoringsystem stabil und zuverlässig zu betreiben. Sensorknoten verschwanden und tauchten nach einiger Zeit spontan und ohne ersichtlichen Grund wieder auf. Die Fehlersuche erwies sich als ausserordentlich schwierig aufgrund der verteilten Struktur eines drahtlosen Sensornetzes. Um die Ursachen der Instabilität zu finden, wurde im Labor ein identisches Sensornetz eingerichtet, der das Sensornetz auf der Storchenbrücke emulierte. Diese Massnahme erwies sich jedoch als wenig hilfreich, da das Labornetz völlig stabil und zuverlässig funktionierte. Die Stabilität und Zuverlässigkeit des Sensornetzes konnte ganz entscheidend verbessert werden, nachdem die Knotensoftware auf TinyOS 2.x portiert wurde. Zudem wurden die Abläufe der Datenerfassung, Datenverarbeitung und Kommunikation neu organisiert. Insgesamt wurde versucht, die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Funktionalitäten zu reduzieren.

Der Fortschritt ist in Abb. 11a) ersichtlich, welche die Empfangsrates von zwei Testphasen über eine Zeitdauer von 120 Tagen aufzeigt. Die Empfangsrates ist das Verhältnis zwischen der Zahl von tatsächlich empfangenen Eigenfrequenzen und der Zahl der theoretisch zu erwartenden Eigenfrequenzen. In der Testphase des Jahres 2007 war die Empfangsrates selten höher als 80%. Zudem sind mehrere totale Zusammenbrüche des Sensornetzes ersichtlich. Totalausfälle von Sensorknoten traten sehr häufig auf. Der Mittelwert der Empfangsrates in dieser Testphase betrug bescheidene 53%.

Die zweite Testperiode, die aus dem Jahr 2010 stammt und mit der neuen Knotensoftware durchgeführt wurde, weist eine deutlich bessere Empfangsrates auf. Es sind keine Zusammenbrüche des Sensornetzes mehr ersichtlich und der Mittelwert der Empfangsrates beträgt 98%. Zwar sind hin und wieder einzelne Krisen ersichtlich, doch sind diese auf einen einzelnen Sensorknoten zurückzuführen, der wegen einer hohen Feuchtigkeit im Gehäuse nach fast vier Jahren Betrieb zunehmend Probleme mit der Hardware bekam.

3.2.4 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch eines Sensorknotens wird durch den Energieverbrauch der Sensoren, der Datenerfassung, der Datenverarbeitung, der Kommunikation und der Netzwerk-Topologie bestimmt. Abb. 11b) zeigt die Batteriespannung des Sensorknotens C6 bei unterschiedlichen Systemkonfigurationen.

In der ersten Konfiguration wurde das Netz mit einem Tastgrad der Funkeinheit betrieben, der 40% betrug. Die Periode der Messungen betrug eine Minute. Der Prozessor und der Beschleunigungssensor blieben die ganze Zeit eingeschaltet. Die Spannung sank um etwa 0.5V in 50 Tagen. Da ein Sensorknoten korrekt arbeitet, solange die Batteriespannung größer als 2.4V ist, beträgt die Lebenszeit eines Knotens mit dieser Konfiguration etwa 60 Tage.

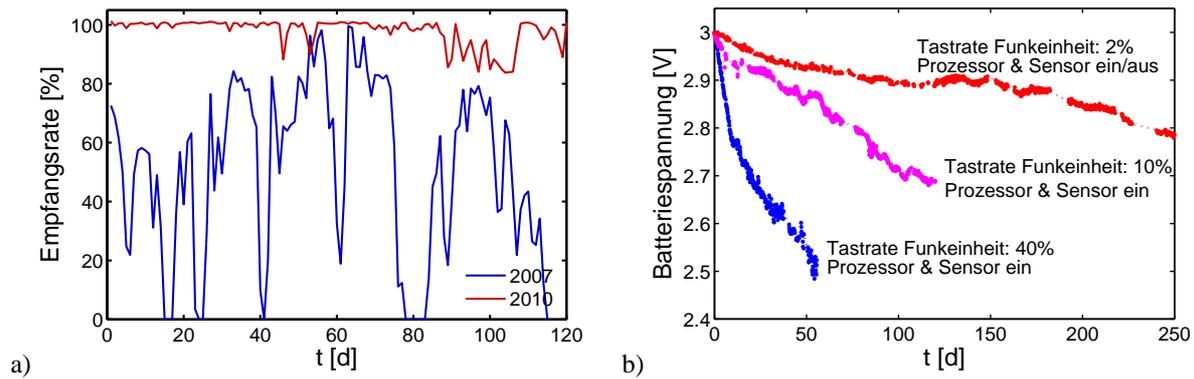


Abb. 11: a) Empfangsrate der Eigenfrequenzen. b) Abnahme der Batteriespannung.

Indem der Tastgrad der Funkeinheit von 40% auf 10% reduziert wurde und die Messungen alle 2 Minuten vorgenommen wurden, konnte der durchschnittliche Spannungsabfall auf etwa 0.08V pro Monat begrenzt werden. Die Lebensdauer eines Knotens erstreckt sich nun auf 180 Tage oder 6 Monate.

