

HANSER

Tag des Systems Engineering

Paderborn, 8. -10. November 2017

Sonstiger Urheber Christian Tschirner, Rüdiger Kaffenberger, Sascha
Ackva

Herausgegeben von Sven-Olaf Schulze

ISBN (Buch): 978-3-446-45538-2

ISBN (E-Book): 978-3-446-45546-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45538-2>

sowie im Buchhandel.

Sven-Olaf Schulze
Christian Tschirner
Rüdiger Kaffenberger
Sascha Ackva

Tag des Systems Engineering

Paderborn, 08.–10.November 2017

Unter Mitarbeit von:

S. Ackva, V. Ahrens, A. Albers, A. A. Albers, M. Amon, M. Andres, H. Apostolov, D. Arndt, D. Bagaria, L. Becerril, M. Becker, M. Behrendt, O. Bielefeld, C. Birk, A. Blumör, M. Bockmair, T. Born, M. Bothen, J. Brandscheid, M. Brandstätter, A. Braun, P. Bryxi, T. Burdach, N. Bursac, A. Czaja, M. Damm, S. Dragaschnig, A. Duell, M. Di Maio, R. Dumitrescu, O. von Dungern, L. Eickhoff, M. Eigner, S. Eilmus, K.-G. Faißt, G. Fernandez Soto, S. Finkel, M. Fockel, J. Fritz, D. Gaarmann, M. Gepp, R. God, S. Groß, D. Großmann, M. Grundel, G. Guo, J. Hagemeyer, T. Hansen, J. Heidrich, C. Henke, M. Hesse, C. Hollauer, C. Hood, M. Hoppe, S. Husung, M. Jastram, F. Joeckle, T. Jungeblut, J. Kaiser, N. Kattner, L. Kirsch, T. Kleinberger, S. Kleiner, N. Klusmann, C. Knop, R. Korošec, T. Kuhn, A. Kühn, J. Lachmair, J. G. Lamm, R. Lampert, S. Langer, C. Lankeit, M. Leute, J. Li, U. Lindemann, E. Löchl, C. Mandel, A. Mazak, T. Meenken, S. Melzer, A. Mettauer, J. Michael, P. Mochine, G. Moeser, R. Munde, M. Neubert, H. Palm, J. Powelske, G. Pregitzer, K. Roder, A. Schertl, N. Schlüter, J. Schmitz, T. Schulte, J. Seewig, M. Sieber, P. Sivasothy, R. Stark, F. Stroer, A. Sünnetcioglu, X. Tang, J. Tlatlik, A. Trächtler, J. Vollmar, W. Weber, D. Weidmann, T. Weilkens, C. Wen, M. Wimmer, P. Winzer, C. Zingel

HANSER

Die Herausgeber:

Sven-Olaf Schulze, Dipl.-Ing. Christian Tschirner, Rüdiger Kaffenberger, Sascha Ackva,
Gesellschaft für Systems Engineering e. V., Zeppelinstr. 71-73, 81669 München

ISBN: 978-3-446-45538-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf vorheriger Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebensowenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigen auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne des Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

© 2017 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Cornelia Rothenaicher

Umschlaggestaltung: Frank Wohlgemuth, Hamburg

Druck und Bindung: Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany



Vorwort

Sehr geehrte Teilnehmer/-innen des TdSE,

Systems Engineering entwickelt sich im deutschsprachigen Raum immer mehr zum Magneten und findet immer mehr Fans und Interessierte. Auch Firmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Medizintechnik und aus der Automobilindustrie sehen einen Mehrwert und einen Wettbewerbsvorteil im Systems Engineering. Forschungsthemen zur Industrie 4.0 und modellbasierten Methoden sind initiiert und die GfSE e.V. ist als Partner mit dabei. Auch das Interesse an der Zertifizierung zum „Certified Systems Engineer (GfSE)“[®] wächst in den Firmen kontinuierlich, um die Mitarbeiter zu qualifizieren damit auch die Firma in eine erfolgreiche Zukunft führen zu können. Schließlich haben wir das aktuelle Handbuch mit Hilfe sehr engagierter Mitglieder in die deutsche Sprache übersetzt und im vergangenen Jahr erfolgreich das systems.camp (www.systemscamp.org) als regelmäßige Veranstaltung etabliert – ursprünglich auch aus einer Mitgliederinitiative gestartet.

Somit versammelt sich die SE-Community nicht nur noch am TdSE – aber nach wie vor ist der TdSE die größte und wichtigste deutschsprachige Veranstaltung zum Systems Engineering. In diesem Jahr bieten Mitglieder ihre spannenden Themen in verschiedenen Tutorials an, unsere Tool Vendors präsentieren ihre Werkzeuge wieder im Tool Vendor Project, das nun stärker auf die Einzelanforderungen der verschiedenen Werkzeuge eingeht. An den beiden Folgetagen finden dann Vorträge und Case Studies in verschiedenen parallelen Vortragsreihen statt, die in diesem Jahr mit vielen Beiträgen aus der Industrie besetzt wurden. Hinzu kommen 2 Special Sessions, die sich mit einem Thema speziell befassen und von der Arbeitsgruppe FAS der GfSE und dem Spitzencluster it's OWL organisiert wurden. Als herausragend sind die Keynotes von Google, CLAAS, Fraunhofer IEM, Audi und B/S/H zu nennen, die sich mit Digitalisierung, Zukunft der vernetzten Produkte und den Anforderungen an diese beschäftigen. Besonders ist hier zu erwähnen, dass Audi als neues korporatives Mitglied in der GfSE sich auch für eine Keynote zum Thema vernetzte Anforderungen in einem Konzern bereit erklärt hat. Um das Angebot für die Teilnehmer abzurunden sind wieder mehr als 20 Aussteller auf dem Marktplatz vertreten und bieten IT Werkzeuge zum Thema Systems Engineering an. Auch sind Dienstleister und Berater mit ihrem Portfolio mit einem Stand auf

