

# Energy Harvesting im Internet of Things

Michel Rottleuthner

HAW-Hamburg, Fakultät Technik und Informatik, Department Informatik,  
Berliner Tor 7, 20099 Hamburg, Germany  
[michel.rottleuthner@haw-hamburg.de](mailto:michel.rottleuthner@haw-hamburg.de)  
<http://informatik.haw-hamburg.de>

**Zusammenfassung.** In dieser Arbeit wird die Entwicklung von Teilkomponenten einer Testplattform für Energy Harvesting-Systeme erläutert. Dazu wird eine kurze Einführung in das Themengebiet gegeben, das übergeordnete Ziel für die Masterarbeit abgesteckt und das Vorgehen beschrieben um dieses zu erreichen. Die Anforderungen an die geplanten Komponenten werden dargelegt und zur Auswahl konkreter Bauteile, für die Basis der Testplattform, herangezogen. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der genaueren Untersuchung eines konkreten Energiespeichers und dem Aufbau der Ladeelektronik- und der Monitoring-Komponente für Energiemessungen. Zu nachfolgenden Arbeiten wird ein Ausblick mit geplanten Schritten gegeben.

## 1 Internet of Things

Das Internet of Things (IoT) kann im wesentlichen als Metapher für eine intelligente, vollständig vernetzte Welt verstanden werden.

Eine Analyse der Entwicklung dieses Themengebietes zeigt, dass von IoT-Technologien ein erheblicher Einfluss auf Bereiche wie Transport, Energie, Gesundheit, Militär und allgemein dem Monitoring von Umwelt und urbanen Umgebungen erwartet wird [1]. Das breite Feld an Einsatzmöglichkeiten zeigt die Relevanz des Forschungsbereichs IoT, welche sich unter anderem auch in den Zahlen zum wirtschaftlichen Wachstum dieser Sparte widerspiegelt. Das Marktforschungsunternehmen Gartner prognostiziert für das Jahr 2016 eine Anzahl von 6.4 Milliarden vernetzten Geräten in Verwendung, welche bis zum Jahr 2020 auf 20.8 Milliarden steigen sollen [2]. Jedes der vernetzten Geräte dieser rasch wachsenden Anzahl muss mit Energie versorgt werden und bietet somit das Potenzial, dabei auf neue, effektive und umweltfreundliche Lösungen zur Energieversorgung zurückzugreifen.

Die iNET Arbeitsgruppe<sup>1</sup> der HAW-Hamburg gestaltet durch die Mitentwicklung des IoT-Betriebssystems RIOT [3], die Zukunft des IoT mit und bietet damit ein geeignetes Umfeld für Forschungsarbeiten im IoT-Bereich.

---

<sup>1</sup> <https://inet.haw-hamburg.de/>

## 2 Energy Harvesting

Bei der Realisierung von allgegenwärtigen, vernetzten Geräten spielt deren Energieversorgung eine besonders wichtige Rolle. Ein praktikables Prinzip zur unabhängigen Energieversorgung besteht im Energy Harvesting (EH). Es beschreibt einen Prozess bei dem Energie aus der Umgebung „geerntet“ und gesammelt wird um damit ein System betreiben zu können. Dazu wird je nach Anwendung auf Energiequellen mit potentiell sehr unterschiedlichen Mengen an verfügbarer Energie zurückgegriffen, um einen wartungsarmen Dauereinsatz ohne Batteriewechsel zu erreichen [4].

