

Eine Testplattform für Energy Harvesting mit RIOT

Michel Rottleuthner, Thomas C. Schmidt

Internet Technologies Group, Dept. Informatik, HAW-Hamburg, Germany

{michel.rottleuthner, t.schmidt}@haw-hamburg.de

Zusammenfassung—Der Begriff „Internet of Things“ (IoT) beschreibt ein globales Netzwerk in dem Gegenstände des täglichen Lebens von Sensoren und Aktoren repräsentiert werden, die direkt miteinander kommunizieren. Um neue Geräte im IoT zu etablieren, ohne regelmäßig proprietäre Insellösungen zu generieren, bietet sich die Verwendung offener Standards und einer robusten Software-Basis an, die unterschiedlichste Hardware auf eine entwicklerfreundliche Ebene abstrahiert. RIOT ist ein Betriebssystem für das IoT, das diesem Grundsatz folgt und damit eine effiziente Entwicklung von plattformunabhängigen IoT-Anwendungen ermöglicht. Ein Themengebiet, das bisher nur eingeschränkt von RIOT unterstützt wird, besteht in intelligenten Mechanismen zur Energieverwaltung. Insbesondere für energieautarke Systeme, die ihre Energie aus der Umgebung schöpfen, stellen generische Lösungen zur dynamischen Energieverwaltung eine wichtige Funktion des Betriebssystems dar. Mit dieser Arbeit wird ein erster Beitrag geleistet um weitere Entwicklungen und Tests der Energieverwaltung in RIOT zu vereinfachen. Dazu wird eine modulare Testplattform für Energy Harvesting (EH) Systeme aufgebaut, die stationäre Versuche und Feldtests ermöglicht und dabei die Aufzeichnung von Messdaten zur Energiebilanz des zu untersuchenden Systems erlaubt.

I. EINLEITUNG

Die Bausteine des IoT bestehen in der Regel aus kleinen eingebetteten Systemen mit stark eingeschränkten Ressourcen. Dies betrifft nicht nur die Rechenleistung und Speicherkapazität, sondern auch die Energieverfügbarkeit. Neben offenen Standards zur Kommunikation ist eine zuverlässige Energieversorgung der einzelnen Geräte eine wichtige Grundvoraussetzung für ein funktionierendes IoT. Energy Harvesting (EH) bietet als Alternative zu endlichen Batteriekapazitäten oder einer externen Energieversorgung eine Lösung, mit der Sensorknoten dauerhaft energieautark operieren können. Für EH lassen sich gängige Energiequellen wie beispielsweise Sonnen-, Wind- und Wasserkraft nutzen [1]. Auch alternative Ansätze wie Thermoelektrizität, menschliche Bewegungen [2], [3], Vibrationen oder Funkwellen [4] finden Verwendung. Trotz erheblicher Unterschiede zwischen den Eigenschaften der Energiequellen werden auf Software-Ebene des eingebetteten Systems allgemeine Energiesparmechanismen und eine möglichst intelligente Energieverwaltung benötigt, um die Leistungsfähigkeit der Anwendung im Rahmen der Energieverfügbarkeit zu maximieren.

Zur Unterstützung bei der Entwicklung von EH-Systemen und generischen Lösungen zur Energieverwaltung für das IoT-Betriebssystem RIOT [5], [6], wird in dieser Arbeit der Aufbau einer Testplattform vorgestellt. Dazu wird in Abschnitt II die Problemstellung genauer beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt III von einer abstrakten Beschreibung des Ge-

samtsystems ausgehend, über die detailliertere Beschreibung der Einzelkomponenten zum vollständigen Aufbau eines Prototypen in Abschnitt IV hingeführt. Abschließend wird in Abschnitt V eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

II. PROBLEMSTELLUNG UND VERWANDTE ARBEITEN

Eine Schwierigkeit bei der Implementierung generischer Energieverwaltungsmechanismen auf Ebene des Betriebssystems besteht in den stark variierenden Konfigurationsoptionen der verschiedenen Zielplattformen. Beispiele hierfür sind verschiedene Low-Power Modi, MCU-interne Taktkonfigurationen oder Teilabschaltungen von internen und externen Peripheriebausteinen. Weiterhin entstehen zwischen diesen Ressourcen dynamische Abhängigkeiten, die sich zur Laufzeit verändern. Generische Komponenten für die Energieverwaltung auf Betriebssystemebene zu implementieren, welche gleichzeitig effektiv, effizient und zuverlässig sind, ist daher kein triviales Problem.

