



# X-SLEWS: Ein neuer flexibler Träger für Sensoren für das Geomonitoring

X-SLEWS: A New and Flexible Sensor Platform for Geo-Monitoring

Matthias May<sup>1</sup>, Jó Ágila Bitsch Link<sup>2</sup>, Tomás M. Fernández-Steeger<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Matthias May, B.Sc., Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, matthias.may@rwth-aachen.de

<sup>2</sup> Dipl. inf. Jó Ágila Bitsch Link, Chair of Communication and Distributed Systems, RWTH Aachen, jo.bitsch@cs.rwth-aachen.de

<sup>3</sup> Dr. rer. nat. Tomás M. Fernández-Steeger, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen, fernandez-steeger@lih.rwth-aachen.de

## Zusammenfassung

Dieses Paper stellt die Neuentwicklung eines drahtlosen Sensornetzwerk-Systems, genannt X-SLEWS, vor. Drahtlose Sensornetzwerke ermöglichen die unbeaufsichtigte Durchführung von Messungen über längere Zeiträume und an Orten, an denen kabelgebundene Sensoren ungeeignet oder zu teuer wären. Mögliche Anwendungen sind z. B. Frühwarnsysteme für Geogefahren, Subsidenz-, Verwitterungs-, Bewegungs- oder Neigungsmonitoring. Aufbauend auf eigenen Erfahrungen bei der Entwicklung und dem Praxiseinsatz von Vorgängersystemen, wurde X-SLEWS entwickelt. Dabei lag der Fokus auf hoher Flexibilität, einfacher Installation und einfachem Betrieb, sowie einer sicheren Datenbereitstellung in hoher Qualität. Bezüglich der Hardware war ein Schwerpunkt der Entwicklung die einfache Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit von Sensoren und Funkmodulen durch eine modulare Architektur, die eine einfache Anpassung an verschiedenste Szenarien ermöglicht.

**Schlüsselworte:** drahtloses Sensornetzwerk, Frühwarnsystem, Monitoring, Ingenieurgeologie, XBee, TinyOS, SLEWS, X-SLEWS

## Abstract

This paper presents the newly developed wireless sensor network system X-SLEWS. Wireless sensor networks enable unattended measurements of environmental parameters for long periods of time and in locations that are not suited for deployments of wired sensors. Possible application scenarios are early warning systems for geohazards, subsidence, temperature, movement or inclination monitoring. The development of X-SLEWS builds upon experiences that were gained during development and deployment of predecessor systems. These include requirements imposed on hardware and software regarding flexibility, simple installation and maintenance, and reliable delivery and high quality of the acquired data.

In order to achieve a high degree of flexibility concerning the hardware design, a modular system was developed. It provides simple exchange of sensors and the radio module to be adaptable to various usage scenarios. Different available radio modules allow application that impose different requirements regarding transmission range and energy efficiency. Regulations in countries forbidding certain radio frequencies can be overcome by choosing between several available variants of the radio module. The interfaces between the basis system and the sensor hardware have been designed in a way that maximizes variability and flexibility in order to simplify the integration of future sensor types and allow a wide range of applications.

Maintainability of the software is ensured by employing the popular TinyOS framework that was designed for wireless sensor networks. It provides simple yet powerful architecture that includes a well-structured hardware abstraction. Using TinyOS it is possible to rely on work that has been contributed to the TinyOS community and that has already undergone extensive evaluation.

**Keywords:** wireless sensor network, early warning system, monitoring, engineering geology, XBee, TinyOS, SLEWS, X-SLEWS

## 1 Einleitung

Die Ermittlung und Auswertung von Umweltdaten wird in vielen Bereichen benötigt. Mit Hilfe von Monitoring-Systemen können z. B. in der Ingenieurgeologie Frühwarnsysteme für Erdbeben (ARNHARDT et al. 2009), Gebäudeüberwachungen (XU et al. 2004 und CERIOTTI et al. 2009) oder die Überwachung von feuer- oder erdbebengefährdeten

Gebieten (HARTUNG et al. 2006 und FLEMING et al. 2009) realisiert werden. Solche Systeme erlauben die frühzeitige Erkennung von Geogefahren und die Durchführung von Maßnahmen zur Schadensbegrenzung. Ziel der Frühwarnsysteme ist es auch, Anzeichen einer Gefahr bereits so früh zu erkennen, dass Schaden vermieden werden kann. Nachträgliche Analysen der aufgenommenen Sensordaten können zum besseren Verständnis der Situation führen und zur

Weiterentwicklungen beitragen. Ein weiteres, bekanntes Monitoring-System ist das in den Schweizer Alpen durchgeführte PermaSense-Projekt (BEUTEL et al. 2009), welches geophysikalische Messdaten für das Permafrostmonitoring erhebt. Da in vielen Anwendungsszenarien die Installation und Wartung von kabelgebundenen Sensornetzwerken nicht praktikabel und zu teuer wäre, wird in solchen Fällen immer häufiger ein Netzwerk basierend auf Funkübertragung verwendet.

