

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
<http://informatik.haw-hamburg.de>

Zusammenfassung. In dieser Arbeit wird in das Thema *Energy Harvesting im Internet of Things* eingeführt. Dazu werden die grundlegenden Teilaspekte der Gewinnung, Speicherung und dem Management von Energie beleuchtet und aktuelle und relevante Forschungsarbeiten vorgestellt. Auf dieser Wissensbasis werden Ziele und Anforderungen für eigene nachfolgende Projektarbeiten festgelegt.

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. In einer Veröffentlichung der Analysefirma IHS, welche unter anderem auf Produktzyklen spezialisiert ist, wird gezeigt, dass sich die Zahl der pro Jahr verkauften netzwerkfähigen Geräte im Jahr 2012 auf ca. 4,3 Mrd. belief, während für 2025 bis zu 13,7 Mrd. Geräte pro Jahr erwartet werden [2].

1.1 Forschungsthemen

Auf logischer Ebene wird versucht, vernetzten Geräten ein möglichst detailliertes Abbild ihrer Umgebung zu vermitteln. Dieser Kontext soll dazu dienen den Nutzern dessen Interpretation abzunehmen, um daraus notwendige Handlungen abzuleiten und im Anschluss ggf. deren Ausführung anzuordnen. Um Geräte und Dienste in diesem Maße zu vernetzen sind Technologien nötig, die die Kombination von Informationen aus extrem heterogenen Quellen ermöglichen. Dazu sind neue Softwarelösungen und Protokolle erforderlich die hochdynamisch, skalierbar, sicher und zuverlässig sind. Dem gegenüber steht Hardware die mit jedem Entwicklungsschritt kleiner, energiesparender und kostengünstiger werden soll, um den Anforderungen im IoT zu genügen. Mit Protokollen wie IPv6 und dem dazu kompatiblen 6LoWPAN, für kleine eingebettete Systeme, wurde auf der

Softwareebene bereits ein stabiles Fundament für ein funktionierendes IoT gelegt. Auch zur Abstraktion der starken Heterogenität und damit der Verwendung einheitlicher Kommunikationsverfahren werden Ansätze vorgestellt, die unter anderem durch eine neue Netzwerkstack-Architektur realisierbar sein sollen [3].

In der Arbeit von Gubbi et al. [4] werden als Schlüsselkomponenten für ein kontextsensitives Computing, Hardware in Form von Sensorik und eingebetteten Kommunikationsfunktionen, eine geeignete Middleware mit Datenspeicherungs- und Analyseverfahren in Kombination mit leicht verständlichen Darstellungs- und Interpretationstools genannt. Als elementarer Grundbaustein werden allgegenwärtige Kommunikationsnetzwerke definiert, welche kontextuelle Informationen dorthin übermitteln sollen, wo sie benötigt werden. Während derartige Infrastruktur in Bewohnten Gebieten stetig ausgebaut wird oder bereits ausreichend zur Verfügung steht, sind in größerer Entfernung zu Wohnhäusern und Straßen oder gänzlich abgelegenen Gebieten meist weder eine Anbindung an ein Kommunikations- noch an ein Stromnetz vorhanden. Zur Bereitstellung von Kommunikationsinfrastruktur in diesem Umfeld wird in dieser Arbeit Energy Harvesting als Lösungsansatz vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird die Notwendigkeit einer EH-Versuchsplattform zur Untersuchung und Realisierung derartiger Systeme erörtert.

2 Energy Harvesting

Energy Harvesting (EH) beschreibt einen Prozess bei dem Energie aus der Umgebung gewonnen und gespeichert wird. Dazu wird je nach Anwendung auf Energiequellen mit potentiell sehr unterschiedlichen verfügbaren Energiemengen zurückgegriffen [5].

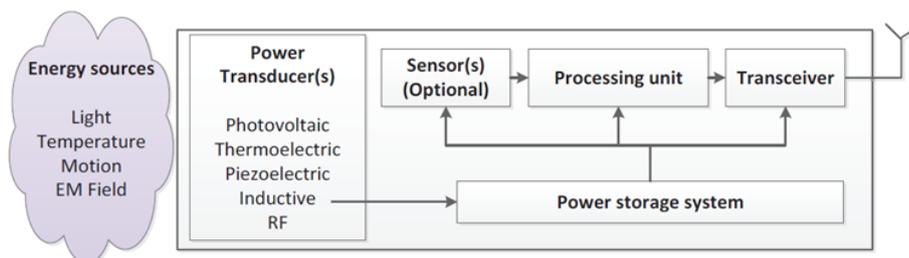


Abb. 1. Modell eines Energy Harvesting Systems [5]