dem Marktplatz dabei. Alle Aussteller bringen noch Beispiele mit – entweder über das Tool Vendor Projekt aus der Industrie oder Industriepartner mit, die von den Vorgehensweisen und Ergebnissen berichten werden.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen auch diesem Jahr erfolgreiche Tage und eine interessante Lektüre zum Systems Engineering und bedanke mich bei allen Personen, die einen Beitrag eingereicht haben und den ehrenamtlichen Helfern, die diese Konferenz und diese Ausgabe ermöglicht haben.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. O. Schulze', written in a cursive style.

Sven-Olaf Schulze,
Vorsitzender der GfSE e.V.

Inhaltsverzeichnis

Der Konferenzband enthält wissenschaftliche Beiträge (W), Beiträge aus der Industrie (I), von Lösungsanbietern und Beratungsunternehmen (LB). Die Art der Beiträge ist durch die Kurzbuchstaben gekennzeichnet, Kombinationen sind möglich – je nach Herkunft der Autorinnen und Autoren.

T1-1 Special Session it's OWL (1/2)

- Bedarfsgerechter SE Prozess für einen mittelständischen Hersteller von Automatisierungskomponenten (W+I) 3
Anja Czaja, Michael Amon, Roman Dumitrescu, Rolf Lampert, Dirk Gaarmann
- Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Produktgenerationenplanung (W) 13
Alexander A. Albers, Arno Kühn, Roman Dumitrescu
- Systemmodelle als Schlüssel zu durchgängigen XIL-Testszenarien (I+W) 23
Joachim Schmitz, Markus Fockel

T1-2 Special Session it's OWL (2/2)

- Modellgestützter Entwurf eines Multisensormoduls für die Gebäudeautomation (W+I) 35
Marc Hesse, Torsten Born, Thorsten Jungeblut
- Virtuelle Inbetriebnahme eines Fertigungszentrums (W) 45
Christian Henke, Jan Michael, Christopher Lankeit, Ansgar Trächtler
- Entwurf eines FPGA-basierten Verbindungsknotens als Prototypenumgebung für energieeffiziente und sichere Gebäudeautomationssysteme (W+I) 55
Jan Tlatlik, Thomas Hansen, Jan Lachmair, Jens Hagemeyer

T2-1 Zukunft des Systems Engineering

- Systemtheorie als wissenschaftliche Grundlage des Wirtschaftsingenieurwesens (W) 67
Volker Ahrens

Ein Blick auf Zukunftsszenarien und Herausforderungen für
das zukünftige Engineering im Anlagenbau (I+W) 77
Michael Gepp, Jan Vollmar, Andreas Schertl, Herbert Palm

Systems Engineering as an Enabler for Future Innovation 87
(W+I)
*Jens Heidrich, Martin Becker, Thomas Kuhn, Thomas
Kleinberger, Markus Damm, Anne Duell*

T2-2 Special Session: SYSMOD, FAS und VAMOS

Systemmodellierung mit SYSMOD, FAS und VAMOS 99
(I+LB)
Jesko G. Lamm, Tim Weilkiens

Storyboards in der Systementwicklung: eine neue Methode 105
und ihr Zusammenspiel mit der FAS-Methode (I+LB+W)
*Jesko G. Lamm, Andreas Mettaufer, Georg Moeser, Tim
Weilkiens, Albert Albers*

Konzept zur Verhaltensmodellierung mit der Systems 115
Modeling Language (SysML) zur Simulation varianten
Systemverhaltens (W+I)
David Arndt, Sylvia Melzer, Ralf God, Manfred Sieber

T3-1 Model-Based Systems Engineering I

Modellbasierte Sicherstellung der funktionalen 127
Interoperabilität von Testsystemen in der
Antriebsstrangentwicklung (I)
*Christian Zingel, Robert Korošec, Johannes Fritz, Stefan
Dragaschnig*

EXEED: Integrierte, modellbasierte Entwicklung des E/E- 131
Systems der neuen Fahrzeugplattform von CHERY (I)
*Jürgen Kaiser, Giselle Fernandez Soto, Xiaojun Tang, Jay
Li, George Guo, Cai Wen, Jörg Brandscheid*

(Model-Based) Systems Engineering für die Digitalisierung 135
der Produktentwicklung (LB+W)
*Sven Kleiner, Stephan Husung, Constantin Mandel, Albert
Albers, Matthias Behrendt*

T3-2 Model-Based Systems Engineering II

Sequence Pattern Mining: Automatisches Erkennen und Auswerten von Interaktionsmustern zwischen technischen Assets basierend auf SysML-Sequenzdiagrammen (W)
Alexandra Mazak, Manuel Wimmer 147

SysML-Modelle maschinell verstehen und verknüpfen (W+LB)
Philipp Mochine, Atakan Sünnetcioglu, Oskar von Dungern, Rainer Stark 157

Ausführbare Spezifikation – Berechnungen von komplexen Systemzusammenhängen (I)
Markus Andres, Michael Bockmair 167

T4-1 Product Lifecycle Management

Ein „Artefaktmodell“ zur Verbesserung der Prozessmodellierung (LB)
Markus Brandstätter, Kerstin Roder 173