Alternative Ansätze wie Thermoelektrizität, Kinetische Energie aus menschlichen Bewegungen [5][6], Vibrationen oder Funkwellen [7] finden praktische Verwendung. Aber auch umfassend getestete, erneuerbare Energiequellen wie Sonnen-, Wind-, und Wasserkraft lassen sich im Kleinformat nutzen um Energie zu sammeln. Eine häufige Problemstellung derartiger Systeme ist, dass die durch das Harvesting zur Verfügung stehende Energie zu gering für den Dauerbetrieb ist oder nicht permanent zur Verfügung steht. Dadurch entsteht ein Bedarf an Energieverwaltungsmechanismen, die unter Anwendung einer bestimmten Optimierungsstrategie versuchen, eine möglichst sinnvolle Nutzung der zur Verfügung stehenden Energiemenge zu erreichen. Ist es unter ordnungsgemäßem Betrieb des Systems möglich, höchstens die Menge an Energie zu verbrauchen, die vom System selbst gesammelt und umgewandelt werden kann, spricht man von einem Energy Neutral Operation (ENO) Zustand [8].

## 3 Ziel

Im Rahmen der Masterarbeit sollen Aspekte von EH-Systemen anhand von energieautarken Sensorknoten untersucht werden, die in einem ENO-Zustand betrieben werden. Um verwendbare Daten und Erkenntnisse zu EH-Systemen zu erhalten, wird eine Testplattform benötigt, unter deren Einsatz sich das Verhalten von Sensorknoten, Ladeelektronik und Energiespeicherkomponenten untersuchen lässt. Anhand dieser Daten sollen weitere Untersuchungen von Softwarelösungen zur Energieverwaltung, der Optimierung des Energieverbrauchs und weiterführende Simulationen ermöglicht werden.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 1 den schematischen Aufbau der geplanten EH-Testplattform in Form eines kabellosen Sensorknotens. Die von der Energiequelle bereitgestellte Energie wird dabei von einem Energiewandler in elektrische Energie gewandelt. Diese elektrische Energie wird mit einem Laderegler (DC-DC-Wandler) im Energiespeicher angesammelt. Mit der angesammelten Energie kann anschließend über einen weiteren DC-DC-Wandler der Mikrocontroller mit Übertragungsmodul und Sensoren betrieben werden. Einen grundlegenden unterschied zu einem Produktivsystem stellt hier die zusätzliche Monitoring-Komponente dar, welche zur Aufzeichnung der relevanten Systemparameter und des allgemeinen Systemverhaltens eingesetzt wird. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Beschreibung der bereits fertiggestellten Lade-

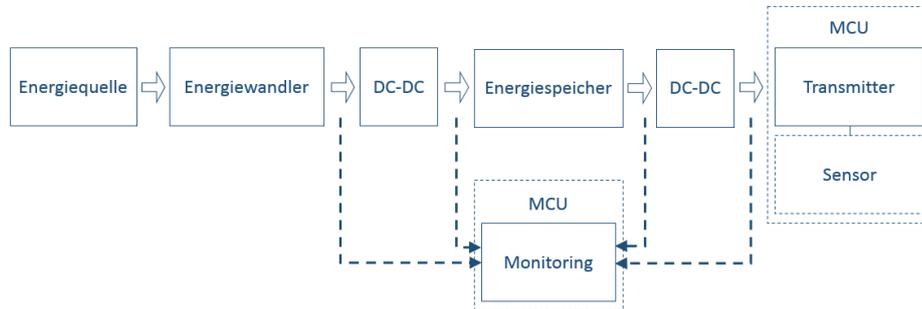


Abb. 1: Schematischer Aufbau der EH-Testplattform

elektronik, dem verwendeten Energiespeicher und der noch in Arbeit befindlichen Monitoring-Komponente, welche im Rahmen des Hauptprojektes entwickelt wird.

