

IMMS

JAHRESBERICHT
2015

Impressum

Herausgeber

IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH

Ehrenbergstraße 27
98693 Ilmenau
Germany

+49.3677.87493.00 *Telefon*
+49.3677.87493.15 *Fax*
imms@imms.de
www.imms.de

Lektorat

Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Kelm
Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Übersetzung

Susan Kubitz Sprachdienst

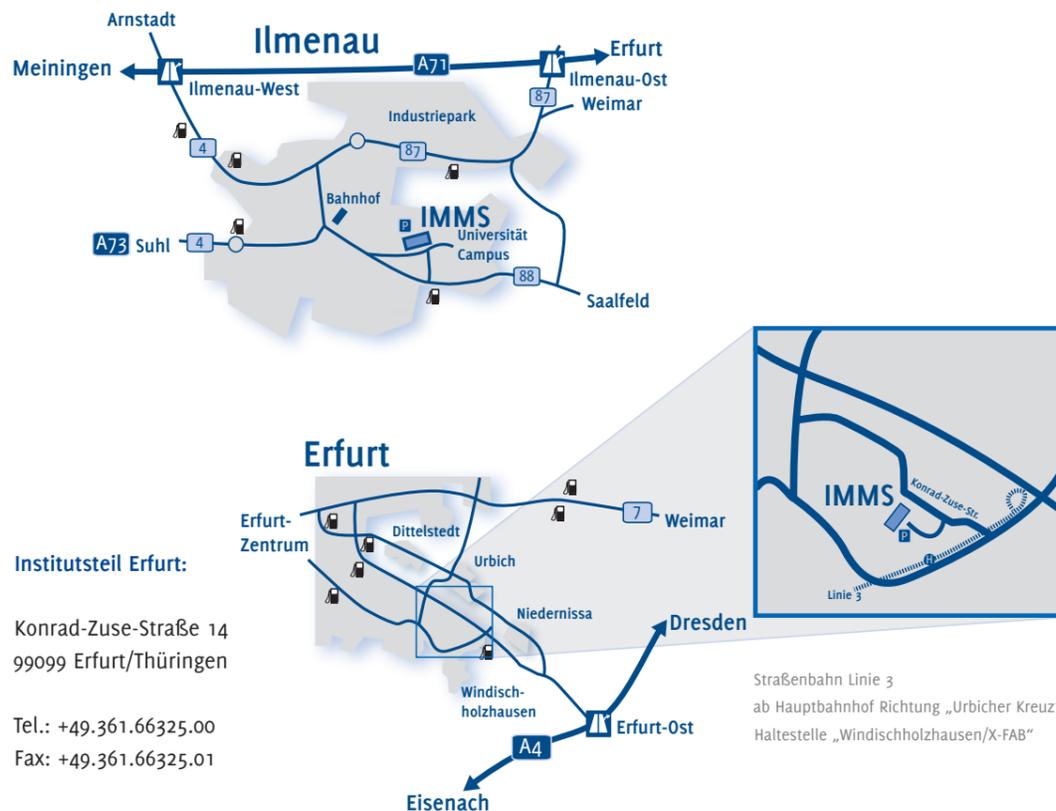
Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Druck

Brandtdruck e.K., www.brandtdruck.de

Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.



Institutsteil Erfurt:

Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt/Thüringen

Tel.: +49.361.66325.00
Fax: +49.361.66325.01

Inhalt

Abkürzungen

ASIC Application-specific integrated circuit (Applikationsspezifische integrierte Schaltung)
BAW bulk acoustic wave (akustische Volumenwelle)
BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor (Komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter)
CPS cyber-physisches System
DAC Digital-to-analog converter (Digital-Analog-Wandler)
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EDA Electronic Design Automation (Rechnergestützte Entwurfsmethodik)
EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
FEM Finite-Elemente-Methode
FPGA Field Programmable Gate Array (vor Ort programmierbare Logik-Gatter-Anordnung)
FTE Full-time equivalent (Vollzeitäquivalent)
HF Hochfrequenz
HTTPS HyperText Transfer Protocol Secure (sicheres Hypertext-Übertragungsprotokoll)
IC Integrated Circuit (Integrierte Schaltung)
IKT Informations- und Kommunikationstechnologien
IP Intellectual Property (vorgefertigter Funktionsblock eines ASIC-/FPGA-Designs)
KMU Kleine und mittelständische Unternehmen
LCR (inductivity, capacity, resistance) Vorrichtung zur Messung von Induktivität, Kapazität und Widerstand
LTE Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der vierten Generation (3,9G)
MEMS Mikroelektromechanische Systeme
OCIT-C Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems – Center to Center (Standard für die Kommunikation zwischen zentralen Verkehrssteuerungs- und -Verkehrlenkungssystemen)
OLED Organic light-emitting diode (Organische Leuchtdioden)
PWM Puls-Weiten-Modulation – die Information über den übertragenen Wert wird im Tastverhältnis eines digitalen Signals kodiert.
PXI PCI eXtensions for Instrumentation, Standard für modulare Messgeräte
RFID Radio-frequency identification (Hochfrequenz-Identifikationsverfahren)
SiCer Silizium-Keramik-Verbundsubstrattechnologie
SoC: System-On-Chip – komplexer ASIC mit vielen verschiedenen Systemkomponenten, wie z.B. Mikrocontroller, Sensoren, Aktoren, HF-Frontends.
SOI Silicon on insulator (Technologie zur Herstellung von Silizium-Schaltkreisen auf einer isolierenden Schicht)
TU Technische Universität

4	Vorwort
5	Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau
6	Nachwuchsförderung am IMMS
8	Stimmen aus Wirtschaft und Wissenschaft
10	Forschungsthema: Energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS)
12	Highlights 2015 auf dem Gebiet energieeffizienter und energieautarker CPS
16	ANCONA Rechnergestützte Verifikationsmethoden – mehr Schubkraft für Industrie-4.0-Entwicklungen
21	HoTSens Entwicklung, Test und Charakterisierung von ASICs bis 300°C
24	smobility Energieoptimierte Funksensoriklösung für Verkehrsanwendungen im Feldtest Verkehrsanwendungen im Feldtest
28	SONOTEC Lecksuche in industriellen Prozessen mit Ultraschallsensorik. Digitale Lösung für die analoge Welt.
32	Forschungsthema MEMS
34	Highlights 2015 auf dem Gebiet mikroelektromechanischer Systeme (MEMS)
35	MUSIK Mikroelektronik und Mikromechanik verschmelzen im Entwurf
38	MEMS2015 Validierung des Designtools
39	Forschungsthema Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik
43	Highlights 2015 auf dem Gebiet Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik
44	Stimmen aus Wirtschaft und Wissenschaft zu Entwicklungen für die Bioanalytik und Medizintechnik
45	Zahlen, Strukturen und Belege
46	IMMS in Zahlen
47	Organisation
48	Lehrangebot
48	Veranstaltungen
49	Publikationen
53	Förderung



Prof. Dr. Ralf Sommer (rechts) und Dipl.-Ing. Hans-Joachim Kelm (links). Foto: IMMS.

Liebe Partner und Freunde des IMMS, sehr geehrte Leserinnen und Leser,

unser Institut hat das Jahr 2015 intensiv genutzt, um für unsere Partner und gemeinsam mit ihnen den Bogen von den Grundlagen zu neuen Anwendungen zu spannen. Wir haben in interdisziplinären Projekten sowohl marktreife Lösungen erarbeitet als auch zukunftsweisende Ergebnisse in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung erzielt. Mit diesen haben wir die Weichen für Anschlussprojekte gestellt, um Visionen wie „Industrie 4.0“, „Smart Mobility“, „Digitale Gesellschaft“ und „Individualisierte Medizin“ auch in den nächsten Jahren mit Leben zu erfüllen. Für diesen Gestaltungsprozess werden wir auch weiterhin die Vernetzung in Verbänden, Clustern und Gremien stärken, unsere Forschungsinfrastruktur ausbauen sowie Nachwuchswissenschaftler zielgerichtet fördern und frühzeitig an entsprechende Aufgaben heranführen.

Wir freuen uns über das, was wir 2015 erreicht haben – über die Auszeichnung unserer wissenschaftlichen Arbeiten mit zwei Preisen auf führenden internationalen Konferenzen und über die Anerkennung durch unsere Industriepartner, die uns praxistaugliche Entwicklungen und eine lösungsorientierte sowie effektive Arbeitsweise bescheinigen. Das Erreichte ist Ansporn, auch künftig als kompetenter und zuverlässiger Forschungs- und Entwicklungspartner Neues aus der Wissenschaft in die Wirtschaft zu überführen.

Voraussetzungen hierfür schuf die institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen, für die wir unseren Dank im Namen des IMMS-Teams und unserer Partner

aussprechen, die sich durch die Kooperation mit dem IMMS Wettbewerbsvorteile erschließen können. Vor allem für mittelständische Unternehmen ist das IMMS als einziges Thüringer Forschungsinstitut für Mikroelektronik- und Mechatronikanwendungen nicht nur regionaler Technologiepartner, sondern auch Koordinator von öffentlich geförderten industriellen Verbundforschungsvorhaben. Um dieser Verantwortung gerecht zu werden, reflektieren wir die Umsetzung unserer strategischen Ausrichtung mit unserem Wissenschaftlichen Beirat und unserem Aufsichtsrat, denen wir für ihr Engagement herzlich danken. Unser Dank gilt auch der Technischen Universität Ilmenau für die hervorragende Zusammenarbeit, die unser Schaffen nicht nur enorm bereichert, sondern durch die Verbindung der Forschungsthemen beider Einrichtungen über verschiedene Wissenschaftsdisziplinen hinweg Synergieeffekte hervorbringt. Wir danken allen Förderern und Geschäftspartnern, Freunden und Menschen, die uns in unserem Tun bestärken!

Bei unseren Mitarbeitern und unseren Studenten möchten wir uns dafür bedanken, dass sie sich mit ihrem Expertenwissen und ihren persönlichen Kompetenzen in konstruktiver und vertrauensvoller Zusammenarbeit in das IMMS-Team einbringen und sich für unsere gemeinsame Zukunft engagieren.

Wir möchten Sie mit unserem Jahresrückblick zum Vorausdenken und auf gemeinsame Wege einladen.

Prof. Dr.-Ing.
Ralf Sommer

Dipl.-Ing.
Hans-Joachim Kelm

Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau

Das IMMS profitiert durch seine Stellung als An-Institut der TU Ilmenau, die Universität durch die Industrienähe des Instituts von der wissenschaftlichen Vernetzung beider Partner. Im Jahr 2015 hat das IMMS mit 28 Fachgebieten in den Bereichen Elektro- und Informationstechnik, Maschinenbau, Informatik und Automatisierung, Mathematik sowie Medien- und Kommunikationswissenschaften wissenschaftliche Projekte bearbeitet. Gleichzeitig ist das Institut stark mit der Industrie vernetzt. In den Branchen Mikroelektronik und Optik ist es ebenso in regionale und nationale Innovationsnetzwerke eingebunden wie in industrielle Cluster. Die Nutzung und Bündelung technologischer Kompetenzen und die Entwicklung gemeinsamer Marktstrategien lieferte für die Forschungstätigkeit des Instituts und der TU Ilmenau wertvolle Praxisimpulse.

Gemeinsame Forschungsprojekte

In der 2015 in die Phase Zwei überführten Forschergruppe **MUSIK** arbeiten IMMS und TU Ilmenau an einer universellen MEMS-Designmethodik für komplexe Hochfrequenz-Schaltungen. Zwischenergebnisse des IMMS werden im vorliegenden Jahresbericht dargestellt.

Im Projekt **fast-wireless** arbeitet das IMMS seit 2015 gemeinsam mit dem Fachgebiet Integrierte Kommunikationssysteme der Fakultät für Informatik und Automatisierung an neuen Übertragungskonzepten für die fünfte Generation im Mobilfunk (5G), dank derer künftig mobile Geräte und Steuereinheiten für Anwendungen im Bereich IoT und Industrie 4.0 in Echtzeit kommunizieren sollen.

Im dreijährigen Forschungsprojekt **KOSERNA** wird seit 2014 ein kompaktes Satellitenempfangssystem für robuste Navigationsanwendungen entwickelt. Das IMMS erweitert im Unterauftrag der TU Ilmenau die Frontend-Schaltung und überträgt die im Vorgängerprojekt **KOMPASSION** erforschten Konzepte auf ein zweites Frequenzband. Durch diese Weiterentwicklung lässt sich die Robustheit gegenüber Stör- und Täuschsignalen erheblich verbessern und gleichzeitig die Größe der Empfangseinheit weiter reduzieren.

In enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Biomedizinische Technik und Informatik und dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau erforschte das IMMS im Projekt **3DNEuroN** ein neues dreidimensionales verlustleistungs- und rauscharmes Sensor-Aktor-Elektroden-Array zur Messung und Stimulation neuronaler Aktivitäten von Nervenzellen. Ziel ist es, den Heilungsprozess von geschädigtem Nervenzellgewebe zu unterstützen. Die TU Ilmenau konnte im Ergebnis der Zusammenarbeit den Partnern aus Finnland (Universität Tampere) und der Schweiz (ETH Zürich) 2015 ein System zur Verfügung stellen. Mit diesem wurde in ersten Experimenten nach elektrischer Stimulation bereits ein Teil der neuro-physiologischen Ziele erreicht. Das IMMS entwickelte für das System die Sensor- und Aktorelektronik.

Gemeinsame Nachwuchsförderung

Das IMMS ergänzt nicht nur die Lehre an der TU durch umfangreiche Praxisangebote. Auch einige Lehrveranstaltungen werden durch IMMS-Mitarbeiter abgedeckt. Darüber hinaus engagiert sich Prof. Sommer sowohl als Lehrender der AG Lehre, als auch gemeinsam mit dem IMMS in der von der TU Ilmenau etablierten, praxisorientierten Basic Engineering School. Das IMMS fördert die Motivation und Ausbildung der Studierenden durch seine praktischen und industrienahen Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika und Besichtigungstouren, wie z.B. zur Alumni-Fachtagung „Engineering and Computer Science – Application of Computers“ im März/April 2015.

Auch dem kleinen Nachwuchs hat sich das IMMS gemeinsam mit der TU Ilmenau in Veranstaltungen zur Kinderuni gewidmet. In einer Vorlesung mit dem Titel „Wie kommen Punkt und Ton über Bits und Bytes in den Film?“ demonstrierte Prof. Sommer über 600 Schülern im Alter von 8–12 Jahren in Mitmach-Experimenten, welche Technik hinter bewegten Bildern steckt und wie man viele Stunden Film auf weniger Platz als einem Daumnagel unterbringt.



Das IMMS bietet regelmäßig Führungen an, wie hier für MINT-Abiturientinnen zur Sommeruni im Labor für Präzisionsantriebssysteme. Foto: IMMS.

Nachwuchsförderung am IMMS

Wissenschaftlicher Nachwuchs hat am IMMS besondere Priorität. Auch 2015 haben sich die Forscher des Instituts hier stark engagiert und vor allem Studenten gefördert. Doch auch Schüler erhielten bei Events und Praktika Einblicke in die Arbeiten des IMMS oder wurden von den Wissenschaftlern bei Facharbeiten betreut. Am Institut wird vor allem den Studenten der TU Ilmenau, aber auch anderer Hochschulen aus dem In- und Ausland, theoretisch fundiertes Methodenwissen vermittelt und dieses frühzeitig mit der praktischen Umsetzung in Anwendungen verknüpft. Angehende Ingenieure der Fachrichtungen Biomedizintechnik, Elektrotechnik, Fahrzeugtechnik, Ingenieur-Informatik, Maschinenbau, Mathematik, Mechatronik und Physik können am IMMS attraktive wissenschaftliche Aufgabenstellungen bearbeiten und werden individuell betreut. Zudem bietet das Institut Trainingskurse und Firmenbesichtigungen an. 2015 arbeiteten insgesamt 40 Studenten als Praktikanten oder studentische Hilfskräfte am IMMS oder sie schrieben hier ihre Bachelor- oder Masterarbeiten. Für den Nachwuchs

bietet die Vernetzung des Instituts mit der Industrie die Chance auf praxisnahe Themen und ergebnisorientiertes Arbeiten.

Das IMMS verfügt über eine international wettbewerbsfähige Infrastruktur nach industriellem Standard in den Bereichen Entwurfsunterstützung und Labortechnik für elektronische und mechatronische Systeme, die für die Forschungsarbeiten und die dafür im Vorfeld notwendigen Qualifizierungsmaßnahmen bereit gestellt werden. Der hohe Anteil von Studenten der TU Ilmenau zeigt, dass die intensiven Bemühungen im Bereich der Grundlagenausbildung Früchte tragen. So finden hochmotivierte Studenten mit hervorragenden Leistungen den Weg ans IMMS, was uns besonders freut. Um den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern und zu fordern, findet unter anderem ein regelmäßiges „Scientific Seminar“ statt. Dort stellen Studenten und Promovenden ihre Arbeiten und Probleme vor, die dann intensiv diskutiert werden. Der dadurch initiierte, rege inhaltliche Austausch geht über die fachlichen Grenzen der eigenen Arbeitsgebiete hinaus und fördert so neue Verknüpfungen und Ideen.



Dipl.-Ing. Bianca Leistriz, Doktorandin am IMMS

„Bereits während meines Studiums der Mechatronik an der TU Ilmenau suchte ich stets nach praktischen und wissenschaftlichen Herausforderungen. Mehrere Semester arbeitete ich als wissenschaftliche

Hilfskraft am IMMS unter anderem an Berechnungsskripten, Experimentalaufbauten und Messungen. Infolge der positiven Erfahrungen am Institut kehrte ich nach meinem Auslandspraktikum daran zurück und erforschte in meiner Diplomarbeit, bei der ich eine sehr gute Betreuung erfahren habe, Grundlagen für vakuumtaugliche Luftführungselemente. Mittlerweile steht das Konzept für mein Promotionsvorhaben am IMMS mit dem Thema „Steigerung der Leistungsdichte von elektromagnetischen Energiewandlern zur Nutzung von niederfrequenten breitbandigen Anregungen.“ Auf dem Weg dorthin nutzte ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Mechatronik die Chance, in vielfältigen Projekten Kompetenzen in mehreren Forschungsthemen des IMMS aufzubauen.

Neben der Entwicklung von (makroskopischen) Präzisionsdirektantrieben für unterschiedliche Anforderungen führte ich im Projekt USENEMS Simulationen von Strukturen zur Bestimmung von Materialparametern von Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) durch. In der Forschergruppe GreenSense erforschte, entwickelte und realisierte ich ebenfalls MEMS, welche jedoch zur Energieversorgung von miniaturisierten Sensorsystemen dienen. Parallel arbeitete ich in der Forschergruppe PORT der TU Ilmenau an feinmechanischen Energy Harvestern für autarke Sensorsysteme im Automobilbereich mit.

Die Idee, Sensorsysteme mit unterschiedlichsten Applikationsanforderungen autark zu betreiben und dafür einen automatisierten Entwurfsablauf für Energiewandler zu entwickeln, begeistert mich und dies möchte ich mit meinem Promotionsthema ein gutes Stück voran bringen. Dabei baue ich, wie bei meinen vorherigen Themen auch, auf die konstruktiven Gespräche in unserem interdisziplinären Team, die zu innovativen und praktikablen Lösungen führen. Neben der sehr guten Atmosphäre unter den Kollegen, welche ein wesentlicher Wohlfühlfaktor ist, fördert die gute infrastrukturelle Ausstattung des Instituts eine erfolgreiche Promotion, da mir für die Untersuchung meiner Ideen sowohl verschiedene Softwaretools als auch umfangreiches messtechnisches Equipment zur Verfügung steht.“



Dipl.-Ing. Jun Tan, Doktorand am IMMS

„Seit meinem Praktikum in der Mikroelektronik bin ich am IMMS. Ich habe dort mein Diplomthema bearbeitet, wobei ich sehr gut betreut wurde, mich dann als wissenschaftlicher Mitarbeiter in mehrere Projekte eingebracht und so

die Forschungsrichtung meiner Promotion gefunden: Mein Ziel ist, präzise mikroelektronische Low-Power-Sensorik mit miniaturisierter RFID-Technologie zu kombinieren.

Erste Bausteine für diese Idee habe ich in einem Projekt erarbeitet, in dem wir einen Temperatursensor implementiert haben, der hochgenaue Messungen bis zu 1200°C für Automotive-Anwendungen ermöglicht. Die Lösungen für die sehr genaue Referenzspannung des Analog-Digital-Wandlers und für den sehr genauen Verstärker habe ich mitentwickelt und auf der Analog 2013 im Beitrag „Digitally Trimmable Wide Temperature Range 0.35-µm CMOS On-Chip Precision Voltage Reference“ veröffentlicht. Im Projekt GreenSense habe ich mit an einem System für energieautarke Sensorik gearbeitet und dafür einen neuartigen Low-Power-Temperatursensor entwickelt, für den nun ein Patent angemeldet ist. Die Ergebnisse konnte ich auf der IEEE-Konferenz „APCCAS 2014“ in Japan präsentieren und habe für den Beitrag „A Low-Voltage Low-Power CMOS Time-Domain Temperature Sensor Accurate To Within [-0.1, +0.5] °C From -40 °C To 125 °C“ den „Best Paper Award“ erhalten. Das war nicht nur ein schöner Moment, sondern auch eine Bestätigung dafür, dass ich mit meinem Promotionsziel richtig liege. Dieses verfolge ich seit 2015 im Projekt „Admont“ weiter und bringe mich dort unter anderem in die Entwicklung drahtloser multiparametrischer Biosensornetze ein, mit denen sich biochemische Größen berührungslos und damit steril erfassen lassen.

Für mich ist das IMMS eine große Bühne, die für Forschung und Entwicklung sehr viele Chancen bietet. Nicht nur die vielen interessanten Themen, sondern auch der Raum, sich in diese Themen vertiefen zu können und gleichzeitig fachlich und methodisch gefördert und gefordert zu werden, hat mir von Anfang an Rückenwind gegeben mich weiterzuentwickeln. Darüber hinaus mag ich die Arbeit in unserem internationalen Team und die gute Atmosphäre – ich erhalte viel Unterstützung von meinen Kollegen. Ich liebe Analog-Design und ich glaube, dass ich am IMMS sehr große Fortschritte machen und durch meine Leidenschaft für Analog-Design dem IMMS viel zurückgeben kann.“

Stimmen aus Wirtschaft und Wissenschaft



Dr. Daniel Müller,
Head R&D ASIC, Sensirion AG.
Foto: Sensirion AG.

Dr. Daniel Müller, Sensirion AG

Sensirion bietet ganzheitliche Sensorlösungen, u.a. für den Automobilmarkt an. In Zusammenarbeit mit dem IMMS haben wir ein neues, innovatives Feature zur Integration in einen neuen Sensor-ASIC für einen unserer wichtigsten Automotiv-Kunden (Tier 1) entwickelt. Das Produkt wird in 2016 in Serienproduktion gehen.

Das IMMS hat seinen SENT-Empfänger als Soft-IP zur Verfügung gestellt und entsprechend unseren Anforderungen angepasst. Das IP hat ein klares Konzept, ist gut verständlich implementiert und ist auf industriell-professionellem Niveau bestens dokumentiert. Es entspricht bezüglich Fläche, Leistungsverbrauch und Funktionalität bestens unseren Erwartungen. Die Lieferung erfolgte inklusive einer Verifikationsumgebung und den benötigten Synthesedaten. Die IP Integration war einfach, schnell und wurde bestens durch IMMS unterstützt. Die Evaluation am fertigen Chip hat den fehlerlosen Betrieb des IPs bestätigt.

Mit dem Ergebnis und der Zusammenarbeit sind wir äusserst zufrieden. Besonders hervorheben möchten wir die grosse Flexibilität bezüglich unseren Änderungswünschen und deren sehr unkomplizierten, aber trotzdem immer professionellen Handhabung. Das, wie auch die immer angenehme und sachliche Kommunikation, hat ganz wesentlich zum Erfolg des Projektes beigetragen. Das Projekt war ein sehr gelungenes Beispiel von Wissenstransfer Forschung-Industrie – wir freuen uns auf weitere Gelegenheiten zur Zusammenarbeit!

www.sensirion.com



Prof. Dr.-Ing. Erich Barke,
ehemaliger Präsident der Leibniz Universität Hannover; bis 2015 Leiter des dort angesiedelten Fachgebietes Entwurfsautomatisierung des Instituts für Mikroelektronische Systeme sowie Mitglied des wissenschaftlichen Beirats des IMMS. Foto: Leibniz Universität Hannover.