ConfigML – Erste prototypische Realisierung einer Verwaltung von Modellen mit Modellen im PLM (I+LB)
Tim Schulte, Samson Groß, Sebastian Langer, Lucas Kirsch 177

Cutting the “Cross-Cutting” Part 2: Interface Management (LB+I)
Marco Di Maio, Martin Grundel, Martin Hoppe, Niklas Klusmann 187

T4-2 Model-Based Systems Engineering III

Werkzeuge für die Entwicklung mechatronischer Systeme mit Methoden des MBSE (I+W)
Alexander Blumör, Gerhard Pregitzer, Martin Bothen 193

MBSE-gestützte Strukturierung von Baukästen
mechatronischer Produkte im Kontext der PGE –
Produktgenerationsentwicklung, am Beispiel zweier
Fallstudien (W) 203
Jonas Powelske, Clemens Birk, Albert Albers, Nikola Bursac

Model Enabled Offering für erfolgreiche Akquise (I) 213
Michael Neubert

T5-1 Methoden

How to assess the acceptability of design support (W) 219
*Lucia Becerril, Christoph Hollauer, Niklas Kattner, Dominik
Weidmann, Udo Lindemann*

Determining Complexity of Mechatronic Systems using
McCabe's Complexity Metric (W+LB) 229
Dinesh Bagaria, Daniel Großmann, Tim Burdach

KAUSAL – Eine Methodik zur modellbasierten Analyse
komplexer Fehlerketten (W) 239
Ovidiu Bielefeld, Nadine Schlüter, Petra Winzer

T6-1 Industry

Eine Umfrage über die Ausprägung von Systems
Engineering (I) 251
Thomas Meenken

Software is not the only Fruit: Modelling Mechatronic
Systems (LB) 255
Colin Hood

System Architecture Framework als Werkzeug zur MBSE
Einführung (I) 259
Sascha Ackva, Michael Leute

Verifikationsstrategie für eine Sensorsuite (I) 263
Wolfgang Weber

Ein Lean Management Ansatz für die Entwicklung von
Traktionsbatterien (I) 267
Andreas Braun, Emanuel Löchl

Mit Entwurfsklausuren zur agilen U-Bootentwicklung
(I+LB) 271
*Robert Munde, Sandra Eilmus, Florent Joeckle, Michael
Jastram*

Synchroplan – Ein Element zur Verankerung der SE-
Themen im Projekt (I+LB) 275
Christian Knop, Philipp Bryxi, Stephan Finkel

T7-1 Innovation

Big Data in verfügbarkeitsorientierten Produkt-Service-
Systemen am Beispiel einer Landmaschine (W) 285
*Felix Stroer, Karl-Gerhard Faißt, Thomas Eickhoff, Hristo
Apostolov, Paaranan Sivasothy, Jörg Seewig, Martin Eigner*

Modellgestützter Entwurf eines Multisensormoduls für die Gebäudeautomation

Marc Hesse¹, Torsten Born², Thorsten Jungeblut¹

¹ Universität Bielefeld, AG Kognitronik & Sensorik, Exzellenzcluster Cognitive Interaction Technology (CITEC), Inspiration 1, 33619 Bielefeld, mhesse@cit-ec.uni-bielefeld.de

² STEINEL GmbH, Dieselstraße 80-84, 33442 Herzebrock-Clarholz, Torsten.Born@steinel.de

Zusammenfassung: Um den stetig neuen Anforderungen im Rahmen der Entwicklung in Richtung „Industrie 4.0“ gerecht zu werden, entwickelt die Firma STEINEL GmbH kontinuierlich ihr Produktportfolio in den Bereichen Lichttechnik und Sensorik weiter. Für die Realisierung einer intelligenten Lösung ist dabei die Interaktion vieler hunderter Aktoren und Sensoren notwendig. Die ideale Steuerung des Systems erfordert die Erfassung möglichst vieler Messgrößen an der jeweils optimalen Position im Raum. Das Ziel dieser Kooperation bestand in dem Entwurf minimaler Sensorknoten, welche mit einer Basisstation kommunizieren. Bei der Auswahl der Systemkomponenten stellte die Abschätzung des Energiebedarfs der angestrebten Lösung für das jeweilige Einsatzszenario eine große Herausforderung dar. Im Rahmen der Kooperation wurde daher eine Auswahl an möglichen Systemkomponenten getroffen und mit Hilfe eines Modells evaluiert. Dies ermöglichte eine Auswahl der Systemkomponenten unter Berücksichtigung des angestrebten Einsatzszenarios, sowie des Energiebedarfs des Systems.

1 Einleitung

Durch die steigende Vernetzung von Sensoren und Aktoren stellen die Menschen immer höhere Erwartungen an technische Installationen in ihrem täglichen Umfeld. Die Erwartungen erstrecken sich über Komfortfunktionen bis hin zu energetischen Optimierungen. Die Firma STEINEL GmbH begegnet diesen Erwartungen mit der stetigen Weiterentwicklung ihrer Produkte in den Bereichen Lichttechnik und Sensorik. Handlungsbedarf besteht hier insbesondere bei der benötigten hierarchischen Kommunikationsinfrastruktur zwischen den Sensoren und Aktoren sowie der Entwicklung möglichst minimaler, kabelloser, batteriebetriebener Sensorknoten. Eine flexible Kommunikationsinfrastruktur einerseits und die sinnvolle Kombination unterschiedlicher Sensoren auf engstem Raum andererseits sollen dem Installateur die Freiräume schaffen, um auf die individuellen architektonischen Gegebenheiten vor Ort, sowie die Wünsche der Kunden bestmöglich einzugehen. Bisherige Sensoren weisen oft einen großen Formfaktor auf, müssen an das Stromnetz angeschlossen werden und sind häufig unter der Decke anzubringen. Der Platzierung der Sensoren im Raum sind dadurch Grenzen gesetzt und nicht alle Messgrößen können so ideal erfasst werden.

