

# Der Raspberry Pi als Gateway in 6LoWPAN-basierten Wireless Sensor Networks

Konstantin Bork

Institut für Informatik

Freie Universität Berlin

Takustrasse 9, 14195 Berlin, Deutschland

E-Mail: XXXXXXXXXX

**Zusammenfassung**—Wireless Sensor Networks dringen in immer mehr Bereiche vor und sammeln Daten, die an einen leistungsstarken Computer zur Auswertung geschickt werden müssen. Bislang erhältliche Gateways bieten wenig Flexibilität und sind meist sehr teuer. Als Alternative bieten sich Kleinstcomputer an. Diese Arbeit prüft die Eignung des Raspberry Pi als Gateway in einem Sensornetzwerk.

## I. EINLEITUNG

Immer weiter fallende Preise bei steigender Rechenleistung machen *Wireless Sensor Networks* immer attraktiver in der Benutzung. Während solche Sensornetze früher oft nur in der Gebäudeüberwachung oder der Überwachung eines Ökosystems verwendet wurden, dringen sie seit einigen Jahren in neue Bereiche ein. In der Logistik, die von einem harten Preiskampf der Anbieter beherrscht wird, bieten die Sensoren eine Möglichkeit zur Überwachung der Arbeitsabläufe und somit eine Optimierung der einzelnen Prozesse. Auch die Medizin ist an dieser Technik interessiert. Anstatt einen Menschen zu verkabeln, um Werte wie Puls und Blutdruck zu beobachten, sollen nur noch einzelne Sensoren angebracht werden, die die Werte an einen Computer übermitteln. In der Katastrophenprävention bieten die Sensornetze eine Möglichkeit der Überwachung der Umwelt. Sensoren am Meeresboden können Erdbeben erfassen und dies an einen Computer übermitteln, welcher dann automatisch eine Tsunami-Warnung ausruft. Sensoren in Wäldern hingegen können die Temperatur messen und so einen Waldbrand erkennen.

Alle von den Sensoren gesammelten Daten müssen allerdings auch ausgewertet werden. Dies tut man meist nicht im Netzwerk selbst, da die für die Auswertung nötigen Computer nicht klein genug, witterungsbeständig oder anderweitig unpassend im Netzwerk sind. Aus diesem Grund verwendet man ein Gateway, welches die Daten der Sensorknoten sammelt und an einen anderen Computer übermittelt. Diese Gateways sind verlässlich, bieten die Voraussetzungen zur Verwendung in unwirtlichen Gegenden und die Hersteller bieten meist einen guten Service. Sie sind oft aber sehr teuer und man bindet sich an den Hersteller des Gateways bei der Wahl der Sensorknoten. Manchmal wünscht man sich bei der Errichtung eines *Wireless Sensor Network* auch eine bessere Anpassung des Gateway an die gegebenen Bedingungen, die die Geräte nicht liefern können. Mit dem Aufkommen von Kleinstrechnern wie dem Raspberry Pi scheint es, dass die Probleme von bereits erhältlichen Gateways gelöst werden ohne die Vorteile außer Acht zu lassen.

Eine Lösung ist der von einem Konsortium verschiedener

Unternehmen entwickelte *ZigBee*-Standard. Dieser Standard ermöglicht Verbindungen zwischen verschiedenen Sensoren und Geräten auf kurzen Strecken. Solange man die Daten nur innerhalb des Sensornetzes benötigt, eignet sich *ZigBee* hervorragend. Möchte man die Daten über das Internet an einen entfernten Computer schicken, so ist ein spezielles Gateway nötig. Dieser Umstand bedeutet zusätzliche Kosten, die man möglicherweise vermeiden kann. Es bietet sich also eine IP-basierte Lösung an. Mit 6LoWPAN existiert diese Lösung bereits.

Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb mit der Rolle des Raspberry Pi in einem 6LoWPAN-basierten *Wireless Sensor Network*. Es soll gezeigt werden, dass er die Anforderungen an ein Gateway in solch einem Netzwerk erfüllt, damit man eine offene und günstige Alternative zu schon vorhandenen Lösungen hat. Dafür werden die Einsatzmöglichkeiten und die Anforderungen eines *Wireless Sensor Network* genannt. Nach der Präsentation der Spezifikationen des Raspberry Pi und eines Beispiel-Sensorknotens erfolgt die Analyse. Dafür wird zunächst ein bereits erhältliches Gateway beschrieben. Dann erfolgt der Vergleich des Raspberry Pi mit den anfangs genannten Bedingungen und dem beschriebenen Gateway. Ähnliche Projekte werden genannt und beschrieben. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden zum Schluss zusammengefasst und es werden weitere Themen genannt, die bearbeitet werden sollten.