Klassische erneuerbare Energiequellen wie Sonnen-, Wind-, und Wasserkraft lassen sich analog zu Kraftwerken im größeren Maßstab nutzen um Energie zu sammeln. Alternative Ansätze wie Thermoelektrizität, Kinetische Energie aus menschlichen Bewegungen [6], [7], Vibrationen oder Funkwellen [8] nehmen immer weiter an praktischer Bedeutung zu. Abbildung 1 zeigt ein Modell eines EH-Systems. Außerhalb eines eingebetteten Systems werden Energiequellen

dargestellt, die in der Systemumgebung vorkommen. Die Energiequellen können von verschiedenen Energiewandlern innerhalb des Systems verwendet werden um nutzbare, elektrische Energie zu erzeugen. Die erzeugte Energie wird vom Speichersystem gesammelt, welches damit wiederum Sensoren, einen Mikrocontroller und ein Übertragungsmodul versorgt.

2.1 Energy Neutral Operation Condition

Häufiges Ziel von Energy Harvesting Systemen ist es, einen Energy Neutral Operation (ENO) Zustand zu erreichen. Dabei gilt es für den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems, maximal die Menge an Energie zu verbrauchen, die vom System selbst erzeugt werden kann [9]. Stetige Fortschritte im Bereich der Mikroprozessortechnologie erlauben es zunehmend, kleinste vernetzte Geräte unter Einhaltung des ENO-Zustandes zu betreiben. Eine in diesem Rahmen betriebene Netzwerkinfrastruktur kann damit die unter Abschnitt 1.1 genannte Forderung nach allgegenwärtigen Kommunikationsnetzwerken adressieren.

Zur Einführung des EH-Umfeldes werden nachfolgend die Aspekte der Gewinnung, Speicherung und dem Management von Energie genauer dargestellt.

2.2 Energiegewinnung

Die Energiegewinnung in EH-Systemen wird mit Energiewandlern für eine bestimmte Energiequelle umgesetzt, die auf die Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls wie beispielsweise Größe, Platz und Leistung angepasst werden. Für stationäre Systeme im Freien können dazu Photovoltaik (PV) Module, Windgeneratoren, oder Wasserräder verwendet werden, während am Körper getragene EH-Systeme meist auf Kinetische Energie aus Bewegungen oder Energie aus Körperwärme zurückgreifen. Die Menge an verfügbarer Energie variiert zwischen den verschiedenen Quellen stark. Eine Solarzelle liefert z.B. eine um den Faktor 300 größere Energiemenge verglichen mit einem Thermoelektrischen Element gleicher Größe, welches die Energie aus dem Temperaturunterschied zwischen Körper und Umgebung schöpft [5]. Wird darüber hinaus auch die praktikable Größe der energieverzeugenden Elemente am Körper betrachtet, ergeben sich damit weitere Einschränkungen. PV-Systeme haben sich durch ihre problemlose Skalierbarkeit sowohl in leistungsfähigen Kraftwerken als auch in kleinsten Anwendungen wie Taschenrechnern etabliert und bewiesen. Die Sonne als Energiequelle ist vorhersagbar, aber dennoch durch periodische und teilweise auch kurzzeitig auftretende Leistungsschwankungen durch Tageszyklen und Wetterbedingungen typischen Problemen von EH-Systemen ausgesetzt. Aufgrund dieser Eigenschaften wird hiermit die Verwendung von PV-Modulen für eine EH-Versuchsplattform vorgeschlagen. Zur Maximierung der erzeugten Energiemenge wird im Folgenden ein Verfahren vorgestellt das bei PV-Modulen angewendet werden kann.

Maximum Power Point Tracking Beim Maximum Power Point Tracking (MPPT) wird versucht, die energieverzeugenden Elemente zu jeder Zeit an ihrem