2 Zielsetzung

Ziel war die Entwicklung eines Multisensormoduls, welches einen Raum mittels einer zentralen Basisstation und mehrerer minimaler Funksensoren überwacht. Die zentrale Basis verfügt dabei über eine Stromversorgung, während die minimalen Sensorknoten batteriebetrieben sind und mittels Funkkommunikation mit der Basis interagieren. Im Rahmen des Transferprojektes sollte eine Auswahl geeigneter Funkstandards und Systemkomponenten für die minimalen Sensorknoten erfolgen, sowie eine erste prototypische Realisierung umgesetzt werden. Für die Auswahl geeigneter Systemkomponenten war eine prototypische Abschätzung des Energiebedarfs möglicher Systeme für realistische Anwendungsszenarien notwendig. Insbesondere die Standzeit der minimalen Sensorknoten entscheidet im praktischen Einsatz über die ökonomisch sinnvolle Verwendbarkeit von hunderten Sensoren in größeren Bürogebäudekomplexen. Die Sensoren müssen für eine freie Platzierung einen möglichst kleinen Formfaktor aufweisen, dürfen in den Anschaffungskosten nicht zu teuer sein und müssen, mittels einer möglichst langen Standzeit, mit annehmbarem Wartungsaufwand über lange Zeiträume hinweg betrieben werden können.

3 Stand der Technik

Die Abschätzung der Energieaufnahme in Sensormodulen spielt eine immer größere Rolle in Forschung und Entwicklung. Diese ist entscheidend für die Laufzeit eines Systems und dessen Abmessungen (Größe des Energiespeichers) und hat somit direkte Auswirkung auf die Benutzerakzeptanz und den Erfolg eines Produktes. Die Messung der Energieaufnahme stellte bisher eine praktikable Vorgehensweise zur Abschätzung der Laufzeit dar. Die häufigste Messmethode ist die Messung mittels Shunt-Widerstand [Na09], d.h. die Stromaufnahme wird über den Spannungsabfall an einem bekannten Widerstand im Strompfad bestimmt. Für zyklengenaue Messungen muss der Shunt möglichst nah am Verbraucher platziert werden, da sonst durch die im System verbauten Kapazitäten eine Tiefpass-Filterung auftritt und kurzzeitige Stromspitzen nicht detektiert werden können. Neben ICs für die Integration in eingebetteten Systemen (z.B. Texas Instruments INA219) sind auch kommerzielle Laborgeräte (z.B. Agilent Power Analyzer, Keithley DMM7510) verfügbar. Die Messung der Energieaufnahme wird jedoch zunehmend komplexer, da moderne Sensormodule aus zahlreichen integrierten Komponenten (ICs) bestehen. Zusätzlich muss die Versorgungskette eines Systems bestehend aus Spannungsversorgung, Spannungsregler, dem Leitungsnetz und den einzelnen Verbrauchern (Spannungsdomänen oder einzelne Komponenten bzw. ICs) betrachtet werden. Die Summe über alle Ströme und die Verluste der Versorgungskette bestimmen somit die Energieaufnahme des Systems. Mit zunehmender Komplexität der Systeme (Vielzahl der Komponenten und möglicher Betriebszustände) wird diese Vorgehensweise jedoch immer aufwändiger und liefert oftmals keine präzise Abschätzung der Energieaufnahme des Systems im realen Betrieb. Daher wird angestrebt, die Systeme zu modellieren und mit Hilfe von Simulationen eine möglichst valide Abschätzung zu erhalten. Hier müssen vor allem die möglichen Betriebszustände der Komponenten und die auszuführenden Algorithmen (*software related power*)

berücksichtigt werden. In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines solchen Modells. So wird von Simunic et al. [SBD01] ein Energiemodell für eingebettete Systeme vorgestellt, welches den Instruktionssatzsimulator *ARMulator* um die Betrachtung der Energieaufnahme erweitern soll, wobei auch die Spannungsversorgung betrachtet wird. Die Energieaufnahme pro Takt wird aus der äquivalenten Kapazität jeder Komponente, der Versorgungsspannung und der Taktfrequenz berechnet. Jedoch muss in jedem Takt bekannt sein, in welchem Zustand sich jede Komponente befindet und wie viel Leistung sie in diesem Zustand aufnimmt. Die Arbeit von Steinke et al. [SKW+01] erweitert dieses Modell um ein Scheduling der Instruktionen und berücksichtigt Speicher-Hierarchie und Bit-Toggeling auf Bussen. Ziel ist hier die Abschätzung der Energieaufnahme zur Kompilierzeit. Jedoch sollte ein praktikables Modell hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit mehr als einen Prozessor unterstützen. Einen generischen Ansatz zur Modellierung sowohl auf Komponenten-, als auch auf Systemebene stellen Benini et al. [BBD00] vor. So besteht ein System aus *power manageable components* (PMC), wobei die Zustände einzelner Komponenten als *power state machine* (PSM) modelliert werden. Die Ein-/Abschaltung und Anpassung einzelner Komponenten ist dabei entscheidend für energieeffiziente Designs. So ist zu beachten, dass auch die Zustandsübergänge energetische Kosten verursachen und somit die Leistungsfähigkeit verringern. Jedoch findet sich in der Literatur kein generisches Modell für den Entwurf Hard- und Software von Sensormodulen. Stattdessen werden bisher jeweils nur Spezialfälle mit spezifischer Hardware abgedeckt [TLS+16].