## II. HINTERGRUND

### A. *Wireless Sensor Networks*

Ein Netzwerk von Sensoren, die eigene Prozessoren, eigenen Speicher und eine drahtlose Netzwerkanbindung zur Kommunikation untereinander und mit einer Basisstation besitzen, wird als *Wireless Sensor Network* oder *drahtloses Sensornetz* bezeichnet [1, S. 7]. Einige Einsatzszenarien solcher Sensornetze wurden schon hinreichend untersucht [2], doch mit dem weiteren Fortschritt ergeben sich immer neue Möglichkeiten der Nutzung. Neben der Vernetzung aller Haushaltsgeräte, was sich besonders an private Nutzer richtet, eignen sich *drahtlose Sensornetze* vor allem zur Überwachung der Umwelt [3, S. 3 – 6]. Dazu gehören:

- **Umweltanalyse:** Auf Mülldeponien kann die Konzentration giftiger Gase in der Luft gemessen werden. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit besteht in der Beobachtung des Erosionsprozesses auf dem Meeresboden, bevor man dort Offshore-Windanlagen baut.

- **Intelligente Gebäude:** Sensoren überwachen permanent Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Sauerstoffgehalt der Luft und steuern bei Bedarf die Klimaanlage. In seismisch aktiven Gegenden kann die Erdbewegung überwacht und ein Erdbeben schnell erkannt werden. Eine einfachere Anwendung ist das schlüssellose Betreten eines Gebäudes, realisiert durch spezielle Schlüssel, die vom System erkannt werden.
- **Medizin:** In der Medizin reichen die Einsatzmöglichkeiten von der Überwachung von Intensivpatienten bis hin zur automatischen Medikamenteneinnahme. Außerdem können Tracking-Systeme in Krankenhäusern Ärzte direkt zu ihren Patienten führen und so Leben retten.
- **Logistik:** Einfache Sensoren erleichtern die Güterverfolgung. So können Logistiker ihre Prozesse optimieren und Kunden ihre Bestellungen nach ihrem Bedarf anpassen. Allerdings senden die Sensoren nicht aktiv Daten, sondern sind nur passive Datenspeicher.

Diese Einsatzgebiete stellen natürlich diverse Anforderungen, die ein *drahtloses Sensornetz* erfüllen muss. Eine Reihe solcher Anforderungen an *Wireless Sensor Networks*, die in der Literatur genannt werden [ [3, S. 7 – 9]; [1, S. 9 – 14]; [4]], sind:

- **Geringer Energieverbrauch:** Die Sensorknoten müssen energieeffizient sein. Sie können in der Regel nicht an ein bestehendes Stromnetz angeschlossen werden und sind deshalb von Batterien oder Solarmodulen abhängig.
- **Skalierbarkeit und Dichte:** Die verwendete Hard- und Software muss mit einer großen Anzahl und einer hohen Dichte an Sensorknoten umgehen können.
- **Flexibilität:** Jeder Sensorknoten soll programmierbar sein, damit man ihn jederzeit an geänderte Bedingungen anpassen kann. Außerdem soll der Ausfall einzelner Knoten nicht die Funktionstüchtigkeit des gesamten Netzwerkes gefährden.
- **Robustheit:** Ein Sensornetz muss je nach Einsatzort und -zweck sehr hohen oder sehr niedrigen Temperaturen, einer hohen Luftfeuchtigkeit oder anderen Umwelteinflüssen standhalten.
- **Sicherheit:** Die Sensoren können sensible Daten erfassen. Angriffe auf das Netzwerk müssen deshalb effektiv unterbunden werden, damit die Funktionstüchtigkeit gewährleistet ist.
- **Kosten:** Bei der großen Anzahl an Sensorknoten in einem *Wireless Sensor Network* soll der Stückpreis möglichst niedrig sein. Dafür muss ein Kompromiss mit den vorherigen Anforderungen gefunden werden.

