

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Über Funk kommunizierende Mikrosysteme

Statusbericht

Thomas M. Wendt

Betreuer: Prof. Dr. Leonhard Reindl
Lehrstuhl: Elektrische Mess- und Prüfverfahren

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Meine Promotion befindet sich im dritten Jahr in der Evaluierungsphase. Die Hardware ist fertig gestellt, erfolgreich in Betrieb genommen und diversen Tests unterzogen. Vier Aufweckstrategien wurden auf der Hardware implementiert und evaluiert. Weitere Untersuchungen und Applikationen können auf der Plattform in Betrieb genommen werden. Die Anfertigung der Dissertation ist in Arbeit und soll bis Ende September abgeschlossen sein.

2 Zusammenfassung der Dissertation

Meine Promotion im Rahmen des Graduiertenkollegs „Eingebettete Mikrosysteme“ befasst sich mit autarken Sensorknoten, die drahtlos untereinander kommunizieren. Ziel der Promotion ist es die Batteriebensdauer der Sensorknoten optimal zu nutzen, damit die Systeme eine möglichst lange Funktionslaufzeit erreichen. Das Design der Sensorknoten wird auf Energiebedarf untersucht und die Phase, in der die Sensorknoten erhöht Strom aufnehmen, soll optimiert werden. Aufweckstrategien sind der Hauptfokus der Arbeit, eine Übersicht ist in Abbildung 1 gegeben. Aufwecken bedeuten in diesem Zusammenhang, dass der Sensorknoten von einem Energiesparmodus in den Betriebsmodus wechselt. Somit trägt die Aufweckstrategie dazu bei die Betriebszeit des Knotens auf ein Minimum zu reduzieren, der Energiebedarf bleibt gering und die Lebensdauer wird erhöht.

Die Aufweckstrategien werden in der Dissertation verglichen, bewertet, getestet und auf Flexibilität geprüft. Es soll die Frage beantwortet werden: Was ist notwendig zum Aufwecken und wie hoch ist der erbrachten Nutzen?

3 Dissertationsthema, allgemeine Beschreibung

In Forschung und industriellen Anwendungen werden drahtlose Sensornetzwerke [5] zunehmend erforscht und getestet. Sensornetzwerke werden überall eingesetzt, wo es gilt Messwerte von vielen oder verteilten Sensoren zu übertragen oder Aktoren zu steuern [7]. Drahtlose Sensornetzwerke verwendet man in Anwendungen, bei denen man keine Kabel legen kann oder möchte.

Verarbeitungsschritte können vom Hostknoten an die Sensorknoten delegiert werden, um den Kommunikationsaufwand zu minimieren, da die Übertragung von Messwerten den ca. zehnfachen Energieverbrauch benötigt im Vergleich zur Verarbeitung der Messwerte. Ein Sensorknotennetzwerk ist oft als Sterntopologie aufgebaut und besteht dann aus einem Hostknoten, dem Master, und einer Vielzahl von Sensorknoten. Einzelne Sensorknoten können je nach Anwendung z.B. Sensoren für Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck oder Erdbeschleunigung enthalten. Diese Sensoren zeigen in der Regel, ebenso wie die Empfängerschaltungen der Sensorknoten, eine hohe Leistungsaufnahme. Dadurch würden die Sensorknoten unakzeptabel große Batterien benötigen, um eine geforderte Lebenszeit zu erfüllen.