Aus der aktuellen Problemstellung in der bisherigen Entwurfssystematik für Sensormodule und der Analyse des Stands der Technik ergab sich somit der Handlungsbedarf zur Entwicklung eines praxisgerechten Modells, welches folgende Eigenschaften erfüllen sollte:

- Modulare Struktur zur einfachen Erweiterung und Wiederverwendbarkeit des Modells
- Verschiedene Phasen des Entwurfsablaufs müssen über ein anpassbares Abstraktionsniveau dargestellt werden können
- Einfluss der Spannungsversorgung muss in der Abschätzung der Energieaufnahme des Systems berücksichtigt werden
- Energetische Kosten der Zustandsübergänge in einzelnen Komponenten müssen abgebildet werden

4 Modellgestützter Entwurf

Ein Modell, welches die zuvor beschriebenen Eigenschaften erfüllt, wurde am Fachbereich Kognitronik & Sensorik der Universität Bielefeld entwickelt und bereits in einer Publikation [HAH+16] beschrieben. Im Rahmen des Projekts konnte dieses Modell praktisch angewendet werden und somit den energieeffizienten Entwurf des Sensorknotens unterstützen. Im Folgenden wird das aufgestellte Modell zunächst theoretisch beschrieben. In Bild 1 ist die typische Architektur eines Sensormoduls dargestellt.

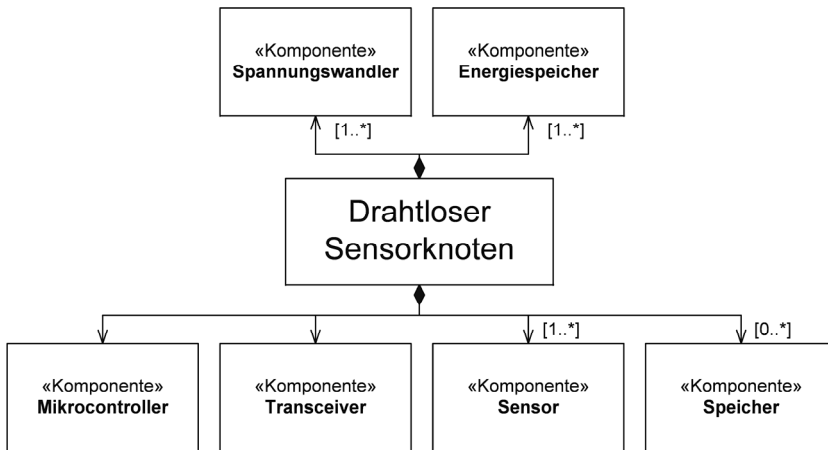


Bild 1. Komponenten eines drahtlosen Sensorknotens

So besteht das Gesamtsystem aus einzelnen aktiven Komponenten wie dem Mikrocontroller, dem Funktransceiver, einem Speicher und einem oder mehreren Sensoren. Zusätzlich wird die Spannungsversorgung, bestehend aus Energiespeicher und Spannungsregler, berücksichtigt. Die Modellbildung erfolgt zunächst für jede einzelne Komponente des Sensorsystems wobei, wie in Kap. 4.1. und 4.2 beschrieben, jeder Komponente verschiedene Parameter (Zustände, Kosten, ...) zugeordnet werden. Abschließend erfolgt die Modellierung des Gesamtsystems auf Basis der einzelnen Komponenten (Kap. 4.3) und das Systemverhalten wird mit Hilfe von verschiedenen Tasks (Kap. 4.4) und deren Tastgrad (Kap. 4.5) abgebildet.

4.1 Komponenten

Im Folgenden werden die Modelle für die einzelnen Komponenten eines Sensormoduls vorgestellt. Die Komponenten umfassen den Mikrocontroller, die Sensoren, sowie die Aktuatoren Funktransceiver und Speicher. Darüber hinaus wird das Modell der Schnittstellen zwischen den Komponenten und die Spannungsversorgung bestehend aus Spannungsregler und Energiespeicher betrachtet. Die für jede Komponente hinterlegten Angaben können entweder dem jeweiligen Datenblatt entnommen oder unabhängig vom Gesamtsystem gemessen werden. Die Quelle jedes Wertes kann in einem Textfeld angegeben werden, so dass die Angaben für jeden Benutzer transparent sind. Die für jede Komponente spezifizierten Parameter umfassen:

- Leistungsaufnahme der möglichen Betriebsmodi
- Leistungsaufnahme und Dauer der Transitionen zwischen den Betriebsmodi
- Typ und Taktrate der Schnittstelle
- Bei Sensoren zusätzlich Dauer und Datenbreite der Messung

4.1.1 Mikrocontroller

Ein Mikrocontroller ist definiert durch die Leistungsaufnahme in jedem möglichen Betriebszustand (z.B. aktiver Betrieb bei verschiedenen Taktraten, Idle, Standby) und den Transitionen zwischen den Zuständen. Für jede Transition werden die Leistungsaufnahme während der Transition und die Dauer der Transition angegeben. Eine Schnittstelle ist definiert durch dessen Typ (z.B. I²C, SPI, UART, etc.) und eingestellter Taktrate. Die Leistungsaufnahme der Schnittstelle addiert sich zur Leistungsaufnahme des Mikrocontrollers.