Bei *Wireless Sensor Networks* haben sich je nach Einsatzzweck und Prioritäten drei Netzwerktopologien für den Aufbau durchgesetzt [5]. Ein Stern-Netzwerk zeichnet sich durch Sensorknoten aus, die um einen einzelnen Basisknoten verteilt sind. Die Kommunikation erfolgt nur zu und vom Basisknoten. Im Unterschied dazu kommunizieren in einem Mesh-Netzwerk alle Knoten untereinander. Dies ermöglicht

eine *Multihop-Kommunikation*, bei der zwei weit entfernte Knoten über mehrere Zwischenstationen Daten austauschen. Die dritte Möglichkeit stellt eine Mischung beider Topologien dar, bei der einige Knoten als Basis gekennzeichnet sind. Diese Basisknoten kommunizieren aber untereinander.

## B. IEEE 802.15.4 & 6LoWPAN

Der im Oktober 2003 veröffentlichte *IEEE 802.15.4-Standard* definiert bezüglich des OSI-Modells die physikalische und die MAC-Schicht eines *Wireless Personal Area Networks (WPAN)* [3, S. 139 f.]. Der Standard definiert physikalisch drei Frequenzbänder mit jeweils unterschiedlichen Bitraten. Im Frequenzbereich um 2,4 GHz ist eine Bitrate von 250 Kbit/s definiert [6, S.5]. Alternativ sind um 920 MHz eine Bitrate von 40 KBit/s und um 868 MHz eine Bitrate von 20 KBit/s vorgesehen [3, S.140], um den schon durch WLAN reservierten Frequenzbereich um 2,4 GHz umgehen zu können. Allerdings können beide Standards auch gleichzeitig betrieben werden [7].

Auf der MAC-Schicht definiert der Standard zwei Arten von Knoten [3, S. 140]:

- **Full Function Device (FFD):** Solch ein Knoten kann sowohl ein Koordinator im Netzwerk sein oder als einfaches Gerät arbeiten.
- **Reduced Function Device (RFD):** Knoten dieser Art arbeiten nur als einfache Geräte.

Ein WPAN nach IEEE 802.15.4 besteht mindestens aus einem Koordinator und einem anderen Gerät und bildet so ein Stern-Netzwerk. Bei mehreren Koordinatoren ist es möglich, dass diese untereinander kommunizieren. Die Bedingung dafür ist, dass ein Knoten als Personal Area Network-Koordinator ausgezeichnet ist. Dieser Koordinator organisiert das Netzwerk, indem er 64 Bit große Adressen an jeden Knoten verteilt und regelmäßig Daten mit den anderen Koordinatoren austauscht [3, S.140]. Bei der Kommunikation hat man die freie Wahl, welches Protokoll man verwenden will.

So bietet sich zunächst das *Internet Protocol Version 6 (IPv6)* an, damit man das *Wireless Sensor Network* einfach an das Internet anbinden kann und von außerhalb die im Netzwerk gesammelten Daten lesen und auswerten kann. Die Schnittstellen zur IP-Programmierung sind gut dokumentiert, IP ist standardisiert und Programme zur Organisation und Analyse eines IP-Netzwerkes sind schon vorhanden [8, S. 4 f.]. Das Problem liegt allerdings darin, dass IPv6 aus verschiedenen Gründen [8, S. 5 f.] nicht für solch kleine Geräte ausgelegt ist. Doch hierfür gibt es mit *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network*, kurz 6LoWPAN, eine Lösung. Die Hauptfunktionalität von 6LoWPAN liegt in der Vermittlungsschicht des OSI-Modells [8, S. 20 ff.]. So bietet 6LoWPAN u.a. eine Header-Komprimierung [8, S. 41 f.] und eine Fragmentierung der einzelnen Datenpakete [8, S. 52-59]. Diese Maßnahmen ermöglichen die Verwendung von IP in einem *Wireless Sensor Network*.

## C. Gateways in Wireless Sensor Networks

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben muss in einem *Sensornetz* ein FFD vorhanden sein. Diese Rolle nimmt normalerweise der Gateway-Router ein. Dieser synchronisiert

das gesamte Netzwerk, entweder alleine oder mithilfe von zusätzlichen Koordinatoren [6, S. 21]. Dementsprechend muss das Gateway genügend Rechenleistung haben, um diese Arbeit bewerkstelligen zu können. Im Gegensatz zu RFDs darf es mehr Energie verbrauchen, was besonders in einem Stern-Netzwerk nötig ist und einfache Sensorknoten von dieser Aufgabe ausschließt [6, S. 22 f.]. Je nach Topologie des Netzwerkes und der Anzahl der eingesetzten Sensorknoten ist ein entsprechend leistungsstarkes Gateway nötig.