Der Umfang dieser Problematik lässt sich anhand des eingesetzten Betriebssystems einfach illustrieren. RIOT ist ein offenes IoT-Betriebssystem für ressourcenarme eingebettete Systeme. Es unterstützt verschiedene Architekturen wie z. B. AVR, MSP-430, ARM oder MIPS und bietet Entwicklern die Möglichkeit ihren Code ohne Anpassungen auf allen unterstützten Plattformen einzusetzen. RIOT stellt dazu eine umfangreiche Hardwareabstraktionsschicht bereit und erleichtert dem Entwickler durch bekannte Programmierparadigmen und Standardschnittstellen modulare Anwendungen zu erstellen. Die aktuelle Version von RIOT¹ unterstützt dabei über 80 verschiedene Zielplattformen. Zusätzlich zur großen Anzahl an Plattformen entstehen durch die kontinuierliche Weiterentwicklung Herausforderungen bezüglich Testmethoden und Verifikation der Energieverwaltung. RIOT wird von einer aktiven Community entwickelt und regelmäßig um neue Funktionen erweitert. Durch regelmäßige Änderungen sind automatisierte Tests zur Qualität und Funktionalität des Quellcodes unverzichtbar. Jede kleine Änderung einzeln auf allen relevanten Plattformen zu testen, wäre mit moderatem Aufwand nicht realisierbar. Ein Continuous Integration (CI) System schafft hierbei Abhilfe. Fehler im Code können damit erkannt und behoben werden, bevor sie in die Code-Basis übernommen, oder gar auf einem Produktivsystem eingesetzt werden. Der im IoT-Umfeld besonders wichtige Aspekt des Energieverbrauchs

¹RIOT Release 2017.04 <https://github.com/RIOT-OS/RIOT/tree/2017.04-branch>

wird dabei häufig nicht ausreichend abgedeckt. Das CI System von RIOT bietet derzeit keine Möglichkeit, automatisiert die Auswirkungen von Software-Änderungen auf den Energieverbrauch zu messen, um vorab vor starken Abweichungen zu warnen oder energiebezogene Optimierungen zu quantifizieren. Ein System das CI-Tests zum Energieverbrauch in Form von Unit-Tests durchführt stellen Woehrle et al. in ihrer Arbeit vor [7].

Abseits von Laborversuchen und Simulationen spielen für kabellose Sensorknoten Feldtests eine wichtige Rolle. Für EH-Systeme gilt dies im besonderen Maße, da deren Energieversorgung und weitere Systemparameter von dynamischen Umwelteinflüssen abhängen [8]. So kann eine falsche Annahme oder die Vernachlässigung eines Parameters in Laborversuchen zu Ergebnissen führen, die für einen realen Einsatz des Systems nicht belastbar sind.

III. ENERGY HARVESTING TESTPLATTFORM

Wir stellen eine Testplattform für EH-Systeme und anderen kabellose Sensorknoten vor, die Laborversuche und Feldtests zur Energieverwaltung im RIOT-Kontext vereinfachen soll. Dafür soll die Testplattform ohne externe Geräte Messdaten zum Energieverbrauch des Sensorknotens überwachen und aufzeichnen. Die gewonnenen Daten aus möglichst praxisnahen Tests, sollen anschließend zur realistischen Bewertung von verschiedenen Energieverwaltungsmechanismen in RIOT dienen. Die Plattform wird zu Gunsten der Flexibilität modular und unabhängig von verwendeten Evaluierungsboards gehalten. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Testplattform.