4 Maßnahmen zum externen Aufwecken eines Sensorknotens

In vielen Anwendungsszenarien sollen die einzelnen Sensorknoten nicht permanent, sondern nur zu bestimmten Zeiten ausgelesen werden. In diesem Fall kann der Sensorknoten in der Zwischenzeit in einen Energiesparmodus gehen um Energie zu sparen. Viele Echtzeitanwendungen bedingen jedoch, dass einzelne Sensoren auch während ihrer Schlafperiode extern aufgeweckt und an-



Abbildung 1: Übersichtsdarstellung der Aufweckstrategien.

gesprochen werden können. Der Energiebedarf aller anderen Sensorknoten soll dabei kaum oder gar nicht ansteigen. Das gezielte Aufwecken eines Sensorknotens ähnelt dem so genannten „Multiple Access“ in der Nachrichtentechnik [10]. Es kommen daher alle Multiple Access Verfahren für eine Aufweckstrategie prinzipiell in Frage. Eine Übersicht zeigt Abbildung 1. Die vier Aufweckstrategien Zeit-, Frequenz-, Raum-, und Codevielfachzugriffverfahren, abgeleitet von den Vielfachzugriffverfahren die in der Nachrichtentechnik Anwendung finden, werden im Text auch mit Time, Frequency, Space und Code Diversity bezeichnet.

4.1 Time Diversity

Diese Aufweckstrategie kann als Zeitschlitzverfahren umgesetzt werden. Jeder Knoten bekommt ein bestimmtes Zeitintervall zugewiesen, in dem er Daten übertragen oder angesprochen werden kann. Zwischen den Sendeintervallen befindet sich der Sensorknoten im Energiesparmodus. In der Literatur werden zwei Möglichkeiten der Realisierung beschrieben:

1. Ein Datenpaket wird übertragen, ohne auf eine Anforderung zu warten. Die Kommunikation findet zum gegebenen Zeitintervall immer statt.
2. Die Sensorknoten sind im gegebenen Zeitintervall empfangsbereit und versenden nur auf Anfrage ein Datenpaket. Da die für diese Untersuchung eingesetzten CC2420 ZigBee Empfänger [4] im aktiven Zustand bereits einen Strombedarf von 18,8 mA bei 3,3 Volt [4] haben, erhöht sich durch einen Sendevorgang die Energiebilanz kaum. Die Situation ändert sich, wenn ein zusätzlicher Low Power Empfänger die Anfrage bearbeitet. In diesem Fall wird erst daraufhin zur Datenübertragung der Empfänger mit 18,8 mA Stromaufnahme genutzt.

Diese Strategie wird häufig eingesetzt, da sie einfach zu realisieren ist. Die Wartbarkeit und die Adaptierbarkeit an veränderte Anforderungen sind sehr gut.

4.2 Frequency Diversity

In einem Frequenzzugriffsverfahren werden einzelnen Übertragungskanäle verschiedenen Frequenzintervallen zugeordnet. Diese Technik erscheint für ein energiesparendes Aufwecken ungeeignet. Der Einsatz eines zusätzlicher Low Power Aufweckempfängers mit einem eigenen Frequenzbereich ist jedoch sehr zielführend. In dieser Arbeit wird ein breites Frequenzband zur Übermittlung von großen Datenmengen bei 2,45 GHz und ein schmales Frequenzband bei 125 kHz zur Übertragung des Aktivierungssignals eingesetzt. Auf dem 2,45 GHz-Frequenzband können

Tabelle 1: Vergleich des ATMEL 125 kHz Empfängers zum 2.45 GHz Sensorknoten.

Sender / Empfänger	Stromverbrauch
Sensorknoten	53,9 mA @ 4,2 V
ATMEL ATA5282 [2]	0,0035 mA @ 3,0 V

Funkstandards eingesetzt werden wie z.B. ZigBee, Bluetooth oder WLAN, was die Implementierung vereinfacht. Allerdings haben Empfänger dann einen hohen Energiebedarf. Der Low Power Empfänger auf dem 125 kHz-Frequenzband [2] ist durchgehend eingeschaltet. Erst zur Datenübertragung wird dann der Empfänger auf dem 2,45 GHz-Frequenzband [4] eingeschaltet. Dieser Lösungsansatz lässt sich sehr gut mit dem oben beschriebenen „Time Diversity“ kombinieren, um den Stromverbrauch noch weiter zu senken. Ein Vergleich der Stromaufnahme von Transceivern ist in Tabelle 1 gegeben.