## 4 Vorgehen

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen bei den Projektarbeiten<sup>2</sup> erklärt und ein kurzer Rückblick für den nötigen Kontext gegeben. Die Projektarbeiten, die der Masterarbeit vorangestellt sind, dienen dazu, die Grundlagen und wissenschaftlichen Hintergründe zu erarbeiten, welche zur Durchführung der Masterarbeit benötigt werden. Nach der detaillierten Ausarbeitung und Präsentation des aktuellen Stands der Forschung im Grundseminar wird anhand der Ergebnisse das weitere Vorgehen für die Projektarbeiten eingegrenzt. Die untersuchte Literatur zeigt verschiedene Ansätze und die praktische Umsetzbarkeit von EH-Systemen. So zeigt z.B. Google mit dem Projekt Loon [9], dass sich mit Sonnenenergie betriebene Netzwerkinfrastruktur auch im größeren Maßstab realisieren lässt, jedoch ohne genaue Details zur technischen Umsetzung zu nennen. Verschiedene Arbeiten (Renner et al. [10], Le et al. [8], Xiang et al. [11]) zeigen die erfolgreiche Verwendung von Superkondensatoren als Energiespeicher in EH-Systemen. Für die genauere Beschreibung und Auseinandersetzung mit der genannten Literatur sei auf die Ausarbeitung des Grundseminars verwiesen.

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Grundseminar werden für die weitere Untersuchung als Energiequelle Photovoltaik-Zellen (PV-Zellen) und als Energiespeicher Superkondensatoren festgelegt. PV-Zellen sind kostengünstig, leicht verfügbar und erlauben, wie zuvor erwähnt, eine einfache Skalierung in einen größeren Maßstab, was weitere Einsatzmöglichkeiten zulässt. Die Sonne als Energiequelle bietet weiterhin den Vorteil, dass die Energieverfügbarkeit durch den Tag-Nacht-Zyklus relativ beständig und vorhersagbar [12] ist und eine PV-Zelle nur geringen physikalischen Belastungen ausgesetzt ist.

<sup>2</sup> Grundprojekt und Hauptprojekt im Rahmen des Masterstudiengangs Informatik, HAW-Hamburg PO2014

Mit der zuvor genannten Eingrenzung auf PV-Zellen und Superkondensatoren, werden nachfolgend die Eigenschaften und der daraus resultierende Aufbau der hardwareseitigen Testplattformkomponenten dargestellt.

## 5 Energiespeicher: Superkondensator

Superkondensatoren unterscheiden sich wesentlich von Energiespeichern wie herkömmlichen Akkus. Nachfolgend sollen diese Unterschiede aufgezeigt werden. Superkondensatoren besitzen gegenüber Akkus eine niedrigere Energiedichte, wodurch sich bei selbem Volumen nur ca. ein Zehntel der Energie speichern lässt. Jedoch überstehen sie ca. eine tausendfache Anzahl an Ladezyklen verglichen mit herkömmliche Akkus und bieten damit eine weitaus höhere Lebensdauer [13]. Die Ladeelektronik muss bei beiden Energiespeichern sicherstellen, dass die maximal zulässige Ladespannung nicht überschritten wird. Während ein Superkondensator problemlos komplett entladen werden kann, ist z.B. bei gängigen Lithium Akkus ein Tiefentladeschutz nötig. Für einen permanenten Einsatz im Freien ist ebenfalls nicht zu vernachlässigen, dass Superkondensatoren umweltfreundlicher sind [10]. Das prinzipbedingte Entladeverhalten eines Superkondensators, führt dazu, dass die Spannung proportional zur entnommenen Energie abfällt. Der Spannungswandler, der dem Mikrocontroller vorgeschaltet ist, muss also eine möglichst niedrige Minimal-Eingangsspannung aufweisen, um wenig Energie ungenutzt im Superkondensator zu belassen. Ein großer Nachteil von Superkondensatoren sind auftretende Leckströme, die zu einer vergleichsweise raschen Selbstentladung führen und dabei ein komplex zu modellierendes Verhalten aufweisen [14].