Auf Grund vorhergehender Erfahrungen aus Projekten mit drahtlosen Sensornetzwerken wie dem SLEWS-Projekt (ARNHARDT et al. 2009), einem Frühwarnsystem für Erdbeben und dem RatMote-Projekt (BITSCH LINK et al. 2010), einem System zur Beobachtung von Ratten in deren natürlichem – aus unterirdischen Gängen bestehendem – Lebensraum wurde die Entwicklung eines Nachfolgers, dem X-SLEWS, begonnen. Mit X-SLEWS werden Nachteile der oben genannten Systeme wie eine zu geringe Funkreichweite und fehlende Flexibilität bei der Auswahl der Sensoren behoben.

Für erste Feldversuche ist das System mit Sensoren ausgestattet, die auf Anwendungen im Bereich der Ingenieurgeologie spezialisiert sind. Jedoch lag ein Schwerpunkt bei der Entwicklung der Hardware und Software des Systems darin, die einfache Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit der Sensoren zu ermöglichen, um das System auf andere Anwendungsmöglichkeiten anpassen zu können. Das Ziel Flexibilität wurde außerdem bei der Integration der Funkschnittstelle berücksichtigt. Ein eigenständiges, standardisiertes Modul übernimmt die Aufgabe der Funkübertragung und erleichtert so die Entwicklung des Systems, da für die komplizierte Funktechnik auf bekannte und erprobte Produkte zurückgegriffen werden kann. Dieses Funkmodul ist für verschiedene Frequenzen erhältlich. Da außerhalb von Europa die 868-MHz-Module teilweise auf Grund gesetzlicher Regelungen nicht erlaubt sind, können in anderen Ländern andere Varianten der Funkmodule (z. B. 900 MHz oder 2,45 GHz) verwendet werden. Außerdem kann die benötigte Reichweite oder Energieeffizienz angepasst werden, indem Module mit den gewünschten Eigenschaften ausgewählt werden. Diese Änderungen können ohne aufwändige Modifikationen an der Hard- und Software vorgenommen werden.

Um die Wartbarkeit und Erweiterbarkeit der Software in der Zukunft sicherzustellen, wird bei den X-SLEWS-Sensorknoten das im Bereich der Sensornetze weit verbreitete Betriebssystem TinyOS verwendet. Es erlaubt die Wiederverwendung von Komponenten, die in der TinyOS-Community entwickelt und bereits in anderen Szenarien ausgiebig getestet wurden. Außerdem reduziert die dokumentierte, standardisierte Architektur die Einarbeitung in die Software und die Wartung des Systems, insbesondere wenn grundlegende Kenntnisse von TinyOS bereits vorhanden sind.

## 2 Aufbau des Systems

Das Kernstück des Systems ist ein drahtloses Netzwerk aus Sensorknoten, die Sensordaten erfassen und diese ggf. über mehrere andere Sensorknoten an eine Basisstation senden.

Die Basisstation (Senke) des Netzwerks bildet ein, ohne Sensoren ausgestatteter Sensorknoten, der an ein handelsübliches, auf Linux basiertes Gerät angeschlossen wird. Zurzeit wird ein Raspberry Pi<sup>2</sup> verwendet (s. Abb.1). Alternativ wurde auch eine Lösung mit einem OpenWRT<sup>3</sup>-basierten Router getestet. Vorteil des Raspberry Pi gegenüber einem Linux-Router ist, dass dieser ein vollwertiges, übliches Debian-Linux im Gegensatz zu der speziellen Linux-Variante OpenWRT für Router unterstützt. Die Verwendung eines drahtlosen Routers hätte den Vorteil, dass dieser über WLAN-Technik verfügt, über die die gesammelten Sensordaten von den in der näheren Umgebung befindlichen WLAN-fähigen Laptops leicht abgeholt werden können.

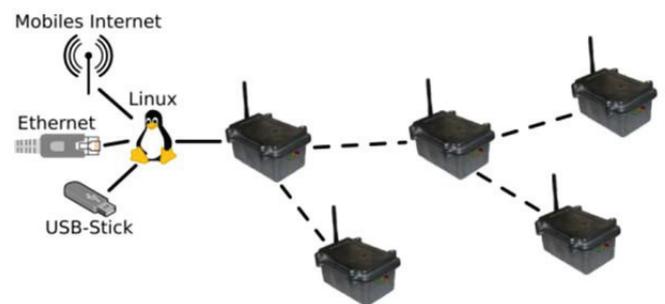


Abb. 1: Aufbau des X-SLEWS-Systems mit einem Linux-basierten Gerät als Gateway.