4.3 Space Diversity

Durch eine Antenne [3] mit kleinem Öffnungswinkel können Sensorknoten direkt und einzeln angesprochen werden. Der Energiebedarf anderer Sensorknoten wird dabei nicht erhöht. Damit die Antenne reproduzierbar auf einzelne virtuelle Sektoren bewegt werden kann, ist sie in unserem Testaufbau auf einer kipp- und drehbaren Mechanik angebracht. Die Antenne ist mit dem Hostknoten verbunden und bildet die Mitte des Netzwerkes, welches als Sterntopologie aufgebaut ist. Durch die Strahlenbündelung, verursacht durch den kleinen Öffnungswinkel der Antenne, wird zusätzlich die Mehrwegausbreitung reduziert. Sollte sich die Space Diversity - Aufweckstrategie in der Praxis bewähren, kann auch auf „Multiple Input Multiple Output“ oder „Phase-Array“ Antennen [3] ohne bewegliche Teile übergegangen werden.

4.4 Code Diversity

Die Separation einzelner Sensorknoten mit langen Faltungscodes ist für energiearme kleine Sensorknoten nicht einfach durchführbar und erscheint nicht zielführend. Bei Einsatz eines niederfrequenten Low Power Aufweckempfängers, der die individuelle Adresse des Sensorknotens decodiert, kann jedoch als Code Diversity aufgefasst werden.

Diese Aufweckstrategie ist typisch für Standard-Funknetzwerke und notwendig, wenn mehr als ein Sensorknoten aktiv ist. Der Hostknoten sendet die Adresse an alle Sensorknoten, diese decodieren die Adresse und der adressierte Sensorknoten bleibt betriebsbereit. Dieser aktive Sensorknoten kann nun einen Kommunikationspfad zum Hauptknoten aufbauen, alle anderen nicht adressierten Knoten gehen wieder in der Energiesparmodus zurück.

5 Demonstrator für Aufweckstrategien

Damit alle vier verschiedenen Aufweckstrategien in einer industrienahen Anwendung getestet und evaluiert werden können, wurde ein spezieller Demonstrator entwickelt. Abbildung 2 zeigt den Prinzipaufbau des Demonstrators. Der Demonstrator ist mit einem 8 bit μ Controller [8] mit 16 kByte Flashspeicher ausgerüstet. Bei Bedarf kann somit auch der standardisierte ZigBee [1] Software Stack auf der Plattform betrieben werden. Der μ Controller kann so programmiert werden, dass ein Umschalten im Betrieb zwischen zwei Systemclockquellen möglich ist. Dadurch

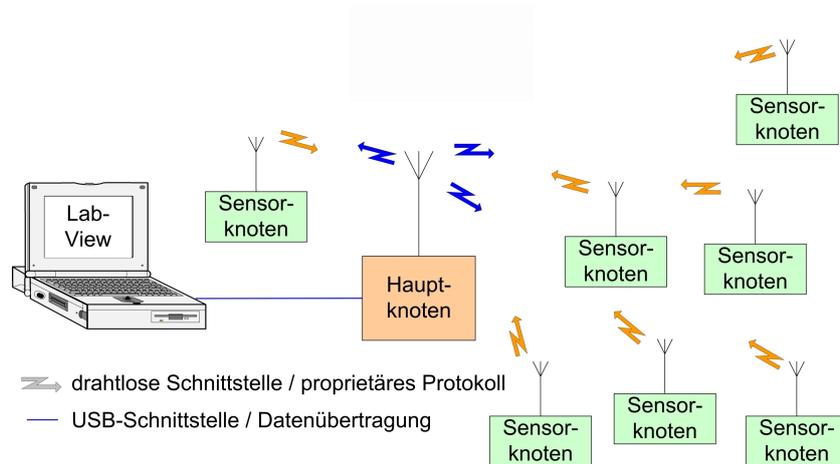


Abbildung 2: Prinzipdarstellung des Hardwareaufbaus.