Leistungsmaximum zu betreiben. Abbildung 2 zeigt diesen Sachverhalt am Beispiel eines PV-Moduls. Die Leistungscharakteristik des PV-Moduls wird dabei durch eine Strom-/Spannungskennlinie beschrieben, die sich in Abhängigkeit von der Intensität der Sonneneinstrahlung verändert, was sich in der Grafik in den verschiedenfarbigen Linien zeigt. Im linken Graph ist der Strom in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen. Der Rechte Graph zeigt die daraus resultierende Leistungs-/Spannungskennlinie. Diese trägt auf der Y-Achse das Produkt von Strom und Spannung, was wiederum der Leistung entspricht. Die Effizienz und damit auch direkt die Leistungsfähigkeit wird somit durch die Spannung bestimmt, mit welcher der Strom am PV-Modul entnommen wird. Durch die Veränderung der Strom/Spannungskennlinie, beispielsweise durch den Einfluss von Wolkenfeldern auf die Sonneneinstrahlung, entsteht ein sich stetig veränderndes System. In diesem wird durch eine geeignete Regelung versucht immer den aktuellen MPP zu erreichen, der in beiden Graphen mit schwarzen Punkten markiert ist. Für ein EH-System kann es dabei von Vorteil sein die aktuellen Parameter der Energiequelle zur Laufzeit zu überwachen, um mit den zusätzlich zur Verfügung stehenden Informationen das Systemverhalten hinsichtlich des Energieverbrauchs anzupassen [10].

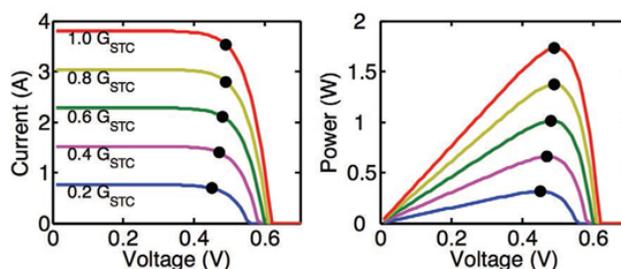


Abb. 2. Strom-/Spannungskennlinien und Leistungs-/Spannungskennlinien eines PV-Panels bei unterschiedlicher Sonnenintensität mit markiertem MPP [10]

2.3 Energiespeicherung

Zur Speicherung der Energie in EH-Systemen bieten sich verschiedene Verfahren an, welche sich hauptsächlich im Speichermedium und dessen inhärenten Eigenschaften unterscheiden. Die in portablen Geräten häufig eingesetzten chemischen Akkus (z.B. Li-Ion) eignen sich durch ihre auf 500 bis 1200 begrenzten Ladezyklen nur bedingt für einen autarken Langzeiteinsatz im Bereich von mehreren Jahren [11]. Allerdings bieten nur derartige Akkus eine hohe Energiedichte, welche für die Überbrückung längerer Perioden ohne Energiezufuhr zwingend notwendig ist. Mehrere Arbeiten haben gezeigt, dass sich für sparsame Systeme auch Kondensatoren bzw. Superkondensatoren einsetzen lassen [12]. Zwar

ist deren Energiedichte wesentlich niedriger (ca. Faktor 10) aber deren Lebensdauer bezüglich Ladezyklen liegt um mindestens Faktor 1000 höher [11]. Ein plausibler Trend der sich hierbei abzeichnet ist die Verwendung hybrider Energiespeichersysteme die aus Akkus und Superkondensatoren bestehen und über eine integrierte Schaltung überwacht und gesteuert werden [13]. Abbildung 3 zeigt ein solches System. Die DC-DC Wandler sind dabei notwendig um die Spannung der jeweils angeschlossenen Komponente auf das vom Mikrocontroller benötigte Niveau zu regeln. Bei der Verwendung von Superkondensatoren ist dies unumgänglich, da der Spannungspegel an diesen durch die Entnahme von Energie stetig weiter abfällt. Dieser Effekt wirkt sich bei Akkus, die innerhalb ihrer Spezifikationen betrieben werden, wesentlich geringer aus. In einem möglichst effizienten EH-System muss der DC-DC Wandler am PV-Modul außerdem dynamisch konfiguriert werden um das zuvor gezeigte MPPT-Verfahren anzuwenden.

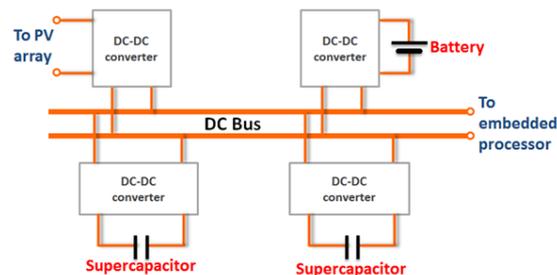


Abb. 3. Hybrides Energiespeichersystem mit gemeinsamen Gleichstrombus auf Basis eines PV-Moduls, zwei Superkondensatoren und einem chemischen Akku [13]