Fig. 1: Architecture of the X-SLEWS system using a Linux-based device as gateway.

## 3 Sensorknoten

Im Folgenden wird der Aufbau der Hardware eines Sensorknotens beschrieben. Außerdem wird das verwendete Software-Framework vorgestellt.

### 3.1 Hardware

Eines der Hauptziele bei dem Entwurf der Hardware der Sensorknoten war das Bereitstellen größtmöglicher Flexibilität, ohne die Kosten zu sehr zu erhöhen und den Platzbedarf für die Elektronik vergleichbar mit den Vorgängern zu halten (s. Abb.2). Das Design der Hardware (s.

Abb.3) basiert auf der des RatMote2 (MAY 2010), welches wiederum auf der des RatMote, entwickelt von Thomas Bretgeld in seiner Diplomarbeit (BRETGELD 2010), basiert. Kernstück ist ein 32-Bit-Mikrocontroller der Firma STMicroelectronics<sup>4</sup> mit Cortex-M3-Architektur von ARM, der auf mobile, energieeffiziente Anwendungen optimiert ist. Aus dem SLEWS-Projekt flossen hauptsächlich Erkenntnisse aus Feldtests sowie Erfahrung mit Sensoren ein (FERNÁNDEZ-STEEGER et al. 2013).

<sup>2</sup> Der Raspberri Pi ist ein Computer von der Größe einer Kreditkarte. Er wird von der Raspberry Pi Foundation entwickelt ([www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)).

<sup>3</sup> OpenWRT ist eine Linux-Distribution für eingebettete System wie Router ([www.openwrt.org](http://www.openwrt.org)).

<sup>4</sup> STM32F103RBT6

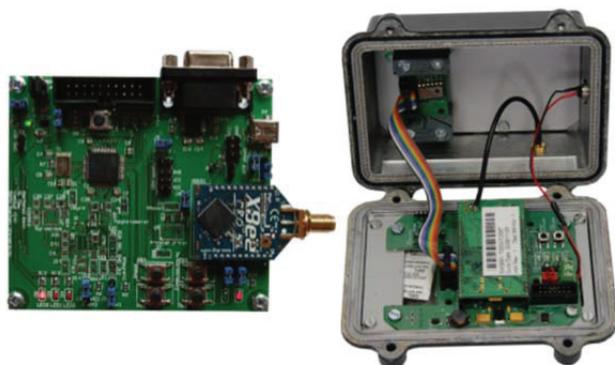


Abb. 2: Links: Prototyp-Board des RatMote2. Unter anderem wurden der Mikrocontroller und das XBee-Funkmodul in X-SLEWS übernommen. Rechts: ein SLEWS-Sensorknoten. Der neue Sensorknoten von X-SLEWS passt in das gleiche Gehäuse.

Fig. 2: Left: prototype board of the RatMote2. The same microcontroller and radio module are used in X-SLEWS. Right: a SLEWS sensor node. The new X-SLEWS sensor node fits into the same case.

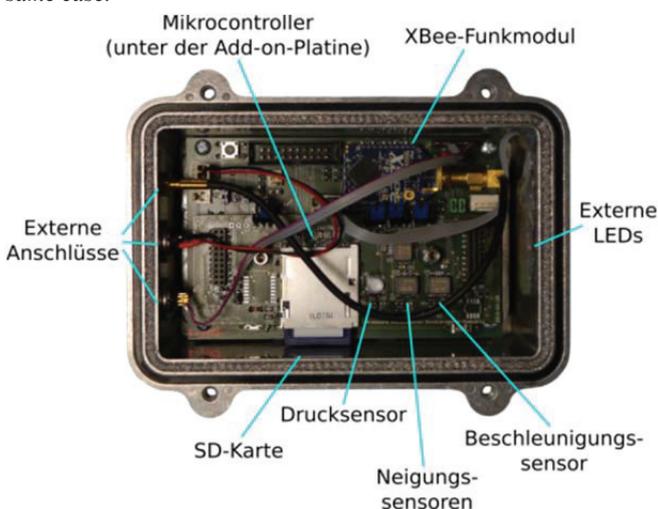


Abb. 3: Ein geöffneter Sensorknoten bestückt mit einem XBee-Funkmodul und einer Sensor-Add-on-Platine. Auf der linken Seite sind Anschlüsse für Batterie, Antenne und zum Debuggen herausgeführt. Auf der rechten Seite sind von außen erkennbare LEDs ins Gehäuse integriert.

Fig. 3: A sensor node in its open case equipped with an XBee radio module and a sensor add-on board. On the left hand side there are connectors for battery, antenna and for debugging purposes. Externally visible LEDs are mounted on the right hand side.