4.1.2 Sensoren

Ein Sensor ist, wie auch der Mikrocontroller, durch die verschiedenen Betriebszustände (z.B. verschiedene Messungen, Idle, Standby) und deren Leistungsaufnahme definiert, wobei auch die Transitionen berücksichtigt werden. Zusätzlich sind die verfügbaren Schnittstellen, dessen Taktraten und der Protokolloverhead für jede Schnittstelle spezifiziert. Die Bandbreite der Schnittstelle wird durch die zu übertragende Datenmenge bestimmt, welche von der ausgewählten Messung abhängt.

4.1.3 Funktransceiver

Auch der Funktransceiver wird über die Betriebszustände (z.B. Senden, Empfangen, Idle, Standby), Transitionen und Schnittstellen definiert. Basierend auf diesen Parametern kann berechnet werden, wieviel Zeit die Übertragung einer bestimmten Datenmenge in Anspruch nimmt. Die zu übertragenden Datenmenge wird durch die Datenmenge der aktiven Sensoren und dem Protokolloverhead der Funkübertragung bestimmt.

4.1.4 Speicher

Der Speicher wird über die Betriebszustände (z.B. Lesen, Schreiben, Idle, Standby), Transitionen, Schnittstellen definiert. Die zu lesenden bzw. zu schreibende Datenmenge wird durch die Datenmenge der Sensoren und dessen Verarbeitung im Mikrocontroller bestimmt.

4.2 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung eines Systems setzt sich aus Spannungsregler und Energiespeicher zusammen.

4.2.1 Spannungsregler

Das Modell des Spannungsreglers umfasst die Effizienz des Reglers in verschiedenen Arbeitspunkten. Bestimmend sind hier die Eingangsspannung, die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom. Die Summe der Leistungsaufnahme aller Komponenten ergibt

bei definierter Ausgangsspannung den Ausgangsstrom des Reglers. Die Eingangsspannung des Reglers wiederum entspricht der Ausgangsspannung des Energiespeichers. Die Effizienz des Reglers kann somit für jeden Arbeitspunkt bestimmt und zur Berechnung des Eingangsstroms verwendet werden. Die benötigten Daten können dem jeweiligen Datenblatt entnommen oder auch als Datensatz vom Hersteller des Spannungsreglers bezogen werden. Ein Fitting der Kurven liefert die Effizienz des Reglers für jeden möglichen Arbeitspunkt, wobei die so entstehende Datenbasis als Look-Up Table implementiert werden kann.

4.2.2. Energiespeicher

Der Eingangsstrom des Reglers entspricht dem Ausgangsstrom der Batterie, wobei dieser die Effizienz der Energieentnahme aus dem Energiespeicher bestimmt. Die Effizienz ist dabei u.a. abhängig vom Innenwiderstand und somit spezifisch für jeden Energiespeicher. Das derzeitige Modell basiert auf der Peukert Gleichung [Pe97], welches ein empirisches Modell mit einer geringen Berechnungskomplexität ist und für eine erste Abschätzung meistens ausreichend ist. In komplexeren Modellen werden zusätzlich die Parameter verbleibende Kapazität, Leerlaufspannung und Temperatur berücksichtigt [RVR03].

4.3 Systemkonfiguration

Die zuvor modellierten Komponenten können für verschiedene Systemkonfigurationen verwendet werden. Eine Systemkonfiguration legt dabei die Komponenten des Sensormoduls (vgl. Bild 1) fest und definiert die inaktiven Zustände jeder Komponente (z.B. Idle oder Standby). Die Leistungsaufnahme des Systems im inaktiven Zustand entspricht somit der Summe der Leistungsaufnahme aller Komponenten des Systems im inaktiven Zustand.

4.4 Taskdefinition

In einem Task wird der aktive Modus jeder Komponente ausgewählt, wodurch die Leistungsaufnahme während der aktiven Periode und die Kosten der Transitionen zwischen aktivem und inaktivem Zustand bestimmt werden. Die Dauer der aktiven Periode wird bei Sensoren durch die ausgewählte Messung und bei dem Funktransceiver durch die zu sendende Datenmenge bestimmt. Die Dauer der aktiven Zeit des Mikrocontrollers wird von dem auszuführenden Algorithmus bestimmt. Die Dauer kann abgeschätzt, gemessen oder mit Hilfe eines Instruktionssatzsimulators bestimmt werden. Die aktive Zeit der übrigen Komponenten und die Datenübertragung zwischen den Schnittstellen addieren sich zur aktiven Zeit des Mikrocontrollers. Jeder Task wird mit einer zeitlichen Auflösung von 1 μ s definiert.

4.5. Tastgrad

Der Tastgrad des Systems stellt die Ausführungsfrequenz der zuvor definierten Tasks abgebildet dar, wobei die Ausführungsfrequenz für jeden Task individuell gewählt werden kann. Der Tastgrad bestimmt das Verhältnis von aktiver zu inaktiver Periode. Somit kann die Leistungsaufnahme des Systems aus der Leistungsaufnahme der Komponenten während der inaktiven Periode und der Leistungsaufnahme der definierten Tasks und dessen Ausführungsfrequenz bestimmt werden.

5 Ergebnisse

Im Rahmen des Transferprojektes wurden mögliche Kommunikationstechnologien und verschiedene Systemkomponenten im Hinblick auf einen Einsatz in dem Multisensormodul untersucht. Hierfür wurde das entwickelte Modell zur Evaluierung des Energiebedarfs des Sensorknotens auf Basis verschiedener Einsatzszenarien angewendet. Die Systemkomponenten des Multisensormoduls umfassen entsprechend der Anforderungsanalyse an ein solches System verschiedene Sensoren (Helligkeit, Temperatur, etc.), Mikrokontroller, Funktransceiver, Spannungsregler sowie Energiespeicher (Batterie, Akku etc.). Das Modell verwendet verschiedene Tasks, die der Sensorknoten abarbeiten kann. So werden in Task 1 (Bild 2) die Messwerte der Sensoren ermittelt, an den Mikrocontroller übertragen und überprüft.