2.4 Energiemanagement

EH-Anwendungen benötigen häufig keinen permanenten Betrieb der Hardware und nur kurzzeitige Funkverbindungen. Dabei ist nur ein Bruchteil der Energie verglichen mit dem Dauerbetrieb notwendig und die energieerzeugenden und energiespeichernden Elemente können relativ klein und damit kostengünstig dimensioniert werden. Um die verfügbare Energie gleichmäßig zu verbrauchen, werden häufig *Duty-Cycling*-Verfahren genutzt, in denen das System überwiegend in einem möglichst sparsamen Modus oder vollständig abgeschaltet verharrt. Zum verrichten der notwendigen Arbeit wird das System periodisch für kurze Zeit aufgeweckt. Der Vorteil liegt hierbei in der einfachen Umsetzung durch integrierte Timer-Peripherie eingebetteter Prozessoren und der flexiblen Möglichkeit zur Anpassung der Parameter für das An/Aus Verhältnis und der Aufwachfrequenz. Dieser primitive Ansatz lässt sich durch *Power Gating* auf System- oder Chipenebene, *Dynamic Voltage and Frequency Scaling* und durch Algorithmen gestützte,

dynamische Scheduling und Übertragungsstrategien weiter optimieren [5]. Auch der Einsatz von prädikativen Systemen kann durch eine Vorhersage des zu erwartenden Energiebudgets weitere Vorteile mit sich bringen [14].

3 Projekte

In diesem Abschnitt werden aktuelle und relevante Projekte vorgestellt um an praktischen Beispielen mögliche Einsatzgebiete einer Versuchsplattform zu zeigen.

3.1 Movers and Shakers

Ein potenziell interessanter Anwendungsfall, in dem alleinig das Verwenden und damit das Mitführen eines Gerätes für dessen Energieversorgung ausreicht, wird in der Arbeit von Gorlatova et al. [7] gezeigt. Die Autoren haben dabei einen umfangreichen Datensatz verwendet, der ursprünglich zur Gestenerkennung mittels Beschleunigungssensoren erstellt wurde. Die Datensätze repräsentieren hierbei dreidimensionale Beschleunigungswerte verschiedener Bewegungen, von über 40 Testpersonen. Zusätzlich wurden mit fünf weiteren Probanden vergleichbare Messungen über ganze Tage und somit reguläre Tagesabläufe durchgeführt. Mit den Datensätzen wurde anschließend unter Zuhilfenahme eines Massenträgheitsgeneratormodells in einer Simulation, die durch die Bewegungen erzeugbare Energie untersucht. Das Ergebnis zeigt dabei die allgemeine Leistungsfähigkeit und damit, die praktische Verwendbarkeit von Energieerzeugung mittels alltäglicher Bewegungen durch einen Taschengenerator. Außerdem zeigen die Ergebnisse Möglichkeiten zur Optimierung der Parameter derartiger Generatoren auf Basis des Gewichtes und der Größe des Nutzers. Mit dem vorgestellten Aufbau lässt sich eine Energieversorgung realisieren, die durchschnittlich zwischen $7 \mu W$ und etwas unter $30 \mu W$ zur Verfügung stellen kann.

3.2 In-shoe Harvester

Eine weitere Arbeit, welche einen ähnlichen Grundgedanken verfolgt aber eine Spezielle Anwendung perfektioniert, stellen Xie und Cai in [6] vor. Die Arbeit zeigt die Leistungsfähigkeit eines EH-Systems, das mit Abmessungen von $80 \text{ mm} \times 47 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ in einen Schuh integriert wird und die Kinetische Energie beim Auftreten in elektrische Energie umwandelt. Hervorzuheben ist hierbei, dass keine piezoelektrischen Elemente, sondern eine kompakt realisierte Mechanische Konstruktion verwendet wird. Dadurch kann mithilfe einer Übersetzung eine Rotation an einem Mikrogenerator ausgelöst werden, welcher mit 1 Watt bei einer Laufgeschwindigkeit von $3,5 \text{ km/h}$ wesentlich mehr Energie erzeugt als bisherige Konstruktionen auf Piezo-Basis.