### 3.1.1 Modulares Konzept

Eine wichtige Erkenntnis aus dem SLEWS-Projekt war, dass Sensorchips relativ häufig geändert werden müssen, verglichen mit der Prozessoreinheit. Da Produktlebenszyklen von Sensoren wesentlich kürzer sind, mussten Sensoren während der Verwendung der SLEWS-Hardware ausgetauscht werden, da diese nicht mehr verfügbar waren.

Zudem bieten Hersteller von Sensorchips regelmäßig weiterentwickelte Sensoren an, mit denen bessere Ergebnisse mit dem Sensornetzwerk erzielt werden können. Ein Upgrade der Sensorhardware soll deshalb leicht durchführbar sein.

Ein weiterer wichtiger Grund für einen modularen Aufbau ist der Bedarf, in Zukunft andere Sensortypen integrieren zu können, um auf noch nicht vorhersehbare Anwendungsszenarien reagieren zu können. Der Aufwand hierfür lässt sich deutlich reduzieren, indem man Sensoren auf einer unabhängigen, austauschbaren Platine bestückt und testen kann.

Die Umsetzung einer modularen Platine wurde bei X-SLEWS wie folgt realisiert: Die Basisplatine enthält alle Komponenten, die für einen grundlegenden Betrieb des Sensorknotens nötig sind. Dazu gehören die Subsysteme Spannungsversorgung, Mikrocontroller, Programmierschnittstelle und eine einfache, aber wichtige Ausgabemöglichkeit, in diesem Fall drei LEDs (s.

Abb.3). Um die Funkübertragung hinzuzufügen, ist ein Sockel für XBee Funkmodule vorgesehen. Sensoren werden auf einer zweiten Platine angebracht, welche auf zwei Sockel gesteckt wird und optional mit Schrauben befestigt werden kann, um eine möglichst stabile Montage der ggf. sehr empfindlichen Sensoren zu gewährleisten. Die Add-on-Platine ist so konstruiert, dass theoretisch beliebig viele Add-on-Platinen übereinander gestapelt werden können, vorausgesetzt, die Bestückung der Oberseite der Add-on-Platine erlaubt dies. Die Anzahl der Add-on-Platinen ist limitiert durch die elektrischen Schnittstellen des Mikrocontrollers zu den Sensoren, da oft nicht beliebig viele Sensoren angeschlossen werden können. Zum Beispiel wird für die SPI-Schnittstelle pro angeschlossenem Sensor ein Pin benötigt, um diesen während der Kommunikation zu aktivieren. Um möglichst viele Pins für solche Zwecke zur Verfügung zu haben, wurden zwei Sockel mit insgesamt 40 Pins gewählt. Die I<sup>2</sup>C-Schnittstelle, sowie die RS485-Schnittstelle<sup>5</sup> haben diese Einschränkung nicht, da dort die angeschlossenen Sensoren bei der Kommunikation über eine Adresse im Kommunikationsprotokoll ausgewählt werden. Von den 40 Pins können ca. die Hälfte frei, nicht protokoll-gebunden verwendet werden. Einige der Pins, die für spezielle Schnittstellen wie SPI und I<sup>2</sup>C vorgesehen sind, können alternativ auch als allgemeine Pins konfiguriert werden. Schnittstellen für SPI, I<sup>2</sup>C und USART sind jeweils zweifach auf dem Sockel vorhanden.

### 3.1.2 Funkmodul

Als Funkmodul wurde die XBee-Produktlinie ausgewählt. XBee-Module sind einfach zu verwenden, bieten große Reichweiten und sind in verschiedenen Versionen mit unterschiedlichen Frequenzen erhältlich. Für weltweite Nutzung kann auf XBees im Bereich von 2,45 GHz (WLAN-Frequenzbereich) zurückgegriffen werden. Für größere Reichweite bieten sich niedrigere Frequenzen an, die aber nicht in allen Ländern freigegeben sind. So ist 868 MHz in Europa erlaubt, in den USA muss aber auf die 900-MHz-Module zurückgegriffen werden um größere Reichweiten zu erreichen, die mit 2,45 GHz nicht möglich sind.

Die XBee-Funkmodule sind einfach zu verwenden, da be-

<sup>5</sup> Für die RS485-Schnittstelle wird ein zusätzlicher Chip auf der Basisplatine benötigt, der die Signale des Mikrocontrollers auf die von der Schnittstellenspezifikation vorgegebenen Spannungen umwandelt.

reits Funktechnologie integriert ist, die unter anderem die Modulation der Funkfrequenz zum Übertragen der Daten vornimmt. Daten, die vom Mikrocontroller an das Modul geschickt werden, werden ohne weiteren Aufwand für den Mikrocontroller direkt vom Funkmodul an andere XBees verschickt. Verschiedene einstellbare Leistungsmodi erlauben den Betrieb bei reduziertem Energieverbrauch auf Kosten der Reichweite.

