



# Sensor-in-the-Loop

Eine neuartige Debugging-Architektur  
für intelligente Sensoren

## Dissertation

VORGELEGT VON:

**Daniel Gis,**

geboren am 25.06.1984 in Pasewalk

zur Erlangung des akademischen Grades eines

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

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

EINGEREICHT AM:

06.02.2023

# Zusammenfassung

Die Digitalisierung und Automatisierung unterschiedlichster Prozesse ist ein Kernthema unserer modernen Gesellschaft. Dies betrifft sowohl unser alltägliches Leben mit automatisierten Gebäuden und intelligenten Assistenten als auch das industrielle Umfeld mit intelligenten Fabriken und autonomen Systemen. All diese Anwendungen haben eine Gemeinsamkeit; um mit der physikalischen Welt zu interagieren, benötigen sie eine Vielzahl von Sensoren. Aufgrund der immer höheren Integration von Mikroprozessoren hat sich der Markt der Sensoren gewandelt. Immer mehr Sensoren werden als sogenannte intelligente Sensoren gefertigt. Das bedeutet, dass die Sensoren neben ihren Sensorelementen integrierte Recheneinheiten und Speicherelemente besitzen. Dies ermöglicht es u.a. durch Firmware die ursprünglichen Sensordaten bereits auf dem intelligenten Sensor weiterzuverarbeiten. Die Erstellung von Firmware für diese Systeme stellt Entwickler allerdings vor besondere Herausforderungen.

Diese Arbeit stellt Konzepte und Implementierungen vor, welche die Erstellung von Firmware für intelligente Sensoren komfortabler und effizienter gestalten. Aufgrund der Interaktion mit der physikalischen Welt ist es besonders herausfordernd, Firmware und Algorithmen, welche abhängig von den Sensordaten sind, zu validieren und zu testen. Die vorgestellte Sensor-in-the-Loop (SiL)-Architektur adressiert dieses Problem. Ziel ist es, die Vorteile von State-of-the-Art Entwicklungsmethoden für intelligente Sensoren zu kombinieren, um einen effizienten und komfortablen Entwicklungsprozess bereitzustellen. Das vorgestellte System ermöglicht es, wiederholbare und reproduzierbare Tests direkt auf der jeweiligen Sensorhardware auszuführen. Die Verwendung des SiL-Ansatzes ermöglicht dabei neben der Untersuchung der funktionalen Parameter auch eine Betrachtung von extrafunktionalen Parametern des Sensorsystems.

Das vorgestellte Konzept wurde unter realen Bedingungen getestet und eingesetzt, um verschiedene auf Sensordaten beruhende Algorithmen zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Besonders die Untersuchung der extrafunktionalen Eigenschaften wurde erst durch die Verwendung des vorgestellten Konzeptes ermöglicht. Weiterhin werden Ideen und Konzepte präsentiert, welche die SiL-Architektur erweitern. Durch die vorgestellten Erweiterungen wird die Effizienz und der Komfort des Systems weiter gesteigert. So wird zum einen die Erweiterung und Manipulation von Sensordaten ermöglicht, um spezielle Testfälle für Sensoralgorithmen zu generieren. Des Weiteren wird eine Erweiterung vorgestellt, welche die Untersuchung und Berücksichtigung des Energieverbrauchs erlaubt.

# Abstract

The digitalization and automation of a wide variety of processes is a core topic of our modern society. This affects both our everyday lives with automated buildings and intelligent assistants as well as the industrial environment with smart factories and autonomous systems. All these applications have one thing in common; in order to interact with the physical world they need a variety of sensors. Due to the ever-increasing integration of microprocessors, the market of sensors has changed. More and more sensors are being manufactured as so-called smart sensors. This means that the sensors have integrated computing units and memory elements in addition to their sensing elements. This makes it possible, among other things, to further process the original sensor data already on the intelligent sensor by means of firmware. The creation of firmware for these systems poses special challenges to developers.

This thesis presents concepts and implementations that make the creation of firmware for smart sensors more convenient and efficient. Due to the interaction with the physical world, it is particularly challenging to validate and test firmware and algorithms that depend on sensor data. The presented Sensor-in-the-Loop architecture addresses this problem. The goal is to combine the advantages of state-of-the-art development methods for smart sensors to provide an efficient and comfortable development process. The presented system allows to perform repeatable and reproducible tests directly on the respective sensor hardware. The use of the SiL approach allows not only the investigation of functional parameters but also the consideration of extra-functional parameters of the sensor system.

The presented concept was tested and used under real conditions to investigate and compare different algorithms based on sensor data. Especially the investigation of the extra-functional properties was only made possible by using the presented concept. Furthermore, ideas and concepts are presented that extend the SiL architecture. The extensions presented further increase the efficiency and convenience of the system. On the one hand, the augmentation and manipulation of sensor data is enabled to generate special test cases for sensor algorithms. Furthermore, an extension is presented that allows the investigation and consideration of the extra-functional property of energy consumption.