Prof. Dr.-Ing. Erich Barke

Im wissenschaftlichen Beirat des IMMS habe ich die Ilmenauer Kollegen einige Jahre bis 2015 fachlich begleitet. Seit 2014 arbeiten das IMMS und mein Fachgebiet im gemeinsamen Forschungsprojekt ANCONA Hand in Hand an der „Analog-Coverage“ in der Nanoelektronik.

Meine ehemaligen Mitarbeiter in Hannover entwickeln u.a. Methoden, die der Erforschung von Maßen zur Quantifizierung dieser Analog-Coverage dienen. Solche Maße sollen Aussagen darüber liefern, wie vollständig alle relevanten Betriebsfälle einer Analogschaltung und mit welcher Sicherheit verifiziert wurden. Das IMMS in Erfurt erarbeitet hierfür Methoden, mit denen sich unter anderem Verkopplungen automatisch auf Systemebene in Modelle integrieren lassen und mit denen sich die Modelle effizient simulieren lassen.

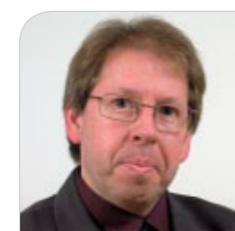
Für die Validierung unserer Ansätze konnten wir bereits auf Designdaten von prozessierten ASICs des IMMS zurückgreifen. Im Gegenzug haben die Erfurter ihre Erkenntnisse aus der Nutzung unserer effizienten Simulationstechnik (PRAISE) in ihre Ansätze einfließen lassen. Ich sehe nicht nur den regelmäßigen persönlichen Austausch und die sehr gute Zusammenarbeit im Projekt sowie die gemeinsamen erfolgreichen Veröffentlichungen mit Freude.

Vielmehr habe ich auch dank meiner Aktivitäten im wissenschaftlichen Beirat die Schritte des IMMS auf dem Weg zur Verschmelzung von mikroelektronischer und mikromechanischer Methodik hin zu einer übergreifenden Gesamtdesignmethodik für MEMS mit großem Interesse aus nächster Nähe verfolgt. Aus der Sicht der Entwurfsautomatisierung ist das bisher großartig gelungen. MEMS werden in Zukunft nur dann erfolgreich sein können, wenn für ihre Entwicklung eine durchgängige Entwurfsmethodik zur Verfügung steht. Auch wenn deren Implementierung grundsätzlich von kommerziellen EDA-Firmen wahrgenommen werden muss, darf die grundlegende Arbeit von Forschungs- und Dienstleistungsinstituten wie dem IMMS bei der Lösung des Problems nicht unter-

schätzt werden. Gerade in Deutschland gibt es für MEMS eine herausragende Expertise. Die überwiegend amerikanischen EDA-Firmen können und müssen hiervon profitieren. Dabei kommt dem IMMS mit seinem besonderen Know-how sowohl bei der Entwicklung von MEMS als auch bei der Spezifikation und Implementierung der dazu notwendigen Entwurfsmethodik eine herausragende Rolle zu.

Auf dem Wege dahin wünsche ich dem IMMS viele wissenschaftliche Erfolge und in wirtschaftlicher Hinsicht eine überaus gesunde Zukunft.

<http://www.ims.uni-hannover.de/>



Thomas Freitag,
Development Manager Melexis
Microelectronic Integrated
Systems. Foto: Privat.

Thomas Freitag, Melexis

Das IMMS begleitet uns seit Jahren bei der Entwicklung und Verfeinerung unserer ICs, wie z.B. für die LIN-basierte Ansteuerung von RGB-LEDs, mit der in Kraftfahrzeugen flexible und kosteneffiziente Innenraumbeleuchtungen realisiert werden.

2015 haben wir gemeinsam an einer Erweiterung der LIN-RGB-Produktfamilie gearbeitet, mit der unsere Kunden jetzt unter anderem zwei RGB-LEDs mit einem IC ansteuern und über mehr Speicher verfügen können. Für diese neuen Designs haben die Kollegen des IMMS unter anderem die Verifikation vorgenommen und dafür das Verhalten der Umgebung in Mixed-Signal-Hardware-Beschreibungssprachen modelliert. Nach erfolgreichen Messungen von Vorversionen erarbeitet das IMMS derzeit einen speziellen Testaufbau, mit dem die bereits gefertigten neuen Designs 2016 gemessen werden.

Wir planen, auch in Zukunft weiter mit dem IMMS zu kooperieren und auf die Kompetenz des Instituts zu bauen. Wir sind sehr zufrieden mit der lösungsorientierten und flexiblen Arbeitsweise – weiter so!

www.melexis.com



Prof. Dr. Peter Holstein,
Strategische Entwicklung
bei der SONOTEC Ultraschall-
sensorik Halle GmbH.
Foto: Privat.

Prof. Dr. Peter Holstein, SONOTEC

SONOTEC suchte einen Partner bei der Entwicklung eines neuartigen Ultraschallprüfgerätes auf digitaler Basis. Dieses Lecksuchgerät vereint erstmalig neuartige Messtechnik, innovative Sensorik, intelligente Software und Anwenderfreundlichkeit für die vorbeugende Instandhaltung. Für dessen Entwicklung war ein tiefes Verständnis digitaler Architekturen und von Signalabläufen in akustischen Messsystemen notwendig. Uns war die Leistungsfähigkeit des IMMS in der Audioverarbeitung und Hardware-Entwicklung aufgrund der Kooperations- und Transferaktivitäten sowie der Außenwirkung bekannt. Wir haben deren technologische Bedeutung erkannt und konnten am IMMS alle notwendigen (Technologien) Kompetenzen abrufen – z. B. modellbasierte Entwicklung, Elektronikdesign, Umsetzung akustischer Anforderungen in Signalverarbeitung bis hin zum embedded Computing und dem Verständnis von Betriebssystemen. Das IMMS hat für unser neues Ultraschallprüfgerät die digitalen Komponenten der Hardware entworfen. Das Kernstück der Performance beruht auf der FPGA-Technologie, wofür das IMMS über ausgewiesene Referenzen verfügt.

Die Zusammenarbeit mit dem IMMS verlief hervorragend, unbürokratisch, fachlich offen und ließ sich perfekt planen und koordinieren. Besonders bemerkenswert war die Effizienz der Revisionszyklen. Es wurden immer sofort Zwischenstände ausgetauscht. Dies funktionierte vor allem dadurch, dass die Kollegen von SONOTEC und IMMS auch intensiv persönlich zusammengearbeitet haben.

Die Anforderungen an neue Produkte und Technologien steigen ständig – beispielsweise im Zusammenhang mit den Möglichkeiten und Problemen von Industrie 4.0. Aufgrund der Arbeitsweise und der Qualität der Ergebnisse streben wir hierfür eine längerfristige Kooperation an.

www.sonotec.de



FORSCHUNGSTHEMA
**ENERGIEEFFIZIENTE UND
ENERGIEAUTARKE
CYBER-PHYSISCHE SYSTEME**

Das IMMS arbeitet seit 2015 an einem „Smart Jacket“ mit elektrisch leitfähigen, gestrickten Schaltflächen. Das Institut entwickelt die integrierte Elektronik, die die Schaltbefehle via Funk über eine Distanz von bis zu 30 Metern sicher zu Empfängern überträgt. Foto: IMMS.

Highlights 2015 auf dem Gebiet energieeffizienter und energieautarker CPS

Ein cyber-physisches System (CPS) bezeichnet einen Verbund von eingebetteten elektronischen Hardware/Software-Komponenten, die über ein Datennetzwerk miteinander kommunizieren und über Sensoren und Aktoren mit der realen Welt interagieren können. Cyber-physische Systeme bilden die Grundlage für das „Internet der Dinge und Dienste“ sowie für die zukünftige Realisierung komplexer, verteilter Regelungs- und Automatisierungssysteme, z.B. in der industriellen Produktion („Industrie 4.0“) oder im Energiemanagement („Intelligente Stromnetze“).

Aufgrund der Vielzahl der Komponenten und ihrer meist großräumigen Verteilung ist die Energie- und Ressourceneffizienz von CPS von höchster Bedeutung. Unsere Forschungsaktivitäten konzentrieren sich daher auf die Entwicklung besonders energieeffizienter mikroelektronischer und eingebetteter Systeme zur Erfassung, Verarbeitung und Kommunikation von Mess- und Steuerdaten. Dazu erforschen und entwickeln wir unter anderem Hardware- und Software-Lösungen zur drahtgebundenen und drahtlosen digitalen Vernetzung von Sensoren und Aktoren unter besonderer Berücksichtigung von Aspekten wie Echtzeitfähigkeit und energieautarkem Betrieb.

Best-Paper-Award für Arbeit zu rechnergestützter Verifikationsmethode

Das IMMS wurde gemeinsam mit Forschungspartnern auf der Konferenz „Forum on Specification & Design Languages“ in Barcelona, Spanien, am 16.09.2015 für den Beitrag „Temporal Decoupling with Error-Bounded Predictive Quantum Control“ mit dem Best-Paper-Award ausgezeichnet. Die Arbeit wurde im Clusterforschungsprojekt ANCONA (Analog-Coverage in der Nanoelektronik) entwickelt, das an spezielle Aspekte aus vorangegangenen Forschungsprojekten wie GreenSense anknüpft. Gemeinsam mit fünf Universitäten und Forschungseinrichtungen erarbeitet das IMMS in ANCONA rechnergestützte Verifikationsmethoden, um die korrekte Funktion komplexer analog-digitaler Schaltungen schon während des Entwurfs zuverlässig nachzuweisen. Das IMMS entwickelt hierfür spezialisierte Methoden, die in diesem Jahresbericht eingehend beschrieben sind. Für komplexe



Georg Gläser, IMMS, auf der FDL2015 in Barcelona. Der vorgestellte Beitrag zu rechnergestützten Verifikationsmethoden wurde mit dem Best-Paper-Award ausgezeichnet. Foto: Lukas Lee, Leibniz Universität Hannover.

Simulationen ist oftmals eine Kopplung verschiedener Simulatoren notwendig, deren Synchronisation die Performance signifikant beeinträchtigt. Der prämierte Beitrag zeigt eine Möglichkeit auf, den Synchronisationsaufwand gezielt zu reduzieren und beherrschbarer zu machen.

IMMS erhält iENA-Silbermedaille für energieeffiziente Lösungen in integrierten Schaltungen

Das IMMS wurde am 16.12.2015 für die Entwicklung „Elektronische Verzögerungsschaltung in CMOS-Technologie“ mit einer Silbermedaille beim Wettbewerb der 67. internationalen Fachmesse für „Ideen, Erfindungen, Neuheiten“ iENA 2015 geehrt. Bei der Auszeichnungsveranstaltung an der TU Ilmenau stellten die Erfinder Benjamin Saft, Eric Schäfer und André Jäger die prämierte Lösung vor. Die Verzögerungselemente wurden am IMMS im Forschungsprojekt GreenSense erarbeitet und sind in den Prototypen einer mikroelektronischen Energy-Harvesting-Auswerteschaltung eingeflossen und getestet worden.

Mit der Erfindung des IMMS wird das Verhältnis von Verzögerungszeit zu eingesetzter Energie im Vergleich zu CMOS-Thyristor-Verzögerungselementen nach dem Stand der Technik um den Faktor vier verbessert. Der neue Ansatz ermöglicht höhere Verzögerungszeiten bei gleicher Energieaufnahme bzw. einen verringerten Flächenbedarf bei gleicher Verzögerungszeit. Aufgrund dieser Eigenschaften können Entwickler und Hersteller von mikroelektronischen und mikromechatronischen Systemen (ASIC¹/MEMS²)

¹ ASIC Application-specific integrated circuit (Applikationsspezifische integrierte Schaltung)

² MEMS Mikroelektromechanisches System



Übergabe der Silbermedaille für energieeffiziente Lösungen in integrierten Schaltungen an die Erfinder André Jäger, Benjamin Saft und Eric Schäfer (v.r.n.l.) zur Auszeichnungsveranstaltung am 16.12.2015 durch den Veranstalter der iENA (links: Hr. Könicke, AFAG Messen). Foto: IMMS.

die neuen Verzögerungselemente einsetzen, um Ultra-Low-Power-Schaltungen für Energy-Harvesting-Module und Mikro-Sensor-Aktor-Systeme für energieeffiziente bzw. energieautarke Anwendungen im Bereich Bioanalytik- und Industrie-4.0 zu entwickeln. Am IMMS werden die Arbeiten derzeit u.a. in Folgeprojekten wie ADMONT ausgebaut.

Projekt RoMulus gestartet

In dem im Oktober 2015 gestarteten Forschungsprojekt „Robuste Multisensorik zur Zustandsüberwachung in Industrie-4.0-Anwendungen“ (RoMulus) erkunden Experten aus Forschungseinrichtungen und Industrie neue Technologien und Entwurfsmethoden zur Entwicklung robuster und energieeffizienter Multisensorsysteme. Ohne solche Systeme sind Zustandsüberwachung und Qualitätssicherung von digitalisierten Produktionsprozessen undenkbar. Sie sind damit einer der wesentlichen Wegbereiter für die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0). Ziel ist es, auch für Systeme in begrenzten Stückzahlen einen systematischen Entwurf und die kosteneffiziente Fertigung zu ermöglichen.

Das IMMS wird dafür das im Projekt MEMS2015 entwickelte Design-Tool für Beschleunigungssensoren erweitern. Dieses wird neben den bereits abgedeckten 1D-Sensoren auch den automatisierten Entwurf von mehrdimensionalen Sensoren ermöglichen. Darüber hinaus werden technologiespezifische und komplexere physikalische Phänomene in den Fokus gerückt und in den Entwurfsprozess mit einbezogen.

Der zweite Schwerpunkt des IMMS liegt auf der Erforschung von neuen Ultra-Low-Power-Schaltungen für RFID-Multisensoren für industrielle Anwendungen. Als Ergebnis des Projekts soll eine Low-Power-Sensor- und IP-Plattform entstehen, die kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zu hochtechnologischen Sensoren (IoT) ermöglicht.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und von der Hochschule Reutlingen koordiniert.

Projektbeginn von Smart-Jacket

Seit Januar 2015 wird ein smartes Textil entwickelt, mit dem sich Schalter für Beleuchtung, Maschinen, Türen, Möbel oder Spiele durch eine einfache Armbewegung gegen den eigenen Körper oder gegen ein festes Objekt, wie z.B. eine Stuhllehne, indirekt betätigen lassen. Es soll Menschen unterstützen, bei denen eine Bedienung von Schaltern per Hand nicht in Frage kommt.

Drückt eine Person einen Schalter in der smarten Jacke mit mehreren, aus elektrisch leitfähigen Polymerfäden gestrickten Schaltflächen, soll die integrierte Elektronik die Schaltbefehle via Funk über eine Distanz von bis zu 30 Metern sicher zu Empfängern übertragen. Eine haptische Wahrnehmung der Schalterbetätigungen wird durch elastisch verformbare Strickware ermöglicht. Die Elektronik soll zum Waschen nicht entfernt werden. Darüber hinaus soll die Batterielaufzeit der Elektronik bei etwa drei Jahren bei normalem Gebrauch liegen. Schaltheandlungen sollen zudem ausschließlich durch mechanische Einwirkung und nur beim getragenen Textil ausgelöst werden. Derartige Systeme sind derzeit nicht am Markt erhältlich.

Die gestrickten Schaltflächen, die textile Verdrahtung, die Pflegeanforderungen und das Jackendesign werden von der Strickmanufaktur Zella bearbeitet. Das IMMS ist für die Konzeption, Entwicklung und Integration der Elektronik (Hard- und Software) für das Textil und die anwendungsspezifischen Schaltaktoren zuständig. Damit einhergehend entwickelt das Institut Lösungen für die Energieversorgung, die Funkstrecke, die Konfiguration und die funktionale Sicherheit.



Der auf der "Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing" (DASIP) in Krakau, Polen, am 23.09.2015 mit dem Best-Demo-Night-Award ausgezeichnete Demonstrator des IMMS zur Elektromobilität.

Die Arbeit mit dem Titel „Wireless Sensor Networks for Traffic Applications: Challenges and Solutions“ konnte auch zur Langen Nacht der Wissenschaften am 6. November 2015 am IMMS in Erfurt ausgiebig getestet werden.
Foto: IMMS.



Vom IMMS überarbeiteter Prototyp der intelligenten Stromzange, für die das Institut 2015 die Fertigung von 40 Geräten betreut hat, die als Vorbereitung für den Serienanlauf vom Partner InduSol genutzt und getestet werden. Foto: IMMS.

Projekt „fast-wireless“ gestartet

Echtzeitfähige mobile Datenübertragung ist die Grundlage für vielfältige neue Anwendungen, wie z.B. für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder zwischen Maschinen sowie für das „taktile Internet“. Für diese Anwendungen müssen sehr viele Sensoren mit sehr geringen Signallaufzeiten mit Verzögerungen (Latenz) im Millisekundenbereich und mit sehr hoher Ausfallsicherheit von Daten- und Signalverbindungen interagieren. Heutige Funktechnologien können diese Forderungen nicht erfüllen. So wurde z.B. LTE³ hauptsächlich für hohe Kapazitäten entwickelt.

In „fast-wireless“ wird daher eine latenzminimierte Basistechnologie der fünften Generation im Mobilfunk (5G) erforscht, entwickelt und bewertet, um mobile Geräte und Steuereinheiten echtzeitfähig zu vernetzen. Ein Schwerpunkt liegt in der Entwicklung von Übertragungskonzepten, die eine geringe Latenz und hohe Zuverlässigkeit erlauben. Das IMMS erarbeitet Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit des Betriebssystems künftiger Systeme, unterstützt die Projektpartner bei der Definition geeigneter Schnittstellen zwischen den Kommunikationsschichten und entwickelt Komponenten, die eine Partitionierung latenzkritischer Elemente in Hard- und Software ermöglichen. Die Ergebnisse sollen in eine Demonstrator-Plattform einfließen, die das IMMS entwickelt. Hierfür definiert das Institut Anwendungsszenarien und setzt die erarbeiteten Algorithmen der Projektpartner um.

³ LTE Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der vierten Generation (3,9G)

sMobility Projektabschluss von Best-Demo-Night-Award begleitet

Das IMMS hat auf der "Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing" (DASIP) in Krakau, Polen, für die am 23.09.2015 präsentierte Arbeit „Wireless Sensor Networks for Traffic Applications: Challenges and Solutions“ den Best-Demo-Night-Award erhalten. Mithilfe einer um Sensorik erweiterten Autorennbahn hat das IMMS auf der DASIP Ergebnisse veranschaulicht, die das Institut im gleichzeitig abgeschlossenen Forschungsprojekt „Smart Mobility in Thüringen“ erarbeitet hat. Das einfach installierbare drahtlose Sensorsystem trägt dazu bei, die Elektromobilität voranzubringen und wird im vorliegenden Jahresbericht dargestellt. Der prämierte Demonstrator konnte auch zur Langen Nacht der Wissenschaften am 6. November 2015 am IMMS in Erfurt ausgiebig getestet werden.

Engagement im Netzwerk eMobilityCity

Das IMMS ist seit 2015 im Netzwerk eMobilityCity aktiv. Dieses versteht sich als Kompetenz- und Innovationszentrum für Elektromobilität in Thüringen und vereint die Partner aus den Thüringer Verbundprojekten sMobility, Smart City Logistik, eTelematik oder EMOTIF. Das IMMS übernimmt die wissenschaftliche Begleitung zu den in sMobility erarbeiteten drahtlosen Sensorplattformen für taktile Straßen und bindet die Partner in fortführende Aktivitäten zu Verkehrsanwendungen ein.

Projekt S4ECOB abgeschlossen

2015 wurde das Projekt S4ECOB (Sounds for Energy Control of Buildings) abgeschlossen, in dem das IMMS eine eingebettete Plattform für ein System zur Audiosignalverarbeitung entwickelt hat, das künftig zu energieeffizienteren Gebäuden beitragen soll. Um die Gebäudesteuerung großer öffentlicher Bauten optimal zu betreiben, ist es wichtig zu wissen, wie viele Personen sich gerade in den einzelnen Bereichen eines Hauses aufhalten. In dem im Projekt entwickelten System werden die Umgebungsgeräusche mit einem Netzwerk verteilter Mikrofone erfasst. Das komplexe System kann auf Basis akustischer Daten die Anzahl von Personen in Gebäudebereichen erfassen und abhängig davon die Haustechnik regeln.

Das IMMS hat die eingebettete Plattform entwickelt, welche Audiosignale von 3 x 8 Mikrofonen verarbeitet, und hierfür den Entwurf einer geeigneten Hardware sowie die Konzeption und Implementierung der Softwarekomponenten realisiert. Zudem hat das IMMS die Architektur der Kommunikationsstrukturen zwischen den Komponenten entworfen und deren Umsetzung vorgenommen. Die innovative Architektur und die neuen Wege für die Hard- und Software-Implementierung waren der Schlüssel zu einer sehr leistungsfähigen, flexiblen und kostengünstigen eingebetteten Signalverarbeitungsplattform mit sehr geringem Energiebedarf.

Serienanlauf für intelligente Stromzange vorbereitet

Mit der am IMMS entwickelten und auf der embedded world 2015 präsentierten Stromzange ist ein kleines, mobiles Gerät entstanden, mit dem sich Störströme auf Kommunikationsleitungen bei laufendem Betrieb einer Anlage über 14 Tage erfassen und bewerten lassen. Es unterstützt den Anwender vor Ort dabei, eigenständig Störquellen zu bestimmen, Störniveaus zu beurteilen und Daten für spätere Analysen zu speichern und kann damit weit mehr als herkömmliche Analysegeräte und -verfahren. Dazu hatte das IMMS u.a. umfangreiche Tests zu Magnetkreisen durchgeführt, entsprechende Hardware und analoge Anpassschaltungen sowie Software-Komponenten unter Effizienzkriterien ausgewählt, Software entwickelt, das Gesamtsystem energetisch optimiert und das Gehäuse konstruiert. Für die Vorbereitungen des Serienanlaufs beim Industriepartner InduSol hat das IMMS den Prototypen überarbeitet und 2015 die Fertigung von 40 Geräten betreut, die zunächst von InduSol genutzt und getestet werden.



ANCONA

Rechnergestützte Verifikationsmethoden – mehr Schubkraft für Industrie-4.0-Entwicklungen

Motivation

Für intelligente, im „Internet der Dinge“ agierende Systeme und hochleistungsfähige Industrie-4.0-Anwendungen sind komplexe, hochintegrierte Mikroelektronik-Chips die technologische Basis. Solche SoCs (System-on-Chip) vereinen auf engstem Raum zahlreiche analoge und digitale Elemente und Funktionen wie Sensorik, Signalverarbeitung und Aktorik. Designfehler in integrierten Schaltungen können Umsatzseinbußen von mehreren hundert Mio. Dollar durch Produktionsausfälle verursachen und darüber hinaus weitaus höhere Kosten für Rückrufe, Reparaturen und Ersatzleistungen nach sich ziehen. Daher ist man bestrebt, Designfehler möglichst früh im Entwurfsprozess festzustellen und derartige Risiken zu minimieren.

Darüber hinaus sollen für die neuen Anforderungen im Industrie-4.0-Kontext intelligentere und damit komplexere Systeme entstehen. Für diese werden künftig zahlreiche neue Systemkomponenten erforscht und entwickelt, deren Zusammenspiel mit den gängigen Methoden meist erst im Versuchsaufbau getestet werden kann. Daher erarbeiten die Projektpartner in ANCONA rechnergestützte Verfahren, um die korrekte Funktion dieser Systeme schon während des Entwurfs zuverlässig nachzuweisen. Das soll künftig

Das IMMS erarbeitet Lösungen, mit denen Modelle für gemischt analog-digitale Schaltungen auf Systemebene automatisch erweitert werden, um kritische Szenarien zu identifizieren. Für die Systemsimulationen werden FPGAs eingesetzt, wie das hier abgebildete Virtex7-Demoboard. Foto: IMMS.

das Design gemischt analog/digitaler Schaltungen erleichtern und deutlich beschleunigen, somit Innovationspotentiale heben und zu Wettbewerbsvorteilen verhelfen. Das IMMS entwickelt hierfür spezialisierte Methoden, mit denen unter anderem Verkopplungen in Systemmodelle integriert und diese effizient simuliert werden.