Die Basisplatine des X-SLEWS-Sensorknotens unterstützt eine vollständige Abschaltung des Funkmoduls durch einen elektronischen Schalter (MOSFET). So kann der Energieverbrauch weiter reduziert werden wenn das Funkmodul zeitweise nicht benötigt wird.

### 3.1.3 Sensor-Add-on-Platine

Die Sensor-Add-on-Platine für Anwendungen in der Ingenieurgeologie ist mit einem 3-Achsen-Beschleunigungssensor<sup>6</sup> und zwei 1-Achsen-Neigungssensoren<sup>7</sup> bestückt. Die Neigungssensoren sind sehr hochauflösende Beschleunigungssensoren mit höherer Dämpfung, die im 90-Grad-Winkel zueinander angeordnet sind und deutlich genauere Messungen von Neigungen als die Beschleunigungssensoren ermöglichen. Außerdem ist ein Drucksensor<sup>8</sup> vorhanden und es besteht die Möglichkeit, ein Gyroskop<sup>9</sup> und einen Feuchtigkeitssensor<sup>10</sup> zu bestücken. Einige dieser Sensoren liefern zusätzlich Temperaturwerte.

### 3.1.4 Stromversorgung

Die Stromversorgung der Sensorknoten erfolgt wahlweise mit Hilfe von Batterien oder Akkus. Der Vorteil der verwendeten Lithium-Batterien ist die hohe Kapazität, der große Temperaturbereich und die geringe Selbstentladung. Jedoch sind Lithium-Batterien im Vergleich mit Batterien anderer Technologien teuer, liefern dafür aber die benötigte Spannung. Als Alternative können NiMH-Akkus verwendet werden. Diese sind günstiger und wiederverwendbar, bieten jedoch nur eine geringere Kapazität, sind anfälliger für den Betrieb bei sehr niedrigen Temperaturen wie sie beispielsweise im Winter auftreten, und haben eine höhere Selbstentladung.

## 3.2 Software

Um ein zweckmäßiges Software-Framework für die selbstentwickelte Hardware von X-SLEWS bereitstellen zu können, fiel die Wahl auf TinyOS. TinyOS (HILL et al. 2004) ist ein leichtgewichtiges Betriebssystem und wurde für Sensorknoten entwickelt. Mit Hilfe dieses Betriebssystems können Anwendungen für den Sensorknoten mit geringem Aufwand und ohne tiefere Kenntnisse der Hardware erstellt werden. Außerdem können existierende Anwendungen auf dem neuen Sensorknoten ausgewertet werden und erleichtern so die Überprüfung grundlegender Funktionen während der Entwicklung. Unter anderem können die LEDs, die serielle Schnittstelle zur kabelgebundenen Da-

tenübertragung und die Kommunikation über Funk mit bereits von den TinyOS-Entwicklern erstellten Anwendungen überprüft werden. Die Verwendung dieser Anwendungen ist von Vorteil, da TinyOS in vielen Projekten eingesetzt wird (XU et al. 2004, WERNER-ALLEN et al. 2006, TALZI et al. 2007 und CERIOTTI et al. 2009) und regelmäßig weiterentwickelt wird. Dadurch wird ein hoher Entwicklungsstand und entsprechend gute Qualität der Software sichergestellt.

Beim Entwickeln von Anwendungen für TinyOS lässt sich auf eine gut strukturierte Abstraktion der Hardware zurückgreifen. Durch die Verwendung von allgemeinen, plattformunabhängigen und in TinyOS spezifizierten Software-schnittstellen ist es möglich, Anwendungen zu schreiben, die auf jeder Hardware funktionieren, die diese Schnittstellen unterstützt. Umgekehrt ist es nötig bei der Portierung von TinyOS auf eine neue Hardware-Plattform diese Schnittstellen zu Verfügung zu stellen, um plattformunabhängige Anwendungen aus der TinyOS-Community verwenden zu können.

Die Hardware-Abstraktion in TinyOS wird durch mehrere Ebenen realisiert. In den Schnittstellen der untersten Ebene sind alle speziellen Funktionen der Hardware verfügbar, jedoch sind Anwendungen, die diese Ebene verwenden, auf diese spezielle Hardware angewiesen. Auf der obersten Schicht wird vollständige Hardware-Unabhängigkeit geboten. Dies wird erreicht, indem die Schnittstellen so spezifiziert sind, dass sie von jeder gewöhnlichen Sensorknoten-Hardware umgesetzt werden können. Dazu muss hier jedoch auf spezielle Hardware-Funktionen verzichtet werden, die beispielsweise nur auf einem bestimmten Mikrocontroller verfügbar sind.