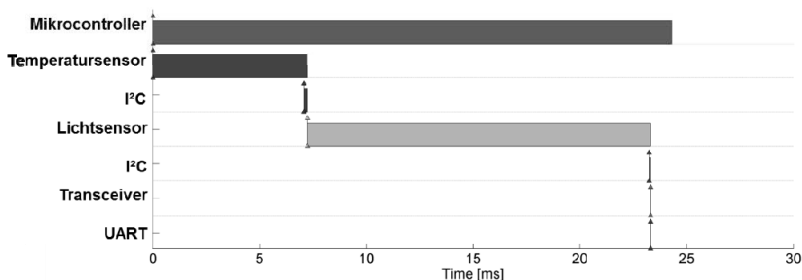


Bild 2. Task 1 - Auslesen der Sensordaten ohne anschließende Übertragung zur Basisstation

In Task 1 wird abgebildet, dass die Messwerte sich nicht geändert haben und somit keine Funkübertragung an die Basisstation notwendig ist. In Task 2 (Bild 3) ist eine solche Übertragung notwendig. In einem ersten Schritt kann der Energiebedarf für diese Tasks abgeschätzt werden. Des Weiteren wird die Leistungsaufnahme in der inaktiven Phase zwischen den Tasks für verschiedene Energiesparmodi der Systemkomponenten, sowie der Energiebedarf für die Transitionen der Systemkomponenten zwischen den verschiedenen Betriebsmodi berücksichtigt. Die Ausführungsfrequenz der Tasks kann auf Basis von zuvor definierten Use-Cases parametrisiert und für einen breiten Bereich simuliert werden. Somit ergibt sich der Tastgrad des Systems.

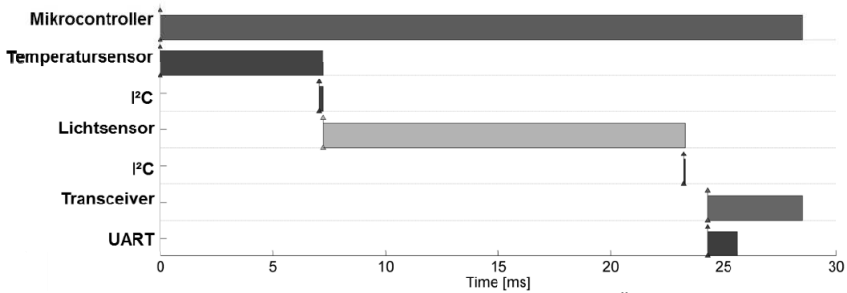


Bild 3. Task 2 - Auslesen der Sensorwerte mit anschließender Übertragung der Daten zur Basisstation

Anhand dieses Vorgehens können Systeme und ihre Komponenten bereits in einer frühen Phase des Entwurfsprozesses auf ihre Eignung für zuvor spezifizierte Anwendungsfälle hin beurteilt werden, so dass ein agiler und iterativer Entwurfsprozess ermöglicht wird. Insbesondere kann anhand der Modellierung und Simulation die Standzeit des Systems bei der Verwendung von verschiedenen Energiespeichern, sowie verschiedenen Funktransceivern in Hinblick auf definierte Anwendungsfälle hin abgeschätzt werden. Dadurch können Grenzfälle betrachtet werden, sowie die ideale Systemkonfiguration für angestrebte Einsatzszenarien ermittelt werden. Bild 4 zeigt eine Standzeit-Abschätzung auf Basis des Modells für verschiedene Funktransceiver. Hierbei wird deutlich, dass die Laufzeit von der Ausführungsfrequenz des Tasks abhängt und für verschiedene Funktransceiver variiert.

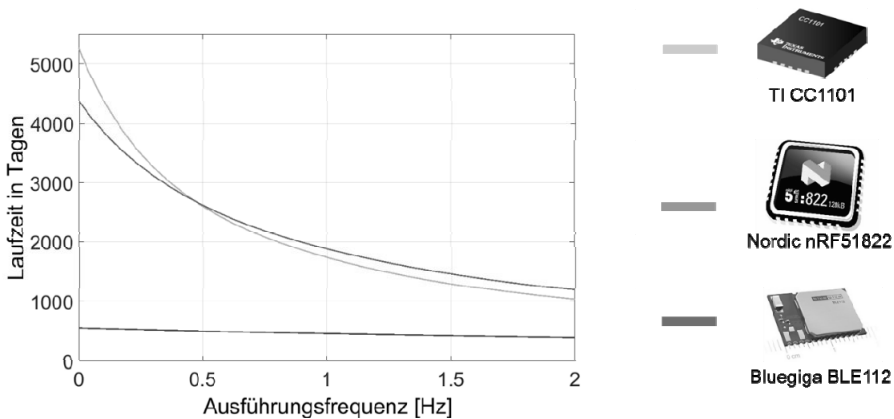


Bild 4. Standzeit eines minimalen Sensorknotens in Abhängigkeit der Ausführungsfrequenz der Tasks für verschiedene Funktransceiver

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde ein kompakter Multisensormodul entworfen, welcher die von STEINEL gestellten Anforderungen an eine solche Plattform erfüllt und dabei über eine hohe Ressourceneffizienz verfügt. Das Blockschaltbild des entworfenen Sensormoduls ist in Bild 5 dargestellt.