Für den geplanten Testaufbau wurde ein GreenCap von Samwha mit einer Kapazität von 100 F und 2.7 V Nennspannung ausgewählt. Da das Datenblatt [15] dieses Superkondensators keine präzisen Angaben zur Höhe des Leckstroms direkt nach Beendigung des Ladevorgangs macht, aber dennoch die generelle Eignung des Bauteils dahingehend zu überprüfen ist, werden eigene Messungen durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung am Superkondensator durch Selbstentladung ohne angeschlossene Last. Die beiden Zeitreihen unterscheiden sich dabei ausschließlich durch die Dauer, für welche die Ladeschlussspannung an dem Superkondensator angelegt wurde. Vor dem Versuch waren beide Kondensatoren vollständig entladen. Der Verlauf, bei nur für eine Stunde angelegter Ladeschlussspannung, zeigt zu Beginn einen sehr steilen Abfall, der sich erst nach einigen Tagen in einen näherungsweise linearen Verlauf entwickelt, während dieser Effekt nach der zehnstündigen Ladeschlussphase wesentlich schneller eintritt. Die wesentlichen Schlussfolgerungen dieser ersten Messungen sind, dass dieses spezielle Verhalten beim Entwurf der Energiemanagementverfahren nicht vernachlässigt werden sollte. Für die generelle Eignung des Superkondensators als Energiespeicher für das geplante System, werden hierdurch allerdings keine übermäßigen Einschränkungen erwartet. Diese Folgerung ergibt sich aus der Tatsache, dass im Regelfall zu jeder Sonnenphase wieder Energie in das System eingespeist werden kann. Gleichzeitig liegt auch bei der

relativ kurzen Ladeschlussphase nach knapp zwei Tagen noch ausreichend Spannung an, um den mikrocontroller-seitigen DC-DC-Wandler zu betreiben. Eine experimentell bestimmte Schwelle hierfür stellt die 1 V Marke dar, welche sich mit einem optimierten DC-DC-Wandler noch weiter reduzieren ließe. Eine genauere Untersuchung dahingehend soll im weiteren Verlauf des Hauptprojektes durchgeführt werden.

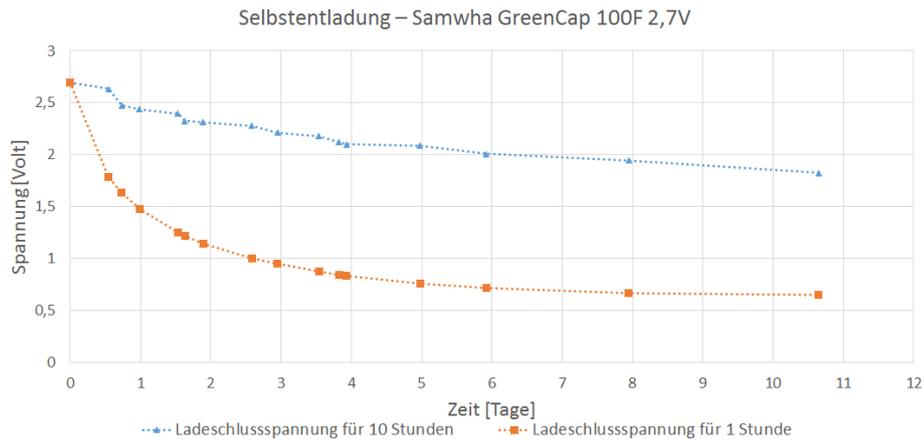


Abb. 2: Spannungsverlauf bei Selbstentladung des 100 F 2.7 V GreenCap

## 6 Ladeelektronik

Im folgenden wird der Aufbau der Ladeelektronik beschrieben. Die Ladeelektronik muss die Möglichkeit bieten, die Eingangsspannung auf den Maximum Power Point der PV-Zelle einzustellen um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen. Da in nachfolgenden Versuchen potenziell unterschiedliche PV-Zellen eingesetzt werden sollen, muss diese Einstellung variabel sein. Weiterhin sollte der Laderegler bis zu einer möglichst niedrigen Spannung betrieben werden können, um auch bei relativ schlechten Witterungsverhältnissen oder in der Dämmerung Energie aus der PV-Zelle extrahieren zu können. Die Ladeschlussspannung sollte ebenfalls einstellbar sein, um auch Energiespeicher mit anderen Eigenschaften verwenden zu können. Ein nach diesen Kriterien geeignetes Bauteil stellt der LTC3105 von Linear Technologies dar. Anhand des Datenblattes [16] können die benötigten Bauteile zur Beschaltung des LTC3105 berechnet werden.