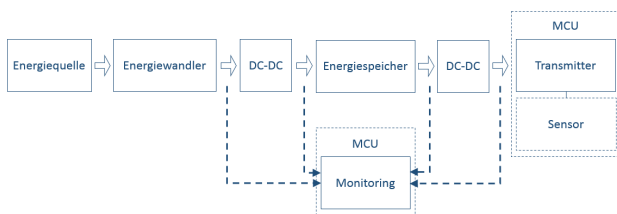


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines EH-Systems mit Monitoring Komponente

In der Testplattform wird eine Photovoltaik- (PV) Zelle verwendet. Diese lädt über ein Lademodul, basierend auf einem Maximum Power Point (MPP) Schaltregler einen Superkondensator. Aus diesem Superkondensator wird über einen DC-DC-Konverter ein Sensorknoten gespeist. Um den Energieverbrauch des Sensorknotens messen und die Messwerte speichern zu können, existiert eine Monitoring Komponente, die aus einem externen Messmodul und einem Datenspeicher in Form einer SD-Karte besteht. Das Messmodul kann je nach Anwendungsszenario in ein- oder mehrfacher Ausführung an einem separaten Mikrocontroller oder an dem Sensorknoten selbst angebracht werden. Sowohl für das Messmodul, als auch für die SD-Karte wird ein Treiber zur Verwendung in RIOT bereitgestellt. Nachfolgend werden die Eigenschaften der einzelnen Komponenten genauer erläutert.

A. Superkondensator

Als Energiespeicher für das EH-System wird ein Superkondensator verwendet. Superkondensatoren bieten gegenüber chemischen Batterien die Vorteile einer weitaus höheren Lebensdauer, eines einfachen Ladeverfahrens und einer hohen physikalischen Robustheit. Allerdings weisen sie eine wesentlich niedrigere Energiedichte und eine höhere Selbstentladung auf [9]. Zur Bestimmung des Ladezustandes lassen sich leichtgewichtige Modelle verwenden [10]. Durch die höhere Lebensdauer von Superkondensatoren sind längerfristige Einsätze im Bereich von Jahrzehnten realisierbar. Abbildung 2 zeigt den verwendeten Superkondensator. Er besitzt eine Kapazität von 100 F und eine Nennspannung von 2.7 V. Nach Gleichung 1 kann damit eine Energiemenge von bis zu 364.5 W s gespeichert werden.



Abbildung 2: Superkondensator

$$E_1 = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} C \cdot (U^2 - U_{min}^2) \quad (2)$$

Da die Spannung an einem Kondensator abfällt, sobald Energie daraus entnommen wird, kann nur ein Teil der Kapazität tatsächlich verwendet werden. Die tatsächlich verwertbare Kapazität eines voll geladenen Kondensators wird somit direkt durch die minimale Eingangsspannung des zweiten DC-DC-Konverters (in Abbildung 1 rechts) bestimmt. Gleichung 2 liefert die verwertbare Energie in Abhängigkeit von Nennspannung U und Minimalspannung U_{min} des Superkondensators.

Je nach Betriebsspannung und Energieverbrauch der verwendeten MCU und der Effizienz des eingesetzten Konverters kann der Wert für U_{min} stark variieren. Mit einem einfachen, handelsüblichen DC-DC-Konverter (ME2108A33) mit fester Ausgangsspannung von 3.3 V und einem großzügig dimensionierten Verbraucher lässt sich experimentell eine Untergrenze bestimmen. Bei einer durchschnittlichen Belastung von 40 mA durch ein Evaluierungsboard mit angeschlossenem Temperatursensor zur Messung und einem über SPI angebundenen LC-Display zur Anzeige, lag die Untergrenze für den erfolgreichen Betrieb des Systems bei knapp unter 1 V. In diesem Beispiel liegt die verwertbare Energiemenge E_2 bei 314.5 W s. Auf den Einsatz eines Konverters der geringere Eingangsspannungen erlaubt, wird vorerst verzichtet. Hierfür sind mehrere Gründe zu nennen. Bei weiter sinkender Spannung wird die Effizienz bei der Entnahme der Energie, als auch beim Wiederaufladen, zunehmend schlechter. Weiterhin verbleiben bei 1 V Ladespannung lediglich ca. 13.7 % der Energie im Kondensator, da sich die Spannung quadratisch auf die Energiemenge im Kondensator auswirkt.