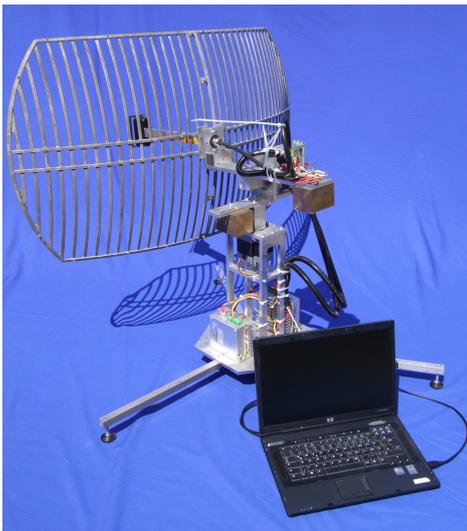


Abbildung 3: Kipp- u. drehbare Richtantenne.

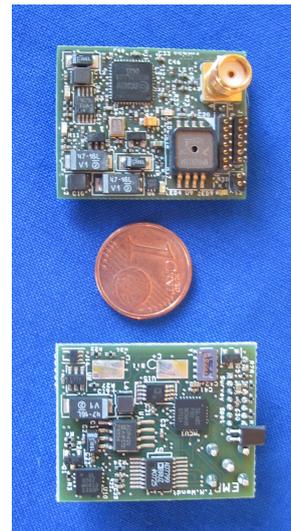


Abbildung 4: Seriennaher Sensorknoten

wird die Nutzung einer sehr niederen Taktfrequenz von 32,768 kHz und der Betrieb des μ Controller mit nur 11 μ A Strombedarf ermöglicht. Um die interne Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann der Prozessor bis zu einer Taktfrequenz von 25 MHz betrieben werden. Die Batterielaufzeit der Sensorknoten wird durch diese Dynamik weiter erhöht. Der Energiebedarf des μ Controllers kann dadurch um den Faktor 1000 verringert werden. Dieser Faktor hängt aber sehr von den Applikation ab. Die drahtlose Datenübertragung wurde mit Hilfe eines Transceivers im 2,45 GHz Frequenzband umgesetzt. Dieser bietet die Möglichkeit, Daten mit bis zu 250 kbps zu übertragen. Um die Anforderungen, die sich für die Umsetzung der Aufweckstrategien ergeben, implementieren zu können, wurde für den μ Controller ein eigener Softwarestack [6] entwickelt. Durch den eigenen Stack können die Stromeinsparpotentiale besser getestet werden.

Tabelle 2: Stromaufnahme der Sensorknoten in verschiedenen Betriebsmodi, X bedeutet aktiv.

Stromaufnahme					Strom [mA] @ 4,2 V
Transceiver	Sensoren	μC @ 25 Mhz	μC @ 32 khz	5V-reg.	
X	X	X		X	53,9
X		X		X	43,6
X			X	X	35,3
		X		X	5,4
			X	X	1,4
			X		0,45