Stand der Technik

Für digitale Systemkomponenten sind viele Methoden etabliert, mit denen ein Entwurf bewertet werden kann: Automatisch erzeugte randomisierte Testsignale, wie z.B. in der Universal Verification Methodology gehören zum Stand der Technik. Zudem kann berechnet werden, wie gut die durchgeführten Tests das Systemverhalten überprüfen, indem z.B. die Anzahl der getesteten Systemzustände zur Anzahl der möglichen Zustände ins Verhältnis gesetzt werden.

Im Design von Analog/Mixed-Signal-Systemen, die neben rein digitalen Funktionen analoge Sensorik und Aktorik beinhalten können, fehlen solche Metho-

1. Modellbeschreibung

Modell (ESL)

Code-Teil 1



Code-Teil 2



2. Modellfusionierung

Modelleigenschaften

Coverage check

Noise

Xtalk

...

Erweiterung, Verfeinerung und Integration zusätzlicher Eigenschaften mittels automatisierter Code-Analyse und -Generierung

Erweitertes Modell

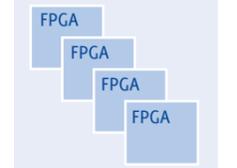
Code-Teil 1



Code-Teil 2



3. Simulation im FPGA-Cluster



den: Es ist bisher nicht möglich, automatisch Testfälle zu erzeugen oder die Verifikationsgüte objektiv zu bewerten. Daher müssen neuentwickelte gemischt analog/digitale Komponenten für sehr komplexe Systeme bislang meist als Prototypen gefertigt und dann deren Interaktionen im Versuchsaufbau getestet werden. Eine weitere Herausforderung stellen hier die aufwendigen Simulationen dar: Während in digitalen Systemen hunderte Testfälle durchgeführt werden können, ist das im analogen Kontext nur schwer möglich. Die Simulationszeiten für einzelne Testfälle bewegen sich hier im Bereich von Minuten bis Stunden.

Üblicherweise begegnet man dieser Explosion der Simulationszeit mit idealisierten Modellen, die das Schaltungsverhalten möglichst gut abbilden. So ist es möglich, die Funktionen eines Chips auf Systemebene zu verifizieren. Allerdings werden hier komplexe Interaktionen nicht abgebildet. Diese können jedoch ein System erheblich stören oder sogar zerstören: Parasitäre Kopplungen über Versorgungsleitungen oder Temperaturabhängigkeiten oder bestimmte Rauscheinflüsse können zum Totalausfall des Chips führen.

Lösungen des IMMS für die rechnergestützten Verifikationsmethoden

Das IMMS steuert die in Abbildung 1 dargestellten und für das neue Vorgehen wesentlichen Lösungsansätze bei. Zum einen nutzt das Institut die im

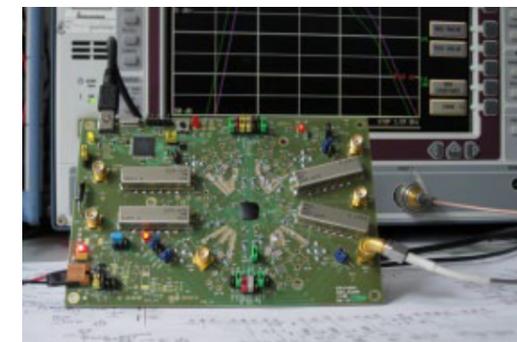


Abbildung 2: Evaluierungsboard, mit dem ein System üblicherweise als gefertigter Prototyp charakterisiert wird. Foto: IMMS.

Abbildung 1: Übersicht über die Beiträge des IMMS zum Projekt: Ein System-Modell wird automatisch durch zusätzliche Eigenschaften erweitert und mit FPGA-basiertem Hardwarebeschleuniger simuliert. Grafik: IMMS.

Designprozess neben der eigentlichen Schaltung generierten Modelle, um diese automatisch durch zusätzliche Effekte zu erweitern, die Einflüsse auf das Systemverhalten zu bewerten und kritische Szenarien zu identifizieren. Zum anderen entwickelt das IMMS Hardwarebeschleuniger auf FPGA¹-Basis, um die Systemperformance effizient bewerten zu können und die Simulationszeiten beherrschbar zu machen.²

Automatische Erweiterung von Modellen auf Systemebene zur Identifikation kritischer Szenarien

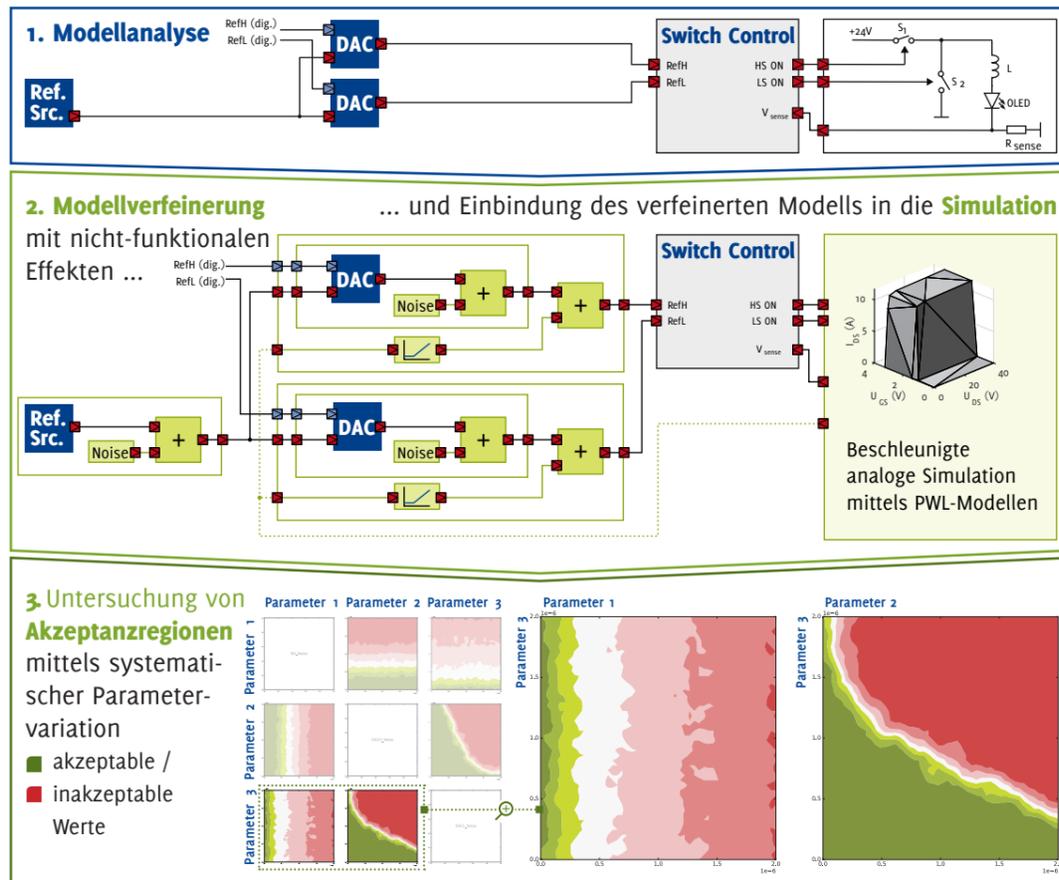
Virtuelle Prototypen, d.h. Simulationsmodelle des SoCs, sind im Design von Analog/Mixed-Signal-Systemen üblich, um deren Funktion abzusichern.

In Abbildung 2 ist ein Evaluierungsboard dargestellt, mit dem ein System üblicherweise als gefertigter Prototyp charakterisiert wird. Meist kann dann erst festgestellt werden, dass das System neben den spezifizierten, funktionalen Eigenschaften durch weitere, nicht zur Funktion gehörende Faktoren beeinflusst wird. Zu diesen extrafunktionalen Größen gehören z.B. die eigene Stromaufnahme, Störungen auf der Versorgung und analoges Verhalten vermeintlich rein digitaler Signale. Sie können das Systemverhalten stören oder gar zum Totalausfall führen – trotz der Verifikation mit Hilfe von virtuellen Prototypen.

Die Integration dieser Einflussgrößen ist zwar möglich, aber sehr aufwendig: Angenommen, es sollen fünf Faktoren und ihre Kombinationen in einer Teilkomponente berücksichtigt werden, so müssten 31 Kombinationen betrachtet und im Modellcode des virtuellen Prototypen implementiert werden. Weiterhin müssten daraus jeweils Gesamtsystemmodelle

¹ FPGA: Field Programmable Logic Array – frei programmierbarer Logikbaustein, der beliebige digitale Funktionen umsetzen kann.

² Vgl. "Automatic Annotation of Properties to ESL SystemC Models and Accelerated Simulation", Georg Gläser, Eckhard Hennig, Forum on Specification and Design Languages (FDL), 2015, 14 – 16 Sept., Barcelona/Spain.



mit jeder relevanten Kombination für die Verifikation erzeugt werden. Der Implementations- und Wartungsaufwand ist also beträchtlich und steigt mit der Anzahl der Faktoren stark an. Da es selten möglich ist, im Vorfeld zu evaluieren, welche Größen das Verhalten stören, müssten zudem in der Anfangsphase noch größere Untersuchungen durchgeführt werden.

Hier setzt der erste Beitrag des IMMS im Projekt ANCONA an (siehe Abbildung 3): Vorhandene Modelle werden mit Hilfe automatisierter Code-Analyse und Code-Erzeugung automatisch erweitert und das System auf kritische Konfigurationen untersucht. Diese Methode sichert das System schon in den ersten Entwurfsphasen gegenüber störenden Einflüssen durch Kopplungen ab, die gegenwärtig erst am vollständigen Design bzw. im fertigen Chip beobachtet werden können.

Das neue Vorgehen wurde u.a. an einem Design aus dem Forschungsprojekt EROLEDT evaluiert: Eine Leistungstreiberschaltung für organische Leuchtdioden (OLEDs) sollte auf Stabilität und Betriebssicherheit untersucht werden. Ausgangspunkt war das vorliegende idealisierte Systemmodell (siehe Abbildung 3 (1)). In

Abbildung 3: Prozess zum Evaluieren der Akzeptanzregionen des Systems: Die durch Annotation hinzugekommenen Parameter werden untersucht, um kritische Szenarien zu identifizieren. Grafik: IMMS / Universität Hannover.

diesem sollte der Einfluss von Störungen auf Referenzspannungen untersucht werden, d.h. die Modelle der Digital/Analog-Wandler, die von diesen Störungen betroffen sein können, mussten erweitert werden.

Dieser Verfeinerungsprozess ist exemplarisch in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt: Zunächst wird der Modellcode des Digital/Analog-Wandlers (DAC) durch ein am IMMS entwickeltes Programm auf der Basis von libClang analysiert. Mit den gewonnenen Informationen über die Struktur und Funktion des Modells kann eine Hülle erzeugt werden, die die zusätzliche Eigenschaft (hier: additives Rauschen) abbildet. Diese Hülle wird mit Hilfe eines Lückentextes generiert, was in Abbildung 4 verdeutlicht wird: Mit den Informationen aus der Analyse wird ein vordefinierter Code angepasst und zum bestehenden Modell hinzugefügt.

Dieser Schritt wird durch ein Verfahren aus dem Web-Design, dem Text-templating umgesetzt: Eine gegebene Vorlage wird automatisiert durch zusätzliche Bestandteile und Informationen ergänzt. Die Vorlage besteht in diesem Fall aus Modellcode und bildet

```

Vorlage
SC_MODULE(${target_name}) {
public:
  ${str_portlist}

private:
  ${base_name}* base_class;
  sca_tdf::sca_signal<double>
    ${parameters['port']}_tmp;

  noise_gauss* noise_src;
  add* noise_adder;
  sca_tdf::sca_signal<double> noise;

public:
  SC_CTOR(${target_name}) {
    base_class = new ${base_name}("base_class");
    base_class->${parameters['port']}
      (${parameters['port']}_tmp);
    ${str_connectionlist}

    noise_adder = new add("noise_adder");
    noise_adder->in1(${parameters['port']}_tmp);
    noise_adder->in2(noise);
    noise_adder->out(${parameters['port']});

    noise_src = new noise_gauss("noise_gauss",
      ${parameters['variance']},
      ${parameters['mean']});
    noise_src->out(noise);
  }
};

Generierte Modellerweiterung
SC_MODULE(TargetModule) {
public:
  sca_tdf::sca_in<double> in;
  sca_tdf::sca_out<double> out;

private:
  Base *base_class;
  sca_tdf::sca_signal<double> out_tmp;

  noise_gauss *noise_src;
  add *noise_adder;
  sca_tdf::sca_signal<double> noise;

public:
  SC_CTOR(TargetModule) {
    base_class = new Base("base_class");
    base_class->out
      (out_tmp);
    base_class->in(in);

    noise_adder = new add("noise_adder");
    noise_adder->in1(out_tmp);
    noise_adder->in2(noise);
    noise_adder->out(out);

    noise_src = new noise_gauss("noise_gauss",
      0,
      0.0);
    noise_src->out(noise);
  }
};

```

zusätzliche Modelleigenschaften ab. Am IMMS wird dazu eine Bibliothek verschiedener Vorlagen erstellt und laufend erweitert. Dieser Annotationsprozess kann mit verschiedenen „Eigenschaftsvorlagen“ aus der Bibliothek wiederholt werden, um das Modell um zusätzliche Faktoren zu erweitern (siehe Abbildung 3 (2) und (3)).

Im nächsten Schritt wird das automatisch erweiterte Modell in die Gesamtsystemsimulation integriert (Abbildung 3 (2)). In dieser Simulation werden demnach die Parameter der eingefügten Faktoren berücksichtigt, deren Einfluss evaluiert werden soll. Diese ergänzten Parameter werden in verschiedenen Simulationen variiert und das jeweils hervorgerufene Systemverhalten bewertet. So können Bereiche für zufriedenstellende Parameterwerte bestimmt werden. Aus der Größe und Gestalt dieser in Abbildung 3(3) gezeigten Akzeptanzregionen kann der Systemarchitekt neue Spezifikationsparameter und Testfälle für die Verifikation ermitteln. Die Designsicherheit kann somit gesteigert bzw. das Ausfallrisiko von Chips verkleinert werden.

Hardware-unterstützte Simulation von gemischt analog-digitalen Systemen

In der Systemverifikation werden typischerweise viele und lange Simulationszyklen durchgeführt. Um auf Systemebene effizientere Parameterstudien für die Identifikation von Akzeptanzregionen durchführen zu können, sind schnellere Simulationen notwendig. In vielen Anwendungsbereichen haben sich FPGA-

Abbildung 4: Modellerweiterung durch Verwendung einer Template-Engine: Eine Vorlage wird durch zusätzliche Informationen ergänzt. Grafik: IMMS.

basierte Hardwarebeschleuniger etabliert. Im Digitalentwurf werden oft FPGA-Prototypen zur Entwicklung von Software eingesetzt, bevor der eigentliche Chip vorliegt.

Analoge FPGAs gibt es bisher nicht in anwendbaren Größenordnungen. Zwar können in speziellen Chips kleine Strukturen, wie z.B. einzelne Verstärkerblöcke, auf FPGA-Basis realisiert werden. Dieser Ansatz ist aber für das Prototyping großer Systeme mit vielen verschiedenen Elementen nicht machbar. Da jeder Chip viele hundert verschiedene Blöcke enthält, wären nicht nur entsprechend viele Prototyping-Plattformen notwendig und wirtschaftlich kaum zu vertreten. Darüber hinaus stören deren parasitäre Effekte die Betrachtungen immens.

Im Projekt ANCONA beschreitet das IMMS daher einen neuen Weg: Mit Hilfe von Industrie-Standard-Programmen zur High-Level-Synthese³ (z.B. Cadence C-To-Silicon Compiler) sollen gemischt analog/digitale Systemmodelle auf herkömmlichen FPGAs – also rein digitaler Hardware – abgebildet werden.

Diese Methode wurde bereits für die Entwicklung eines Hochtemperatursensors am IMMS verwendet. Das in Abbildung 5 dargestellte Sensorinterface mit PWM-Modulator⁴ wurde auf seine Empfindlichkeit gegenüber thermisch bedingten Leckströmen untersucht. Dazu wurde die Linearität wie bei einem

³ High-Level Synthese Prozess zum Abbilden von Software-Code auf logische Funktionen zur Implementierung in Hardware – z.B. im FPGA
⁴ PWM: Puls-Weiten-Modulation – die Information über den übertragene Wert wird im Tastverhältnis eines digitalen Signals kodiert.

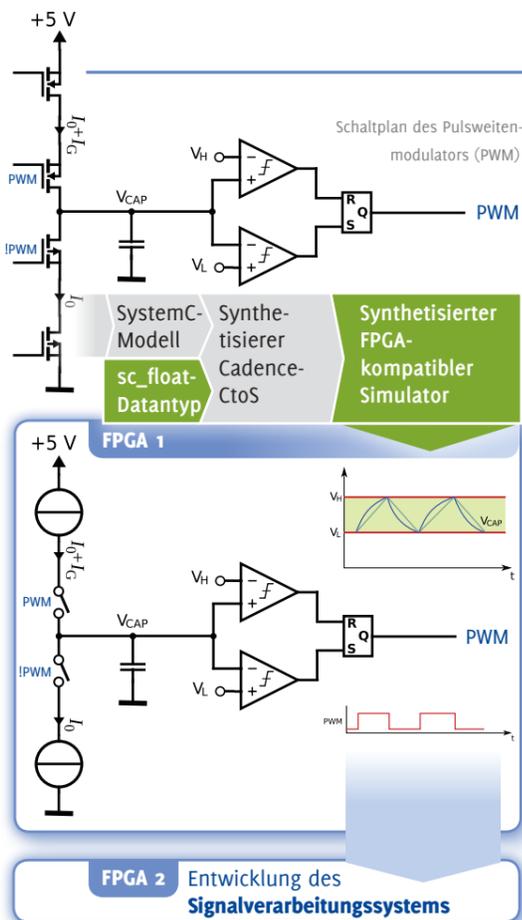


Abbildung 5: Simulation eines Mixed-Signal-Systems im FPGA. Grafik: IMMS.

Analog/Digital-Wandler durch Auswertung der Wanklungskurve ermittelt. Die notwendigen Simulationen brauchen extrem viel Zeit. In einem Versuch wurde abgeschätzt, dass hierfür bei normaler Geschwindigkeit mehrere Tage benötigt werden.

Für solche Fälle soll ein FPGA-Prototyp Abhilfe schaffen (Abbildung 5): Ein SystemC-Modell der Schaltung soll dank spezieller Fließkomma-Datentypen in einen hinsichtlich Ressourcenbedarf, Geschwindigkeit und Genauigkeit angepassten Hardwarebeschleuniger überführt werden. Diese Datentypen wurden im Projekt am IMMS entwickelt und bieten, anders als C++-Datentypen, die Option, die Größen der internen Register beliebig anzupassen und damit die Performance FPGA-basierter Simulationen deutlich steigern zu können. Durch geringe Modifikation des Modellcodes und Implementierung eines Differentialgleichungs-Lösers wurde das Modell so durch High-Level-Synthese in einem FPGA-Prototypen umgesetzt.

Der Aufbau ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt: Auf einem Virtex5-Demoboard ist das Modell des Hochtemperatur-Sensorinterfaces realisiert, auf einem zweiten FPGA der Algorithmus zur Kalibrierung und Auswertung der gewonnenen Messdaten. Dieser

konnte so schon in einem frühen Design-Stadium konzipiert werden. Mit dieser Machbarkeitsstudie wurde die Basis für schnellere Simulationen gelegt.

Zusammenfassung und Ausblick

Das IMMS liefert mit seinen Beiträgen entscheidende Bausteine für die im Projekt angestrebte Absicherung des Mikroelektronikentwurfs. Gemeinsam mit Forschungspartnern wurde das Institut auf der Konferenz "Forum on Specification & Design Languages" (FDL 2015) in Barcelona, Spanien, für den Beitrag „Temporal Decoupling with Error-Bounded Predictive Quantum Control“ mit dem Best-Paper-Award ausgezeichnet.

In der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit bis Mitte 2017 werden die Beiträge weiterentwickelt und integriert. Die Annotation von Eigenschaften wird weiter ausgebaut. Zudem wird die erfolgreich für SystemC-Modelle entwickelte Methodik auf andere Modellierungssprachen, wie z.B. VerilogAMS, angepasst. Die Synthese dieser Modelle in einen FPGA zur beschleunigten Simulation wird ebenfalls weiter verfolgt. Zudem wird daran gearbeitet, die Abschätzung von Akzeptanzregionen für den Entwurf ggf. mit angepassten Algorithmen weiter zu optimieren, um nochmals Rechenzeit einzusparen und damit den Design- und Verifikationsprozess zu beschleunigen.

Das IMMS wird die neuartige Verifikationsmethode in seine Forschungsprojekte einbinden, damit die Qualität der dort realisierten Entwürfe weiter steigern und die Erkenntnisse in die Optimierung der neuen Methode einfließen lassen.

Kontakt:

Georg Gläser, M.Sc., georg.glaeser@imms.de



Diese Arbeit wird als Teil des ANCONA-Projektes (Förderkennzeichen 16ES021) im Förderprogramm IKT 2020 durch das Bundesministerium für

Bildung und Forschung (BMBF) gefördert sowie durch die Industriepartner Infineon Technologies AG, Robert Bosch GmbH, Intel AG sowie Mentor Graphics GmbH unterstützt.



HoTSens Entwicklung, Test und Charakterisierung von ASICs bis 300°C

Motivation

Um zunehmend komplexer werdende Maschinen und Anlagen sicher und mit höchstmöglicher Ressourcenn- und Energieeffizienz betreiben zu können, müssen die Maschinen- und Prozesszustände schnell, präzise und an vielen Stellen gleichzeitig erfasst werden. Je näher sich ein System aus Sensoren und Auswertelektronik am Prozess befindet, desto störungsärmer und genauer können Signale erfasst und verarbeitet werden. Soll ein solches System jedoch näher zum Prozess vordringen, muss es immer höheren Temperaturen standhalten.

Im Projekt HoTSens wird daher mit Partnern eine integrierte Systemlösung für Sensorik und Elektronik entwickelt, die bei hohen Temperaturen bis zu 300 °C, unter hohem Druck und bei außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen in Industrieanlagen und Maschinen zuverlässig arbeiten kann. Bislang sind spezielle, für den Hochtemperatureinsatz ausgelegte integrierte Mikroelektronikschaltungen für eine maximale Betriebstemperatur bis 225 °C erhältlich. Das angestrebte Sensorsystemmodul mit integrierter Hochtemperaturelektronik soll die primären Signale eines kombinierten Druck- und Temperatursensors verstärken, kalibrieren und vorverarbeiten, um mögliche Fehler des Drucksignals ausgleichen zu können. Damit soll erstmals eine Systemlösung entstehen, die

Aufbau des Test-Setups mit integrierter Kühlung für einen kompletten halbautomatischen Wafertest bis 300 °C. Foto: IMMS.

austauschbare und standardisierte Sensormodule für den Einsatz unter den genannten extremen Bedingungen bereitstellt.

Das IMMS hat anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) für das System entwickelt, diese getestet und charakterisiert. Hierfür hat das Institut ein neues Test-Setup mit integrierter Kühlung für einen kompletten halbautomatischen Wafertest bis 300 °C und darüber hinaus entwickelt, aufgebaut und erfolgreich eingesetzt.

Design der Hochtemperatur-ASICs

Das IMMS hat für unterschiedliche Lösungsansätze ASICs entwickelt, die die Signale von Drucksensoren in Anwendungen bis +300 °C verarbeiten sollen. Für diese Temperaturen hat das Institut mithilfe von Teststrukturen Charakterisierungsmessungen an Transistoren auf Wafer Ebene bis 300 °C durchgeführt. Auf dieser Basis wurden in Zusammenarbeit mit der X-FAB AG Schaltungsmodelle für Bauelemente erarbeitet. Bisrige Modelle waren nur für Temperaturen bis 250 °C ausgelegt. Somit wurden grundlegende Analog-Schaltungsstrukturen für Operationsverstärker, Spannungsregler und Stromspiegel so modifiziert, dass sie auch für Temperaturen über 250 °C über extrem geringe

Leckströme bzw. eine stark verminderte Abhängigkeit von der Temperatur verfügen. Das Layout von symmetrischen Transistorstrukturen wurde so gestaltet, dass diese jeweils in Bereichen mit gleichen Temperaturen liegen und sich daher praktisch identisch verhalten.

Alle Entwürfe wurden für eine thermische Entkopplung mit einem zusätzlichen, räumlich getrennt aufgebauten Schaltkreis mit Vorregler, Hochvolt-Transistor und Verpolschutz-Diode ergänzt. Die ASICs wurden in der XI10 SOI-(Silicon-on-Insulator)-Technologie der X-FAB AG gefertigt, die für Anwendungen bis +300 °C ausgelegt ist.