Trotz der mehrschichtigen Software-Architektur und dem damit verbundenen Mehraufwand an Software erzeugt TinyOS sehr kleinen und effizienten Maschinencode für den jeweiligen Mikrocontroller, indem es die Code-Optimierung der C-Compiler benutzt.

## 4 Gateway

*Das Gateway des Sensornetzwerks besteht aus einem auf Linux basierenden Gerät und einem normalen Sensorknoten. Das Linux-Gerät, zurzeit ein Raspberry Pi, übernimmt die Speicherung der Daten. Der Sensorknoten ist über eine Datenleitung an den Raspberry Pi angeschlossen und agiert als Schnittstelle zwischen ihm und dem Funknetzwerk. Der Sensorknoten ist die Basisstation bzw. Senke des Netzwerks und das Ziel aller Daten, die von den Sensorknoten übermittelt werden. Die Verwendung eines normalen Sensorknotens (auf die Sensor-Add-on-Platine kann am Gateway verzichtet werden) spart die Entwicklung einer zusätzlichen Platine für die Basisstation.*

Abb.4 zeigt das X-SLEWS-Gateway.

Alle am Gateway ankommenden Daten werden vom Raspberry Pi lokal gespeichert. Zugriff auf diese Daten kann über mehrere Möglichkeiten erfolgen.

- Über mobiles Internet mit Hilfe eines UMTS-Stick.
- Über eine lokale Ethernet-Verbindung.
- Durch Anstecken eines USB-Sticks.

Wenn ein UMTS-Stick angeschlossen ist, stellt der Rasp-

<sup>6</sup> SCA3100-D04, VTI Technologies

<sup>7</sup> SCA830-D07, VTI Technologies

<sup>8</sup> MS5803-01BA, Measurement Specialties, Inc.

<sup>9</sup> ADXRS453, Analog Devices

<sup>10</sup> SHT15, SENSIRION



berry Pi eine Verbindung zum Internet her. Außerdem wird eine SSH-Verbindung<sup>11</sup> zu einem vorkonfigurierten Server hergestellt, die einen Tunnel zum SSH-Port des Raspberry Pi aufbaut. Dadurch ist es möglich, auch ohne direkten Zugriff auf den Raspberry Pi, vom Server aus eine SSH-Verbindung zurück zum Raspberry Pi herzustellen. Diese SSH-Verbindung erlaubt dann vollständigen Fernzugriff. Die Methode mit dem vom Raspberry Pi aus initiierten Tunnel erlaubt den Zugriff, auch wenn die IP-Adresse des Raspberry Pi nicht bekannt ist, oder dieser durch z. B. eine Firewall nicht erreichbar ist.

Mit einer Ethernet-Leitung können vor Ort die Messdaten abgeholt werden. Dazu wird eine SSH-Verbindung aufgebaut, mit der die Messdaten kopiert werden. Alternativ kann der angeschlossene Computer auch so konfiguriert werden, dass der Raspberry Pi die Daten periodisch schickt.

Außerdem gibt es die Möglichkeit, an die USB-Buchse einen USB-Stick anzustecken, auf den die Daten dann automatisch übertragen werden. Diese sehr einfache Funktion ist nützlich, wenn, beispielsweise bei einer entfernten Installation auf einer Baustelle, eine Person ein Abbild der Daten abholen soll, die nicht über die technische Möglichkeit verfügt, ein Notebook anzuschließen.

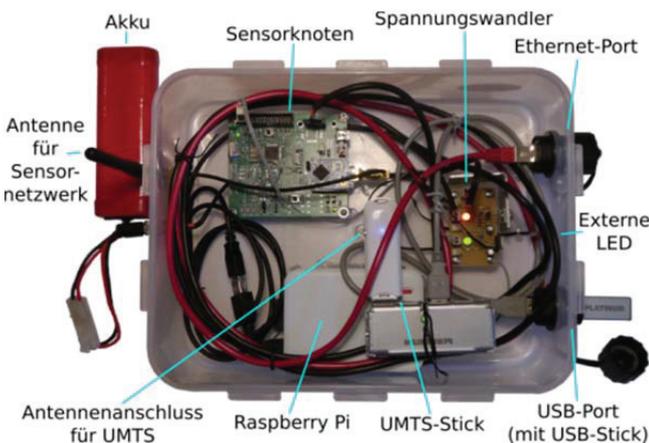


Abb. 4: Das X-SLEWS-Gateway im Betrieb. Als Schnittstelle in das Sensornetzwerk wird hier ein Sensorknoten des RatMote2-Projekts verwendet. Auf Grund der ähnlichen Hardware und des XBee-Sockels ist das möglich. Ein externer Anschluss für die UMTS-Antenne ist vorgesehen.