5.1 Messungen und Ergebnisse

Ein Sensorknoten wurde als Master-Knoten (Hostknoten) entwickelt und ist mit der kipp- und rotierbaren Antenne (siehe Abbildung 3) verbunden. Der Raum um die Antenne wurde in einzelne Sphären unterteilt und ist somit adressierbar. Die Antenne dreht oder neigt sich um $3,75^\circ$. Die maximale Verkippung beträgt 90° , der maximale Drehwinkel 360° . Bei einem Öffnungswinkel der Antenne von $7,5^\circ$ horizontal sowie vertikal ergeben sich adressierbare 2304 Sektoren. Über weitere Informationen wie Lage, Entfernung und Höhe der Sensorknoten ist es möglich, eine Karte zu erstellen. Mit den Winkelinformationen der Schrittmotoren können die Höhenangaben der einzelnen Sensorknotenpositionen in der Karte auf Plausibilität überprüft werden. Die Karte wird auf dem Hauptknoten verwaltet und ermöglicht es, einzelne Sensorknoten exakt und individuell zu adressieren. Bei einer Änderung der Netzwerk- oder Raumstruktur muss die Karte von Zeit zu Zeit erneuert oder modifiziert werden. Die Messwerte und die Karte können zur Visualisierung auch an den PC (LabView) weitergeleitet bzw. dort verwaltet werden. Die Hardware wurde komplett fertig gestellt, in Betrieb genommen und getestet. Die vier Aufweckstrategien wurden implementiert und verglichen. Der seriennahe Sensorknoten ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Sensorknoten wurden in anwendungsnahen industriellen Szenarien getestet, wie z.B. als aktive RFID Knoten für eine SAR (Search and Rescue) Anwendung oder als Signalerzeugungs- und Signalstärkemessgeräte für Lokalisierungsaufgaben in Räumen. Die Messwerte in Tabelle 2 zeigen die mögliche Energieeinsparung der unterschiedlichen Betriebsmodi der Sensorknoten. Die Messwerte sind für alle vier Aufweckstrategien gültig. Bei Frequency Diversity kann durch Verwendung eines Zusatzempfängers die Stromaufnahme allerdings noch weiter auf $3,5 \mu\text{A}$ bei 3 V gesenkt werden. Hierzu wird der Sensorknoten komplett von der Batterie getrennt, so dass nur der 125 kHz Empfänger aktiv bleibt.

Ein Beispiel für die Charakterisierung der einzelnen Aufweckstrategien ist in Abbildung 5 gegeben. Das Zeitschlitzverfahren führt bei gegebener fixer Energiemenge zu einer maximalen Lebensdauer, die als Funktion der Aufweckrate wie ein Tiefpass abnimmt. Eine Grenzfrequenz, in diesem Fall $f_{50\%}$, beschreibt die Aufweckfrequenz, bei der die Hälfte der verfügbaren Energie im Schlafmodus und die andere Hälfte im Arbeitsmodus verbraucht wird. Soll die Stromaufnahme zum Erhalt einer längeren Betriebsdauer weiter gesenkt werden, kann man sofort aus der Graphik erkennen, ob die Ruhestromaufnahme „Ruhestrombereich“ oder die Sendeleistung „aktiver Bereich“ reduziert werden muss.

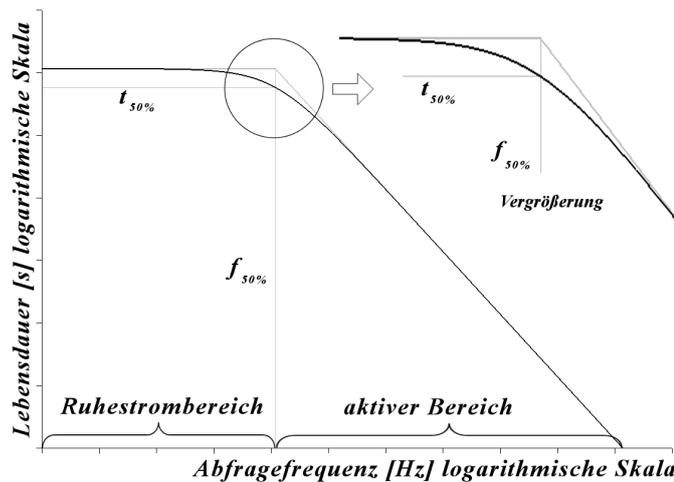


Abbildung 5: Darstellung der Parameter für Time Diversity

5.2 Kooperation an der Universität Freiburg

Der Einsatz der Sensorknoten in SAR Anwendungen wird in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Grundlagen der Künstlichen Intelligenz“ untersucht und weiter entwickelt. Diese Gruppe ist dem Institut für Informatik der Universität Freiburg zugeordnet. Zudem werden die Sensorknoten zur Untersuchung von Ad-hoc Netzwerken eingesetzt. Hier besteht eine Kooperation mit dem Lehrstuhl „Rechnernetze und Telematik“ des Institut für Informatik der Universität Freiburg. Eine weitere Zusammenarbeit besteht mit der Arbeitsgruppe für „Autonome Intelligente Systeme“ des Institut für Informatik der Universität Freiburg zur Untersuchung der Möglichkeit zur Lokalisierung der Sensorknoten im Raum mit Hilfe der Signalstärke. Eine gemeinsame Veröffentlichung [9] und weitere geplante Veröffentlichungen belegen diese intensive Zusammenarbeit.