Die Ausgangsspannung des Bausteins wird über einen Spannungsteiler konfiguriert und ist nach (1) zu berechnen. Um die Schaltung (Abbildung 3a) an dieser Stelle flexibel konfigurierbar zu halten, wird zusätzlich zwischen den beiden festen Widerständen ( $R_1$  und  $R_2$ ) ein Potentiometer mit  $500\text{ k}\Omega$  ( $R_3$ ) platziert.

Mit  $R_1=1.1\text{ M}\Omega$  und  $R_2=390\text{ k}\Omega$  ergibt sich ein Einstellbarer Spannungsbereich zwischen  $2.24\text{ V}$  und  $5.12\text{ V}$ . Die MPP-Spannung wird nach (2) über einen einzelnen Widerstand ( $R_{MPPC}$ ) festgelegt, welcher auch als Potentiometer ausgeführt ist und mit einem Wert von  $500\text{ k}\Omega$  die Einstellung auf den Bereich unterhalb von  $5\text{ V}$  ermöglicht.

Als Spule wird entsprechend dem Datenblatt eine niederohmige ( $44\text{ m}\Omega$ ) Speicherdrossel mit  $10\text{ }\mu\text{H}$  von Würth Elektronik verwendet. Die entsprechende Beschaltung des Bausteins ist Abbildung 3a zu entnehmen, welche den entworfenen Schaltplan für die Ladeelektronik zeigt. Zum Entwerfen von Schaltplan und Platinenlayout wird die Software EAGLE<sup>3</sup> verwendet. Die Platinen werden eigens mittels Fotolithografie-Verfahren hergestellt, auf welches im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird.

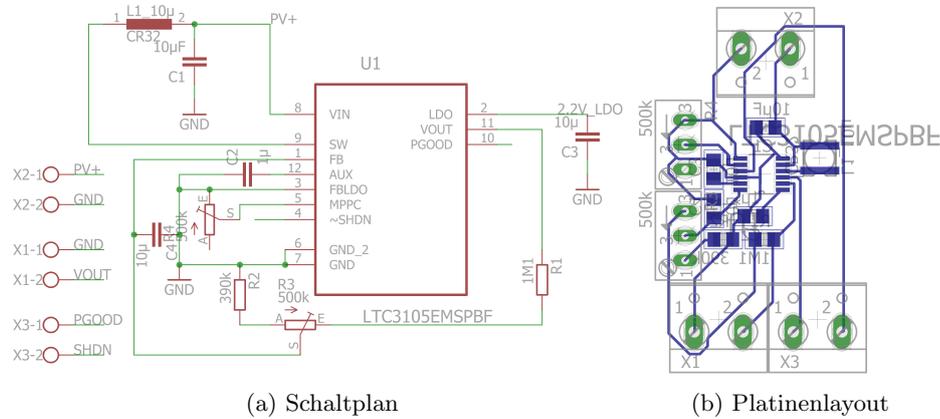


Abb. 3: Laderegler auf Basis des LTC3105

$$V_{OUT} = 1.004\text{ V} \cdot \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (1)$$

$$V_{MPPC} = 10\text{ }\mu\text{A} \cdot R_{MPPC} \quad (2)$$

## 7 Messungen

Im weiteren Verlauf des Projekts werden Messungen einen wesentlicher Bestandteil der praktischen Arbeit darstellen. Sie sind nötig um die ordnungsgemäße