Besondere Anforderungen an den Testaufbau und Stand der Technik

Mit den beschriebenen Anforderungen an integrierte Sensorik und Auswertelektronik steigen auch die für den Test von ASICs auf Wafer-Ebene. Standard-Leiterkarten für Wafer-Prober sind Nadelkarten auf Epoxidharzbasis und erlauben nur Testtemperaturen bis 175 °C. Andere, wesentlich teurere Materialien für diese Karten, wie Polyimid und Teflon, stoßen bereits bei einer Dauerbelastung zwischen 220 °C und 280 °C an ihre Grenzen.

In der Regel werden für den Hochtemperatur-Wafer-Test einerseits Nadelkarten aus mehr als 300 °C belastbaren Keramiken verwendet. Andererseits werden Nadelkarten aus den o.g., bis 280 °C zugelassenen Materialien direkt oder mit einer zusätzlichen Temperaturbarriere in Form einer mit Luft gefüllten Kammer über dem Wafer platziert. Vereinzelt werden diese Kammern mit kalter Luft durchspült, um einen zusätzlichen Kühleffekt zu erzielen. In den meisten Fällen wird die elektrische Verbindung von den Nadeln, die den Wafer antasten, hin zum Messgerät über lange geschirmte Kabel realisiert. Somit befindet sich für den Test keinerlei Elektronik in der Nähe der Nadelkarte. Folglich wird der zu untersuchende ASIC u.a. mit einer viel zu großen elektrischen Kapazität belastet, die durch die lange Zuleitung hervorgerufen wird. Da ein Chip mitunter nicht dafür ausgelegt ist, können mit derartigen Aufbauten vorrangig Messungen an einfachen Bauelementen durchgeführt wer-

Abbildung 1: Prinzipdarstellung einer klassischen Nadelkarte mit aktiven Bauelementen für Messungen auf Wafer-Ebene. Grafik: IMMS.



den, wie z.B. an Transistoren. Andernfalls muss in Kauf genommen werden, dass die Messergebnisse durch den Messaufbau verfälscht werden.

Ein ausreichender Abstand schied für HoTSens als Lösungsweg für den Hochtemperatur-Wafer-Test aus, da die hier entwickelten ASICs z.B. aufgrund ihrer nicht für den Messaufbau ausgelegten Treiberfähigkeit zu sehr davon beeinflusst würden. Die Testbedingungen entsprächen somit nicht mehr dem späteren Einsatzszenario. Daher musste die Leiterkarte samt Elektronik nahe genug am ASIC platziert werden. Somit waren auch die Randbedingungen für die aktiven Bauelemente zu berücksichtigen, die für den Test der HoTSens-Chips direkt auf der Leiterkarte sitzen sollten. Da solche Bauelemente, wie z.B. Operationsverstärker, in der Regel nur bis 85 °C spezifiziert sind, musste eine thermische Entkopplung von der 300 °C heißen Testumgebung geschaffen werden.

Lösung des IMMS für Wafer-Tests bei 300 °C

Um die ASICs bei hohen Temperaturen exakt messen und charakterisieren zu können, hat das IMMS das Vorgehen des Standard-Wafer-Tests (Abb. 1) mit dem des Hochtemperatur-Wafer-Tests vereint. Das Institut hat dazu eine Vorrichtung entwickelt, die den Wafer antastet, die Signale vom Wafer zu einer Leiterkarte mit Auswertelektronik weiter zu einem modularen PXI-Messgerät¹ führt und dabei die Leiterkarte und die Elektronik mit einer Spülkammer für die Kühlung vor zu hoher Temperatur schützt (Abb.2).

Kühlung der Leiterkarte mit Auswertelektronik

Die Leiterkarte besteht aus kostengünstigem Standard-Material, einem Verbundwerkstoff aus Epoxidharz und Glasfasergewebe (Klasse FR4), das bei einer Glasübergangstemperatur von 170 °C instabil wird (Abb. 3). Zum Schutz vor den auf dem Wafer vorherrschenden Temperaturen um 300 °C wurde als

¹ PXI PCI eExtensions for Instrumentation, Standard für modulare Messgeräte

Abbildung 2: Lösungsansatz des IMMS für den Hochtemperaturtest auf Wafer-Ebene mit thermisch entkoppelter Leiterkarte. Grafik: IMMS.

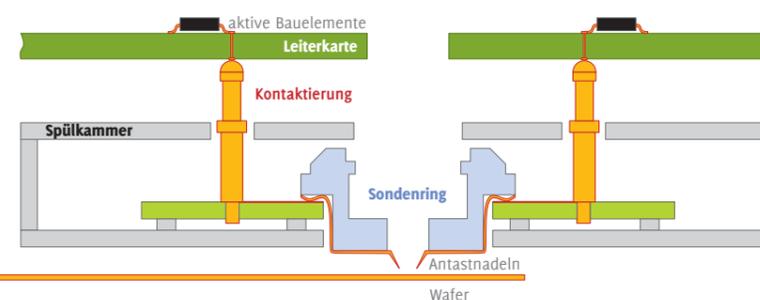


Abbildung 3: Leiterkarte mit der erforderlichen Auswertelektronik. Foto: IMMS.

Barriere eine Spülkammer konstruiert (Abb. 4). Ihre Abmessungen mit 4,5 Zoll Breite orientierten sich an Standardmaßen für Nadelkartenhalterungen. Als Material für die Spülkammer wurde der paramagnetische Edelstahl 1.4305 ausgewählt, da er Vorteile im Vergleich zu anderen Metallen bietet. Die Spülkammer besitzt damit eine um den Faktor 10 – 20 geringere thermische Leitfähigkeit, eine um den Faktor 1,5 – 2 geringere thermische Ausdehnung und eine um 2 – 3mal größere Steifigkeit als solche aus Aluminium oder Kupfer. Dadurch stellt sie eine ideale thermische Barriere zwischen dem heißen Wafer und der kalten Leiterkarte dar. Verstärkt wird diese Wirkung durch den Anschluss für ca. 25 °C kalte Spülluft, die die Kammer durchströmt und diese aktiv kühlt.

Kontaktierung

Um die elektrische Verbindung zwischen Leiterkarte und Wafer sicherzustellen, musste ein Signalweg durch die Spülkammer geschaffen werden. Dazu hat das IMMS eine Keramik-Leiterplatte aus Aluminiumoxid mit einer Glasübergangstemperatur von weit über 300 °C entworfen und in der Spülkammer platziert (Abb. 5). Aluminiumoxid ist mit einem elektrischen Widerstand von $10^{12} \Omega \cdot m$ im angestrebten Temperaturbereich zwar ein sehr guter Isolator, aber im Vergleich zur Leiterkarte aus FR4-Material mit einer 100mal höheren Wärmeleitfähigkeit von ca. 30 W/(K·m) ein sehr guter thermischer Leiter. Auf dieser Keramik befinden sich drei vergoldete Kontaktringe. Deren innerer Pading leitet die Signale, die die Na-

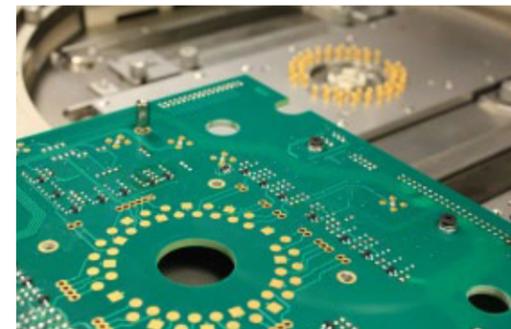


Abbildung 4: Spülkammer (hinten) zur Kühlung des Messaufbaus u. zum Schutz der Leiterkarte (vorn, Unterseite mit Kontaktpads). Foto: IMMS.

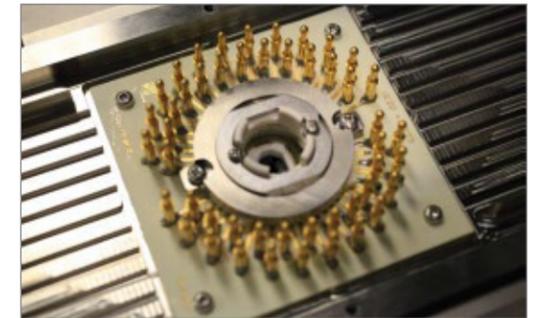


Abbildung 5: Keramikplatte mit dem Sondenring zur Antastung des Wafers und Führung der Signale zur Leiterkarte. Foto: IMMS.

den beim Antasten des Wafers über den Sondenring bei max 300 °C aufgreifen, an die beiden äußeren Padinge weiter. Auf diesen äußeren beiden Ringen sind gefederte Kontaktstifte angeordnet, die max. 300 °C ausgesetzt werden (Abb 3). Mit diesen Stiften wird durch die Spülkammer hindurch (Abb. 4) die Verbindung von der Keramik zur Unterseite der Leiterkarte sichergestellt. Mit Wärmebildern und Temperatursensoren wurde bei einer Wafer-Temperatur von 300 °C eine Erwärmung der Leiterkarte auf maximal 65 °C nachgewiesen (Abb. 6).

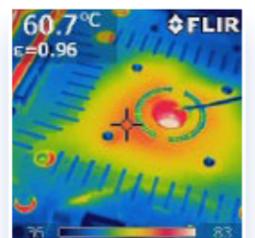


Abbildung 6: Wärmebild der Leiterkarte. Foto: IMMS.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem entwickelten Konzept und der damit realisierten Charakterisierung von Hochtemperatur-ASICs wurde gezeigt, dass ein kompletter halbautomatischer Wafer-Test bis 300 °C durchführbar ist. Die prozessierten ASICs zeigen die erforderliche Funktionalität und werden bis zum Projektende Langzeittests unterzogen. Der Aufbau wurde so gestaltet, dass er für angestrebte Redesigns genutzt und darüber hinaus für andere ASICs in diesem Temperaturbereich mit geringem Aufwand angepasst werden kann: Zum einen sind die kostengünstigen Standard-FR4-Leiterkarten für alternative Tests, für die aktive Bauelemente genutzt werden sollen, ausreichend. Das Layout der Keramikleiterplatte erlaubt es darüber hinaus, neue Sondenringe mit anderen Nadelpositionen einzusetzen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Marco Reinhard, marco.reinhard@imms.de

Das Projekt HoTSens wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ unter den Kennzeichen 16ES0008 gefördert.





Motivation

Das IMMS hat ein einfach installierbares drahtloses Sensorsystem für die „taktile Straße“ erforscht, entwickelt und im Feld getestet, das dazu beiträgt, die Elektromobilität voranzubringen. Da Reichweiten von E-Autos kürzer sind als die von konventionellen Fahrzeugen, die „Strom-Tankzeiten“ jedoch länger, sind aktuelle lokale Informationen u.a. zu Verkehrsströmen wichtig, um reisezeit- und reichweitenoptimiert navigieren zu können.

Das System des IMMS nimmt über Magnetfeldsensoren in der Straßendecke Fahrzeugdaten auf, wie Anzahl, Fahrzeugklasse oder Geschwindigkeit. Dabei werden die lokalen Veränderungen des Erdmagnetfelds durch überfahrende Wagen passiv erfasst, auf dieser Grundlage Fahrzeuge erkannt und hinsichtlich Typ und Geschwindigkeit klassifiziert. Die vom IMMS entwickelte Systemlösung erhebt die genannten Verkehrsdaten drahtlos, sammelt diese in einem Gateway in der Nähe zusammengehöriger Detektoren und übermittelt sie anschließend an einen Datenkonzentrator in der Verkehrsleitzentrale der Modellstadt Erfurt. Dort ergänzt das seit April 2015 für Feldtests installierte

Einbau drahtloser Sensorknoten in die Straßendecke für den seit April 2015 laufenden sMobility-Feldtest in Erfurt. Foto: IMMS.

neue Drahtlosnetzwerk aus 172 Sensorknoten und 17 Gateways bereits bestehende Erfassungslösungen.

Voruntersuchungen

In der Straßendecke verbaute Detektoren bedeuten hohe Anforderungen hinsichtlich der Outdoor-Tauglichkeit, der Batterielaufzeit bei begrenztem Bauraum und stark schwankenden Temperaturen sowie der Zuverlässigkeit bei der Drahtloskommunikation. Außerdem sollte das System flexibel sein, das heißt nachträgliche Entnahmen und Umpositionierungen von Detektoren ermöglichen sowie um Sensorik erweiterbar sein. Aus diesem Grund hat das IMMS umfangreiche Voruntersuchungen zur Funkkommunikation mit verschiedenen Antennen, zu Energieverbräuchen von Systemkomponenten bei unterschiedlichen Szenarien sowie zu Energy-Harvesting-Konzepten vorgenommen, die im Jahresbericht 2014 erläutert sind. Auf dieser Basis hat das IMMS eine flexible Systemlösung erarbeitet, diese um separate Umweltdetektoren für eine schadstoffabhängige Verkehrslenkung erweitert, Labormuster aufgebaut und getestet und die Komponenten für den Feldtest in Erfurt aufgebaut.



Die Komponenten der „taktile Straße“ für den Feldtest

Verkehrsdetektoren

Diese kompakten eingebetteten Systeme aus einer vom IMMS optimierten Elektronik und einer Batterie werden mit geringem Aufwand in ein Bohrloch in der Straßendecke installiert (Abbildung 1). Wesentliche Komponenten sind ein kombinierter Mikrocontroller/Transceiver (Atmel ATmega128RFA1), ein Magnetfeldsensor und eine Planarantenne.

Der mit 128 Hz ausgelesene Sensor erfasst Änderungen des Erdmagnetfelds durch Fahrzeugüberfahrten, deren Beginn und Ende erkannt werden, und die mit weitergehenden Auswertungen eine Klassifikation in Pkw und Lkw ermöglichen.

Detektionen werden im Standard-Betriebsmodus unmittelbar an das zugeordnete Gateway gemeldet, das sich in bis zu 75 m Sichtlinie befindet. Für deren abgesicherte Kommunikation hat das IMMS ein Verfahren implementiert, das kryptografische Hashes nutzt. Dazu hat das Institut ein maßgeschneidertes Anwendungsprotokoll für die Kommunikation im Sensornetz auf der Basis von IEEE 802.15.4 und TinyOS entwickelt. Es ermöglicht neben Daten- und Statusnachrichten auch Kommandos vom Gateway zum Detektor und eine Zeitsynchronisation zwischen beiden. Dadurch lassen sich Geschwindigkeitsmessungen für Fahrzeuge vornehmen, indem je zwei Detektoren als Paar in definiertem Abstand zueinander in Verkehrsflussrichtung installiert und die Messungen korreliert werden. Je nach konkreten Anforderungen können die Detektoren in verschiedenen Datenerfassungsmodi (Ereignisse, Aggregation, Rohdaten usw.) und bis zu zwei Jahre im Batteriebetrieb arbeiten.

Verkehrsgateways

Als zentrale Komponente eines Erfassungsstandortes und damit eines Verkehrsdetektornetzes sammeln die am IMMS entwickelten Gateways die Daten von jeweils zugeordneten Detektoren ein, geben diese über HTTPS abgesichert via Mobilfunk ins Internet an Erfurts Datenkonzentrator weiter, überwachen den Status und erlauben die Fernkonfiguration des Sensornetzes.



Abbildung 1: Detektor-Elektronik und -Einbauhülse (7 cm Durchmesser, 12 cm Tiefe). Die Verkehrsdetektoren sind kompakte eingebettete Systeme aus einer optimierten Elektronik und einer Batterie, die in einem Kunststoffgehäuse in ein Bohrloch in der Straßendecke mit geringem Aufwand installiert werden. Foto: IMMS.

Grundlage der Gateway-Entwicklung war die flexible Embedded-Linux-Plattform BAsE-Box des IMMS, die für das industrielle Umfeld robust ausgelegt ist und maximal 1,7 Watt verbraucht. Sie besteht aus einer Basisplatine mit ARMv7-Prozessor (Cortex A8) und Steckverbindern für Erweiterungsplatinen. Diese Basisplattform hat das IMMS zum Gateway ausgebaut und dafür folgende Erweiterungsplatinen entwickelt:

- eine Energieversorgungs- (Spannungsbereich 9..36 V) und Kommunikationsplatine (Mobilfunk, Sensornetz)
- eine kaskadierbare I/O-Platine (16 potenzialfreie Kontakte), insgesamt bis zu 64 Kontakte bei vier Platinen
- Platinen zum Akkulademanagement und zur Akkuüberwachung

Damit hat das IMMS drei Ausführungen von Gateways realisiert. Die ersten beiden sind in einer Höhe von 4 m über der Straße an Ampel- oder Lichtmasten installiert:

- Standardausführung zur Outdoor-Mastmontage mit dauerhafter Stromversorgung (Abbildung 2)
- akkugepufferte Variante zur Outdoor-Lichtmastmontage mit Nachtstrom-Versorgung
- Variante mit direkter Anbindung an die Steuerung einer Ampelanlage über potenzialfreie Kontakte (Schaltschrank-Montage)



Abbildung 2: Gateway in der Standard-Ausführung mit dauerhafter Stromversorgung. Foto: IMMS.



Abbildung 3:
Offener Umweltdetektor mit Energieversorgung, Gateway-Elektronik und Sensorsystem (Platinen von links nach rechts).
Foto: IMMS.

Das IMMS hat eine Softwarelösung mittels Linux, C++ und Qt realisiert, die diese Hardware-Unterschiede adressiert und entsprechende konfigurierbare Funktionalitäten bietet. Das maßgeschneiderte Anwendungsprotokoll im Sensornetz ermöglicht es dem Gateway zudem, bei unvermeidlichen zwischenzeitlichen Beeinträchtigungen in der Funkkommunikation mit Detektoren Kompensationsmechanismen für Robustheit und Fehlertoleranz anzuwenden. So werden z.B. verlorene Nachrichten über Zähler kompensiert, andere Werte bei Notwendigkeit extrapoliert.

Mit der neuen Lösung lassen sich folgende Daten von Verkehrsflüssen erfassen: Verkehrsstärke (Fahrzeuge pro Stunde) gesamt und nach Fahrzeugklasse, Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h) gesamt und nach Fahrzeugklasse, Belegungszeiten (Fahrzeug über dem Detektor in % der Zeit im Intervall) und Bodentemperatur in °C. Diese Daten werden in einem konfigurierbaren Intervall, das im Feldtest in Erfurt bei einer Minute liegt, an den Datenkonzentrator übertragen. Damit stehen minutengenaue Informationen für die Auswertung der Verkehrslage bereit. In größeren Abständen werden außerdem Statusinformationen zum Zustand der einzelnen Komponenten übertragen.

Umweltdetektoren

Für eine schadstoffbezogene Verkehrslenkung erheben die Umweltdetektoren Messwerte für Stickstoffdioxid, darüber hinaus für Kohlendioxid und -monoxid sowie Temperatur und relative Luftfeuchte. Diese Daten werden direkt an den Datenkonzentrator übermittelt. Das dafür verwendete Gateway hat funktionale Gemeinsamkeiten mit dem für die Verkehrsdetektoren und wurde mit dem Umweltsensorsystem eines regionalen Anbieters in einem gemeinsamen, outdoor-tauglichen Gehäuse integriert (Abbildung 3).

Diese am IMMS realisierte Lösung hat das Potenzial, deutlich preisgünstiger als verfügbare kommerzielle Sensorsysteme zur Luftschadstoffmessung zu sein. Sie ist somit attraktiv für Kommunen, die wegen strenger werdender Auflagen Schadstoffmesswerte zunehmend feingranularer aufzeichnen müssen. Die Systemerweiterung um den Umweltdetektor zeigt, dass sich künftig alternative oder zusätzliche Sensorsysteme innerhalb der Plattform implementieren lassen.

Datenkonzentrator

Für den Linux-basierten Datenkonzentrator hat das IMMS die Software entwickelt. Diese erfasst die Daten aller Gateways und damit aller Verkehrs- und Umweltdetektoren im Stadtgebiet, speichert und leitet sie per OCIT-C-Protokoll¹ an den Verkehrsrechner der Stadt Erfurt weiter, wo sie in das Verkehrsmanagement einfließen. Außerdem bietet die Software ein HTML5- und AJAX-basiertes Web-Frontend, mit dem sich das System konfigurieren und dessen Status überwachen lässt (Abbildung 4).

Ergebnisse des Feldtests

Von April bis September 2015 sind alle im Gesamtprojekt entwickelten Komponenten und Konzepte gemeinsam mit Probanden, die Elektrofahrzeuge mitsamt dieser neuen Infrastruktur nutzen, in einem Feldtest mit zwei Demonstratoren untersucht worden. In einem der beiden – „sMobility City Erfurt“ – sind an 17 Standorten im Stadtgebiet Erfurt je ein Gateway und insgesamt 172 Verkehrsdetektoren installiert, außerdem zwei Umweltdetektoren und ein Datenkonzentrator in der Verkehrsleitzentrale Erfurt. 14 der Gateways sind Standardausführungen, zwei sind akkugepuffert und eins ist eine I/O-Variante in einer

¹ OCIT-C: Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems – Center to Center

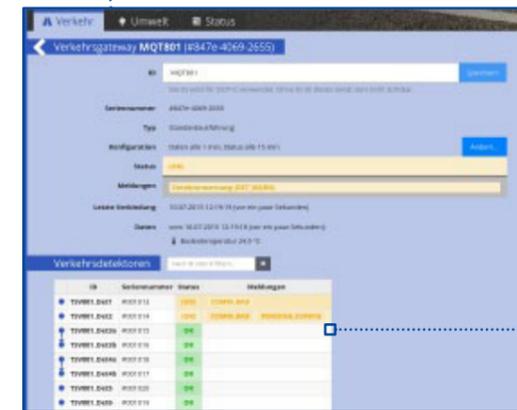
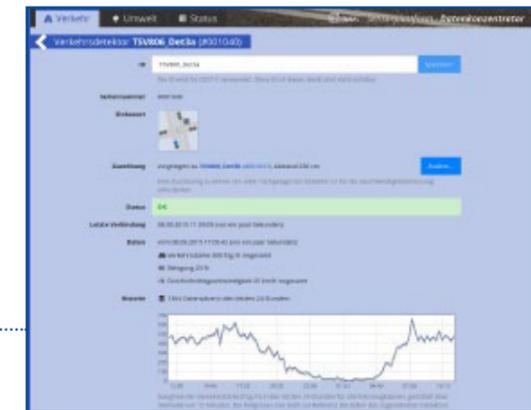


Abbildung 4:
Web-Frontend des Datenkonzentrators.

Oben links: Gateway-Übersicht.
Unten links: Detailansicht eines Gateways.
Unten rechts: Detaildarstellung eines Detektors einschließlich Tagesganglinie der Verkehrsstärke.
Grafik: IMMS.



Ampelanlage. Das System ergänzt die vorhandene Detektionsinfrastruktur und ermöglicht so eine genauere Erfassung der Verkehrslage an den ausgewählten Standorten. Auf dieser Basis sind exaktere Modellierungen und Prognosen für das Verkehrsmanagement möglich. Zudem werden auch Informationen darüber bereitgestellt, wie sich Verkehrsströme nach dem Überqueren einer Kreuzung aufteilen. Die Komponenten werden weiter betrieben, um langfristige Aussagen zu Stabilität und Laufzeit treffen zu können.

Mit dem Feldtest wurde der Funktionsnachweis der Sensorplattform erbracht. Mit der Wahl der einzelnen Detektorstandorte ließen sich auch gezielt verschiedene Störfaktoren in der praktischen Anwendung untersuchen. Es wurden verschiedene Konstellationen analysiert, die die Funkbeziehung zum Gateway beeinträchtigen – sowohl stationär, wie bauliche Verhältnisse, als auch temporär, wie z.B. Witterungseinflüsse und das im Tagesverlauf variierende Verkehrsaufkommen. Daraus konnten zum einen genauere Vorgaben zur Standortwahl bei zukünftigen Installationen abgeleitet werden. Zum anderen bestätigten die Untersuchungen, dass es notwendig war, die o.g. Mechanismen für Fehlertoleranzen zu integrieren, die vorübergehende Störungen kompensieren.