#### D. Der Raspberry Pi (Model B)

Die Idee hinter dem Raspberry Pi ist es Kinder und Jugendliche an das Programmieren und Experimentieren mit dem Computer heranzuführen [9]. Zu diesem Zweck bietet er einen Kompromiss zwischen Rechenleistung und Kosten der Komponenten. Er wird in zwei verschiedenen Ausführungen verkauft, die sich jedoch nur in Kleinigkeiten unterscheiden [10]. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Model B.

Der eingesetzte Broadcom BCM2835 ist ein *System on Chip*, der neben der eigentlichen CPU u.a. auch eine Grafikeinheit und den Arbeitsspeicher beherbergt. Die CPU basiert auf der ARM-Architektur und nutzt den ARMv6-Befehlssatz, d.h. gängige Desktop-Software kann nicht eingesetzt werden. Die CPU taktet mit 700 MHz und kann auf 512 MB Arbeitsspeicher zugreifen, den sie mit der Grafikeinheit teilt. Die Grafikeinheit unterstützt diverse Grafikstandards, kann in H.264 codierte Videodateien in Echtzeit dekodieren und per HDMI ausgeben. Der SMSC LAN 9512 liefert einen RJ45-Anschluss für das Anbinden an ein lokales Netzwerk [11, S. 55-63, 68, 80]. Für den Anschluss externer Geräte sind zwei USB-Anschlüsse vorhanden. Als Langzeitspeicher für das Betriebssystem und weitere Daten dient eine SD-Karte, die über den entsprechenden Slot am Raspberry Pi angeschlossen wird. Die Spannungsversorgung erfolgt über einen Micro-USB-Anschluss und ein Netzteil mit mindestens 700 mA bei 5 V Spannung [12, 2, 4, 16]. Für zusätzliche Schaltungen besitzt der Raspberry Pi außerdem *General Purpose Input Output*, kurz GPIO, Kontakte [13]. Betrieben wird der Raspberry Pi vorzugsweise mit Linux. Es läuft jedoch nicht jede Distribution, dazu gehört z.B. das beliebte Ubuntu Linux [13, S. 13]. Bei der Einrichtung hat man die Wahl zwischen dem von Debian abgeleiteten Raspbian, einer angepassten Version von Arch Linux und der angepassten Fedora-Version Pidora [13, S. 14]. Für die ersten Schritte wird meist Raspbian empfohlen. Weitere Software lässt sich nach der Einrichtung mithilfe des Linux-Paketmanagers installieren.

#### E. Beispiel eines Sensorknotens: Die deRFmega128-Reihe

Die deRFmega128-Reihe von *dresden elektronik* ist eine Reihe von Funkmodulen, welche für den Einsatz in einem Wireless Sensor Network entwickelt wurden. Verwendet wird eine Single-Chip-Lösung der Firma Atmel, bei der Mikrocontroller und Transceiver in einem einzelnen Modul verbaut sind. Die Module arbeiten auf dem 2,4 GHz-Band und sind auch für den Einsatz in einem 6LoWPAN-basierten *Sensornetz* geeignet. Der Mikrocontroller kann für die Datenspeicherung und für autonome Firmwareupdates auf 1 Mbit EEPROM zugreifen. Alle Module werden mit 3,3 V Spannung versorgt, sodass auch eine Stromversorgung mit 2 AA- bzw. AAA-Batterien möglich ist. Die Betriebstemperatur liegt zwischen  $-40^{\circ}\text{C}$  und  $+85^{\circ}\text{C}$ .

Die beiden letztgenannten Eigenschaften qualifizieren den Modulen auch für einen längeren Einsatz in schwer zugänglichen Gebieten in der Umwelt. Gemäß des Einsatzzweckes kann jedes Modul über frei programmierbare I/O-Pins angepasst und erweitert werden. So können Temperatur- oder Feuchtigkeitssensoren zur Umweltüberwachung angebracht werden [14].

### III. ANALYSE DES RASPBERRY PI ALS GATEWAY

#### A. Vergleichsgerät: National Instruments NI 9792

Um den Raspberry Pi besser analysieren zu können, ist es hilfreich andere Gateways zu betrachten. Zum Vergleich in dieser Arbeit dient als Erstes das Gateway NI 9792 der Firma National Instruments. Es ist dafür ausgelegt in einem Sensornetz mit bis zu acht Sensorknoten in einem Stern-Netzwerk oder bis zu 36 Knoten in einem Mesh-Netzwerk zu kommunizieren [15]. Dieses Gateway eignet sich gut als Vergleich, weil es laut Datenblatt eine ähnliche Rechenleistung wie der Raspberry Pi besitzt. Im Unterschied dazu kostet das NI 9792 aber laut Hersteller über 1.500 Euro.