Fig. 4: This is the X-SLEWS gateway in operation. As interface to the sensor network a sensor node of the RatMote2 project is used. This is possible due to its similar hardware and the XBee socket. An external connector for the UMTS antenna is planned.

## 5 Evaluierung

Bis jetzt wurden Tests durchgeführt, um die grundlegende Funktionalität der Sensorknoten und ihrer Sensoren, des Funknetzwerks, sowie des Gateways zu überprüfen. Dabei wurden letzte Änderungen an der Hardware durchgeführt,

deren Notwendigkeit erst während der praktischen Anwendung im Feld erkannt wurde. Hierzu zählt beispielsweise, dass der Ethernet-Port und die USB-Buchsen des Raspberry Pi nur nach Öffnen des Gehäusedeckels des Gateways zugänglich sind.

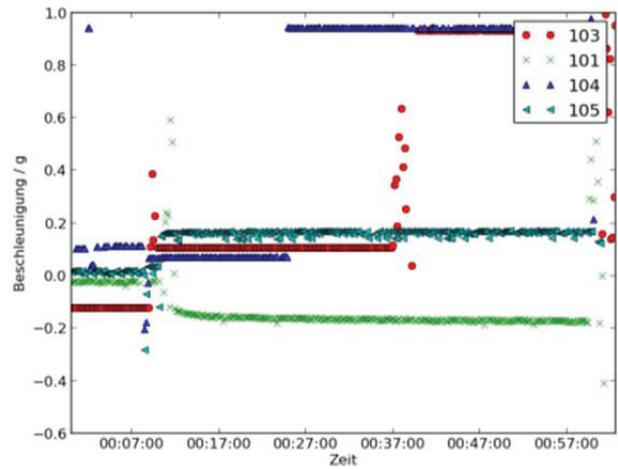


Abb. 5: Eine graphische Darstellung der Messdaten eines Neigungssensors des ersten Feldversuchs zeigen, dass die Sensoren und die Funkübertragung funktioniert. Vier Sensoren waren an dem Versuch beteiligt. An mehreren Sprüngen in den Datenreihen ist erkennbar, dass der Sensor gekippt und bewegt wurde.

Fig. 5: A graphical representation of inclination sensor data conducted during a first field test with four sensor nodes. Multiple edges in the data lines show that the sensor has been tilted and moved.

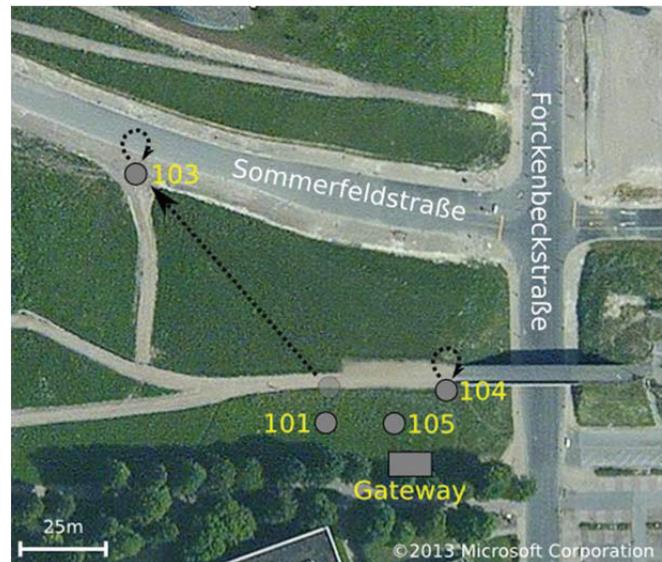


Abb. 6: Diese Karte zeigt die Sensorknoten in einem Feldtest in Aachen. Während des Versuchs wurde Sensorknoten 104 gekippt und 103 an einen anderen Ort bewegt und dort gekippt.

Fig. 6: This map shows the sensor nodes in a field test in Aachen. During the experiment sensor node 104 was tilted and 103 was moved to a new location and tilted there.

<sup>11</sup> Eine SSH-Verbindung stellt eine verschlüsselte Verbindung zu einem Computer über ein Netzwerk her, um z. B. Fernwartung durchführen zu können.

eines Problems im Sensornetzwerk, z. B. dem Ausfall eines Sensorknotens, ist es jedoch wichtig, dass man schnell und kontinuierlich die am Gateway eintreffenden Daten mitverfolgen kann. Ein Öffnen des Gehäuses im Feld kann auf Grund von Wetterbedingungen jedoch problematisch sein. Aus diesem Grund wurde jeweils eine verschleißbare USB- und Ethernet-Buchse am Gehäuse angebracht.

