

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

# System-Level Design of Energy-Efficient Sensor-Based Human Activity Recognition Systems

A Model-Based Approach

## **Dissertation**

to obtain the academic degree

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

of the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering  
at the University of Rostock

submitted by

**Florian Grützmaker**

born on 13.01.1990 in Crivitz, Germany

from Rostock

Rostock, March 29th, 2021

## Abstract

Today, we are surrounded by a plethora of different processor systems in our everyday life and almost every situation. Mobile and wearable devices are equipped with embedded processors to provide advanced functionality and assistance in everyday situations. Furthermore, embedded systems can be found in our daily vicinity, be it at home, in offices, public places or in transport. Besides pervasive integration, embedded systems have seen a transformation from single processor systems to powerful multi-processor systems on chip, in order to overcome technological limitations in form of heat dissipation. Furthermore, the diversity of processor architectures has increased to heterogeneous multi-processor systems that offer trade-offs between energy demands, computational power, and flexibility for a wide range of application-specific demands. With technological advances, assistive systems have seen a further development by industry and research as well. As a fundamental requirement, in order to provide us with relevant services, our current *activity* needs to be known by the assistive system. Consequently, assistive systems must be able to infer our activities automatically by observations, without additional, possibly obtrusive interaction.

Inertial sensors have gained an important role for such observations, as advances in micro-electro-mechanical systems technology allow them to be manufactured as small and unobtrusive, but also energy-efficient and cheap components. Since then, sensor-based human activity recognition systems have increasingly been subject to research and development towards high recognition accuracy, but also many conceptual and algorithmic optimizations with respect to low latency and energy efficiency have been developed. The diversity and availability of computational resources as well as algorithmic solutions leads to promising possibilities for system designs such that software components can be executed on suitable processing units, in order to meet application-specific requirements on latency, data throughput, and energy consumption.

However, the huge number of possibilities comes at the price of a vast design space, that becomes increasingly hard to explore. In order to reduce design time, methods to quantify and thus substantiate design decisions early in the design process become crucial. The thesis at hand proposes model-based design and analysis techniques as a possible solution. To this end, dataflow models of computation are evaluated towards their ability to capture abstracted behavior of human activity recognition systems. These models can further capture design decisions with respect to mappings, schedules, functional parameters, and existing conceptual optimizations of human activity recognition system, and allow a formal analysis of extra-functional properties.

To this end, the thesis at hand contributes an evaluation of state-of-the-art dataflow models of computation regarding their suitability for a model-based design and analysis of human activity recognition systems, in terms of expressiveness and analyzability, as well as model accuracy. Different aspects of state-of-the-art human activity recognition systems have been modeled and analyzed. Based on existing methods, novel analysis approaches have been developed to acquire extra-functional properties like processor utilization and data communication rates, which directly influence energy consumption of the system. Furthermore, energy consumption models are introduced with which hardware elements can be annotated, in order to estimate the impact of design decisions on the energy consumption at design time.

## Kurzfassung

In unserem heutigen Alltag sind wir von einer Vielzahl verschiedener Prozessorsysteme umgeben. Mobile und tragbare Geräte sind mit unterschiedlichsten Prozessoren ausgestattet, um erweiterte Funktionalitäten und Unterstützung bereitzustellen. Darüber hinaus finden wir eingebettete Systeme in unserer täglichen Umgebung, sei es zu Hause, in Büros, an öffentlichen Orten oder im Transportwesen. Neben allgegenwärtiger Integration haben sich eingebettete Systeme von Einzel-, zu leistungsstarken Multiprozessorsystemen entwickelt, um technologische Einschränkungen durch unzureichende Wärmeableitung zu überwinden. Darüber hinaus hat die Vielfalt an heterogenen Multiprozessorsystemen zugenommen, die Abwägungen zwischen Energiebedarf, Rechenleistung und Flexibilität für anwendungsspezifische Anforderungen ermöglicht. Mit dem technologischen Fortschritt wurden auch Assistenzsysteme durch Industrie und Forschung weiterentwickelt. Als Grundvoraussetzung um uns relevante Dienste bereitstellen zu können, muss unsere aktuelle *Aktivität* dem Assistenzsystem bekannt sein. Folglich müssen Assistenzsysteme in der Lage sein, unsere Aktivitäten eigenständig durch Beobachtungen abzuleiten.

Inertialsensorik hat für solche Beobachtungen eine wichtige Rolle eingenommen, da sie dank der Fortschritte in der mikroelektromechanischen Systemtechnologie als kleine und unauffällige, aber auch energieeffiziente und kostengünstige Komponenten hergestellt werden können. Seitdem wurden sensorgestützte Aktivitätserkennungssysteme zunehmend erforscht und entwickelt, um eine hohe Erkennungsgenauigkeit zu erreichen. Es wurden jedoch auch konzeptionelle und algorithmische Optimierungen hinsichtlich Latenz und Energieeffizienz entwickelt. Die Vielfalt und Verfügbarkeit von Rechenressourcen sowie Algorithmen bietet vielversprechende Möglichkeiten für den Systementwurf, sodass Softwarekomponenten auf geeigneten Prozessoreinheiten ausgeführt werden können, um anwendungsspezifische Anforderungen zu erfüllen.

Der Entwurfsraum wird mit zunehmender Größe jedoch schwieriger zu explorieren. Um die Entwurfszeit zu verkürzen, werden Methoden zur Quantifizierung und dadurch zur Untermauerung von Entwurfsentscheidungen früh im Entwurfsprozess von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Arbeit schlägt modellbasierte Entwurfs- und Analysetechniken als mögliche Lösung vor. Zu diesem Zweck werden Datenflussberechnungsmodelle dahingehend bewertet, ob sie das abstrahierte Verhalten von Aktivitätserkennungssystemen erfassen können. Diese Modelle können Entwurfsentscheidungen in Bezug auf Bindung, Ablaufplanung, Funktionsparameter und vorhandene konzeptionelle Optimierungen von Aktivitätserkennungssystemen erfassen und eine extrafunktionale Eigenschaftsprüfung ermöglichen.

Zu diesem Zweck liefert die vorliegende Arbeit eine Bewertung bestehender Datenflussberechnungsmodelle hinsichtlich ihrer Eignung für den modellbasierten Entwurf und Analyse von Aktivitätserkennungssystemen basierend auf ihrer Ausdrucksmächtigkeit und Analysierbarkeit sowie Modellgenauigkeit. Verschiedene Aspekte modernster Aktivitätserkennungssysteme wurden dazu modelliert und analysiert. Basierend auf vorhandenen Methoden wurden neuartige Analyseansätze entwickelt, um extrafunktionale Eigenschaften wie Prozessorauslastung und Datenkommunikationsraten zu berechnen, die den Energieverbrauch des Systems direkt beeinflussen. Darüber hinaus werden Energieverbrauchsmodelle eingeführt, mit denen Hardware-Elemente annotiert werden können, um die Auswirkungen von Entwurfsentscheidungen auf den Energieverbrauch zur Entwurfszeit abzuschätzen.