Die Hardware bietet folgendes [16]:

- Ein Freescale MPC8347 PowerPC-Prozessor mit 533 MHz Taktfrequenz, 256 MB Arbeitsspeicher und 2 GB Langzeitspeicher für Log-Dateien
- Funk über 2,4 GHz laut IEEE 802.15.4 und zwei Ethernet-Ports
- Ein USB-Anschluss, ein RS232-Port und zwei Stromanschlüsse mit 9 V bzw. 35 V
- Eine Arbeitstemperatur von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $70^{\circ}\text{C}$

Der Stromverbrauch liegt laut eines Foreneintrags eines National Instruments-Mitarbeiters [17] bei 9,5 W mit einem Maximalverbrauch von 15 W. Die Programmierung erfolgt von einem anderen Computer mithilfe einer Software des Herstellers.

#### B. Vergleichsgerät: Advanticsys SG1000

Ein weiteres Gateway ist das SG1000 von Advanticsys. Es bietet anders als das NI 9792 deutlich leistungsstärkere Hardware. Das Datenblatt [18] listet folgendes:

- Ein Intel Atom D525 x86-Prozessor mit  $2 \times 1,8$  GHz Taktfrequenz, 2 GB Arbeitsspeicher und 160 GB Festplattenspeicher
- Funk über 2,4 GHz laut IEEE 802.15.4 und ein Ethernet-Ports
- Vier USB-Anschlüsse, ein DB9-Port und ein Stromanschluss mit 12 V

Der Preis liegt laut Hersteller bei ca. 400 Euro. Somit ist das SG1000 bei leistungsstärkerer Hardware günstiger als das NI 9792. Dafür fehlen genauere Informationen auf der Produktseite. Ausgehend von den Hardwaredaten ist aber davon auszugehen, dass deutlich mehr als 36 Knoten im Netzwerk angesprochen werden können. Dafür nimmt das SG1000 auch die Ausmaße eines kleinen PCs ein.

### C. Vergleich zwischen Raspberry Pi & den Anforderungen an ein Sensornetz

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt muss ein Sensornetz einige Anforderungen erfüllen, um optimal funktionieren zu können. Durch einen Stromverbrauch von rund 3,5 W laut Datenblatt [11, S. 80] erfüllt der Raspberry Pi die wichtige Bedingung energieeffizient zu sein. Es ist so sogar möglich, ihn autonom mit Batterien zu betreiben. Durch den Einsatz von Linux als Betriebssystem ist er flexibel, wenn das *Wireless Sensor Network* an geänderte Umweltbedingungen angepasst werden muss. Es ist möglich neue Programme zu installieren, neue Schaltungen anzubauen und Treiber für diese zu entwickeln. Bei der Wahl einer stabilen und sicheren Linux-Distribution erfüllt er auch die Voraussetzungen an die Sicherheit des Netzwerkes. Wenn dies noch nicht ausreicht, so kann man auch zusätzliche Programme zur Datenverschlüsselung oder anderen Sicherheitsvorkehrungen entwickeln und auf dem Raspberry Pi installieren. Da keine mechanischen Komponenten wie eine Festplatte auf dem Board verbaut sind, ist er auch weitgehend gegen Stöße und einem Fall aus geringer Höhe robust. Aufpassen muss man allerdings bei der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit. Durch die Konstruktion als kleiner PC soll der Raspberry Pi nur bei Raumbedingungen betrieben werden. Außerdem darf er nicht auf einer Metalloberfläche betrieben werden, da einige Leitungen auf der Unterseite des Boards verlaufen. Abhilfe schafft ein einfaches Gehäuse. Bei einem Preis von rund 35 US-Dollar sind diese Zusatzkosten verschmerzbar. Damit ist er zwar teurer als einfache Sensorknoten, dafür schafft er eine höhere Rechenleistung, die von einem Gateway erwartet wird. Dank Linux beherrscht der Raspberry Pi 6LoWPAN [19]. Das größte Problem liegt nun in der fehlenden Antenne für die Kommunikation nach IEEE 802.15.4. Diese kann jedoch über einen der beiden USB-Anschlüsse mit einem Entwicklerboard nachgereicht werden [20]. Dieses Board wird durch im Linux-Kernel integrierten Treibern auch vom Raspberry Pi unterstützt. Somit eignet sich der Raspberry Pi ausgehend von den Anforderungen als Gateway in einem *Wireless Sensor Network*.