B. Lademodul

Das Lademodul basiert auf dem Schaltregler LTC3105² von Linear Technologies. Der hierzu angefertigte Prototyp bietet die Möglichkeit über ein Potentiometer die Eingangsspannung auf den Maximum Power Point (MPP) der PV-Zelle einzustellen um diese im Leistungsmaximum zu betreiben. Die gewählte Bestückung der Platine erlaubt hierbei die Einstellung im Bereich unterhalb von 5 V. Ein weiteres Potentiometer erlaubt die Einstellung der Ausgangsspannung zwischen 2.24 V und 5.12 V. Abbildung 3 zeigt den Prototypen mit der Seite der Anschlussklemmen und den Potentiometern. Zusätzlich zum Eingang für die PV-Zelle (IN-, IN+) und dem Ausgang für den Superkondensator (OUT-, OUT+) verfügt das Modul über einen Eingang zum Aktivieren und Deaktivieren der Schaltung (SHDN) und einen Ausgang der signalisiert, ob die Ausgangsspannung im Rahmen der Toleranz auf die Zielspannung geregelt wird.

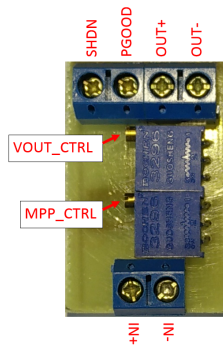


Abbildung 3: Prototyp des Ladereglers

C. Messmodul

Das Messmodul basiert auf dem Texas Instruments Baustein INA226³) und ist in der Lage, gleichzeitig die Spannung und den Strom (über den Spannungsabfall an einem Shunt-Messwiderstand) an einer angeschlossenen Last zu überwachen. Der Baustein verwendet zur Messung einen $\Delta\Sigma$ -ADC mit 500 kHz Abtastrate. Das Modul wird über eine Inter-Integrated Circuit (I²C) Schnittstelle an einen Mikrocontroller angebunden. Der Prototyp bietet die Möglichkeit, die I²C-Adresse des Bausteins mit Jumper-Brücken einzustellen, und so mehrere baugleiche Module gleichzeitig an einem Bus zu betreiben. Der Messbereich ist über Schalter einstellbar, die zwischen den verschiedenen Messwiderständen auswählen. Durch den höchsten messbaren Spannungsabfall von 81.92 mV am Messwiderstand kann der Messbereich durch Auswahl eines geeigneten Widerstands dimensioniert werden. Bei Verwendung eines 750 m Ω Widerstands ergibt sich beispielsweise ein Messbereich bis ca. 109 mA bei einer Auflösung von rund 3.3 μ A. Für einem Messwiderstand von 10 Ω ergibt sich ein Messbereich bis ca. 8 mA bei einer Auflösung von 0.25 μ A. Weiterhin bietet das Modul

²<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fb.pdf>

³<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>

Einstellungen für Konvertierungszeiten zwischen 140 μ s und 8.2 ms und einer automatischen Mittelwertbildung für bis zu 1024 Werte. Für die Verwendung des Messmoduls unter dem Betriebssystem RIOT wird ein Low-Level-Treiber erstellt.

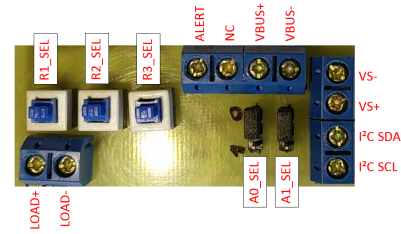


Abbildung 4: Prototyp des Messmoduls

D. Speicher für Messdaten

Ein Einsatzzweck der Testplattform ist es, unter möglichst authentischen Bedingungen Feldtests mit Sensorknoten durchführen zu können. Dazu ist eine Komponente für das Protokollieren der vom Messmodul geliefert Daten erforderlich. Aufgrund des eingeschränkten Volumens des internen Speichers einer klassischen MCU, wird hierzu ein externes Speichermedium benötigt. Ausgewählt werden hierfür SD-Karten. Der Standard für SD-Karten sieht vor, dass jede Karte neben dem nativen SD-Modus über einen SPI-Modus verwendet werden kann. Eine SPI Schnittstelle ist wiederum auf sehr vielen Mikrocontrollern als Peripheriebaustein verfügbar oder kann bei Verfügbarkeit der nötigen GPIO Pins unkompliziert in Software nachgestellt werden. Damit ist eine hohe Kompatibilität zu verschiedensten Mikrocontrollern sichergestellt.