<sup>3</sup> <http://www.cadsoft.de/eagle-pcb-design-software/ueber-eagle/>

Funktion der Ladeelektronik zu verifizieren und sie für den gegebenen Einsatzzweck zu validieren. Die erste Überprüfung durch Messungen mit einem Voltmeter zeigt, dass die Ladeelektronik die Rahmenanforderungen erfüllt. Sowohl die Einstellung der MPP-Spannung als auch der Ausgangsspannung funktioniert zuverlässig und mit ausreichender Genauigkeit ( $< 0.05\text{ V}$ ). Der Superkondensator wird über die PV-Zelle vollständig geladen, während die Ladeschlussspannung stets eingehalten wird. Zusätzlich zur reinen Prüfung der Grundanforderungen, ist eine Quantifizierung der Funktionalität des Aufbaus nötig. Veränderliche Umwelteinflüsse wie variierende Sonneneinstrahlung oder Temperatur beeinflussen maßgeblich die Effizienz und somit auch die Effektivität von EH-Systemen. Die daraus entstehenden unterschiedlichen Auslastungszustände können mit manuellen Messungen nicht praktikabel abgedeckt werden. Weiterhin sind für Simulationen von EH-Systemen Messreihen nötig, die ein möglichst detailliertes und realistisches Abbild des echten Systems darstellen. Zu diesem Zweck wird eine Schaltung aufgebaut, die für ein permanentes Monitoring des EH-Systems verwendet werden kann. Diese Schaltung soll an einem Mikrocontroller betrieben werden, der die Messergebnisse kontinuierlich aufzeichnet. Die Anforderungen an das Messmodul werden nachfolgend angeführt. Der Messbereich soll konfigurierbar sein um bei verschiedenen Mikrocontrollern mit unterschiedlicher Leistungsaufnahme eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen. Für eine hohe Genauigkeit soll es außerdem möglich sein die Schaltung über ein Referenzmessgerät zu kalibrieren und die Messschaltung durch eine eigene Spannungsquelle zu versorgen. Für die Verwendung des Messmoduls unter dem Betriebssystem RIOT soll ein Treiber und eine Messanwendung entwickelt werden, womit die aufgezeichneten Messdaten zur weiteren Analyse an einen PC zu übertragen werden können.

