

UNIVERSITY OF ROSTOCK

DISSERTATION

**Analog/Mixed-Signal Modeling Methodologies
for Heterogeneous Virtual Prototypes and Their
Impact on Smart Sensor Development**

Author:

Alexandra KÜSTER

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

Alexandra Küster

born on 12.08.1996 in Bad Soden a. Ts., Germany

from Reutlingen

Rostock, April 26, 2025

Kurzfassung

MEMS-Sensoren sind aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Auch wenn es uns meistens nicht so bewusst ist, sind diese kleinen und unauffälligen mikroelektromechanischen Systeme unsere ständigen Begleiter, sei es im Handy, der Smartwatch, den Kopfhörern, zuhause oder im Auto. Ihre Anwendungen sind vielfältig und reichen von einfachen Mechanismen wie der Erkennung, wenn das Handy gedreht wird, um den Bildschirminhalt zu rotieren, bis zu komplexer Aktivitätserkennung. Dabei verändert sich der Konsumgütermarkt rasant, was einen hohen Druck auf die Hersteller ausübt, die Entwicklungszeit neuer Sensorgenerationen zu verkürzen. Trotzdem werden die Systeme moderner Sensoren immer komplexer, um den erhöhten Anforderungen und neuen Anwendungsfällen gerecht zu werden. Immer öfter integrieren Sensoren Mikroprozessoren, einerseits um kontinuierliche Kompensationen und Selbstkalibrierungen zu ermöglichen und andererseits, um Algorithmen zur Sensorfusion oder ganze Applikationen direkt auf dem Sensor zu berechnen, was in sogenannten *intelligenten MEMS-Sensoren* mündet.

Diese beiden konträren Verläufe erfordern effiziente Entwicklungsmethoden für moderne Sensoren. Ein vielversprechender Ansatz stammt hierbei aus dem Bereich komplexer Digitalsysteme. Virtuelle Prototypen haben sich als effektives Vehikel zur Unterstützung des Hardware-Software-Codesigns etabliert. Ein virtueller Prototyp definiert hierbei ein simulierbares Systemmodell, das die Funktionalität der digitalen Hardware widerspiegelt und eine gemeinsame Analyse von Hardware und Software ermöglicht. Dies unterstützt einen früheren Start der Software-Entwicklung (bevor die Hardware verfügbar wird), effizientere Fehlersuche durch die erhöhte Beobachtbarkeit des Prototypen sowie frühe Integrationstests, um sicherzustellen, dass Hardware und Software aufeinander abgestimmt sind.

Die Strategie virtueller Prototypen wird heutzutage bereits für die MEMS-Sensorentwicklung genutzt. Allerdings liegt auch hier der Fokus auf dem Digitalteil. Ein MEMS-Sensor beinhaltet allerdings neben dem Digitalteil ein mikroelektromechanisches System und eine analoge Ausleseschaltung. Dadurch ist das System inherent heterogen und wird nur unzureichend von einem digitalen virtuellen Prototypen abgebildet. Besonders bei Firmware, die oft sehr eng mit der Hardware interagiert, kann diese limitierte Abdeckung der Domänen zu Problemen führen. Testfälle müssen an die Begebenheiten des Prototypen angepasst werden, wodurch die Wiederverwendbarkeit leidet und neue Fehlerquellen geschaffen werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zu diesem Zweck mit Methoden für die Modellierung und Verwendung von heterogenen virtuellen Prototypen, also Systemmodellen, die alle Domänen eines MEMS-Sensors abdecken und die gemeinsame Simulation von mechanischen, analogen und digitalen Komponenten sowie der Software unterstützen. Sie untersucht den Einfluss eines solchen Modells auf die Sensorentwicklung, indem verschiedene Bereiche der Entwicklung betrachtet werden. Die Arbeit demonstriert, dass heterogene virtuelle Prototypen die Entwicklung von Firmware sowie Trim- und Testalgorithmen sichtbar unterstützen können. Dabei werden Anforderungen an diese Modelle abgeleitet, die im Anschluss durch verschiedene neu entwickelte Modellierungsmethoden unterstützt werden sollen. Der Fokus liegt dabei auf AMS (engl. analog/mixed-signal) Modellen, da die digitale Modellierung auf dieser Ebene bereits Stand der Technik ist. Zu diesem Zweck werden Strategien aufgezeigt, um die Simulationsgeschwindigkeit zu erhöhen und die Wiederverwendung existierender Modelle zu ermöglichen. Darüber hinaus werden semi-symbolische Simulationen verwendet, um eine bessere Abdeckung des Zustandsraums zu ermöglichen.

Abstract

MEMS sensors have become an integral part of everyday life. Although often invisible to us, we are surrounded by these small micro-electromechanical parts pervasively. They are hidden in smartphones, wearables, hearables, at home or in cars. Their applications are manifold ranging from simple mechanisms that let our display content rotate when rotating the phone up to complex features like (human) activity recognition. Modern sensor systems become more and more complex to fulfill the ever-increasing requirements and to enable emerging use cases. They are increasingly integrating microprocessors, on the one hand to enable continuous compensation and self-calibration, and on the other hand to calculate algorithms for sensor fusion or entire applications directly on the sensor resulting in *smart MEMS sensors*. At the same time, the fast changing consumer market puts high pressure onto the sensor developers to shorten time-to-market for future sensor generations.

These two contradicting developments require the adaption of old and the invention of new and more efficient development methodologies. A promising approach has been used for complex systems-on-chip for years. *Virtual prototypes* have evolved as an effective approach to support the hardware/software co-design. A virtual prototype thereby defines a system-level simulation model that enables the joint analysis of hardware and software. As a consequence, the software development can start earlier, becomes more efficient through the increased observability and debugging features of the virtual prototype, and early integration tests are enabled to ensure the proper interaction of hardware and software.

Virtual prototypes are nowadays already in use for the sensor development. However, the focus is still on the digital subsystem although the mechanical and analog components form a significant portion of the overall system. Hence, most existing virtual prototypes cover the inherently heterogeneous systems insufficiently. The limited coverage is especially problematic for the design of low-level firmware that interacts closely with the hardware. Test cases have to be adapted to the characteristics of the prototype, which reduces their reusability and induces new sources of error.

As a remedy, the thesis at hand deals with methodologies for the modeling and usage of heterogeneous virtual prototypes, i.e. system-level models that cover all domains of a smart MEMS sensor and enable the joint simulation of mechanical, analog/mixed-signal, digital and software components. The impact of such a model on the sensor development is investigated by examining different areas of development. It is demonstrated that heterogeneous virtual prototypes effectively support the development of firmware as well as trim and test algorithms. Thereby, requirements for these models are derived: early availability, high simulation performance and coverage of the analog state space. In a consecutive step, various new modeling methodologies are introduced to account for these requirements. Focus is thereby laid onto analog/mixed-signal models as digital virtual prototyping is already state-of-the-art. Strategies are developed to increase the solver efficiency of SystemC AMS and support the reuse of existing models for virtual platforms. Moreover, semi-symbolic simulation is introduced to increase the coverage of the analog state space.