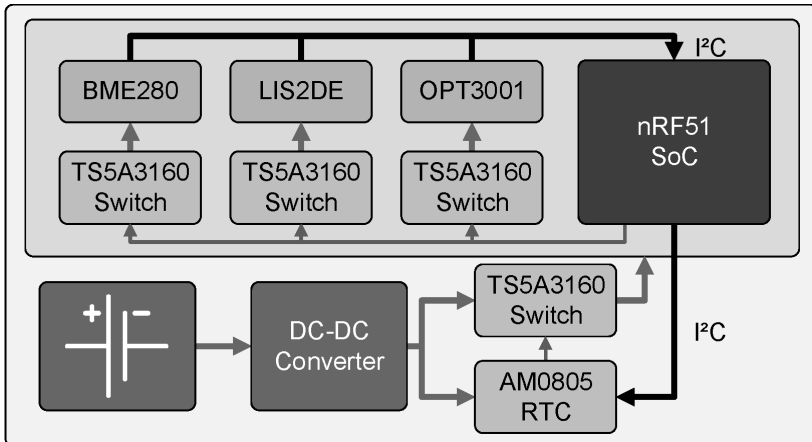


Bild 5. Blockschaltbild des minimalen Sensorknotens

Neben einem Funktransceiver mit integriertem Mikrocontroller (*System on a chip*, SoC) umfasst das Module verschiedene Sensoren zur Umgebungüberwachung und eine geeignete Spannungsversorgung. Zusätzlich verfügt das System über elektronische Schalter (*Switch*), mit denen einzelne Komponenten von der Spannungsversorgung getrennt werden können (*Power Gating*). Für den Fall, dass auch der SoC abgeschaltet wird, kann das System mit einer Echtzeituhr (*Real Time Clock*, RTC) überwacht und nach einer definierten Zeitperiode wieder aktiviert werden. Der verwendete RTC arbeitet dabei im Subschwelligebiet, so dass in diesem Standby-Modus eine Leistungsaufnahme im nW-Bereich erreicht werden kann. Der Sensorknoten wurde abschließend in Hardware gefertigt (Bild 6) und steht als Basis für weitere Entwicklungsarbeiten zur Verfügung. Ziel ist hier unter anderem eine Versorgung des Sensorknotens mittels Energy-Harvesting, so dass diese energieautark agieren können.

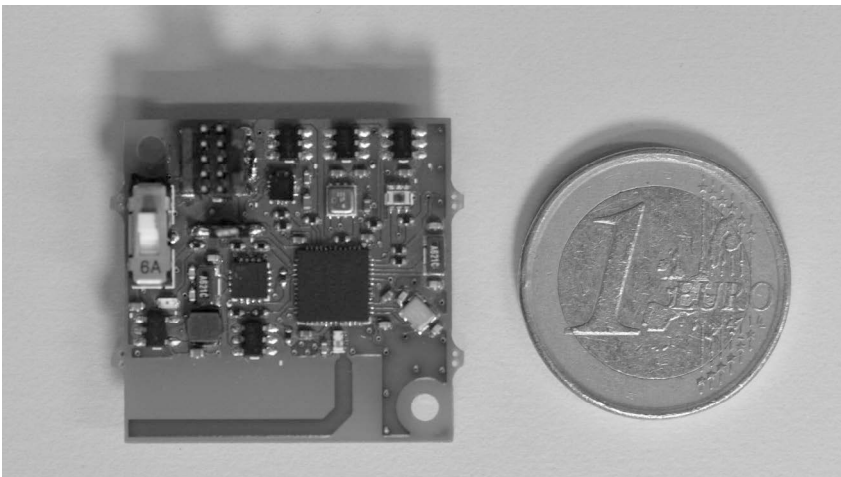


Bild 6. Im Projekt entworfener und gefertigter Sensorknoten. Foto: CITEC/Universität Bielefeld

Literaturverzeichnis

- [BBD00] L. Benini, A. Bogliolo und G. De Micheli. „A survey of design techniques for systemlevel dynamic power management“. In: Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on 8.3 (2000), S. 299–316.
- [HAH+16] M. Hesse, M. Adams, T. Hörmann, U. Rückert, “Towards a comprehensive power consumption model for wireless sensor nodes” 2016 IEEE 13th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks
- [Na09] Z. Nakutis. „Embedded systems power consumption measurement methods overview“. In: MATAVIMAI 2.44 (2009), S. 29–35.
- [Pe97] W. Peukert. „Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakumulatoren“. In: Elektrotechnische Zeitschrift 20 (1897), S. 20–21.
- [RVR03] R. Rao, S. Vrudhula und D. N. Rakhmatov. „Battery modeling for energy aware system design“. In: Computer 36.12 (2003), S. 77–87.
- [SBD01] T. Simunic, L. Benini und G. De Micheli. „Energy-efficient design of battery-powered embedded systems“. In: Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on 9.1 (Feb. 2001), S. 15–28. DOI: 10.1109/92.920814.
- [SKW+01] S. Steinke, M. Knauer, L. Wehmeyer und P. Marwedel. „An accurate and fine grain instruction-level energy model supporting software optimizations“. In: Proc. Of PATMOS. Citeseer. 2001.
- [TLS+16] A. Tobola, H. Leutheuser, B. Schmitz, C. Hofmann, M. Struck u. a. „Battery runtime optimization toolbox for wearable biomedical sensors“. In: 2016 IEEE 13th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN). Juni 2016, S. 199–204. DOI: 10.1109/BSN.2016.7516259.