Bei der dritten Konfiguration wurden der Beschleunigungssensor und Signalkonditionierung nach Abschluss der Datenerfassung ausgeschaltet. Der Tastgrad der Funkeinheit wurde auf 2% reduziert und die Periode der Messungen auf 5 Minuten eingestellt. Abb. 11b) zeigt, dass der Spannungsabfall nun ca. 0.13V in 150 Tage betrug. Die Lebensdauer eines Sensorknotens konnte dadurch auf ca. 600 Tagen und damit weit über ein Jahr verlängert werden.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass drahtlose Sensornetze nicht nur eingesetzt werden können, um periodisch langsam variierende Messgrößen zu erfassen, sondern dass auch komplexe, längerfristige und datenintensive Monitoring-Aufgaben durchführbar sind. Der Schlüsselfaktor ist die Datenverarbeitung im Sensorknoten, da sie mit geringem Energieverbrauch durchgeführt werden kann. Dadurch kann die Periode der Batteriewechsel von einigen Tagen oder Wochen auf mehrere Monate oder Jahre verlängert werden. Die damit verbundene Reduktion der Unterhaltskosten ist ein wichtiger Aspekt im praktischen Einsatz.

Ein weiterer äusserst wichtiger Aspekt für den praktischen Einsatz ist die Zuverlässigkeit. Die Erfahrungen an der Storchenbrücke haben gezeigt, dass es eine nicht-triviale Aufgabe war, ein drahtloses Sensornetz zuverlässig über mehrere Wochen, Monaten oder Jahren zu betreiben. Das allgegenwärtige Ziel, Energie zu sparen, erhöht erheblich die Komplexität des Systems. Während die Algorithmen für den spontanen Aufbau des Netzes, für das Routing der Daten, die Zeitsynchronisation usw. unter Laborbedingungen zuverlässig arbeiteten, zeigten sie im Feldeinsatz Schwächen. Hinzu kam, dass die datenintensive Anwendung diese Schwächen noch verstärkte. Durch einen Entwurf der Monitoring-Software, der eine bessere Entflechtung der verschiedenen Prozesse erlaubte, und den Einsatz von etwas weniger effizienten aber dafür robusteren Algorithmen, konnte die Stabilität und Zuverlässigkeit dramatisch verbessert werden.

Trotz der schweren Hard- und Software Einschränkungen eines drahtlosen Sensornetzes genügen die produzierten Daten den Qualitätsanforderungen eines Bauwerksmonitorings. Die Abweichungen zu verdrahteten Systemen sind in der Größenordnung von einigen Prozenten. Die Hardware-Einschränkungen erfordern jedoch eine enge Spezialisierung der Sensorknoten auf die Überwachungsaufgabe.

Obwohl es noch mehrere offene Fragen gibt, zeigen die Ergebnisse, dass es keine grundsätzlichen Hindernisse gibt, welche den Einsatz von drahtlosen Sensornetzen im Bauwerksmonitoring behindern können. In naher Zukunft werden die Fortschritte bei der Hard- und Software die Energieeffizienz und die Zuverlässigkeit noch weiter verbessern.

Verdankung

Die Autoren danken dem Staatssekretariat für Bildung und Forschung, dem Bundesamt für Strassen, der Europäischen Kommission, der Gebert Rüt Stiftung und dem Vorstand der Empa für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- Bischoff, R., Meyer, J. & Feltrin, G. (2009) Wireless sensor network platforms. In Boller, C., Chang, F. & Fujino, Y. (Eds.) *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 1229-1238.
- Casas, J. R. (1994) A combined method for measuring cable forces: the cable-stayed Alamillo Bridge, Spain. *Structural Engineering International*, 4, 235-240.
- Culler, D. E. & Wei, H. (2004) Wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 47, 30-33.
- Feltrin, G., Meyer, J. & Bischoff, R. (2006) A Wireless Sensor Network for Force Monitoring of Cable Stays. In *IABMAS'06 - Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Porto, July 16-19, 2006,
- Gangone, M. V., Whelan, M. J., Janoyan, K. D. & Jha, R. (2008) Field deployment of a dense wireless sensor network for condition assessment of a bridge superstructure. In *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2008*,
- Gay, D., Levis, P., von Behren, R., Welsh, M., Brewer, E. & Culler, D. (2003) The NesC language: A holistic approach to networked embedded systems. In *Proceedings of the ACM SIGPLAN 2003 Conference on Programming Language Design and Implementation*,
- Glaser, S. D. (2004) Some Real-World Applications of Wireless Sensor Nodes. In *Proceedings, SPIE Symposium on Smart Structures & Materials/ NDE 2004*, San Diego, CA, March 14-18, 2004,
- Kahn, J. M., Katz, R. H. & Pister, K. S. J. (2000) Emerging challenges: Mobile networking for "Smart Dust". *Journal of Communications and Networks*, 2, 188-196.
- Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S. & Turon, M. (2007) Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. *Proceedings Of The Sixth International Symposium On Information Processing In Sensor Networks*, 254-263.
- Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E. & Culler, D. (2005) TinyOS: An operating system for wireless sensor networks. *Ambient Intelligence*. Springer-Verlag, New York.
- Lynch, J. P., Yang, W., Loh, K. J., Jin Hak, Y. & Chung Bang, Y. (2006) Performance monitoring of the Geumdang bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors. *Smart Materials and Structures*, 15, 1561-75.
- Maroti, M., Kusy, B., Simon, G. & Ledeczi, A. (2004) The flooding time synchronization protocol. In *Proceedings of the 2nd International ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 04)*, Baltimore, MD, November 3, 2004,
- Mechitov, K., Kim, W., Agha, G. & Nagayama, T. (2006) High-Frequency Distributed Sensing for Structure Monitoring. *Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers (SICE)*, E-S-1, 109-114.
- Pakzad, S. N., Fenves, G. L., Kim, S. & Culler, D. E. (2008) Design and Implementation of Scalable Wireless Sensor Network for Structural Monitoring. *Journal of Infrastructure Systems*, 14, 89-101.
- Polastre, J., Szewczyk, R. & Culler, D. (2005) Telos: enabling ultra-low power wireless research. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, Los Angeles, California,