

Diss. ETH No. 18247

Power Management in Energy Harvesting Embedded Systems

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
CLEMENS MOSER
Dipl.-Ing. B.Sc. TU Munich

born 13.02.1979
citizen of
Switzerland and Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Lothar Thiele, examiner
Prof. Dr. Rolf Ernst, co-examiner

2009

Abstract

Energy harvesting (also known as energy scavenging) is the process of generating electrical energy from environmental energy sources. There exists a variety of different energy sources such as solar energy, kinetic energy, or thermal energy. The term has been frequently applied in the context of small autonomous devices such as wireless sensor nodes.

This thesis addresses power management in energy harvesting embedded systems. As an example scenario, we focus on wireless sensor nodes which are powered by solar cells. We demonstrate that classical power management solutions have to be reconceived and/or new problems arise if perpetual operation of the system is required. In particular, we provide a set of algorithms and methods for different application scenarios, including real-time scheduling, application rate control as well as reward maximization. Goal is to optimize the performance of the application subject to given energy constraints. Compared to state-of-the-art approaches, our methods optimize the system performance or achieve the same performance as state-of-the-art approaches requiring, e.g., smaller solar cells and smaller batteries. Furthermore, we show how to dimension important system parameters like the minimum battery capacity or a sufficient prediction horizon. Our theoretical results are supported by simulations using long-term measurements of solar energy in an outdoor environment. Furthermore, to demonstrate the practical relevance of our approaches, we measured the implementation overhead of our algorithms on real sensor nodes.

Zusammenfassung

Als Energy Harvesting (oder Energy Scavenging) bezeichnet man die Erzeugung elektrischer Energie aus z.B. Sonnenenergie, Vibrationen oder Umgebungstemperatur. Der Begriff wird häufig im Zusammenhang mit miniaturisierten, eingebetteten System verwendet. Entsprechende Energiewandler machen besonders dann Sinn, falls drahtlose Technologien zum Einsatz kommen oder Batterien als Energiequellen keine ausreichende Betriebsdauer garantieren.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Optimierung eingebetteter Systeme welche ihre Energie mittels Energy Harvesting aus der Umgebung entnehmen. Typischerweise werden Batterien in solchen Systemen nicht mehr als primäre Energiequellen, sondern nur noch als Zwischenspeicher verwendet. Am Beispiel von solarbetriebenen, drahtlosen Sensorknoten wird gezeigt, wie geeignete Algorithmen die Energieversorgung langfristig optimieren können. Ziel dieser Optimierung ist es, unterbrechungsfreien Betrieb des Systems zu gewährleisten und gleichzeitig die verfügbare Energie möglichst sinnvoll zu nutzen. Zu diesem Zweck werden in dieser Arbeit verschiedene Anwendungsszenarien untersucht. Darüber hinaus werden Methoden zur Berechnung der notwendigen Speicherkapazität der Batterie vorgestellt, welche für einen unterbrechungsfreien Betrieb notwendig ist. Die entwickelten Algorithmen wurden teilweise auf Sensorknoten implementiert und getestet. Zudem haben Simulationen gezeigt, dass unsere Algorithmen die langfristige Energieversorgung im Vergleich zu State-of-the-Art Lösungen deutlich verbessern. Die durchgeführten Simulationen basieren auf Messdaten solarer Energie, die in Langzeitmessungen von einer Photovoltaikanlage aufgezeichnet wurden. Auf der Grundlage dieser Messdaten wurden unsere Algorithmen ausgiebig getestet.