5.3 Ausblick, weitere Arbeitspakete

Die Untersuchungen der Aufweckstrategien anhand der eigens entwickelten Hardware haben das hohe Potential für Stromesparung gezeigt. Als Ergebnis kann diese nun in realen Anwendungen über einen längeren Zeitraum eingesetzt und weiter untersucht werden. Die Sensorknoten haben Seriennähe erreicht und könnten für Tests am Luftschiff (Blimp) des Graduiertenkollegs in hoher Stückzahl gefertigt werden. Eine 3D Karte kann mit Hilfe der Signalstärke, des atmosphärischen Drucks (Höhenabschätzungen) und der Erdbeschleunigung (als Korrekturwerte) erstellt werden. Die Sensoren dafür sind bereits auf den Sensorknoten integriert. Die Karte dient in erster Linie der Visualisierung der Positionen der Sensorknoten sowie der Optimierung der Space Diversity Aufweckstrategie. Diese Karte, zusammen mit weiteren Sensordaten, soll in das interdisziplinäre Graduiertenkolleg Projekt Blimb integriert werden. Der Blimb soll autonom fliegen und mit Hilfe der Karte besser Positionsabschätzungen und Korrekturen durchführen können. Ein weiteres Arbeitspaket ist die Verwendung in SAR Applikationen. Erste Tests haben gezeigt, dass die Sensorknoten hier als aktive RF-IDs eingesetzt werden. Da die Sensorknoten über eine Batterie verfügen können viel größere Signalreichweiten im Vergleich zu passiven RFIDs erreicht werden. Die Knoten werden zur Kartenerstellung und als stationäre Datenspeicher genutzt. Diese Arbeiten sind gerade erst angelaufen, weitere Auswertungen und Ergebnisse stehen noch aus.

Literatur

- [1] Z. Alliance. *ZigBee Specification*, 0534744th ed. ZigBee Alliance, June 20 2005.
- [2] *LF Wake-up Demonstrator ATAK5278-82*, Rev 4894b-auto-06/06. ed. Atmel Corporation, San Jose, 2006. [Online]. Available: <http://www.ATMEL.com>
- [3] C. Balanis. *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey USA: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [4] *CC2420 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver*, Rev swrs041 ed. Chipcon AS from Texas Instruments, Oslo, 2006. [Online]. Available: <http://www.chipcon.com>
- [5] J. Gutiérrez, E. G. Jr., and R. B. Jr. *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*. New York USA: IEEE Press, 2003.
- [6] P. Hatzold. *Digitale Kommunikation über Funk*. Poing Germany: Franzis Verlag GmbH, 1999.
- [7] E. Mackensen. "Analyse, simulation und entwurf intelligenter, autarker mikrosysteme für drahtlose sensor-aktor-netzwerke". ISBN-10 3-89959-537-8, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Freiburg Germany, Mai 2006.
- [8] *C8051F310/1/2/3/4/5/6/7*, Rev 1.7 08/06 ed. Silicon Laboratories Inc, Austin, 2006. [Online]. Available: <http://www.silabs.com>
- [9] D. Sun, A. Kleiner, and T. Wendt. "Multi-robot range-only SLAM by active sensor nodes for urban search and rescue". In *RoboCup Symposium 2008 (RoboCup2008)*. Shanghai, China, 2008, accepted.
- [10] M. Yacoub. *Wireless Technology Protocols, Standards, and Techniques*. Boca Raton USA: CRC Press LLC, 2002.