

Diss. ETH No. 22717

# **Power Subsystem Design and Management for Solar Energy Harvesting Embedded Systems**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Bernhard Raget Buchli**

M.Sc. EE, University of Wisconsin-Madison, USA

born on June 13, 1976

citizen of Safien, GR

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Lothar Thiele, examiner

Prof. Dr. Luca Benini, co-examiner

Dr. Jan Beutel, co-examiner

2015

# Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) have reached a level of maturity, at which they have become a feasible option for monitoring processes of interest, when wired infrastructure is not possible. Due to remote and inaccessible deployment sites of such networks, they can generally not rely on reliable power sources, but require batteries to supply the energy for the system to perform its intended task. However, the finite energy store imposed by batteries directly limits the system's performance and lifetime. Ambient energy harvesting has been shown to be a promising way to boost the performance and lifetime of WSNs. Unfortunately, enhancing a battery powered device with energy harvesting capabilities will by itself neither provide a lower bound on the expected sustainable performance level, nor guarantee uninterrupted long-term operation.

This thesis addresses the design and runtime management of the power subsystem for solar energy harvesting embedded systems. We demonstrate that for enabling long-term operation of such systems, a paradigm shift both in the design approach, and the runtime management of the energy is necessary. We provide an end-to-end power management solution, which consists of (i) a power subsystem capacity planning approach, and (ii) two novel dynamic power management schemes that maximize the minimum achievable performance level, while ensuring that long-term, i.e., multi-year operation can be sustained. Compared to three State-of-the-Art approaches, our solution maximizes the long-term sustainable minimum system performance or perform equivalently, but require a smaller solar panel and/or smaller battery. Our theoretical results are supported by simulations using 10 years of solar energy measurements from various geographical locations. To demonstrate the improvements of proper power subsystem design and management, we further present a case study with a real-world WSN deployment for geoscientific research in a high-alpine environment.

Specifically, this thesis presents the following contributions to the State-of-the-Art:

- We present a systematic method for power subsystem capacity planning, i.e., proper sizing of the solar panel and battery, for solar energy harvesting embedded systems.

- We present two novel dynamic power management schemes that enable the system to maximize the minimum performance level at runtime, while ensuring that uninterrupted operation over time periods on the order of years may be sustained.
- We present a light-weight battery State-of-Charge approximation algorithm that can provide runtime information about the battery fill level without requiring special purpose hardware. Moreover, we show that this approach can be used to infer the harvested energy.
- Through extensive simulation we show that our end-to-end solution achieves significantly better results in terms of minimum long-term sustainable performance level, duty-cycle stability, and overall energy efficiency when compared to 3 State-of-the-Art approaches.
- Finally, using a real-world scientific project, we demonstrate the improvements in system utility for the end-user application that can be gained with our solution.

# Zusammenfassung

Drahtlose Sensornetzwerke (WSN) haben einen hohen Reifegrad erreicht, so dass sie eine praktikable Lösung für die Überwachung von verschiedenen Prozessen sind, wenn verdrahtete Infrastruktur nicht möglich ist. Aufgrund der oft schwer zugänglichen Einsatzorte solcher Netzwerke können die einzelnen Geräte in der Regel nicht zuverlässig mit Strom versorgt werden, sondern es sind Batterien erforderlich, um die Energie für das System zu liefern. Allerdings begrenzt der endliche Energiespeicher von Batterien die Leistung und Lebensdauer des Systems. Energieentnahme aus der Umgebung (ambient energy harvesting) ist ein vielversprechender Weg, um die Leistung und Lebensdauer des WSNs zu steigern. Leider verbessert die Bestückung eines batteriebetriebenen Gerätes mit Energy-Harvesting-Fähigkeiten weder automatisch das erwartete Leistungsniveau, noch garantiert es ununterbrochenen Langzeitbetrieb.

Diese Dissertation befasst sich mit dem Design und der Laufzeitverwaltung des Stromversorgungssystem für eingebettete Systeme mit Sonnenenergiegewinnungsfähigkeiten. Es wird gezeigt, dass zur Ermöglichung von langfristigem Betrieb dieser Systeme ein Paradigmenwechsel sowohl für den Designansatz als auch für die Laufzeitverwaltung der verfügbaren Energie notwendig ist. Es wird eine komplette Power-Management-Lösung vorgestellt, welche aus einem Kapazitätsplanungsansatz des Energieversorgungssystem und aus zwei neuen dynamischen Power-Management-Algorithmen besteht, welche dafür sorgen, das minimale Leistungsniveau zu maximieren. Sie stellen gleichzeitig sicher, dass langfristiger, das heisst, mehrjähriger Betrieb aufrechterhalten werden kann.

Im Vergleich zum letzten Stand der Technik, maximiert unsere Lösung die langfristige nachhaltige Mindestleistung des Systems oder erreicht mindestens äquivalente Performanz, aber mit einer kleineren Solarzelle und/oder kleineren Batterie. Unsere theoretischen Ergebnisse werden durch Simulationen mit Sonnenenergiemessungen während 10 Jahren an verschiedenen geografischen Standorten unterstützt. Um die Nutzungssteigerung unseres Ansatzes zu demonstrieren, evaluierten wir unsere Lösung anhand einer Fallstudie mit einer realen WSN-Installation für die geowissenschaftliche Forschung in einer hochalpinen Umgebung.

Diese Dissertation macht die folgenden Beiträge zum letzten Stand der Technik:

- Wir präsentieren eine systematische Methode für die Kapazitätsplanung des Stromversorgungs-System, das heisst, die richtige Dimensionierung der Solarzelle und Batterie für eingebettete System mit Sonnenenergiegewinnung.
- Wir präsentieren zwei neue dynamische Power-Management-Algorithmen, die dem System ermöglichen das minimale Leistungsniveau während der Laufzeit zu maximieren und gleichzeitig sicherzustellen, dass ein ununterbrochener Betrieb über Zeiträume in der Größenordnung von mehreren Jahren aufrechterhalten werden kann.
- Wir präsentieren einen Batteriefüllstand Approximations-Algorithmus, welcher während der Laufzeit, ohne auf spezielle Hardware angewiesen zu sein, Informationen über den Batteriefüllstand zur Verfügung stellt. Darüber hinaus zeigen wir, dass mit diesem Ansatz auch die gewonnene Energie approximiert werden kann.
- Durch umfangreiche Simulationen zeigen wir, dass unsere Lösung deutlich bessere Ergebnisse in Bezug auf das minimale, und langfristig aufrechterhaltene Leistungsniveau, die Stabilität des Auslastungsgrades und der gesamten Energieeffizienz erzielt als 3 Ansätze aus der Literatur.
- Mit einem realen, wissenschaftlichen Projekt zeigen wir die Verbesserungen in der Nützlichkeit des Systems für die Endnutzeranwendung, welche mit unserer Lösung gewonnen werden können.