Ausblick

Das IMMS hat mit sMobility sein langjährig aufgebautes Know-how in der Realisierung drahtloser Sensornetze auf Verkehrsinfrastrukturen erweitert und wird auf die Ergebnisse aufbauen. Es werden verschiedene Ansätze zur Verwertung verfolgt, darunter auch die Übertragung auf Anwendungsbereiche wie den Schienenverkehr. Für Weiterentwicklungen wird das IMMS eine Testumgebung mit realitätsnahen Bedingungen und leichtem Zugriff unmittelbar vor dem Institut am Ernst-Abbe-Zentrum in Ilmenau installieren. Dort werden künftig Lösungen zur Parkraumüberwachung und verschiedene Verbesserungspotenziale untersucht, z.B. im Energiemanagement durch alternative Hardwarekomponenten, eine adaptivere Sensorauswertung und eine Repeater-Entwicklung als weitere Systemkomponente für größere Funkreichweiten.

Kontakt: Dipl.-Inf. Marco Götz, marco.goetze@imms.de



Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01ME12076 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



SONOTEC

Lecksuche in industriellen Prozessen mit Ultraschallsensorik. Digitale Lösung für die analoge Welt.

Motivation

In der Industrie werden bis zu 10% der elektrischen Energie allein dafür verwendet, um Druckluft zu erzeugen. Etwa ein Drittel dieser Luft entweicht durch Lecks und verursacht nicht nur Energieverluste und Kostensteigerungen in den Prozessen, sondern auch Fehlfunktionen in den betreffenden Maschinen und Anlagen. Um diesem Problem zu begegnen, werden bereits seit langem Ultraschalltechnologien zur Lecksuche eingesetzt. Die etablierten analogen Prüfverfahren sind zwar preiswert, robust und einfach. Mit ihnen lassen sich aber auch nur Ultraschallwellen in einem sehr schmalen Frequenzband mit einer Breite von in der Regel etwa 4 kHz erfassen. Dies ermöglicht einerseits eine hohe Empfindlichkeit, geht jedoch andererseits zu Lasten der Signalinformation, da mit der engen Frequenzspanne nur ein geringer Bereich willkürlich ausgewählt wird, der nicht unbedingt die wichtigen Ultraschallsignale enthalten muss. Instandhalter stehen daher regelmäßig vor der Aufgabe, mit schmalbandigen analogen Prüfgeräten Druckluftverluste aus sehr groben Schätzwerten zu bestimmen. Prüfwerte müssen nicht selten von Hand dokumen-

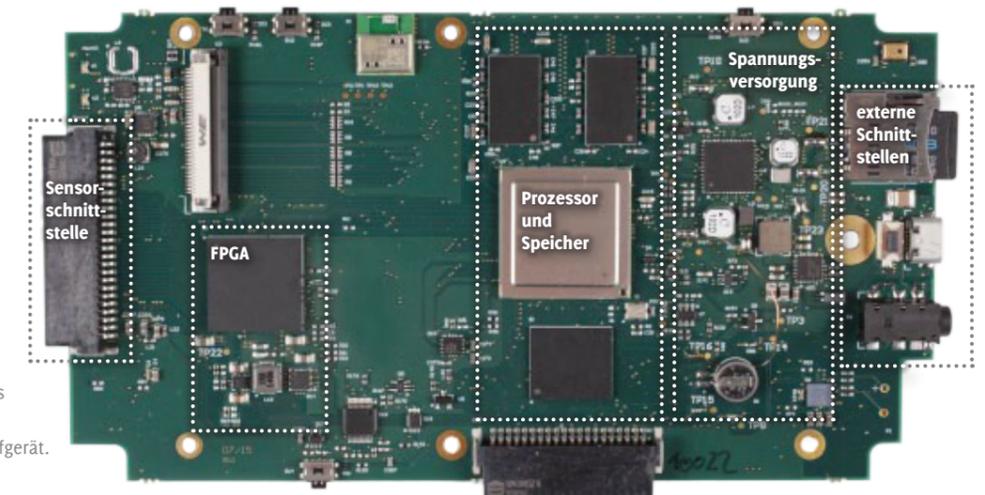
Messungen an der am IMMS entwickelten Hardware für ein digitales Handgerät, mit dem Lecks in Druckluftleitungen mittels Ultraschall gefunden und bewertet werden können. Foto: IMMS.

tiert werden. Eine darauf aufbauende Bewertung von Leckverlusten ist damit kaum möglich. Dies erschwert die Planung von wirksamen Maßnahmen in der vorbeugenden Instandhaltung und im Energiemanagement.

Anforderungen von Industrie 4.0 und Maintenance 4.0, wie Vernetzung, Mobilität, schnelle Verfügbarkeit und Auswertung von Informationen für Prozessoptimierungen, erfordern ein völlig neues Herangehen und neue Lösungen für dieses Problem.

Die Firma SONOTEC und das IMMS haben daher ein neuartiges Ultraschallprüfgerät auf digitaler Basis entwickelt. Das tragbare Handgerät mit Fünf-Zoll-Touchscreen verbindet für die vorbeugende Instandhaltung erstmalig neuartige Messtechnik, die Ultraschallwellen in einem breiten Frequenzbereich von 20 bis 100 kHz erfasst, innovative Luft- und Körperschallsensorik sowie intelligente und intuitiv bedienbare Apps. Un-

Am IMMS entwickelte Platine für das neue digitale Ultraschallprüfgerät. Foto: IMMS.



ter anderem lassen sich Prüfdaten, Pegelwerte und Spektrogramme speichern, Prüfberichte generieren und über die integrierte Kamera Lecks dokumentieren. Schnittstellen wie Bluetooth, USB und SD/MMC, ermöglichen eine effektive Datenkommunikation und eine Integration in bestehende Systeme.

SONOTEC hat das Gesamtsystemkonzept des Handgerätes entwickelt, die Hard- und Software der Ultraschallsensorik sowie die Applikationssoftware mit Datenauswertungsalgorithmen und Nutzeroberfläche. Das IMMS hat die digitalen Komponenten der Hardware entworfen und realisiert sowie die FPGA-Firmware entwickelt – ein wichtiges Element für die Performance des Geräts. Darüber hinaus hat es neben der Anpassung und Portierung des Android-Betriebssystems Algorithmen entwickelt, dank derer die Messwerte hörbar gemacht werden können. Somit können Prüfengeure an ein von Analoggeräten gewohntes Vorgehen bei der Lecksuche anknüpfen.

Die Lösung im Detail: Gesamtkonzept

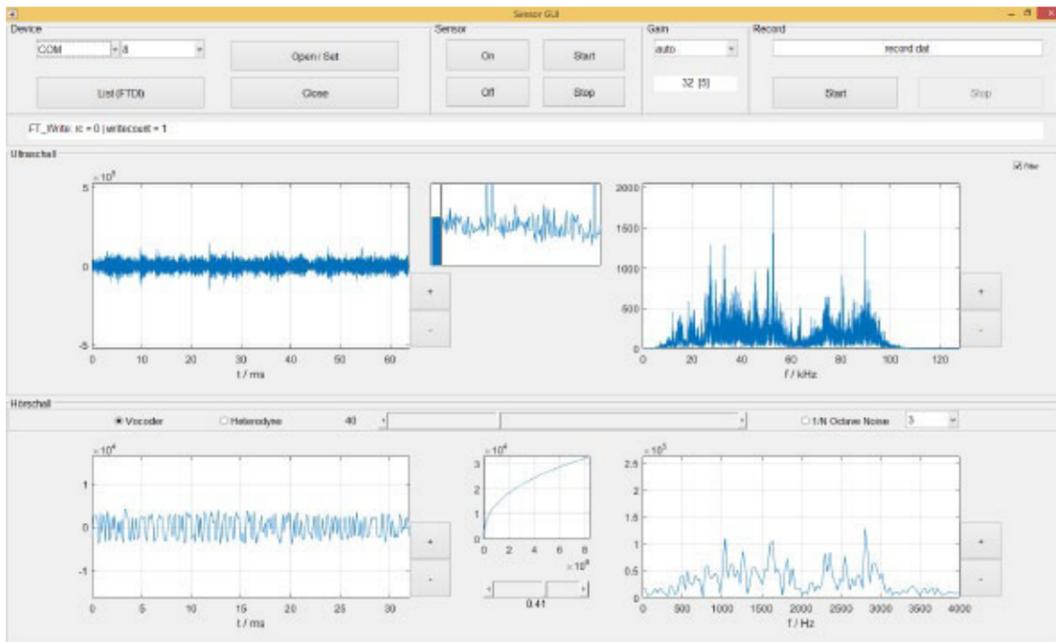
Breitbandige Sensorik erfordert hohe Abtastraten und eine leistungsfähige Signalverarbeitung, um die in Ultraschallsignalen enthaltene physikalische Information nutzen zu können. SONOTEC hat daher die physikalischen Grundlagen und verfahrenstechnischen Hintergründe sowohl für das Problem der Lecksuche und -bewertung als auch für andere Anwendungen analysiert und neu bewertet. Auf dieser Basis hat SONOTEC eine neue Verfahrenskonzeption erarbeitet, die die Integration starker Rechenleistung, flexibler Signalverarbeitungsalgorithmen und Anwendungssoftware als Grundlage für diese und neue Anwendungen ermöglicht.

Entstanden ist eine komplett digitale sowie modulare und skalierbare Lösung. An das Handgerät werden per Kabel zwei neuentwickelte Ultraschallsensoren mit Signalvorverarbeitung und Analog-Digital-Wandlung angeschlossen. Da an das Gerät bereits digitalisierte Daten geliefert werden, wird ein breites Spektrum von Sensoren direkt verwendbar sein. Zudem erlaubt die interne Struktur der Plattform eine Erweiterung auf mehrere schnelle Messkanäle sowie um langsame Hilfskanäle. Dadurch wird sich diese Technik in der Instandhaltung künftig wesentlich breiter einsetzen lassen.

Die Bedienung des Prüfgeräts, die Berechnungen und die Datenkommunikation werden über verschiedene, von SONOTEC entwickelte Apps verwaltet. Komplexe Funktionen, wie z. B. Berechnungen, sind innerhalb der Apps und im digitalen Rechenkern gekapselt. Durch die Automatisierung des gesamten Datendurchlaufs kann sich der Nutzer auf die Prüfaufgabe und die diesbezüglichen Abläufe konzentrieren. Wesentlich für die einfachere Benutzung ist vor allem, dass komplexe Ultraschalldaten verwendet und in einfache grafische Information übersetzt werden. Daher wurde eine leistungsstarke Grafik für eine einfache und anschauliche Darstellung von Ergebnissen implementiert. Neben der Messfunktionalität und der Signalauswertung sind auch Routenführungen und Instandhaltungshinweise integriert.

Beitrag des IMMS

Grundlage der Arbeiten bildete das Know-how des IMMS im Bereich digitaler Architekturen und von Signalabläufen in akustischen Messsystemen sowie in der Audioverarbeitung. Ausgehend vom Gesamt-



MATLAB-Entwicklungsumgebung für die Hörbarmachung. Grafik: SONOTEC.

systemkonzept hat das IMMS das Hardwarekonzept für das Handgerät entwickelt und auf dieser Basis den Schaltplan und das Layout der Platine erstellt. Für die Implementierung der schnellen Signalverarbeitungsalgorithmen hat das IMMS ein FPGA integriert. Dieses Hardware-Element, in das logische Schaltungen programmiert werden können, ist das für die Performance wesentliche Element. Darüber hinaus wurde ein NXP-iMx6-Prozessor für die Auswertung der Daten und die Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie Bluetooth, zwei SD-Karten-Slots sowie USB implementiert. Das Gerät verfügt über 1GB DDR3 und 8GB Flash-Speicher. Der 15Wh Lithium-Ionen-Akkumulator kann über USB geladen werden.

Über einen parallelen Datenbus kann der Prozessor auf den Speicher des FPGA zugreifen und die berechneten Daten übertragen. Auch die FPGA Firmware kann über diese Schnittstelle in das FPGA geladen werden.

FPGA-Firmware: Signalverarbeitung und Hörbarmachung

Der FPGA lässt sich reprogrammieren und ermöglicht so über weitere Firmware-Module die Implementierung applikationsspezifischer Algorithmen. Für die Lecksuche hat das IMMS eine Firmware für den FPGA im Handgerät entwickelt. Hauptbestandteile sind die Sensorschnittstelle, digitale Signalverarbeitungsalgorithmen und die Schnittstelle zum Prozessor. Über die Schnittstelle zum Sensor wird der serielle Datenstrom empfangen und an die Signalverarbeitung weitergeleitet. Als Algorithmen wurden Filter zur Signalkorrektur, FFT zur Berechnung der Frequenzanteile und eine Hörbarmachung des Ultraschallsignals entwickelt.

Für den Umgang mit dem Gerät ist es wichtig, wie der Ultraschall für den Prüfer „hörbar“ gemacht wird. Beim analogen Verfahren wurde hierfür das schmale Frequenzband um die Trägerfrequenz in den Hörbereich verschoben. Die daraus berechneten Spektren mit niedriger Abtastrate haben aber eine andere Bedeutung als Spektren mit hoher Abtastrate aus dem neuen Verfahren. Im neuen Prüfgerät ist im Prinzip die komplette state-of-the-Art-Signalverarbeitung der akustischen Messtechnik möglich. Für die Hörbarmachung hat das IMMS ausgehend von einem Voice-



Das neuentwickelte Ultraschallmessgerät für die vorbeugende Instandhaltung im Einsatz. Das Gerät wurde auf der HANNOVER MESSE 2016 präsentiert. Bildrechte: fotolia: industrieblick/SONOTEC.

Encoder- Verfahren einen Algorithmus entwickelt, der die Ultraschallsignale im Frequenzbereich von 10 kHz bis 100kHz um Faktor 32 komprimiert und in den hörbaren Bereich transformiert. Der Algorithmus wurde zuerst in Matlab umgesetzt und mit SONOTEC gemeinsam bewertet und optimiert. Anschließend erfolgte die Implementierung in einem FPGA, sowie Test und Verifikation.

Betriebssystem

Für die komplexe Hardwarearchitektur hat das IMMS Embedded Linux und Googles Android als mögliche Betriebssysteme analysiert. Im Ergebnis wurde Android portiert. Das neue, mobile Prüfgerät profitiert vor allem von den in Android bereits enthaltenen Energiesparfunktionen sowie von dem vielen Nutzern bereits vertrauten Anzeige- und Bedienkonzept, was eine intuitive Bedienung ermöglicht. Da Android als OpenSource-Software vorliegt, lassen sich zudem leicht notwendige Anpassungen und Erweiterungen vornehmen. Somit wurde z.B. der Nutzer-Zugriff auf den internen Speicher und die beiden SD-Karten des Gerätes abweichend vom Standardverhalten speziell für den Einsatz als Prüfinstrument abgestimmt. Dar-

über hinaus wurden weitere Vorteile genutzt, wie z.B. die leistungsfähige Entwicklungsumgebung Android-Studio bei der Realisierung der Apps. Über die Android-API kann zudem auf sehr viele Standardfunktionen eines Handheld-Gerätes, wie Grafikausgabe, Schnittstellen und Standby-Funktionen, etc. komfortabel zugegriffen werden.

Für die Portierung des Betriebssystems auf Basis eines vom CPU-Hersteller bereitgestellten Board-Support-Packages hat das IMMS unter anderem die wichtigsten Komponenten, allen voran Bootloader und Linux-Kernel, für die Hardware des Gerätes angepasst. Das Institut hat einen Treiber entwickelt, der das Einlesen und die weitere Verarbeitung der vom FPGA gelieferten Ultraschall-Datenströme ermöglicht. Besondere Herausforderung war hierbei die genaue Abstimmung von Treiber und FPGA aufeinander, so dass eine schnelle und effiziente Datenübertragung mit einer Datenrate von 3,8MB/s gewährleistet ist. Damit werden die Daten in Echtzeit übertragen, so dass ein kontinuierlicher Datenstrom zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht, z.B. zur Speicherung auf SD-Karte und zur Ausgabe des hörbarmachten Signals.

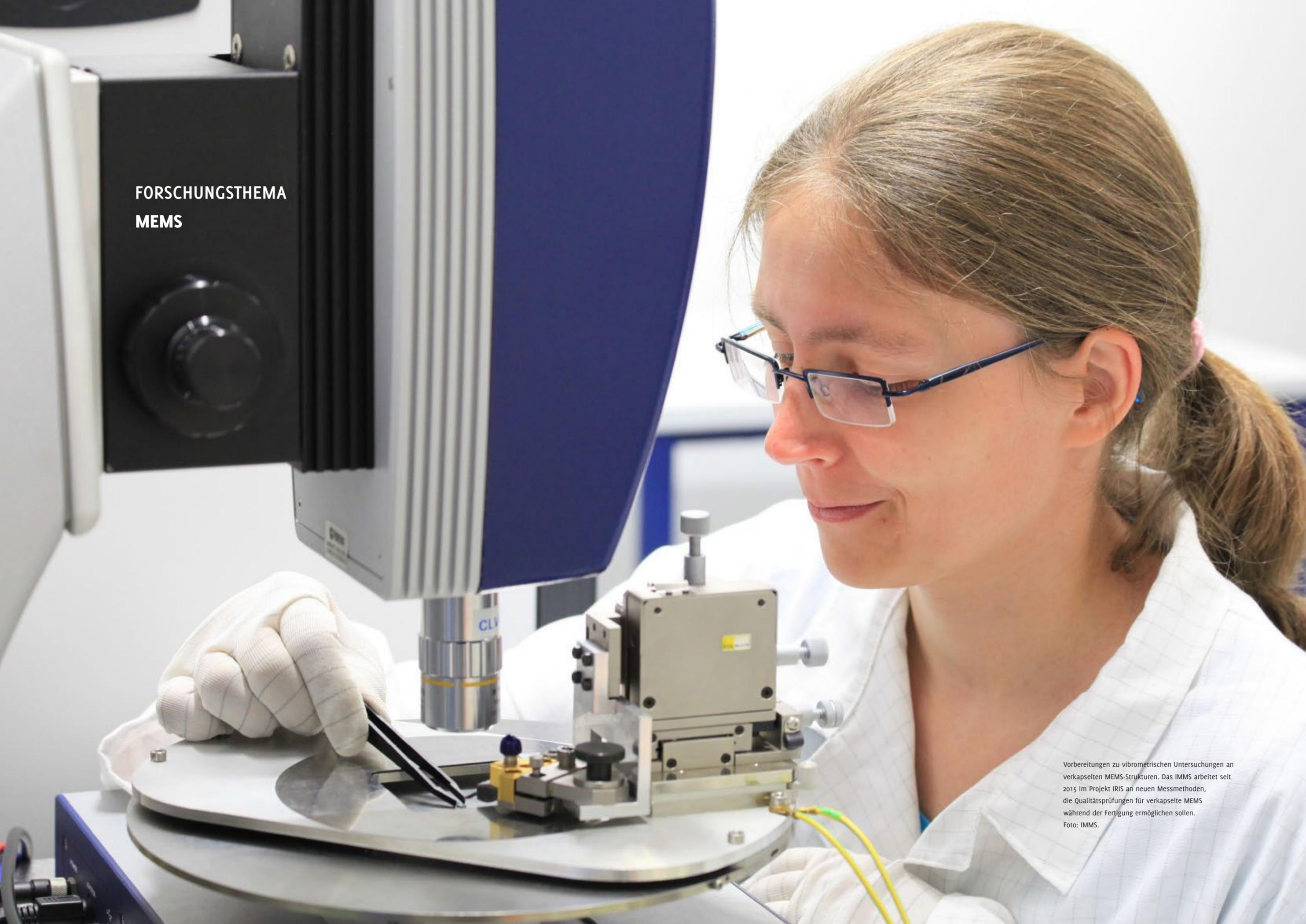
Ausblick

SONOTEC und IMMS haben in enger Kooperation eine Nullserie entwickelt und getestet. Das Prüfgerät wurde erstmalig auf der Hannover-Messe im Frühjahr 2016 erfolgreich der Öffentlichkeit vorgestellt. Derzeit unterstützt das IMMS die Firma SONOTEC bei der weiteren Überführung des Gerätes in die Serienfertigung. Anwender werden damit künftig ein Prüfgerät zur verbesserten Diagnose von Maschinenfehlern, zur Erhöhung der Energieeffizienz und vor allem zur wesentlich besseren Bewertung von Trends und Planung von Wartungsintervallen zur Verfügung gestellt bekommen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Sebastian Uziel
Sebastian.Uziel@imms.de

FORSCHUNGSTHEMA
MEMS



Vorbereitungen zu vibrometrischen Untersuchungen an verkapselten MEMS-Strukturen. Das IMMS arbeitet seit 2015 im Projekt IRIS an neuen Messmethoden, die Qualitätsprüfungen für verkapselte MEMS während der Fertigung ermöglichen sollen.
Foto: IMMS.

Highlights 2015 auf dem Gebiet mikroelektromechanischer Systeme (MEMS)

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) vereinen auf einer Fläche von nur wenigen Quadratmillimetern mikromechanische Sensoren und Aktoren sowie Steuerungselektronik in einem einzigen Bauelement. Im Fokus unserer Forschungsaktivitäten stehen MEMS-basierte Elektronik-Systeme für innovative Applikationen in der industriellen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie in speziellen, jungen Wachstumsfeldern wie den Lebenswissenschaften und der Biomedizintechnik. Neuartige Ansätze, wie z.B. die an unserem Institut entwickelten Lösungen für mikromechatronische Energy-Harvesting-Module, ermöglichen vielfältige Produktinnovationen mit attraktivem Marktpotential besonders für kleine und mittelständische Unternehmen.

Um diese Felder gemeinsam mit unseren Kunden erfolgreich erschließen zu können, bauen wir unsere Fähigkeiten zur Entwicklung von MEMS-basierten Systemen seit mehreren Jahren stetig aus. Hierzu arbeiten wir eng mit MEMS-Technologieentwicklungs- und Fertigungspartnern zusammen und konzentrieren uns auf den systematischen Entwurf integrierter mechatronischer Systemlösungen. Einen weiteren Schwerpunkt unserer Arbeiten bilden die Charakterisierung und der Test von MEMS-Komponenten mittels spezieller Labor- messtechnik und zerstörungsfreier Analysemethoden.

MEMS2015-Projektabschluss mit EDA Achievement Award 2015

Forscher des IMMS und der TU Ilmenau wurden am 21.05.2015 auf dem edaWorkshop15 in Dresden für ihre Arbeiten zum Schaltplan-basierten Entwurf integrierter MEMS-ASIC-Systeme mit dem „EDA Achievement Award 2015“ für besondere Forschungs- und Entwicklungsleistungen für die elektronische Designautomation (EDA) vom edacentrum e.V. ausgezeichnet. MEMS als ein Schlüssel zu Innovationen im Geräte- und Anlagenbau und damit als Teil des Zukunftsprojekts „Industrie 4.0“ sollen künftig auch von kleinen und mittleren Unternehmen mit wenig Designerfahrung individuell und maßgeschneidert mit einem flexiblen MEMS- und Elektronik-Baukastensystem erstellt werden können. Die Forscher haben zu diesem Zweck im 2015 abgeschlossenen Projekt MEMS2015 das seit langem bewährte Bausteinprinzip aus der mikroelektronischen Entwurfsmethodik auf mechanische Sys-



Verleihung des EDA Achievement Awards 2015 an Prof. Dr. Ralf Sommer als Leiter des gewürdigten Forscherteams. Foto: Ralf Popp, edacentrum.

teme und MEMS übertragen und die Entwurfsabläufe für Elektronik und Mechanik zu einer durchgängigen Systematik zusammengeführt. Damit können nun MEMS als Gesamtsystem simuliert und verifiziert und somit Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Darüber hinaus hat das IMMS eine Ausleseschaltung für ein intelligentes Kraftsensor-MEMS entwickelt und Erkenntnisse daraus in die neue Methodik einfließen lassen. Diese Ausleseschaltung und der mit dem neuen Design-Tool entworfene MEMS-Beschleunigungssensor mit Auswerteelektronik wurden gefertigt und am IMMS charakterisiert. Die Ergebnisse sind die Basis für die Validierung der Designmethodik und für die Arbeiten u.a. im Projekt RoMulus.

Projekt IRIS gestartet

In dem 2015 begonnenen Projekt arbeitet das IMMS an neuen Messmethoden, die Qualitätsprüfungen für verkapselte MEMS während der Fertigung ermöglichen sollen. Komplizierte MEMS-Strukturen werden vor diversen Einflüssen meist durch eine Verkappung geschützt. Die so eingeschlossenen Strukturen, die heute bereits millionenfach zum Einsatz kommen, können allerdings während der Produktion bisher nicht unter den realen Bedingungen der Verkappung untersucht werden. Das frühzeitige Erkennen, Verstehen, und schnelle Korrigieren von Abweichungen beim Fertigungsprozess stellt einen wichtigen Wettbewerbsvorteil für die MEMS-Hersteller dar.