### D. Vergleich zwischen Raspberry Pi und NI 9792

Wie oben beschrieben eignet sich das NI 9792 hervorragend als Vergleichsgerät für den Raspberry Pi. Die Prozessoren beider Geräte bieten etwa eine ähnliche Rechenleistung, wobei der Raspberry Pi noch eine eigene Grafikeinheit besitzt. Dank dieser kann man einen Bildschirm am Raspberry Pi anschließen, um das *drahtlose Sensornetz* an Ort und Stelle überwachen zu können, wenn dies nötig ist. Beim NI 9792 ist dafür ein zusätzlicher Computer in der Nähe nötig, der per Ethernet verbunden wird. Auch beim Speicherausbau hat das NI 9792 das Nachsehen. Es verfügt nur über 256 MB Arbeitsspeicher und 2 GB Langzeitspeicher, der Prozessor des Raspberry Pi kann auf 512 MB Arbeitsspeicher zugreifen und man kann je nach Wahl der SD-Karte bis zu 32 GB abzüglich des Betriebssystems an Daten dauerhaft speichern. Wie oben erwähnt kann man das Raspberry Pi mit einem Funkadapter nach IEEE 802.15.4 nachrüsten, wodurch hinsichtlich der Netzwerkfähigkeiten das NI 9792 nur durch seinen zweiten Ethernet-Port hervorsteicht. Beide USB-Anschlüsse des Raspberry Pi können mit einem Adapter auch zu einem RS232-Port umfunktioniert werden, wodurch eine weitere Eigenschaft des NI 9792 keinen Vorteil

gegenüber dem Raspberry Pi bringt. Vorteile des NI 9792 sind allerdings die redundante Stromversorgung über zwei unabhängige Anschlüsse. Wenn es am öffentlichen Stromnetz angeschlossen ist, kann so bei einem Stromausfall eine andere Spannungsquelle den Betrieb des Gateways aufrecht erhalten. Auch die Arbeitstemperatur spricht für das NI 9792, denn so kann man es auch an extrem kalten wie auch heißen Orten verwenden. Beim Stromverbrauch liegt wieder der Raspberry Pi vorne. Er verbraucht weniger als die Hälfte des NI 9792 bei einer ähnlichen Rechenleistung. Verwendet man das NI 9792 als Gateway, so sind zwingend auch Sensorknoten von National Instruments nötig, um ein *Wireless Sensor Network* aufzubauen. Das in dieser Arbeit beschriebene MSBA2-Board ist also nicht verwendbar. Mit dem Raspberry Pi umgeht man dieses Problem. Man kann aber auch andere Sensorknoten verwenden.

Der Vergleich zeigt, dass der Raspberry Pi, zumindest laut Datenblatt, mit einem speziell entwickelten Gateway mithalten kann. Die Rechenleistung beider Geräte ist ähnlich, beide Geräte bieten eine ähnliche Anzahl von Anschlüssen und der Stromverbrauch ist sogar niedriger als beim NI 9792. Dabei beträgt der Preis des Raspberry Pi nur einen Bruchteil der rund 1500 Euro des NI 9792. Allerdings kann man nur das NI 9792 gefahrlos in niedrigen und hohen Temperaturbereichen betreiben.

### E. Vergleich zwischen Raspberry Pi und SG1000

Der Vergleich zwischen beiden Geräten ist nicht praktikabel. Beide Geräte haben ihre Vor- und Nachteile. Das SG1000 hat eine deutlich höhere Rechenleistung und kann mit sehr vielen Knoten kommunizieren, dafür passt der Raspberry Pi auch an kleine Orte oder kann gut versteckt werden. Der Vergleich verdeutlicht aber zwei Aspekte:

- Gateways können je nach Einsatzzweck sehr unterschiedlich ausfallen. Auch ein PC kann als Gateway verwendet werden.
- Die Prioritäten müssen vorher festgelegt. Entweder soll das Gateway leistungsstark und groß oder klein und leistungsschwächer sein.

Soll mit einer relativ geringen Anzahl an Knoten kommuniziert werden, so ist der Raspberry Pi im Vorteil gegenüber dem SG1000.