Abb. 5 zeigt beispielhaft eine graphische Darstellung der Daten eines Neigungssensors die bei einem ersten Feldtest mit vier Sensorknoten aufgenommen wurden. Die Verteilung der Sensoren auf dem Testgebiet in Aachen ist in Abb. 6 dargestellt.

## 6 Zusammenfassung

Der modulare Aufbau des in diesem Paper vorgestellten Sensornetzwerk-Systems X-SLEWS ermöglicht einen vielseitigen Einsatz in unterschiedlichen Anwendungsfällen. Die eigenständige Sensorplatine und das austauschbare Funkmodul ermöglichen die Verwendung in zukünftigen Szenarien, deren Anforderungen während der Entwicklung noch nicht bekannt waren. Erste Tests zeigen, dass die grundlegende Funktion des Systems gegeben ist. Weitere Tests in realen Anwendungsszenarien werden Faktoren wie die Reichweite des Funknetzwerks und die Qualität der Sensordaten überprüfen. Zudem wird die Betriebsdauer der Sensorknoten, abhängig von der Verwendung von Akkus oder Batterien als Stromversorgung, analysiert, um diese auf passende Szenarien abstimmen zu können.

## Literatur

- ARNHARDT, C. & FERNÁNDEZ-STEEGER, T. M. & AZZAM, R. (2009): Monitoring of slope-instabilities and deformations with Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) in wireless ad-hoc Sensor Networks. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU General Assembly 2009, 19. – 24. April 2009, Vienna (Austria).
- BEUTEL, J. & GRUBER, S. & HASLER, A. & LIM, R. & MEIER, A. & PLESSI, C. & TALZI, I. & THIELE, L. & TSCHUDIN, C. & WOEHRLE, M. & YUECEL, M. (2009): Operating a sensor network at 3500 m above sea level. – Proc. 8th ACM/IEEE Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks, New York.
- BITSCH LINK, J. Á. & BRETGELD, T. & GOLIATH, A. & WEHRLE, K. (2010): RatMote: a sensor platform for animal habitat monitoring. – Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '10, S. 432 – 433, New York, NY, USA.
- BRETGELD, T. (2010): RatMote – A New Wireless Sensor Platform for a Subterranean Animal Habitat Observation System – Diplomarbeit, RWTH Aachen, Januar 2010.
- CERIOTTI, M. & MOTTOLA, L. & PICCO, G. & MURPHY, A. & GUNA, S. & CORRA, M. & POZZI, M. & ZONTA, D. & ZANON, P. (2009): Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The torre aquila deployment – Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks. IEEE Computer Society, S. 277 – 288.
- FERNÁNDEZ-STEEGER, T. & MAY, M. & HENTSCHEL, K. & BITSCH LINK, J. Á. & CERIOTTI, M. & WEHRLE, K. (2013): “And Then, the Weekend Started”: Story of a WSN Deployment on a Construction Site – Zur Veröffentlichung eingereicht.
- FLEMING, K. & PICOZZI, M. & MILKEREIT, C. & KUEHNLENZ, F. & LICHTBLAU, B. & FISCHER, J. & ZULFIKAR, C. & ÖZEL, O. & SAFER UND EDIM ARBEITSGRUPPEN (2009): The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SOSEWIN). Seismological Research Letters 80(5), S. 755 – 771.
- HARTUNG, C. & HAN, R. & SEIELSTAD, C. & HOLBROOK, S. (2006): FireWxNet: A Multi-Tiered Portable Wireless System for Monitoring Weather Conditions in Wildland Fire Environments – Proceedings of the 4th international conference on Mobile systems, applications and services, S. 28 – 41, New York.
- HILL, J. & SZEWCZYK, R. & WOO, A. & LEVIS, P. & MADDEN, S. & WHITEHOUSE, C. & POLASTRE, J. & GAY, D. & SHARP, C. & WELSH, M. & BREWER, E. & CULLER, D. (2004): TinyOS: An Operating System for Sensor Networks – Ambient Intelligence. Springer Verlag.
- MAY, M. (2010): RatMote2: Improved Radio and Sensor Performance for a Subterranean Animal Habitat Observation System – Bachelorarbeit, RWTH Aachen, Oktober 2010
- TALZI, I. & HASLER, A. & GRUBER, S. & TSCHUDIN, C. (2007): PermaSense: Investigating Permafrost with a WSN in the Swiss Alps – Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors, S. 8 – 12, New York, NY, USA (ACM)
- WERNER-ALLEN, G. & LORINCZ, K. & JOHNSON, J. & LEES, J. & WELSH, M. (2006): Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network – Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, S. 381 – 396, Seattle
- XU, N. & RANGWALA, S. & CHINTALAPUDI, K. & GANESAN, D. & BROAD, A. & GOVINDAN, R. & ESTRIN, D. (2004): A Wireless Sensor Network For Structural Monitoring – Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, S. 1324, Baltimore.