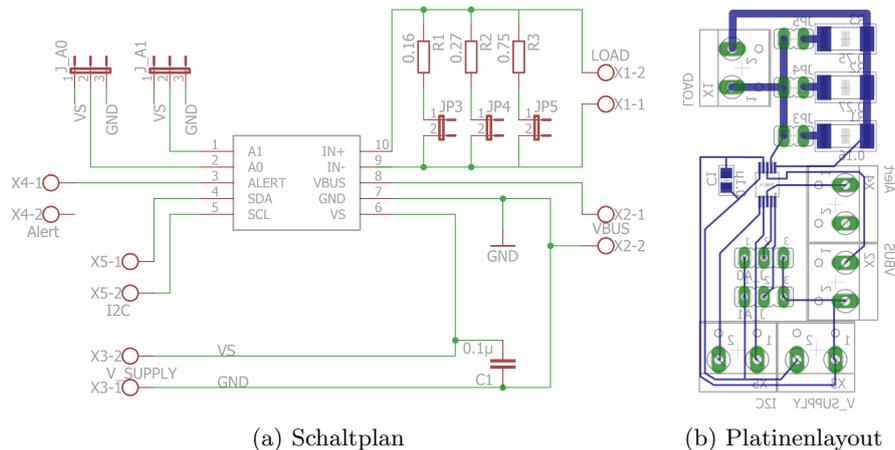


Abb. 4: Messschaltung auf Basis des INA226

Einen für diesen Einsatzzweck geeigneten Baustein bietet Texas Instruments in Form des INA226 an, der gleichzeitig die Spannung und den Strom (über den Spannungsabfall an einem Shunt-Messwiderstand) an einer angeschlossenen Last überwachen kann. Der Baustein erfüllt die zuvor genannten Anforderungen und kann über eine Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C) Schnittstelle an einen Mikrocontroller angebunden werden. Die entworfene Schaltung (Abbildung 4) bietet die Möglichkeit die I<sup>2</sup>C-Adresse des Bausteins und den Messbereich mit Jumper-Brücken einzustellen. In Abbildung 4a ist die Bestückung mit  $R1=0.16\ \Omega$ ,  $R2=0.27\ \Omega$  und  $R3=0.75\ \Omega$  zu sehen. Durch den maximalen Spannungsabfall von 81.92 mV am Messwiderstand (siehe „Shunt voltage input range“ unter [17]), ergeben sich die einstellbaren Messbereiche bis jeweils knapp über 500 mA, 300 mA und 100 mA. Als Mikrocontroller soll die SAM R21 Xplained Pro Evaluierungsplattform von Atmel verwendet werden. Sie ist kompatibel zu RIOT und bietet sowohl eine I<sup>2</sup>C Schnittstelle zur Anbindung des INA226, als auch eine Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) Schnittstelle die per Universal Serial Bus (USB) mit einem Computer verbunden werden kann.

## 8 Ausblick

In diesem Abschnitt wird der geplante Ablauf für die ausstehenden Arbeiten dargelegt. Die Entwicklung des Treibers für das Messmodul steht an erster Stelle. Dazu müssen sämtliche Funktionen des INA226 über eine einfach verwendbare Softwareabstraktionsschicht zugreifbar gemacht werden. Anhand des Datenblattes sind im Anschluss die nötigen Berechnungen für die korrekte Registerkonfiguration des Bausteins durchzuführen. Mit einem Labornetzteil und festen, bekannten Lasten kann dann das Messmodul getestet werden. Mithilfe des Messmoduls können daraufhin Energiemessreihen angefertigt werden um das Langzeitverhalten des Gesamtsystems inklusive Ladeelektronik zu untersuchen und geeignete Daten für spätere Simulationen zu sammeln. Dazu soll eine Testapplikation auf dem EH-System implementiert werden, die eine einfache Aufgabe im Sinne eines kabellosen Sensorknotens durchführt, beispielsweise das regelmäßige Aufzeichnen und Versenden von Temperaturdaten. Auf Basis dieser Daten sollen erste Optimierungskriterien für Energiemanagementfunktionen in RIOT abgewägt und konzipiert werden, welche später, im Rahmen der Masterarbeit, untersucht und weiterentwickelt werden können.

## 9 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit werden die im Grund- und Hauptprojekt entwickelten und noch in Entwicklung befindlichen Teilkomponenten einer Testplattform für EH-Systeme gezeigt. Dazu wird mit einer kurzen Einführung in den Forschungsbereich eingeleitet und dessen Relevanz anhand von aktuellen Prognosen dargelegt. Es werden sowohl Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zum aktuellen

Stand der Forschung, als auch eigene Entwicklungen, Messungen und Ergebnisse verwendet um dem Ziel, eines EH-Systems für energieautarke Sensorknoten, näher zu kommen. Erste Tests der Teilkomponenten liefern positive Resultate und zeigen auf, wo weitere Untersuchungen angesetzt werden können. In diesem Sinne werden zum Abschluss zukünftige Ziele angeführt und die dafür geplanten Schritte erläutert.