## IV. ÄHNLICHE PROJEKTE

Aufgrund des niedrigen Preises haben sich einige Hobbyprogrammierer mit dem Raspberry Pi beschäftigt. So sind auch ähnliche Projekte entstanden, die den Kleinstrechner als Gateway verwenden. So beschäftigt sich ein Projekt mit der Verwendung des Raspberry Pi als Zugangspunkt für das TOR-Netzwerk. Nach Bekanntwerden der NSA-Überwachung hat selbst *Der Spiegel* eine Anleitung hierzu veröffentlicht [21]. Allerdings richtet sich diese Anwendungsmöglichkeit an den privaten Gebrauch des Raspberry Pi.

Interessanter für die Verwendung als Gateway in einem *Wireless Sensor Network* ist ein Projekt, welches auf Basis von *XBee* arbeitet [22]. *XBee* implementiert zwar den IEEE 802.15.4-Standard, basiert allerdings auf *ZigBee* [23]. Es ist also eine andere Möglichkeit, ein *drahtloses Sensornetz* aufzubauen. Der Hauptunterschied zwischen beiden Technologien

besteht darin, dass ZigBee-Knoten ein spezielles Gateway benötigen, um mit einem IP-Netzwerk zu kommunizieren [24]. Anders als der IEEE 802.15.4-Standard definiert Zigbee nämlich noch die Anwendungsschicht, sodass man als Nutzer kaum Möglichkeiten hat andere Protokolle auf dieser Schicht zu verwenden. Möchte man also über das Internet auf das Sensornetzwerk zugreifen, so sollte man ZigBee eher nicht in Betracht ziehen.

## V. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit zeigt deutlich das Potenzial, welches im kleinen Raspberry Pi steckt. Er erfüllt die Bedingungen an ein Gateway, die ein *Wireless Sensor Network* stellt. Der Stromverbrauch ist niedrig, die Kosten gering und die wichtige Flexibilität ist gegeben. Die Komponenten und Schnittstellen sind gut dokumentiert und ermöglichen eine Erweiterung des Computers, wenn dies erforderlich ist. Die GPIO-Kontakte eignen sich hierfür besonders. Auch softwareseitig ist der Raspberry Pi durch die Verwendung von Linux als Betriebssystem sehr flexibel. Die im Linux-Kernel vorhandenen Funktionen zur Kommunikation über 6LoWPAN und zur Anbindung von IEEE 802.15.4-Funkadaptern erleichtern die Errichtung eines *Wireless Sensor Network* mit dem Raspberry Pi als Gateway. Er kann fast problemlos als Full Function Device arbeiten.

Trotz all dieser Vorteile gibt es zwei Hauptprobleme, die noch gelöst werden müssen. Als Erstes ist die Robustheit des Raspberry Pi verbesserungswürdig. Zwar befinden sich keine mechanischen Teile auf dem Board, die einzelne Komponenten beschädigen können und den Computer unbrauchbar machen können. Doch er wird normalerweise ohne Gehäuse ausgeliefert, das ihn vor äußeren Einflüssen schützen kann. Außerdem ist er nicht für die Temperaturbereiche gebaut, in denen spezialisierte Gateways problemlos arbeiten können. Eine Lösung kann möglicherweise ein eigens für den Raspberry Pi entwickeltes Gehäuse liefern, welches ihn vor äußeren Einflüssen wie extremen Temperaturen oder einer hohen Luftfeuchtigkeit schützt und den Datenaustausch mit den Sensorknoten nicht verhindert.

Das zweite Problem liegt in der Sicherheit der Daten. Ohne explizite Implementierung einer Verschlüsselung sind die Daten innerhalb des Netzwerkes frei lesbar. Löst man dieses Problem mit Software, so kann die Rechenleistung des Raspberry Pi für die Kommunikation vermindert werden, wodurch weniger Sensorknoten angesprochen werden können. Diese Vermutung muss noch geprüft werden. Geprüft werden muss auch, ob eine hardwareunterstützte Verschlüsselung mit einer eigenen Schaltung möglich ist. Diese Schaltung kann dann per GPIO angebunden werden.