Im Projekt „IRIS“ sollen daher Lösungen erarbeitet werden, mit denen verkapselte MEMS mit einer neuartigen Infrarotmesstechnik in der In-Line-Fertigungsprozessregelung analysiert werden können. Das IMMS entwickelt Messabläufe für das In-Line-Prozessmonitoring, mit dem mehrere Sensoren parallel gemessen werden können. Des Weiteren erforscht das Institut neue Methoden zur dynamischen Anregung passiver MEMS und entwickelt Teststrukturen. Zudem validiert es das Verfahren und testet die erarbeiteten Messalgorithmen anhand der prozessierten Teststrukturen unter Fertigungsbedingungen.



MUSIK Mikroelektronik und Mikromechanik verschmelzen im Entwurf

Motivation

Für 2020 wird eine Versechsfachung der mobil zu übertragenden Datenmenge im Vergleich zu 2015 erwartet. Diese wird weltweit auf 24 Exabyte – das sind 24 mal 10^{18} Byte – pro Monat ansteigen.¹ Für diese enormen Anforderungen werden unter anderem neue, höherfrequente Funkbänder bereitgestellt. Mehr Bänder und immer schmalere Abstände zwischen den Bändern erfordern mehr und leistungsfähigere sowie kleinere Filter, die in den mobilen Kommunikationsgeräten auf engstem Raum eine störungsfreie Datenübertragung sicherstellen sollen. Für diese und andere Herausforderungen auf dem Weg zum Internet der Dinge sind neue Ansätze notwendig. Einer davon ist, Stärken von miniaturisierter Elektronik und Mechanik in mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) zu bündeln. Das IMMS hat Beiträge zu einem solchen Ansatz erarbeitet, der in der DFG-Forscherguppe MUSIK² unter dem Dach des fakultätsübergreifenden Instituts IMN MacroNano® der TU Ilmenau unter der Leitung des Fachgebietes Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik untersucht und implementiert wird.

¹ http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html

² MUSIK Multiphysikalische Synthese und Integration komplexer Hochfrequenz-Schaltungen, <http://www.tu-ilmenau.de/musik>

Das IMMS hat die hier abgebildeten BAW-Resonatoren sowie weitere MEMS untersucht und modelliert, damit sie für den Entwurf komplexer Funktionsgruppen genutzt werden können. Foto: IMMS.

Neben den typischen MEMS-Sensor/Aktor-Elementen, wie Drucksensoren, Mikrofonen, Inertialsensoren, Cantilevern und Scan-Spiegeln, existieren MEMS-Bauelemente, die im Vergleich zu ihrem elektronischen Pendant deutlich bessere Eigenschaften besitzen, wenn sie in der Signalverarbeitung eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind BAW-Filter (bulk acoustic wave) für eine störungsfreie Datenübertragung und MEMS-Schalter, die Signale deutlich geringer dämpfen als elektronische Schalter, was insbesondere bei hohen Frequenzen z.B. im Mobilfunkbereich nützlich ist.

Lösungsansatz: Modelle für die Simulation von Gesamtsystemen

Genau hier setzen die Arbeiten von MUSIK an. Ziel ist es, Mikroelektronik und -mechanik in Zukunft in einem einzigen Siliziumchip, d.h. monolithisch, zu verschmelzen und als multiphysikalische komplexe Systeme entwerfen, simulieren und mit geeigneter Substrattechnologie fertigen zu können. Daher ist es notwendig, bereits im Entwurf mikroelektronische Funktionsgruppen mit mikromechanischen zu ersetzen bzw. bei komplementären Eigenschaften zu ergänzen und Designs mit Gesamtsystemsimulationen

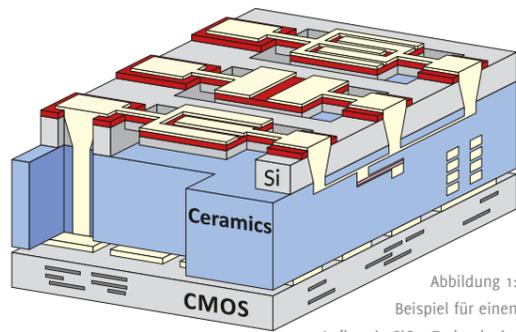


Abbildung 1:
Beispiel für einen Aufbau in SiCer-Technologie:
3D-Modell eines hybridintegrierten MEMS-basierten Mehrfrequenz-Oszillators auf SiCer-Substrat. Quelle: TU Ilmenau / IMN MacroNano®.

zu prüfen und zu optimieren. Das IMMS hat solche mikromechanischen Funktionsgruppen modelliert, damit sie für Entwurf und Simulation genutzt werden können.

Im Fokus von MUSIK stehen MEMS-Hochfrequenzschaltungen. Deren elektronische und mechanische Eigenschaften sowie deren Verhalten bei thermischen und akustischen Einwirkungen werden von der Bauelemente- bis zur Systemebene durchgängig und konsistent beschrieben. Im Entwurf startet diese Beschreibung auf Systemebene nach entsprechenden Systemanforderungen und wird Ebene für Ebene bis auf die einzelnen Bauelemente heruntergebrochen (top-down). Um diese Entwürfe zu verifizieren, wird der umgekehrte Weg durch die Ebenen beschritten (bottom-up). Dieser schichtenübergreifende Ansatz ermöglicht es, die Kenngrößen eines Kommunikationssystems auf hoher Abstraktionsebene mit den physikalischen Eigenschaften der Bausteine und den geeigneten Fertigungstechnologien zu verknüpfen.

Modellierung, Entwurf und Simulation werden durch eine am IMN MacroNano® der TU Ilmenau entwickelte, neuartige Silizium-Keramik-Verbundsubstrattechnologie (SiCer) vervollständigt, die Ansätze für die Hybridintegration und die Vermeidung parasitärer Verdrahtungseffekte liefert (Abbildung 1). Der multi-physikalische und multi-methodische Ansatz soll an-

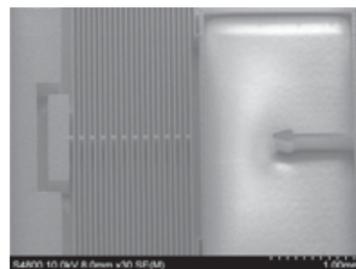


Abbildung 2:
Teststrukturen von MEMS-Schaltern.
Quelle:
TU Ilmenau / IMMS.

hand einer Send-Empfangseinheit eines LTE³-Nutzerterminals demonstriert werden.

Als wesentliche Zwischenergebnisse steuerte das IMMS Verilog-A-basierte Verhaltensmodelle für verschiedene Arten von sogenannten Lamb-Wave-Resonatoren, BAW-Resonatoren und in Abbildung 2 gezeigten MEMS-Schaltern bei, die auf der Basis umfangreicher Strukturstudien und Finite-Elemente-Modellierungen (FEM) gemeinsam mit den Partnern erarbeitet wurden. Diese Modelle bilden parametrisierbare Funktionsgruppen für eine Simulation und Optimierung des HF-Gesamtsystems als ganzheitlichen MEMS-Entwurf in einer übergeordneten Entwurfsebene, der die Vorteile der SiCer-Technologie berücksichtigt.

Beispiel: Modellierung von BAW-Resonatoren mithilfe des IMMS

Abbildung 3 zeigt ein schematisches Schnittbild eines „Solidly Mounted BAW Resonators“ (SMR BAW). Ohne solche Bandpass-Filter wäre mobile Kommunikation heute nicht mehr denkbar. Ein an die Elektroden angelegtes elektrisches Wechselsignal erzeugt innerhalb der Piezoschicht eine akustische Welle. Damit diese sich nicht in das Substrat hinein ausbreitet, dient ein sogenannter akustischer Bragg-Reflektor aus Materialschichten wechselnder Steifigkeit und Dichte der Reflektion dieser Wellenfront. Dabei werden die Schichtdicken gerade so gewählt, dass die reflektierten Anteile phasengleich zur Ursprungswelle schwingen und diese so verstärken. Im Ergebnis entstehen Signalfilter mit starker Signalunterdrückung unter- und oberhalb der jeweiligen Grenzfrequenzen sowie sehr geringer Signaldämpfung im Durchlassbereich.

Unter anderem in Mobilfunkgeräten trennen diese stark miniaturisierbaren Filter die genutzten Funkbänder äußerst präzise und sichern so eine störungsfreie Datenübertragung. Für die künftige mobile Datenflut auf immer mehr und immer näher aneinander liegenden Frequenzbändern müssen sie allerdings deutlich verbessert werden. Durch zunehmend kleinere Abstände zwischen diesen Funkbändern spielen temperaturbedingte Verschiebungen der BAW-Filterfrequenzen eine immer größere Rolle. So ändern sich die Filterflanken eines typischen Band-30-BAW-Filters allein durch wechselnde Umgebungstemperaturen zwischen -20 °C und 85 °C um bis zu 7 MHz und be-

³ LTE Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der vierten Generation (3.9G)

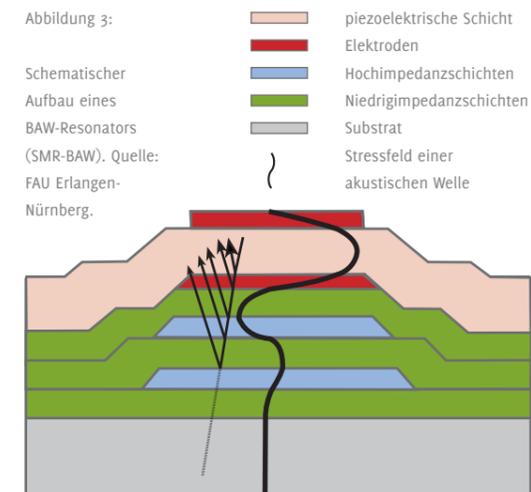


Abbildung 3:
Schematischer Aufbau eines SMR-BAW-Resonators (SMR-BAW). Quelle: FAU Erlangen-Nürnberg.

ansprechen somit bereits 37 % der insgesamt 19 MHz breiten Frequenzlücke,⁴ in der ein Filter vom Durchlassbetrieb auf Sperrbetrieb umschalten muss. Neben diesen umgebungsbedingten Frequenzverschiebungen erwärmt die Signalleistung den Filter und ändert somit dessen Verhalten. Erschwerend kommen herstellungsbedingte Schwankungen hinzu, welche die effektive Frequenzlücke zusätzlich verkleinern. Daher ist es unumgänglich, das temperaturabhängige Filterverhalten präzise modellieren zu können.

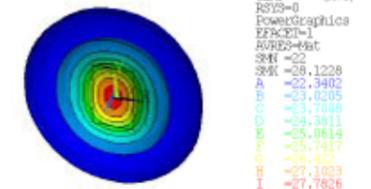
Bisher waren die hierfür notwendigen akustisch-elektromagnetisch-thermischen FEM-Simulationen wegen des immensen Aufwands nicht praktikabel. Mit Hilfe eines vom IMMS und der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten reduzierten FE-Modells der BAW-Strukturen ist nun eine effiziente Bestimmung der Schichttemperaturen möglich, welche für die exakte Berechnung der Filterfrequenzen notwendig sind. Dabei wurden sowohl die akustischen Verluste in den einzelnen Schichten berücksichtigt als auch die elektromagnetischen Verluste in den Elektroden und der Piezoschicht.

Ein erster Ansatz geht dabei im Gegensatz zu Abbildung 3 von einem Modell aus, in dem alle Materialschichten unendlich breit und lang sind, da die Schichtflächen im Vergleich zu den Schichtdicken sehr viel größer sind. Vergleichsrechnungen haben die Eignung dieses Ansatzes bestätigt.

Aus den parametrischen FE-Modellierungen wurden Verhaltensmodelle abgeleitet und in Verilog-A auf Basis des Mason-Modells zur elektromechanischen Beschreibung von Piezoelementen für Simulationen implementiert. Durch die Wahl eines modularen An-

⁴ P. Warder, D. Schnaufer, „Temperature-Compensated Filter Technologies Solve Crowded Spectrum Challenges“, in IEEE Microwave Magazine, 57(11): 90-98, 2014

Abbildung 4:
Temperaturverteilung in einem BAW-Resonator als Ergebnis einer FE-Berechnung. Quelle: IMMS.



satzes wurde es möglich, BAW-Resonatoren mit beliebiger Schichtfolge zu modellieren. Die Arbeiten zeigten, dass nicht nur der Temperaturunterschied entlang der Schichtfolge sondern auch innerhalb der einzelnen Schichten berücksichtigt werden muss, um die Auswirkungen der Eigenerwärmung auf das Verhalten des BAW-Resonators korrekt beschreiben zu können (Abbildung 4).⁵

Ausblick

Mit künftigen Arbeiten wird das IMMS die Simulationszeit für den Entwurf von BAW-Filteranordnungen weiter reduzieren und die parasitäre Verkopplung von MEMS-Resonatoren durch enge räumliche Integration untersuchen. Darüber hinaus werden die entworfenen MEMS-Modelle auf SiCer-Basis um thermische und nichtlineare Effekte erweitert und anhand vibrometrischer Charakterisierung der gefertigten Teststrukturen verifiziert.

Das IMMS bringt in MUSIK seine Erfahrungen in Entwurf, Modellierung und Charakterisierung von MEMS ein und stärkt gemeinsam mit den Partnern sein Know-how im Bereich einer neuartigen Schaltungstechnik „HF-Mikromechatronik“, die den bisher auf Technologie und Einzelelemente gerichteten Fokus der HF-MEMS-Forschung auf eine anwendungsorientierte Systemebene hebt.

DFG Kontakt:
Dr. Christoph Schäffel,
christoph.schaeffel@imms.de

Das IMMS wird als Mitglied der Forschergruppe FOR 1522 MUSIK der DFG im Teilprojekt 5 unter dem Förderkennzeichen SCHA771/2-1 gefördert.

Projektpartner sind der Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität Erlangen-Nürnberg sowie die Technische Universität Ilmenau mit den Fachgebieten Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik, Elektronische Schaltungen und Systeme, Mikromechanische Systeme und Elektroniktechnologie. Assoziierte Industriepartner sind X-FAB Semiconductor Foundries AG, Cadence Design Systems Inc., Coventor SARL, Keysight Technologies Deutschland GmbH und TDK-EPCOS.

⁵ D. Karolewski, A. Tag, V. Silva, A. Hagelauer, G. Fischer, and C. Schäffel, „Modeling of BAW Filters for System Level Simulation“ in German Microwave Conference, 2015, pp. 410-413.



MEMS2015

Validierung des Design-Tools für den automatisierten Entwurf von MEMS

Motivation

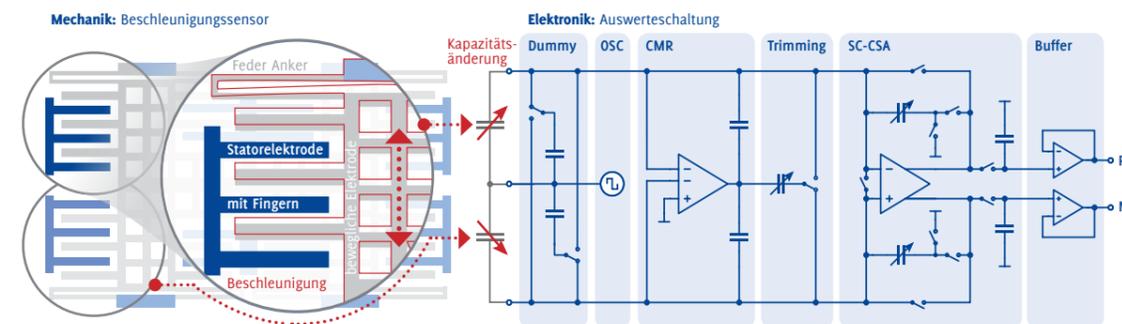
Dem in der Mikroelektronik schon seit Jahrzehnten hochautomatisierten und rechnergestützten Entwurf von integrierten Schaltungen steht für das Design mikromechanischer Bauelemente auf Siliziumbasis bisher keine adäquate Methodik bzw. Entwurfs-Software zur Verfügung. Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) als Massenprodukte haben eine eher junge Geschichte. So wurde der erste in Serie produzierte integrierte Drucksensor von Bosch 1994 eingeführt. Erst seit weniger als zehn Jahren gibt es allgemein verfügbare Software-Tools, um MEMS effizient entwerfen zu können. Verbreitet sind hier v.a. firmeninterne Software-Pakete der großen MEMS-Player, die immenses internes Know-how vereinen und speziell auf die Eigenarten firmeninterner Fertigungsprozesse adaptiert sind. Diesem technologieorientierten Vorgehen fehlt oft die hierarchisch abstrakte Entwurfsmethodik. Diese ist jedoch der Schlüssel, um das Design bei Entwicklungsdienstleistern von der Fertigung in Fabs zu trennen, was für die Mikroelektronik seit langem etabliert ist. Die Tatsache, dass sich Entwicklungszyklen bis zur wirksamen Markteinführung für neue MEMS-Produkte immer mehr

Vorbereitungen für dynamische Messungen an einem Rüttler (vorn rechts) zur Validierung des Beschleunigungssensors, der mit dem am IMMS entwickelten Design-Tool realisiert wurde. Foto: IMMS.

verkürzen, erhöht den Wettbewerbsdruck.¹ Durch ein fabless Design werden MEMS-Lösungen nun auch für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich. Diese Entwicklungen können nur dann entstehen und bestehen, wenn es frei verfügbare Software-Tools gibt und Fertigungs- und Entwicklungspartner den Weg zu eigenen Lösungen öffnen.

Daher hatte das IMMS in dem 2015 abgeschlossenen Projekt „MEMS2015“ Ansätze entwickelt, um den Entwurfsprozess der mechanischen und elektronischen Bauteile von MEMS zu verbinden und zu harmonisieren. Dank der erarbeiteten neuartigen Gesamtentwurfsmethodik können MEMS als Gesamtsystem simuliert und verifiziert und somit Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Ein wesentlicher Bestandteil des Ansatzes ist ein bereits im Jahresbericht 2014 vorgestelltes Design-Tool zum rechnergestützten Entwurf von elektromechanischen Sensoren. Diese Software wurde zunächst für eindimensionale Beschleunigungssensoren in der SOI-Technologie XM-SC der X-FAB AG erstellt. Das Werkzeug berechnet auf der Basis eines am IMMS entwickelten Algorithmus automatisch verschiedene Mechanik-Designmöglichkeiten

¹ Vgl. Emerging MEMS 2013 Report, Yole Développement, http://www.i-micronews.com/images/Reports/MEMS/Images_reports/Yole_MEMS_Developments_MEMS_benefits_from_shortened_development_times_August_2013.jpg



gemäß kundenspezifischer Anforderungen. Darüber hinaus stellt das Tool dem Anwender Sensormodelle zur Verfügung, die in etablierte Entwurfswerkzeuge integriert werden können, und generiert die für die Sensorfertigung notwendigen Maskenlayouts.

Für die Validierung dieser neuen Methodik und des neuen Tools hat das IMMS einen Beschleunigungssensor samt Präzisions-Auswertelektronik mit dem neuen Vorgehen in dem neuen Werkzeug entworfen, fertigen lassen und charakterisiert.

Beschleunigungssensor

Ausgangspunkt des Designs für die Tool-Validierung waren die folgenden gewünschten Sensorengrößen: eine Auflösung von 0,1 %, eine Kapazitätsdifferenz von 70 fF bei einer maximal zu detektierenden Beschleunigungsamplitude von 10 g sowie eine Basiskapazität von 2,5 pF. Der letzte Wert ist die Kapazität zwischen den Elektroden, wenn keine Beschleunigung anliegt. Diese Größen stehen in direktem Zusammenhang zur Sensitivität des Sensors.

Ergebnis ist ein kapazitiver Inertialsensor, der Beschleunigungen in einer Raumrichtung erfasst. Eine solche Anregung verschiebt auf dem Sensor eine bewegliche Elektrode gegenüber zwei fixierten Stator-Elektroden und verändert so die beiden zwischen ihnen auftretenden Kapazitäten (vgl. Bild 1 links). Diese Änderung wird mit einer am IMMS entworfenen elektronischen Schaltung ausgewertet. (vgl. Bild 1 rechts). Um auf engem Raum möglichst hohe Kapazitäten zu erhalten, werden mit dem Tool die Elektroden als interdigitale Kammstrukturen angelegt. Hier greifen die Finger einer beweglichen Kamm-Elektrode und die Finger der Stator-Elektroden ineinander. Für die betrachtete Sensorklasse sind diese Strukturen an Bügelfedern aufgehängt. Diese sogenannten „folded beams“ sind aus zwei parallel zueinander angeordneten Balken aufgebaut.

Die Eigenschaften des Sensors werden insbesondere durch die Anzahl und Länge der Finger eines Kammes sowie die Breite und Länge der Federbalken bestimmt, die das Tool als Ergebnis liefert. Die Grundstruktur der betrachteten Beschleunigungssensoren

Bild 1: Schema und Funktionsprinzip des Beschleunigungssensors (links), dessen Kapazitäten von der Auswerteschaltung (rechts) ausgewertet werden. Grafik: IMMS.

ist aus einer bestimmten Zusammenstellung und Anzahl von Grundmodulen aufgebaut. Diese Grundmodule wiederum enthalten jeweils die gleichen Funktionseinheiten: einen Stator, der zusammen mit einem Kamm die feste Elektrode bildet, und eine bewegliche Elektrode, bestehend aus einer Platte, die in Abhängigkeit von der Technologie Ätzlöcher aufweisen kann, aus interdigitalen Kammstrukturen mit Fingern und aus einer oder mehreren Federn, die an Ankern aufgehängt sind (vgl. Bild 1/2). Die Grundmodule und Funktionseinheiten hat das IMMS in der Software MATLAB mittels einer objekt-orientierten Methode als Baukastensystem implementiert.

ASIC für die Messung der Beschleunigung

Um die vom Sensor erfassten Beschleunigungen einem informationsverarbeitenden System, wie z.B. zur Lageerkennung in einer Kamera, zur Verfügung zu stellen, muss die Differenz zwischen den beiden Sensorkapazitäten gemessen werden. Diese ist jedoch mit einigen wenigen Femtofarad so klein, dass die Messung eine hohe technische Herausforderung darstellt. Für den gefertigten Beschleunigungssensor liegen die Werte bei bis zu 70 fF. Die Beschleunigungssensoren können nicht direkt an kommerziell verfügbare Messgeräte angeschlossen werden, auch nicht an die am IMMS vorhandene hochpräzise Ausstattung. Grund ist, dass die Position der benötigten Messkabel beim Wechsel von zu testenden Modulen und durch die Bewegungen bei den Messungen auf dem Rüttler nicht konstant gehalten werden kann. Eine Lageveränderung der Messkabel verursacht bereits Kapazitätsänderungen, die größer sind als die Sensorkapazitäten, die detektiert werden sollen.

Das IMMS hat daher eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) entwickelt, die direkt am Sensor platziert wird und dort hochpräzise die Messung durchführt. Der ASIC erzeugt eine robuste Ausgangsspannung, die der Differenz zwischen den beiden Sensorkapazitäten folgt, problemlos über lange

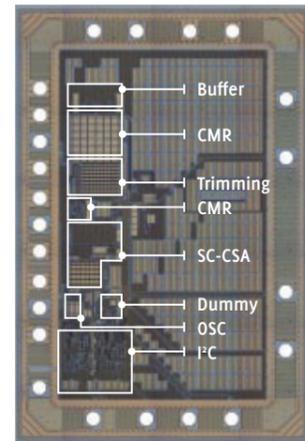
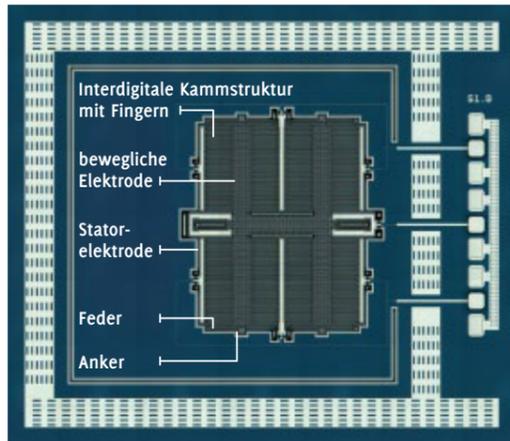


Bild 2: Gefertigter Beschleunigungssensor, (3,5 mm x 3,7 mm, links) und Auswerte-ASIC (2,4 mm x 1,6 mm, rechts) mit den jeweiligen Funktionseinheiten.

Fotos: IMMS.