## Literatur

- [1] MAIA, Pedro ; CAVALCANTE, Everton ; GOMES, Porfírio ; BATISTA, Thais ; DELICATO, Flavia C. ; PIRES, Paulo F.: On the Development of Systems-of-Systems Based on the Internet of Things: A Systematic Mapping. In: *Proceedings of the 2014 European Conference on Software Architecture Workshops*. New York, NY, USA : ACM, 2014 (ECSAW '14). – ISBN 978-1-4503-2778-7, 23:1–23:8
- [2] GARTNER: *Gartner Says 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015*. 2015 <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>
- [3] BACCELLI, Emmanuel ; HAHM, Oliver ; GÜNES, Mesut ; WÄHLISCH, Matthias ; SCHMIDT, Thomas C.: RIOT OS: Towards an OS for the Internet of Things. In: *Proc. of the 32nd IEEE INFOCOM. Poster*. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, 2013
- [4] GREGORI, M.: *Transmission strategies for wireless energy harvesting nodes*, Diss., Juli 2014
- [5] XIE, L. ; CAI, M.: An In-shoe Harvester with Motion Magnification for Scavenging Energy from Human Foot Strike. In: *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on PP* (2015), Nr. 99, S. 1–1. <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2015.2428618>. – DOI 10.1109/TMECH.2015.2428618. – ISSN 1083-4435
- [6] GORLATOVA, Maria ; SARIK, John ; CONG, Mina ; KYMISSIS, Ioannis ; ZUSSMAN, Gil: Movers and Shakers: Kinetic Energy Harvesting for the Internet of Things. In: *CoRR* abs/1307.0044 (2013). <http://arxiv.org/abs/1307.0044>
- [7] CHAMBE, P. ; CANOVA, B. ; BALABANIAN, A. ; PELE, M. ; COEUR, N.: Optimization of Energy Harvesting Systems for RFID Applications. 1 (2014), Nr. 7, 554. <http://waset.org/abstracts/Electronics-and-Communication-Engineering>. – ISSN 1307-6892
- [8] LE, Trong N. ; PEGATOQUET, Alain ; BERDER, Olivier ; SENTIEYS, Olivier: A Power Manager with Balanced Quality of Service for Energy-Harvesting Wireless Sensor Nodes. (2014). ISBN 9781450331890
- [9] GOOGLE: *Project Loon*, 2013. <https://www.google.com/loon/>
- [10] RENNER, Christian ; UNTERSCHÜTZ, Stefan ; TURAU, Volker ; RÖMER, Kay ; UTZ, Stefan U.: Perpetual Data Collection with Energy-Harvesting Sensor Networks. In: *ACM Transactions on Sensor Networks* 11 (2014), Nr. 1, 1–45. <http://dx.doi.org/10.1145/2566675>. – DOI 10.1145/2566675. – ISSN 15504859
- [11] XIANG, Sudeep Yi; P. Yi; Pasricha: Harvesting-Aware Energy Management for Multicore Platforms with Hybrid Energy Storage. (2013), S. 25–30. ISBN 9781450319027
- [12] RAGHUNATHAN, Vijay ; CHOU, Pai H.: Design and Power Management of Energy Harvesting Embedded Systems. (2006), S. 369–374. ISBN 1595934626
- [13] JU, Qianao ; ZHANG, Ying: Reducing Charge Redistribution Loss for Supercapacitor-operated Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes. In: *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2014 (ENSsys '14). – ISBN 978-1-4503-3189-0, 31–36

- [14] YANG, Hengzhao ; ZHANG, Ying: A study of supercapacitor charge redistribution for applications in environmentally powered wireless sensor nodes. In: *Journal of Power Sources* 273 (2015), 223–236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.061>. – DOI 10.1016/j.jpowsour.2014.09.061. – ISSN 0378–7753
- [15] SAMWHA: *Samwha Electric Catalogue*. [http://www.samwha.co.kr/sw{\\\_}catalogue/catimage/23/catalogue{\\\_}samwha{\\\_}electric.pdf](http://www.samwha.co.kr/sw{\_}catalogue/catimage/23/catalogue{\_}samwha{\_}electric.pdf).  
Version: 2013
- [16] LINEAR TECHNOLOGY: LTC3105 Datasheet. (2015), Nr. V, 1–18. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fb.pdf>
- [17] INSTRUMENTS, Texas: INA226 High-Side or Low-Side Measurement , Bi-Directional Current and Power Monitor with I 2 C Compatible Interface, SBOS547A. (2015). <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>