3.3 Remote Sensing of Wind-Driven Wildfire

Tan und Panda zeigen in ihrer Arbeit [12] die Entwicklung eines typischen Knotens für ein verteiltes Sensornetzwerk. Viele dieser Knoten sollen dabei in einem Überwachungssystem für Waldbrände über große Flächen, an verschiedenen Orten im Wald angebracht werden um die Windrichtung und Geschwindigkeit zu messen. Die erhobenen Daten sollen in Echtzeit Aussagen zur voraussichtlichen Waldbrandgefahr und dessen Ausbreitung zulassen. Der Knoten verfügt über einen kleinen Windgenerator der bei einer Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s eine Leistung von 7.7 mW erzeugt. Das Speichersystem basiert auf einem Superkondensator und Ladeelektronik. Die Messung, Berechnungen und die Funkübertragung wird von einem kleinen eingebetteten System inklusive Funkmodul erledigt, das im *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) Band operiert und für den Betrieb durchschnittlich 3.5 mW Leistung benötigt. Hervorsticht, dass hierbei der Windgenerator sowohl als Messinstrument als auch zur Energieversorgung des Systems verwendet wird.

3.4 Google Project Loon

Das letzte Beispiel zeigt sowohl ein kommerzielles Interesse an autarker Netzwerkinfrastruktur als auch die praktische Umsetzbarkeit im großen Maßstab. Google hat mit Project Loon [15] 2013 ein Projekt gestartet, das über autonom navigierte Wetterballons ein flächendeckendes 4G-Funknetz bereitstellen soll. Die Ballons fliegen dabei in der Stratosphäre auf einer Höhe von ca. 20 km und nutzen die mit der Höhe wechselnden Windrichtungen zur kontrollierten Fortbewegung. Ein Ballon deckt dabei eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von ca. 40 km auf dem Boden ab. Für die Energieversorgung wird die Elektronik mit 100 Watt Solarpanelen bestückt und verwendet als Energiespeicher Lithium-Akkus. Die Ballons sollen automatisch von Bodenstationen gestartet werden und bis zu 100 Tage in der Luft bleiben.

Die oben gezeigten Projekte lassen einen Einblick in das Themengebiet zu und erlauben durch ihre Ergebnisse, erste Rückschlüsse für den Entwurf einer Versuchsplattform zu ziehen. Diese sollen im nächsten Abschnitt erörtert werden.

4 Ziele und Anforderungen

Im Rahmen der folgenden Projektarbeiten im Master soll eine Umgebung vorbereitet werden mit der autarke netzwerkfähige EH-Systeme entwickelt werden können. Die zuvor vorgestellten Arbeiten zeigen die vielfältigen potenziellen Einsatzmöglichkeiten einer solchen Plattform und bieten einen stetig wachsenden Raum für weitere Forschungsansätze. Auf Basis der Plattform sollen Eigenschaften und Möglichkeiten zur Optimierung von EH-Systemen analysiert und evaluiert werden, um beispielsweise Scheduling-, Energiemanagement- und Übertragungsverfahren implementieren und untersuchen zu können. Die Plattform soll zur Verwendung unterschiedlicher Energiequellen kompatibel gehalten

werden. Als Referenzenergiequelle sollen vorerst PV-Module verwendet werden, die die unter 2.2 gezeigten Eigenschaften besitzen und gleichzeitig kostengünstig, gut erforscht und verfügbar sind.

Zur Verwendung in der Versuchsplattform müssen außerdem existierende Hardware- und Softwarekomponenten untersucht oder ggf. entwickelt werden.

Wie zuvor beschrieben, ist ein flexibles Energiespeichersystem eine essenzielle Grundlage der meisten EH-Systeme. Hierfür sollen möglichst effiziente Bauteile für die Ladeelektronik evaluiert werden, die über eine integrierte MPPT-Steuerung verfügen und auch mit sehr geringen Spannungen betrieben werden können. Ein Vergleich aktuell verfügbarer Komponenten lieferte beispielsweise die Modelle BQ25504 von Texas Instruments und LTC3105 von Linear Technology als potentiell geeignet.

Zur Kommunikation wird anvisiert, Module mit verschiedenen Funktechnologien wie WIFI und IEEE 802.15.4-basierte Lösungen auf deren Eignung zu untersuchen und möglichst mehrere Alternativen für Vergleichszwecke auszuwählen. Als Auswahlkriterien werden vorab Energieverbrauch, Leistungsfähigkeit, Kosten und Verfügbarkeit definiert.

Auf Softwareebene muss zwischen einer Lösung mit, und ohne Betriebssystem abgewogen werden. Im Zuge dessen sind potentiell geeignete Betriebssysteme, Tools und Frameworks zu untersuchen, um eventuelle Verbesserungsmöglichkeiten aufzudecken. Weiterhin sollen Metriken festgelegt werden, die mit der Plattform aufgezeichnet werden sollen, um anschließende Analysen und Vergleiche zu ermöglichen. Zur Erfassung der Metriken müssen Methoden, geeignete Sensoren und Peripherie evaluiert werden. Die Entwicklung soll dabei möglichst mit frei zugänglichen Standardtools durchführbar sein.