Es müssen in jedem Fall weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die die theoretischen Überlegungen dieser Arbeit in der Praxis überprüfen. So soll der theoretische Vergleich mit anderen Gateways praktisch untersucht werden. Außerdem muss die Kompatibilität mit verschiedenen Sensorknoten geprüft werden. Wenn dies getan ist, ist eine Studie denkbar, die den produktiven Einsatz des Raspberry Pi als Gateway untersucht. Führen alle Untersuchungen zu einem positiven Ergebnis, ist mit dem Raspberry Pi eine günstige und doch leistungsstarke Alternative zu bislang erhältlichen Gateways vorhanden, sodass auch mit einem geringen Budget ein effektives *Wireless Sensor Network* aufgebaut werden kann.

## LITERATUR

- [1] Walteneus Dargie and Christian Poellabauer. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks - Theory and Practice*. John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [2] Enrique J. Duarte-Melo and Mingyan Liu. Field Gathering Wireless Sensor Networks. In Rajeev Shorey, A. Ananda, Mun Choon Chan, and Wei Tsang Ooi, editors, *Mobile, Wireless, and Sensor Networks – Technology, Applications, and Future Directions*, chapter 8, page 197 f. John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [3] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, New York, 1. auflage edition, 2007.
- [4] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A Survey On Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 40:102–114, August 2002.
- [5] Chris Townsend and Steven Arms. Wireless Sensor Networks: Principles and Applications. In *Sensor Technology Handbook*, chapter 22, page 577 f. Newnes, London, har/cdr edition, 2005.
- [6] Nitaigour P. Mahalik. *Sensor Networks and Configuration - Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [7] Wei Yuan, Xiangyu Wang, and J-PMG Linnartz. A coexistence model of iee 802.15. 4 and iee 802.11 b/g. In *Communications and Vehicular Technology in the Benelux, 2007 14th IEEE Symposium on*, pages 1–5. IEEE, 2007.
- [8] Zach Shelby and Carsten Bormann. *6LoWPAN - The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [9] Raspberry Pi Organisation. About us. <http://www.raspberrypi.org/about>. Zugriff am 5.1.2014.
- [10] Raspberry Pi Organisation. FAQ. <http://www.raspberrypi.org/faqs#generalDifference>. Zugriff am 5.1.2014.
- [11] Klaus Dembowski. *Raspberry Pi - Das Handbuch: Konfiguration, Hardware, Applikationserstellung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [12] Erik Bartmann. *Durchstarten mit Raspberry Pi*. O'Reilly Germany, Köln, 1. aufl. edition, 2012.
- [13] Maik Schmidt. *Raspberry Pi - Einstieg - Optimierung - Projekte*. Dpunkt.Verlag GmbH, Heidelberg, 1. auflage edition, 2013.
- [14] dresden elektronik. *User Manual Radio Modules*, 2011.
- [15] National Instruments. Produktsite NI 9792. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/208440>. Zugriff am 5.1.2014.
- [16] National Instruments. Datenblatt NI 9792. <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-284/lang/de>. Zugriff am 5.1.2014.
- [17] Foreneintrag zum energieverbrauch des ni 9792. <http://forums.ni.com/t5/Wireless-Sensor-Networks/NI-9792-power-consumption/m-p/2423478/>. Zugriff am 5.1.2014.
- [18] ADVANTICSYS. SG1000 Produktseite. <http://www.advanticsys.com/shop/assg1000-p-28.html?language=en>. Zugriff am 5.1.2014.
- [19] 6LoWPAN im Linux-Kernel. <https://git.kernel.org/cgit/linux/kernel/git/torvalds/linux.git/tree/net/ieee802154/6lowpan.c>. Zugriff am 5.1.2014.
- [20] Redwire. Redwire Econotag Produktseite. <http://www.redwirellc.com/store/node/1>, 2014. Zugriff am 5.1.2014.
- [21] Peter Gotzner. Tor-Router zum Selberbauen: Internet-Tarnkappe für 65 Euro. <http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/raspberry-pi-tor-router-onion-pi-anonymisiert-surfen-im-web-a-907567.html>, 2014. Zugriff am 5.1.2014.
- [22] Chris Jefferies. Raspberry Pi as an Xbee Wireless Sensor Network Gateway. <http://tinajalabs.wordpress.com/2012/09/02/raspberry-pi-as-an-xbee-wireless-sensor-network-gateway/>, 2014. Zugriff am 5.1.2014.
- [23] Digi International. Anbindung von Endgeräten - Embedded. <http://www.digieurope.de/de/products/wirelessdropinnetworking/embeddedconnectivity/>, 2014. Zugriff am 5.1.2014.
- [24] Chiara Buratti, Andrea Conti, Davide Dardari, and Roberto Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 9(9):6885, 2009.