Kabel übertragen und anschließend weiterverarbeitet werden kann.

Die zentrale Signalwandlung erfolgt durch einen ladungsempfindlichen Verstärker (Charge-Sensitive Amplifier – CSA), der als Switched Capacitor (SC)-Schaltung implementiert wurde, einen Gleichtaktregler (Common-Mode Regulator – CMR) und einen Oszillator (OSC), vgl. Bild 1/2. Der Oszillator lädt periodisch die Sensorkapazitäten mit einer Frequenz von bis zu 1 MHz um. Die dafür benötigte Ladung wird durch den ladungsempfindlichen Verstärker bereitgestellt. Beim Umladen der sich durch die Bewegung unterscheidenden Sensorkapazitäten entsteht am Ausgang dieses Verstärkers eine Spannungsdifferenz. Diese Differenz entspricht der Beschleunigung und wird über die Puffer-Verstärker (Buffer) für die Übertragung über ein Kabel verstärkt. Der Gleichtaktregler sichert den korrekten Arbeitspunkt der Schaltung. Der ASIC wird per I²C-Schnittstelle konfiguriert. So lässt sich beispielsweise die Verstärkung von 1,25 mV/ff

bis 10 mV/ff einstellen oder zwei interne Dummy-Kapazitäten aktivieren, um den ASIC auch ohne Beschleunigungssensoren testen zu können. Über die einstellbare Trimming-Kapazität kann der Nullpunkt der Schaltung eingestellt werden und somit ungewollte Differenzen der Sensorkapazitäten durch Fertigungstoleranzen von bis zu 1000 ff mit einer Genauigkeit von 0,5 ff abgeglichen werden. Der ASIC wurde im MEMS-T-Lab² des IMMS charakterisiert. Er erfüllt die spezifischen Anforderungen, um den Beschleunigungssensor vermessen zu können.

Charakterisierung des Beschleunigungssensors

Um das Design-Tool validieren zu können, wurden mehrere Testsetups entwickelt. Mit diesen wurden die prozessierten Beschleunigungssensoren und die Auswerte-ASICs sowohl einzeln als auch zusammen in aufgebauten Sensor-Modulen charakterisiert.

Der ASIC wurde mit einer modularen Testplattform untersucht. Diese wurde so konfiguriert, dass digitale und analoge ASIC-Komponenten sowie deren

Bild 3: Mit der Inertialsensor-Ersatzschaltung wurde das Übertragungsverhalten des ASICs bei verschiedenen Verstärkungen nachgewiesen: Das Ausgangssignal des ASICs hängt wie erwartet linear von der Kapazitätsänderung ab. Die vier Linien zeigen den Zusammenhang bei vier im ASIC einstellbaren Verstärkungsfaktoren. Grafik: IMMS.

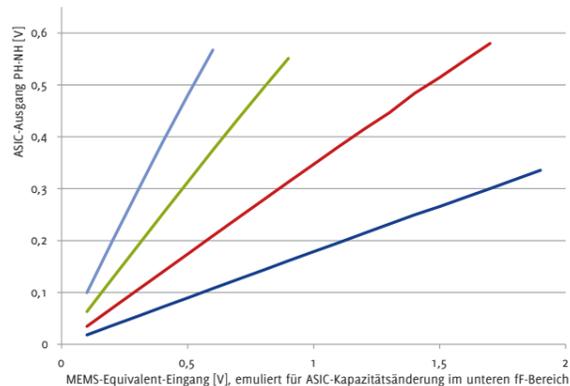
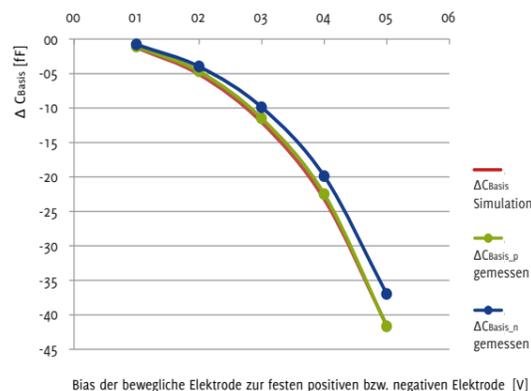


Bild 4: Änderung der Basiskapazität (C_{Basis}) durch elektrostatische Auslenkung der Elektrode mittels Biasing. Grafik: IMMS.



² Vgl. Jahresbericht 2013.

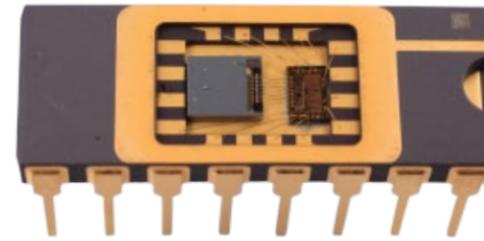
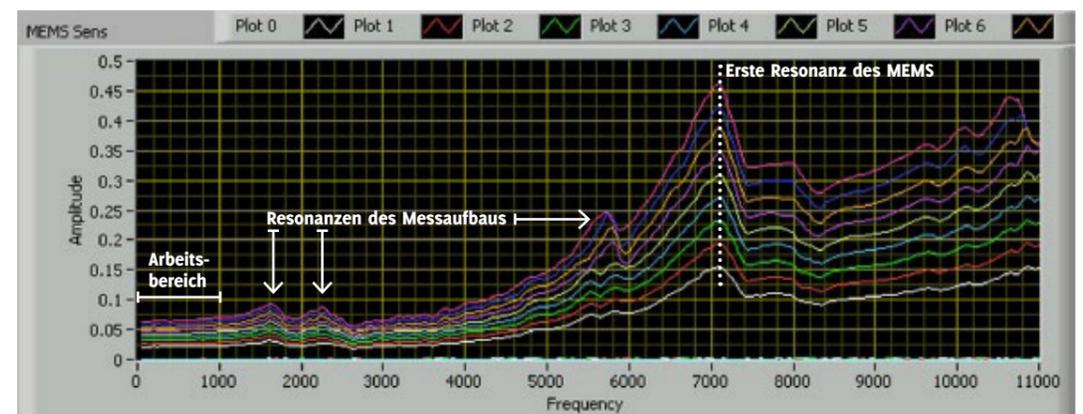


Bild 5: Eines der für die Untersuchungen auf dem Rüttler aufgebauten Module mit verkapseltem Beschleunigungssensor (links) und Auswerte-ASIC (rechts). Foto: IMMS.

Zusammenspiel teilautomatisiert charakterisiert werden konnten. Eingangsgrößen waren zum einen die im ASIC implementierten Dummy-Kapazitäten und zum anderen eine speziell entwickelte Inertialsensor-Ersatzschaltung. Diese imitiert die beim Inertialsensor durch Beschleunigungsvariation hervorgerufene Kapazitätsänderung mittels einer elektrischen Wechselspannung. Das Ausgangssignal des ASICs hängt wie erwartet linear von der Kapazitätsänderung ab (vgl. Bild 3) und ist im relevanten Arbeitsbereich frequenzunabhängig.

An den Beschleunigungssensoren wurden zuerst mittels einer LCR-Messbrücke³ die Basiskapazitäten und die durch den inneren Aufbau des Bauelements bedingten parasitären Kapazitäten auf Wafer-Ebene bestimmt. Die eigens dafür erstellte Probecard verfügt über spezielle Guard-Techniken, wodurch einzelne Kapazitäten unabhängig von den anderen bestimmt werden konnten. Da sich im Messaufbau auf Wafer-Ebene eine Beschleunigung nicht erzeugen lässt, wurde durch ein gezieltes Biasing die bewegliche Elektrode elektrostatisch ausgelenkt und somit eine entsprechende Veränderung der Kapazitäten erzielt. Sowohl die simulierten Kapazitätswerte als auch ihre Änderung bei Auslenkung wurden dabei messtechnisch nachgewiesen (Bild 4).

Bild 6: Die Messkurven, die ein Modul auf dem Rüttler liefert, zeigen die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz. Grafik: IMMS.



³ LCR (inductivity, capacity, resistance) Vorrichtung zur Messung von Induktivität, Kapazität und Widerstand.

Um das Zusammenspiel beider Bauelemente zu validieren, wurden Module aufgebaut (vgl. Bild 5) und auf einen Rüttler montiert. Dieser ermöglicht es, das Gesamtsystem in einem weiten Frequenzbereich von 30 Hz bis 13 kHz und Beschleunigungen bis zu 10g zu charakterisieren. Hierdurch kann die Sensitivität des Modulaufbaus in verschiedenen Arbeitspunkten bestimmt werden. Die in der Simulation berechnete Resonanzfrequenz der MEMS-Strukturen wurde so bestätigt (vgl. Bild 6). Weiterhin konnte festgestellt werden, dass neben der Mikromechanik selbst auch die verwendete Aufbau- und Verbindungstechnik großen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems haben kann (vgl. Bild 6). Diese Erkenntnisse werden in die künftige Entwicklung solcher Testaufbauten einfließen.

Ausblick

Die Charakterisierung des Beschleunigungssensors, der Auswerteelektronik und ihres Verhaltens als Gesamtsystem bilden die Grundlage für weitere Entwicklungen. Zum einen wird das Design-Tool im 2015 gestarteten Projekt RoMulus von eindimensionalen auf zwei- und dreidimensionale Inertialsensoren ausgebaut. Zum anderen ist der ASIC die Basis für Messungen an solchen Sensoren, die im Projekt mit Hilfe der Tool-Erweiterung realisiert werden sollen. Darüber hinaus wird angestrebt, das Tool für künftige Industrieprojekte einzusetzen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Roman Paris, roman.paris@imms.de



Das Projekt MEMS2015 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Kennzeichen 16M3093 im Förderprogramm IKT 2020 gefördert. Projektpartner waren Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, die TU München, TETRA, die Universität Bremen und X-FAB.



FORSCHUNGSTHEMA
SENSORSYSTEME FÜR DIE
BIOANALYTIK UND MEDIZINTECHNIK

Highlights 2015 auf dem Gebiet „Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik“

Die steigende Lebenserwartung der Menschen in unserer Gesellschaft führt zu einem Anstieg schwerer Erkrankungen wie Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Demenz sowie der hiermit verbundenen Aufwendungen für Diagnose und Therapie. Mit unserer Forschung zu mikroelektronischen Biosensor-Systemen für die medizinische Diagnostik und die personalisierte Medizin leisten wir Beiträge zur Kostensenkung im Gesundheitswesen und der Sicherung der Lebensqualität von Patienten.

Unsere Forschungsaktivitäten konzentrieren sich unter anderem darauf, verschiedene Detektionsprinzipien für biologische und chemische Größen in einem elektronischen Sensorelement zu integrieren, um genauere Aussagen zu erhalten und die Fehlerrate zu senken. Grundlage unserer Arbeiten sind kostengünstige Standard-Fertigungsprozesse aus der Halbleiter-Elektronik, die für die neuen Ansätze applikationsspezifisch angepasst werden, z.B. durch spezielle Oberflächen-Funktionalisierung oder die Verwendung biokompatibler Materialien. Mit unseren Lösungen soll es in Zukunft möglich sein, Vor-Ort-Tests, z.B. zur Krebs-Früherkennung, schnell, zuverlässig, kosteneffizient und automatisiert durchzuführen.

Projekt ADMONT gestartet

Im Projekt ADMONT (Advanced Distribution Pilot Line for More-than-Moore Technologies) sollen CMOS-Prozesstechnologien u.a. mit Sensorik- und MEMS-Bauteilen sowie Lösungen zur OLED- und 3D-Integration erweitert werden, um mit innovativen Bauelementen und Systemen in den Bereichen Mobilität, Energie, Gesundheit und Produktion neuartigen Applikationen Schubkraft zu verleihen. Hierfür wird durch das Konsortium aus neun Partnern eine verteilte More-than-Moore-(MtM)-Pilotlinie als „One-Stop-Shop“ aufgebaut, um nachzuweisen, dass sich die neuen Konzepte mit den diversifizierten Technologien produzieren lassen.

Das IMMS wird diese neuartigen Halbleiter-Prozesstechnologien validieren, hierfür auf Erkenntnisse aus der Forschergruppe GreenSense aufbauen und in ADMONT neue Ansätze im Bereich „Smart Health“ entwickeln. Schwerpunkte sind die Modellierung energieautarker Sensorkomponenten für die Bioanalytik, die Entwicklung drahtloser multiparametrischer Bio-

sensornetze, die Entwicklung einer Technologie- und IP-Plattform und der Aufbau mikroelektronischer Prototypen für die In-vitro-Brustkrebsdiagnostik.

Projekt MIMOSE gestartet

In dem im Juni 2015 gestarteten Projekt „Methylierte Krebsmarker-Diagnostik mit monolithisch integrierter mikroelektronischer in-vitro Sensor-Plattform“ entwickelt das IMMS den Prototyp eines Systems, das im Bereich Krebsfrüherkennung dem labormedizinischen Personal zur richtigen Diagnose eine schnelle und zuverlässige Vor-Ort-Entscheidungshilfe bieten soll. Die Arbeiten werden in Kooperation mit der oncnostics GmbH Jena am Beispiel der Früherkennung von Gebärmutterhalskrebs durchgeführt. Auf Basis von elektronischen Sensoren werden neue Detektionsprinzipien erarbeitet, die eine innovative, genaue und hochauflösende Erkennung von DNA-Methylierungsmarkern ermöglichen. Die automatisierte Diagnostikplattform führt die Detektionen der validierten DNA-Methylierungsmarker mittels eines dualen mikroelektronischen Erkennungsverfahrens aus, um die hohe Zuverlässigkeit und Datenqualität der Krebsinformationen zu gewährleisten.

IMMS neuer Partner im PPA-Netzwerk, Schwerpunkt Life Science

Neben dem Engagement im Netzwerk Diagnostik Berlin Brandenburg bringt sich das IMMS seit 2015 in das Netzwerk „Produkt- und Prozesssicherheit mittels spektroskopischer Analytik (PPA)“ ein, um das Thema Bioanalytik weiter zu forcieren. Das PPA-Netzwerk hat das Ziel, hochsensitive, kompakte, modulare und kostengünstige spektrometrische Analysegeräte zur Marktreife zu entwickeln. Das IMMS leistet vor allem Beiträge für das Anwendungsfeld Life Science, das neben Gassensorik und Gefahrstoffdetektion einen Schwerpunkt des PPA bildet. Das IMMS bietet den Partnern Ansätze und Entwicklungen anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen (ASICs) sowie elektronischer Sensorkomponenten auf dem interdisziplinären Gebiet zwischen Mikroelektronik und Life Sciences und findet geeignete Partner für die unterschiedlichen Anwendungen und die multiphysikalischen Effekte aus Biotechnologie, Chemie und Medizin.



Prof. Dr.-Ing. habil.
Peter Husar,

Fachgebietsleiter Biosignal-
verarbeitung an der Techni-
schen Universität Ilmenau.
Foto: Foto Müller, Ilmenau.

Prof. Dr. Peter Husar, TU Ilmenau

„Im EU-Projekt 3DNeuroN hatten wir uns mit Partnern aus ganz Europa das ambitionierte Ziel gesetzt, Menschen zu helfen, bei denen Zellgewebe des zentralen Nervensystems durch Krankheit oder Verletzung geschädigt wurde. Unsere Idee war, die Heilung dieses Gewebes gezielt zu steuern – und zwar mit einem neuartigen System, das neuronale Aktivitäten dreidimensional detektiert und stimuliert. Dafür haben wir ein kapazitives und damit biokompatibles Multi-Sensor-Aktor-Array-System mit insgesamt 800 Sensoren entwickelt, in dem dank der räumlichen Systemstruktur Nervenzellen in einer nahezu natürlichen Umgebung wachsen können.

Für die gleichzeitige und kontinuierliche Aufnahme der Signale aller 800 Sensoren, die rauscharme Signalverstärkung und -auswertung sowie die Ansteuerung der Aktoren benötigten wir analog/digitale ASICs, die in der Lage sind, diese Aufgabe mit äußerst geringer Leistungsaufnahme und damit minimaler Wärmeentwicklung zu erfüllen, um Nervenzellen nicht irreversibel zu schädigen. Diese sehr hohen und in dieser Form vorher noch nicht dagewesenen Anforderungen konnten wir mithilfe der ASIC-Entwicklung des IMMS bewältigen. Wir sind mit dem Ergebnis sehr zufrieden und konnten dank dieses wichtigen Entwicklungsschritts unseren Partnern aus Finnland (Universität Tampere) sowie der Schweiz (ETH Zürich) ein System zur Verfügung stellen, mit dem in ersten Experimenten nach elektrischer Stimulation die neuro-physiologischen Ziele zum Teil erreicht wurden.

Die fachbezogenen und technologischen Herausforderungen und Wendungen im Projekt wurden vom IMMS in kooperativer und konstruktiver Herangehensweise mit ausgewiesener Kompetenz und einem hohen Maß an Flexibilität, Kreativität und Effizienz angegangen. Wir sind bereits dabei, weitere Projekte zu planen und freuen uns, wenn wir die gute Zusammenarbeit fortsetzen können.“ www.tu-ilmenau.de/bmti/fachgebiete/biosignalverarbeitung/

www.tu-ilmenau.de/bmti/fachgebiete/biosignalverarbeitung/



Khalid Ishaque

Chief Executive Officer,
Pixium Vision.
Foto: Pixium Vision.

Khalid Ishaque, Pixium Vision

„Das Augenlicht erblindeter Menschen wiederherstellen zu können, wurde lange als bloße Phantasie eingestuft. Jetzt, in einer neuen Epoche an der Grenze der Neurowissenschaften, verbinden wir die Welten von Auge und Hirn – von Photonen und Neuronen. Es ist ein Verständnis in der Breite und in der Tiefe notwendig, um für Erblindete eine Welt des bionischen Sehens erschaffen zu können. Das ist die Mission von Pixium Vision.

Das Unternehmen arbeitet parallel an zwei innovativen bionischen Systemen, die aktive implantierbare Prothesen beinhalten und dazu gedacht sind, Blindheit zu behandeln und zu kompensieren, die durch die Degeneration retinaler Fotorezeptorzellen hervorgerufen wurde. Diese Systeme sollen blinden Patienten mit funktionsfähigem Sehnerv einen höheren Grad an Unabhängigkeit und Lebensqualität ermöglichen. Unser Unternehmen macht sich die rasanten Fortschritte in den Neurowissenschaften, der neuromorphen visuellen Verarbeitung, der Mikro-, Nano- und Optoelektronik, der Neurobiologie und intelligenten Software-Algorithmen zunutze.

Das IMMS hat einen unverzichtbaren Beitrag zu unserem Ziel beigetragen, das Augenlicht von Erblindeten wiederherzustellen. Das IMMS entwickelte eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) für unser Netzhautimplantat. Dort übersetzt der ASIC die eintreffenden optischen Informationen in einen elektronischen Datenstrom, der wiederum über eine Stimulator-Schnittstelle zum Sehnerv übertragen wird. Der vom IMMS entwickelte ASIC ist die entscheidende Verbindung zwischen der realen Welt und dem Sehnerv des Patienten. Der ASIC nutzt eine Fotodiode für die Signalaufnahme und eine Schaltung, die parasitäre von systemrelevanten Größen unterscheidet und bei den letztgenannten einen Ausgangstreiber aktiviert. Darüber hinaus entwickelte das IMMS die Energieversorgung mittels Wechselspannung. Diese ASICs nutzen wir in unseren aktuellen Systemen.

Wir schätzen die Zusammenarbeit mit dem IMMS, die von aktivem und engem Informationsaustausch mit dessen kompetenten technischen Experten geprägt war, sehr. Das IMMS bleibt ein starker Elektronikpartner für uns für weitere Arbeiten in Forschung und Entwicklung.“

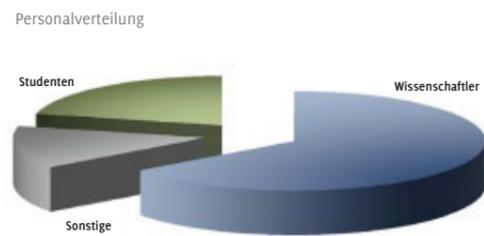
www.pixium-vision.com



**ZAHLEN,
STRUKTUREN
UND BELEGE**

Vorbereitungen für Messungen auf Wafer-Ebene
am Institutsteil Erfurt im Reinraum-Messtechniklabor
Klasse 7, DIN EN ISO 14644-1. Foto: IMMS.

IMMS in Zahlen



2015 waren im IMMS 80 Mitarbeiter beschäftigt. Hier von waren 52 Wissenschaftler und 17 Studenten (FTE)¹ in der Forschung und Entwicklung tätig, was ca. 86% aller Beschäftigten entspricht.

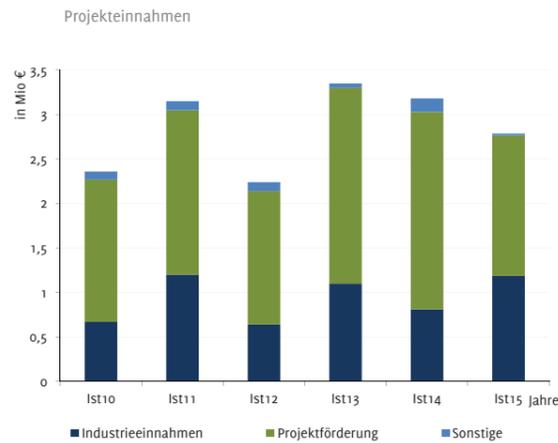
Hinter den 17 FTE stehen eine große Zahl von 40 Studenten, die das Angebot des IMMS nutzen, ihre Ausbildung in praxisorientierter Forschung zu vertiefen und zu vervollständigen: 11 Studenten absolvierten Praktika und 18 sind als Hilfskräfte tätig, 6 Bachelorarbeiten und 5 Masterarbeiten wurden betreut und 6 Mitarbeiter sind gegenwärtig als Doktorand an einer Universität eingeschrieben.

Sein großes Engagement in der studentischen Ausbildung ermöglicht dem IMMS natürlich auch, auf diesem Wege selbst ausreichend Absolventen in der notwendigen Anzahl und Qualität zu gewinnen.

Die Erlöse aus industrieller Auftragsforschung sind 2015 gegenüber dem Vorjahr um 27% gestiegen, wohingegen die Leistungen aus öffentlicher Projektförderung um 13% gegenüber denen des Vorjahres zurückblieben. Der Ertragsanteil beträgt 60%. Die Einnahmen spiegeln dieses Verhältnis tendenziell wider. Nachschüssige Zahlungen aus abgerufener Projektförderung bewirkten gegenüber dem Vorjahr 30% weniger Einnahmen. Für die kommenden Jahre 2016 bis 2018 erwartet das IMMS in beiden Bereichen nennenswerte Zuwächse, nicht zuletzt durch die konsequente Ausrichtung seiner Strategie an den unternehmerischen und gesellschaftlichen Erfordernissen.

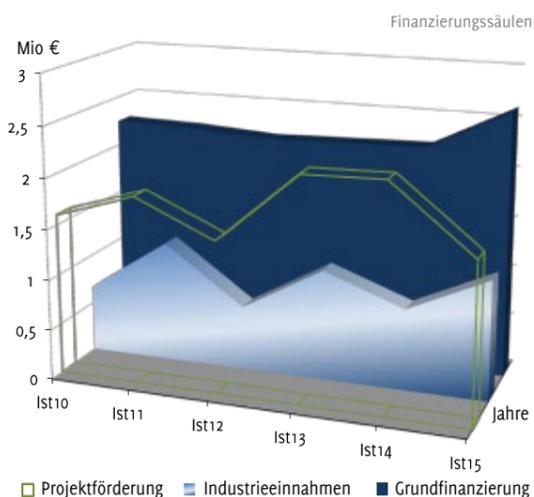
Weit überwiegend finden die Projekte im Verbund mit Industriepartnern statt. Das verdeutlicht die hohe Ak-

¹ FTE Full time equivalent (Vollzeitäquivalent). Die erbrachten Arbeitszeiten werden zu Vergleichszwecken auf eine Vollzeit-Beschäftigung umgerechnet.



zeptanz des IMMS als Forschungspartner. Dem Institut ist es gelungen, durch sein Engagement in Netzwerken die Projektaktivitäten sichtbar zu steigern. Ziel ist es, die guten Ergebnisse aus der Forschung möglichst rasch in industrielle Anwendungen zu bringen. Hiervon werden in erster Linie die KMU profitieren. Die Stabilisierung dieses Prozesses erfordert die Formierung der KMU in regionale und produktorientierte Wertschöpfungsketten. Der Zugang zu innovativen Märkten erfordert in immer stärkerem Maße Systemkompetenz für die Entwicklung und Herstellung von Produkten unter Verwendung von Mikro- und Nanotechnologien. Hierfür ist das IMMS gut aufgestellt.