5 Fazit

In dieser Arbeit wird eine Einführung in das Thema *Energy Harvesting im Internet of Things* gegeben. Die Relevanz des Themas wird durch die Vielfältigkeit der Einsatzgebiete wie der Energieerzeugung durch menschliche Bewegungen oder der Realisierung autarker Netzwerkinfrastruktur belegt. Die Aspekte der Gewinnung, Speicherung und dem Management von Energie werden mit Referenzen auf den aktuellen Stand der Forschung dargestellt. Mit konkreten Projekten und Arbeiten werden themenbezogene Probleme und Fragestellungen, wie die Maximierung der erzeugbaren Energiemenge durch MPPT-Verfahren mit praktischen Beispielen gezeigt. Deren Kernpunkte und Ergebnisse werden hervorgehoben und wiederum auf eigene zukünftige Arbeiten projiziert. Für die anschließenden Projekte wird der Entwurf einer Versuchsplattform als zielführend für die weitere Erforschung des Themengebietes beurteilt. Mit dem erarbeiteten Hintergrund zum Thema werden abschließend die Ziele und Anforderungen für die Entwicklung der geplanten Versuchsplattform festgehalten.

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] IHS: *The Internet of Things explodes*, 2014 (accessed May 18, 2015). <https://www.ihs.com/articles/insights/things-explodes.htm>
- [3] PETERSEN, Hauke ; LENDERS, Martine ; WÄHLISCH, Matthias ; HAHM, Oliver ; BACCELLI, Emmanuel: Old Wine in New Skins? Revisiting the Software Architecture for IP Network Stacks on Constrained IoT Devices. In: *1st Int. Workshop on IoT Challenges in Mobile and Industrial Systems (IoT-Sys15)*. Florence, Italy : ACM, May 2015
- [4] GUBBI, Jayavardhana ; BUYYA, Rajkumar ; MARUSIC, Slaven ; PALANISWAMI, Marimuthu: Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. In: *Future Gener. Comput. Syst.* 29 (2013), September, Nr. 7, 1645–1660. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>. – DOI 10.1016/j.future.2013.01.010. – ISSN 0167–739X
- [5] GREGORI, M.: *Transmission strategies for wireless energy harvesting nodes*, Diss., Juli 2014
- [6] 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
- [7] 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>
- [8] 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
- [9] LE, Trong N. ; PEGATOQUET, Alain ; BERDER, Olivier ; SENTIEYS, Olivier: A Power Manager with Balanced Quality of Service for Energy-harvesting Wireless Sensor Nodes. In: *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 2014 (ENSys '14). – ISBN 978–1–4503–3189–0, 19–24
- [10] LIN, Xue ; WANG, Yanzhi ; PEDRAM, Massoud ; KIM, Jaemin ; CHANG, Naehyuck: Event-driven and Sensorless Photovoltaic System Reconfiguration for Electric Vehicles. In: *Proceedings of the 2015 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*. San Jose, CA, USA : EDA Consortium, 2015 (DATE '15). – ISBN 978–3–9815370–4–8, 19–24
- [11] 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 (ENSys '14). – ISBN 978–1–4503–3189–0, 31–36
- [12] TAN, Yen K. ; PANDA, S.K.: Self-Autonomous Wireless Sensor Nodes With Wind Energy Harvesting for Remote Sensing of Wind-Driven Wildfire Spread. In: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 60 (2011), April, Nr. 4, S. 1367–1377. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2010.2101311>. – DOI 10.1109/TIM.2010.2101311. – ISSN 0018–9456

- [13] XIANG, Yi ; PASRICHA, Sudeep: Harvesting-aware Energy Management for Multicore Platforms with Hybrid Energy Storage. In: *Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Great Lakes Symposium on VLSI*. New York, NY, USA : ACM, 2013 (GLSVLSI '13). – ISBN 978-1-4503-2032-0, 25–30
- [14] HSU, J. ; ZAHEDI, S. ; KANSAL, A. ; SRIVASTAVA, M. ; RAGHUNATHAN, V.: Adaptive Duty Cycling for Energy Harvesting Systems. In: *Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED'06. Proceedings of the 2006 International Symposium on*, 2006, S. 180–185
- [15] GOOGLE: *Project Loon*, accessed May 18, 2015. <https://www.google.com/loon/>