Weiterhin besitzen SD-Karten bereits in ihrem kleinsten Formfaktor *microSD* bis zu 256 GB⁴ Speichervolumen und bieten damit auch für Langzeitmessungen mit erhöhtem Datenaufkommen eine ausreichende Kapazität. Aufgrund der häufigen Verwendung von SD-Karten in Mobilgeräten wie Smartphones kann angenommen werden, dass der Energieverbrauch von SD-Karten auch Feldtests ohne externe Stromversorgung zulässt. Diese Annahme soll in weiteren Versuchen genauer überprüft werden, um die Grenzen des Systems detailliert aufzuzeigen. Ein weiterer Grund für die Verwendung von SD-Karten besteht in der einfachen Handhabung und der direkten Interoperabilität mit handelsüblichen Geräten. Für die Verwendung der SD-Karten wird ein Treiber für RIOT implementiert. Um die Verarbeitung der aufgezeichneten Daten weiter zu vereinfachen, wird außerdem eine Bibliothek für FAT Dateisysteme integriert. Damit können Messdaten vom Mikrocontroller z. B. direkt im CSV-Format abgelegt werden.

IV. AUFBAU DER GESAMTEN TESTPLATTFORM

Ein Prototyp der gesamten Testplattform ist in Abbildung 5 zu sehen. Die hier gezeigte Konfiguration besteht aus zwei

⁴<https://www.sandisk.de/about/media-center/press-releases/2016/western-digital-launches-worlds-fastest-256gb-microsd-card-Broadens-sandisk-memory-card-portfolio-with-new-high-capacity-solutions>

Teilsystemen. Das erste Teilsystem besteht aus einem Atmel SAM R21 Xplained Pro Mikrocontroller (A), welcher Strom- und Spannungsmessungen mit dem Messmodul (C) durchführt und die Ergebnisse auf einer Speicherkarte (B) ablegt. Die dedizierte Ausführung des Messsystems erlaubt eine externe Energieversorgung und damit eine weniger invasive Messung. Alternativ zur lokalen Speicherung auf der SD-Karte können die Messdaten per Funk übertragen werden, wenn die Bandbreite für das gewünschte Messintervall ausreicht und die zusätzliche Belegung des geteilten Funkmediums für den Versuch irrelevant ist.

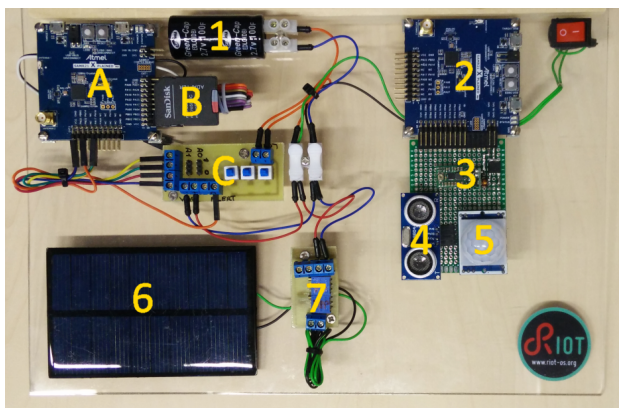


Abbildung 5: Testplattform mit dediziertem Messkontext (A-C) und EH-Präzenssensor (1-7)

Das zweite Teilsystem ist das zu untersuchende EH-System. In diesem Aufbau erfüllt es den Zweck eines einfachen Präzensensors und setzt sich aus dem Superkondensator (1), einem Mikrocontroller (2), zwei Spannungswählern (3) für MCU (3.3 V) und Sensorik (5 V), einem Ultraschallsensor (4), einem PIR (Pyroelektrisch Infrarot) Sensor (5) und einer PV-Zelle (6) mit angeschlossenem Lademodul (7) zusammen. Durch eine Bewegungsdetektion des PIR Sensors wird der EH-Knoten eingeschaltet. Anschließend werden mit dem Ultraschallsensor Distanzmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse über die integrierte IEEE 802.15.4 Funkschnittstelle an eine Basisstation übertragen werden.

Erste Tests mit dem Gesamtaufbau zeigen auf, wo weitere Optimierungen nötig sind. Die physikalische Empfindlichkeit der Messbereichsschalter am Shunt-Messmodul legt die Verwendung von anderen Schaltern nahe. Die verbauten Schalter verändern bei Vibrationen oder Berührungen ihren Innenwiderstand wodurch die Messergebnisse beeinflusst werden und regelmäßige Kalibrierungen nötig werden. Zur Lösung soll auf unempfindlichere Schalter mit einem besonders niedrigen Innenwiderstand gewechselt werden.

Ein allgemeines Problem bezüglich der Feldtests besteht darin, dass viele Evaluierungsboards nicht, oder nur mit Modifikationen verwendet werden können. Auf dem verwendeten Board von Atmel befinden sich z. B. ein fest verbauter Baustein für Debugging-Anwendungen und LEDs welche nicht über die MCU abgeschaltet werden können. Dadurch liegt der Energiebedarf des Evaluierungsboards ohne Modifikationen

teilweise um einen Faktor 1000 über dem Energieverbrauch der darauf verbauten MCU. Um unnötige Energieverbraucher zu eliminieren und damit das volle Potenzial der MCU-eigenen Energiesparmechanismen nutzbar zu machen, müssen daueraktivierte LEDs und Lötbrücken für den Debug-Chip entfernt werden. Auf anderen Plattformen können auch ineffiziente Spannungsregler oder weitere, nicht deaktivierbare Peripherie Probleme bereiten.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND NÄCHSTE SCHRITTE

In dieser Arbeit wurde der Aufbau einer modularen Testplattform für RIOT-basierte EH-Systeme gezeigt. Dazu wurden einzelne Module für diesen Anwendungszweck entworfen, in prototypische Hardware umgesetzt und mit einer Software-Unterstützung durch RIOT ausgestattet. Der vollständige Testaufbau vereinfacht bereits die Durchführung von Messreihen zum Energieverbrauch und zeigt erste Optimierungsmöglichkeiten auf.

Weiterführend sollen Versuche und Messungen an einzelnen Komponenten der Testplattform zeigen, wo die Grenzen des Aufbaus für Feldtests liegen und an welchen Stellen weiterer Optimierungsbedarf besteht. Dazu müssen die Einzelkomponenten der Testplattform hinsichtlich ihres Energiebedarfs genauer untersucht werden. So soll die Speicherkomponente insbesondere auf ihre Eignung für Feldtests ohne externe Energieversorgung geprüft werden. Dafür sollen sowohl Konfigurationen mit verschiedenen Kartenmodellen, als auch verschiedene Puffergrößen zum Akkumulieren von Schreibvorgängen untersucht werden. Außerdem soll der Overhead zum Ein- und Ausschalten der Karte ihrem Energieverbrauch im Sleep-Mode gegenübergestellt werden. Die Ergebnisse sollen in Abhängigkeit der zuvor genannten Systemparameter den Energiebedarf je gespeichertem Byte zeigen, um Vergleichswerte zur Funkübertragung der Daten zu liefern. Auf Betriebssystemebene besteht ein weiteres Arbeitspaket in der Implementierung und Erweiterung von Funktionen zur Steuerung von Low-Power Zuständen der MCU.

LITERATUR

- [1] Faisal K. Shaikh. et al., "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [2] Longhan Xie. et al., "An In-shoe Harvester with Motion Magnification for Scavenging Energy from Human Foot Strike," vol. 20, pp. 3264–3268, December 2015.
- [3] Maria Gorlatova. et al., "Movers and Shakers: Kinetic Energy Harvesting for the Internet of Things," vol. 33, pp. 1624–1639, January 2015.
- [4] P. Chambe. et al., "Optimization of Energy Harvesting Systems for RFID Applications," vol. 8, no. 7, pp. 1147–1150, 2014.
- [5] Emmanuel Baccelli. et al., "RIOT OS: Towards an OS for the Internet of Things," in *Proc. of the 32nd IEEE INFOCOM. Poster*, 2013.
- [6] Peter Kietzmann. et al., "RIOT - das freundliche Echtzeitbetriebssystem für das IoT," in *Internet der Dinge*, Berlin, Nov. 2016, pp. 43–52.
- [7] Matthias Woehrle. et al., "Power monitoring and testing in wireless sensor network development," in *WEWSN*, 2008.
- [8] Bernd-C. Renner, *Sustained Operation of Sensor Nodes with Energy Harvesters and Supercapacitors*. BoD-Books on Demand, 2013.
- [9] Sujesha Sudevalayam. et al., "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," vol. 13, pp. 443–461, 2011.
- [10] Bernd-C. Renner and V. Turau, "State-of-charge assessment for supercap-powered sensor nodes: Keep it simple stupid!" in *International Conference on Networked Sensing (INSS)*, June 2012, pp. 1–6.