Der Freistaat Thüringen hat auch 2015 für verlässliche Bedingungen mit einer angemessenen institutionellen Zuwendung gesorgt, die sich an den Rahmenbedingungen im wissenschaftlichen Umfeld orientiert. Das hat insbesondere die Zusammenarbeit mit den kleinen und mittelständischen Betrieben Thüringens gefördert.



Organisation



Wissenschaftlicher Beirat

- **Vorsitzender:** Herr Dr.-Ing. Gabriel KITTLER, Innovation Manager, X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt
- **Stellv. Vorsitzender:** Herr Olaf MOLLENHAUER, Geschäftsführer der TETRA GmbH, Ilmenau
- **Ehrenmitglied:** Herr Prof. Dr. habil. Eberhard KALLENBACH, Leiter des Steinbeis-Transferzentrums Mechatronik, Ilmenau (bis 31.3.2015)
- Herr Prof. Dr. ERICH BARKE, ehemaliger Präsident der Leibniz Universität Hannover und Leiter des Fachgebietes Entwurfsautomatisierung des Instituts für Mikroelektronische Systeme (bis 31.3.2015)
- Frau Dr. Christiane EHRLING, Analytik Jena AG, Leiterin Forschung und Entwicklung, Bereich Elementaranalyse/Summenparameter
- Herr Dr. Fred GRUNERT, Technischer Geschäftsführer MAZeT GmbH, Jena
- Herr Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias HEIN, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Leiter des Fachgebiets Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik
- Frau Prof. Dr. Olfa KANOUN, Technische Universität Chemnitz, Prodekanin der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mess- und Sensortechnik
- Dr. Ralph KLÄSGES, Carl Zeiss SMS GmbH, Leiter Forschung und Entwicklung
- Herr Dr. Peter SCHNEIDER, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS – EAS, Direktor des Institutsteils Entwurfsautomatisierung EAS, Dresden

- Prof. Dr. Ansgar TRÄCHTLER, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik
- Herr Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas TÜNNERMANN, Direktor des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena und des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF Jena

Aufsichtsrat

- **Vorsitzender:** Herr Robert FETTER, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (seit 25.03.2015); Herr Dr. Jörg PRINZHAUSEN, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (bis 24.03.2015)
- **Stellv. Vorsitzender:** Herr Dr. Frank EHRHARDT, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. Klaus AUGSBURG, Prorektor Wissenschaft, Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau
- Herr Dr. sc. Wolfgang HECKER, Geschäftsführer, MAZeT GmbH Thüringen
- Herr Ulrich KAMPER, Thüringer Finanzministerium (seit 01.04.2015)
- Herr Dr. Jens KOSCH, Chief Technical Officer, X-FAB-Semiconductor Foundries AG
- Herr Thomas WEIßENBORN, Thüringer Finanzministerium (bis 31.03.2015)

Lehrangebot

Prof. Dr. Ralf Sommer

an der Technischen Universität Ilmenau,

Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme:

- „Grundlagen der analogen Schaltungstechnik“, Vorlesung und Übung, Bachelor-Studenten 3. Semester,
- „Rechnergestützte Schaltungssimulation und deren Algorithmen (EDA)“, Vorlesung und Übung, Bachelor- und Master-Studenten
- „Modellierung und Simulation analoger Systeme“, Vorlesung und Übung, Bachelor-Studenten

Prof. Dr. Hannes Töpfer

an der Technischen Universität Ilmenau,

Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik:

- „Theoretische Elektrotechnik I und II“, Vorlesung, Bachelor-Studenten 4./5. Semester
- „Grundlagen der Modellierung und Simulation“, Vorlesung und Übung, Bachelor-Studenten 5./6. Semester
- „Schaltungen der Quanteninformationsverarbeitung“, Vorlesung, Master-Studenten 2. Semester
- „Elektromagnetische Sensorik“, Vorlesung, Master-Studenten 2. Semester
- „Technische Elektrodynamik“, Vorlesung, Master-Studenten 2. Semester
- „Supraleitung in der Informationstechnik“, Vorlesung, Master-Studenten 1. Semester
- „Projektseminar ATET“, Seminar, Master-Studenten 2. Semester

Dipl.-Ing. Sven Engelhardt

an der Berufsakademie Eisenach:

„Mikrocontrollertechnik“, Praktikum, Studiengang Mechatronik, Bachelor-Studenten 5. Semester

Veranstaltungen

Messbeteiligungen

embedded world 2015 Messe für Hersteller und Entwickler von Hard- und Software, Tools und Dienstleistungen im embedded Bereich und Informationsüberblick über neueste embedded-Technologien, Februar 2015, Nürnberg (Mitaussteller, OSADL Gemeinschaftsstand)

Biotechnica Internationale Fachmesse für Biotechnologie, Life Sciences und Labortechnik, Oktober 2015, Hannover (Präsentation auf PATON-Gemeinschaftsstand/Forschung für die Zukunft)

IENA Internationale Fachmesse „Ideen-Erfindungen-Neuheiten“, November 2015, Nürnberg (Präsentation auf PATON-Gemeinschaftsstand, Gewinn Silbermedaille)

MEDICA internationale Fachmesse für Medizin, November 2015, Düsseldorf (Mitaussteller, Gemeinschaftsstand DiagnostikNet-BB)

Workshop-Angebote / IMMS als Gastgeber

Seminar Sensornetzwerke „Eingebettete Systeme – Auf dem Weg zum Smarten Sensor“, Februar 2015, Stuttgart (Veranstalter AMA e.V., wissenschaftliche Leitung und Durchführung: IMMS)

Alumni Fachtagung „Engineering and Computer Science – Application of Computers“, März/April 2015 (Veranstalter TU Ilmenau, Führungen und Vorträge am IMMS)

Workshop Embedded Linux „Chancen, praktische Lösungsansätze und rechtliche Aspekte von Open Source“ November 2015, Ilmenau, gemeinsame Ausrichtung mit der OSADL eG, (Gastgeber, Organisation und Vortrag)

Lange Nacht der Wissenschaften November 2015, IMMS Erfurt (Demonstratoren, Vorträge)

Publikationen

Überblick zu Konferenzen mit Beiträgen des IMMS

TuZ 2015 27. GI/GMM/ITG Workshop zu Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, März 2015, Bad Urach (2 Vorträge/Poster)

DATE 2015 Design, Automation & Test in Europe, März 2015, Grenoble/Frankreich (Poster)

GeMiC 2015 German Microwave Conference 2015, März 2015, Nürnberg (2 Vorträge/Paper)

edaWorkshop 15 Mai 2015, Dresden (Vortrag/Paper, Gewinner des EDA-Achievement-Awards)

DAC 2015 Design Automation Conference, Juni 2015, San Francisco/USA (eingeladener Vortrag und Beitrag zur Podiumsdiskussion)

Thüringer Maschinenbautag Juni 2015, Erfurt (Vortrag)

SPITSE 2015 2nd International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE. 2015", Juni 2015, St. Petersburg, Russland (3 Vorträge, darunter 1 Keynote)

PES 2015 12th International Conference on Applied Electromagnetics, August 2015, Niš, Serbien (Vortrag/Paper)

ESSCIRC 2015 41st European Solid-State Circuits Conference, September 2015, Graz, Österreich (Vortrag/Paper)

FDL 2015 Forum on specification & Design Languages, September 2015, Barcelona, Spanien (2 Vorträge/Paper, Gewinner des Best-Paper-Awards)

DASIP 2015 Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing, September 2015, Kraków/Polen (Beitrag & Demonstrator; Gewinner des Best-Demo-Night-Awards)

DFAM-Symposium „Stand und zukünftige Entwicklungen von Mikroelektronik und Automatisierung“, September 2015, Frankfurt/Main (Moderation, Programmbeirat)

RFI-Workshop Workshop on RFI Threats to GNSS, September 2015, Aachen/Aldenhoven (Live-Demo)

TELFOR 2015 23rd Telecommunications Forum, November 2015, Belgrad/Serbien (Vortrag/Paper)

Begutachtete Veröffentlichungen

Wireless solution for traffic monitoring, Elena CHERVAKOVA¹. Marco GÖTZE¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Hannes TOEPFER^{1,2}. Bojana NIKOLIĆ³. Bojan DIMITRIJEVIĆ³. *12th International Conference on Applied Electromagnetics, August 31 – September 02, 2015, Niš, Serbia*, ELEKTROTECHNICA & ELEKTRONICA E+E Vol. 50. No 9 – 10/2015, Pages 2 – 6, ISSN 0861-4717. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, ²Department of Advanced Electromagnetics, Ilmenau University of Technology, Germany, ³University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia.

FTD simulation in wireless sensor antenna application, Bojan DIMITRIJEVIĆ¹. Bojana NIKOLIĆ¹. Slavoljub ALEKSIĆ¹. NEBOJŠA RAIČEVIĆ¹. Hannes TOEPFER^{2,3}. Elena CHERVAKOVA³. Tino HUTSCHENREUTHER³. *12th International Conference on Applied Electromagnetics, August 31 – September 02, 2015, Niš, Serbia*, ELEKTROTECHNICA & ELEKTRONICA E+E Vol. 50. No 9 – 10/2015, Pages 23-27, ISSN 0861-4717. ¹University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia, ²Department of Advanced Electromagnetics, Ilmenau University of Technology, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau.

Die Zusammenarbeit zwischen der TU Ilmenau und dem Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme – Garant für eine erfolgreiche Überführung von Ergebnissen der Grundlagenforschung in Produkte kleiner und mittlerer Unternehmen, Hans-Joachim KELM¹. Christoph SCHÄFFEL¹. Frank SPILLER¹. *60 Jahre Maschinen- und Gerätebau von der Fakultät für Feinmechanik Optik an der Hochschule für Elektrotechnik zur Fakultät für Maschinenbau an der Technischen Universität Ilmenau*, Jenaer Jahrbuch zur Technik- und Industriegeschichte, Bd. 18 (2015), Seite 481 – 497, ISBN: 978-3939718895, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Application of Wireless Sensors Within a Traffic Monitoring System, Hannes TOEPFER^{1,2}, Elena CHERVAKOVA², Marco GÖTZE², Tino HUTSCHENREUTHER², Bojana NIKOLIĆ³, Bojan DIMITRIJEVIĆ³. *International 23rd Telecommunications Forum, TELFOR 2015*, Pages 236 – 241, invited paper, ISBN: 978-1-5090-0055-5, Serbia, Belgrade. ¹Department of Advanced Electromagnetics, Ilmenau University of Technology, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, ³University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia.

Multiphysics Modeling of BAW Filters, A. TAG¹, V. CHAUHAN¹, R. WEIGEL¹, A. HAGELAUER¹, B. BADER², C. HUCK², M. PITSCHI², D. KAROLEWSKI³. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 21 – 24 Oct. 2015*, DOI: dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2015.01115, ISBN: 978-1-4799-8182-3, Taipei, Taiwan. ¹Institute for Electronics Engineering, University of Erlangen-Nuremberg, Cauerstr. 9, 91058 Erlangen, Germany, ²Advanced Development, TDK Corporation, Anzingerstr. 13, 81617 Munich, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau.

Temporal Decoupling with Error-Bounded Predictive Quantum Control, Georg GLÄSER¹, Gregor NITSCHÉ², Eckhard HENNIG³. *Specification and Design Languages (FDL), 2015 Forum on, 14 – 16 Sept., Barcelona, Spain, (Best-Paper-Award)*. DOI: dx.doi.org/10.1109/FDL.2015.7306358. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²OFFIS – Institut für Informatik Oldenburg, Germany, ³Hochschule Reutlingen, D-72762 Reutlingen, Germany.

An Ultra-Low Power Capacitance Extrema and Ratio Detector for Electrostatic Energy Harvesters, Benjamin SAFT¹, Eric SCHÄFER¹, Alexander ROLAPP¹, Eckhard HENNIG². *41th European Solid-State Circuits Conference ESSCIRC, 14 – 18 Sept. 2015*, Pages 245 – 248, DOI: dx.doi.org/10.1109/ESSCIRC.2015.7313873, ISBN: 978-1-4673-7470-5, Graz, Austria, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Hochschule Reutlingen, D-72762 Reutlingen, Germany.

6D planar magnetic levitation system – PIMag 6D, Christoph SCHÄFFEL¹, Michael KATZSCHMANN¹, Hans-Ulrich MOHR¹, Rainer GLÖSS², Christian RUDOLF², Carolin WALENDA². *JSM Mechanical Engineering Journal*, DOI: dx.doi.org/10.1299/mej.15-00111, 16.10.2015. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Germany.

Passive 350 GHz Video Imaging Systems for Security Applications, E. HEINZ¹, T. MAY², D. BORN², G. ZIEGER¹, S. ANDERS², V. ZAKOSARENKO¹, H.-G. MEYER², C. SCHÄFFEL³. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves manuscript No.*, DOI: dx.doi.org/10.1007/s10762-015-0170-8, Online ISSN: 1866-6906, Print ISSN: 1866-6892, Volume 36, Number 7, July 2015. ¹Supracon AG, D-07751 Jena, Germany, ²Leibniz Institute of Photonic Technology e. V., D-07745 Jena, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Instandhaltungstaugliches Messgerät, Dipl.-Ing. Paul BÜSCHEL¹, Prof. Dr.-Ing. Axel SIKORA², Dipl.-Inf. (FH) Manuel SCHAPPACHER², Dr.-Ing. Tino HUTSCHENREUTHER³, Dipl.-Inf. Thomas ELSTE³, Dipl.-Ing. Sebastian UZIEL³. *Studie Nr. 10/2015, Abschlussbericht, DFAM, Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e. V.*, ISBN-Nr.: 978-3-8163-0676-4. ¹Lehrstuhl für Mess- und Sensortechnik, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, ²Lehrstuhl für Embedded Systems und Kommunikationselektronik, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Hochschule Offenburg, Badstraße 24, 77652 Offenburg, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau.

Systematischer MEMS-ASIC-Designflow am Beispiel eines Beschleunigungssensors, Dominik KAROLEWSKI¹, Jenny KLAUS¹, Raiko PEVGONEN¹, Ralf SOMMER¹. ISBN: 978-3-86386-914-4, Pages 9 – 14, *Proceedings/EdaWorkshop 15, May 19 – 21, 2015, Dresden, Germany*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Electrostatic parallel-plate MEMS-Switch on Silicon-Ceramic-Composite-Substrates, Sebastian GROPP¹, Astrid FRANK², Christoph SCHÄFFEL², Matthias HOFFMANN¹. *Microwave Conference (GeMiC), 2015 German, 16 – 18 March 2015*, Page(s) 414 – 417, DOI: dx.doi.org/10.1109/GEMIC.2015.7107841. ¹Technische Universität Ilmenau, IMN MacroNano®, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Modeling of BAW filters for system level simulation, Dominik KAROLEWSKI¹, Christoph SCHÄFFEL¹, A. TAG², V. Silva CORTES², A. HAGELAUER², G. FISCHER². *Microwave Conference (GeMiC), 2015 German, 16 – 18 March 2015*, Page(s) 410 – 413, DOI: dx.doi.org/10.1109/GEMIC.2015.7107840. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Institute for Electronics Engineering, University of Erlangen-Nuremberg, D-91058 Erlangen, Germany.

High-Frequency Performance of GaN High-Electron Mobility Transistors on 3C-SiC/Si Substrates With Au-Free Ohmic Contacts, Wael JATAL¹, Uwe BAUMANN², Katja TONISCH¹, Frank SCHWIERZ¹, Jörg PEZOLDT¹. *Electron Device Letters, IEEE, Volume:36, Issue: 2, Page(s) 123 – 125*, DOI: dx.doi.org/10.1109/LED.2014.2379664. ¹Inst. für Mikro- und Nanotechnologien, Tech. Univ. Ilmenau, Ilmenau, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Fachartikel (Veröffentlichungen in Zeitschriften)

Autarke Strommesszange schützt vor Produktionsausfällen, Tino HUTSCHENREUTHER¹, Hendrik HÄRTER². *in Elektronik Praxis, September 2015*, Seite 38 – 39, online: www.elektronikpraxis.vogel.de/messen-und-testen/articles/504598/. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, ²Redakteur, Fachzeitschrift Elektronik Praxis.

Drahtlos-Sensorplattform zur Verkehrsdatenerfassung, Marco GÖTZE¹. *Embedded Design, V/2015, 17.09.2015*, online: www.embedded-design.net. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Integriertes elektrostatisches MEMS-Energy-Harvesting-Modul, Benjamin SAFT¹. *Fachzeitschrift Mechatronik 1 – 2, 2015*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

MEMS2015 – Schaltplan-basierter Entwurf von MEMS für Anwendungen in Optik und Robotik, Tobias MAIER¹, R. EID², Volker BOOS³, Alexander MÜLLER⁴, Ralf POPP⁵. *Newsletter edacentrum 01/02 2015*, Seite 5–23. ¹Robert Bosch GmbH, Germany, ²Technische Universität München, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ⁴X-FAB Semiconductor Foundries AG, Germany, ⁵edacentrum, Germany.

Vorträge und Posterpräsentationen

A Flexible Sensor Platform for Traffic Applications, Elena CHERVAKOVA¹, Sven ENGELHARDT¹, Marco GÖTZE¹, Michael RINK¹, Axl SCHREIBER¹. *DASIP 2015, Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing, 23.09.2015 – 25.09.2015, Cracow, Poland, (Best-Demo-Night-Award)*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Automatic Annotation of Properties to ESL SystemC Models and Accelerated Simulation, Georg GLÄSER¹, Eckhard HENNIG². *Specification and Design Languages (FDL), 2015 Forum on, 14 – 16 Sept., Barcelona, Spain*, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Hochschule Reutlingen, D-72762 Reutlingen, Germany.

Enhancing Superconductive Sensors and Detectors with Superconductive Digital Electronic Components – A Step Towards System Integration, Hannes TOEPFER¹. *Second International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE.", 22.06.2015 – 26.06.2015, Electrotechnical University "LETI" St. Petersburg, Russia, Keynote-Speaker*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Design and Implementation of an Algorithm for a Low-energy and Low-cost Mobile Inertial Measurement Unit, Using Accelerometer, Gyro- and Magnetic Field Sensors, Julian MEIER¹, Hannes TOEPFER¹, Tino HUTSCHENREUTHER², Elena CHERVAKOVA². *Second International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE.", 22.06.2015 – 26.06.2015, Electrotechnical University "LETI" St. Petersburg, Russia*. ¹Department of Advanced Electromagnetics, Ilmenau University of Technology, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Integration of 802.15.4 based wireless sensor networks into existing intra-vehicle networks, Silvia KRUG¹, Elena CHERVAKOVA², Hannes TOEPFER², Jochen SEITZ¹. *Second International Scientific Symposium "Sense. Enable. SPITSE.", 22.06.2015 – 26.06.2015, Electrotechnical University "LETI" St. Petersburg, Russia*. ¹Communication Networks Group, Ilmenau University of Technology, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Seamless Design Methodology for heterogeneous Systems – Challenges for research, education, industry and EDA, Ralf SOMMER¹. *Design Automation Conference (DAC), 07. – 11.06.2015, Panel: "The needs and expectations of a fruitful industrial and academic cooperation", San Francisco, USA*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Verkehrsdaterhebung mit drahtlosen Sensornetzwerken zur Erweiterung der Datenbasis für die Verkehrslagemodellierung in der Stadt Erfurt, Wolfram KATTANEK¹, Marco GÖTZE¹. *Fachtagung Verkehrstechnik zur Hausmesse Dresden Elektronik, 21.05.2015, Dresden.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Techniques for Identifying the Analog Coverage, Georg GLÄSER¹, Lukas LEE². *eda-Workshop 2015, 19.05.2015 – 21.05.2015, Dresden, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany. ²LU Hannover, Germany.

Concept of a quick-change-system for an industrial force sensor with an improved signal to noise ratio, Jörg MÄMPEL¹, Eric MARKWEG¹, Raiko PEVGONEN², Olaf MOLLENHAUER¹. *Smart Systems Integration 2015 (SSI 2015), 10.03.2015 – 12.03.2015, Kopenhagen, Dänemark.* ¹TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

FPGA-based Hardware Acceleration of Analog/Mixed-Signal SystemC Models, Georg GLÄSER¹, Eckhard HENNIG¹, Vojtech DVORAK². *DATE 2015, 09.03.2015 – 13.03.2015, Grenoble, Frankreich.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany. ²University of Brno, Czech Republic.

Integrierte Frontend-Schaltung für einen elektronischen Energy-Harvester, Benjamin SAFT¹, Eric SCHÄFER¹, André JÄGER¹, Alexander ROLAPP¹, Eckhard HENNIG¹. *17. Workshop Analogschaltungen, 05.03.2015 – 06.03.2015, TU Darmstadt.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany.

Evaluierung und Test von HF-CMOS-Modulen, Einsatz von flexibel konfigurierbaren Testsystemen (PXI), Björn BIESKE¹, Klaus HEINRICH². *Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TUZ 2015), 01.03.2015 – 03.03.2015, Bad Urach.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany. ²XFAB-AG, Germany.

Test von HF-Multiplexern für hohe Spannungen, Entwicklung einer Testmethodik für Schalter bis 100 V und 100 MHz, Björn BIESKE¹, Michael MEISTER¹, Dagmar KIRSTEN². *Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TUZ 2015), 01.03.2015 – 03.03.2015, Bad Urach.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany. ²XFAB-AG, Germany.

Erteilte Patente

DE102012217853B4 „Anordnung zum Erzeugen eines definierten Abstands zwischen Elektrodenflächen auf integrierten Bauelementen für chemische und biochemische Sensoren“ der Erfinder Holger PLESS, Frank SPILLER, Alexander ROLAPP, W. EINBRODT, K. BACH, Volker BORNMANN.

DE102013114046B4 „CMOS-Thyristor basierte Verzögerungselemente für den Mikro- bis Milisekundenbereich mit sehr geringer Energieaufnahme“ der Erfinder Benjamin SAFT, Eric SCHÄFER, André JÄGER.

DE102008050540B4 „Anordnung zum Verarbeiten eines analogen Sensorausgangssignals mindestens eines optischen Sensors“ des Erfinders Sebastian UZIEL.

DE102011016304B4 „Vorrichtung für einen Mehrkoordinatenantrieb“ der Erfinder Dominik KAROLEWSKI, Michael KATZSCHMANN, Rene THESKA, Torsten ERBE, Christoph SCHÄFFEL, Norbert ZEIKE, Frank SPILLER, Hans-Ulrich MOHR.

DE102010014663B4 „Vorrichtung zur Positionsbestimmung eines Läuferelementes in einem Planarantrieb und dergleichen Bewegungssystem“ der Erfinder Christoph SCHÄFFEL, Hans-Ulrich MOHR, Dominik KAROLEWSKI, Steffen HESSE, Michael KATZSCHMANN.

DE102007007247B4 „Anordnung und Verfahren zur Verhinderung der Wärmeleitung zwischen einer Wärmequelle und einer temperatursensiblen Baugruppe“ der Erfinder Christoph SCHÄFFEL, Norbert ZEIKE.

Offengelegte Patentanmeldung

DE102013113378A1 „Verfahren und Schaltung zum Bestimmen des Zeitpunkts eines Extremums einer sich zeitlich verändernden Kapazität“ der Erfinder Benjamin SAFT, Eric SCHÄFER, André JÄGER.

Förderung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- **SmartJacket** wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) als Kooperationsprojekt unter dem Kennzeichen **KF2534511CJ4** gefördert.
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **sMobility** wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen **01ME12076** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das ZIM-Projekt „Intelligente **Strommesszange EMCheck IMSZ 1**“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen **KF2534508 DB2** aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



- Das Projekt **KOMPASSION** wurde gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen **50 NA 1009**.
- Die Arbeit zu **KOSERNA** wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter dem Förderkennzeichen **50 NA 1405** finanziert.

GEFÖRDERT VOM



- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **ANCONA** wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **16ES0210K** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das Projekt **fast-wireless** wird als Cluster-Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme „Zwanzigzwo – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **03ZZ0505J** gefördert.
- Das Projekt **HoTSens** wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ unter den Kennzeichen **16ES0008** gefördert.
- Das Projekt **IRIS** wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **13N13565** gefördert.
- Das Projekt **MEMS2015** wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen **16M3093** im Förderprogramm IKT 2020 gefördert.
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **RoMulus** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **16ES0362** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor“

GEFÖRDERT VOM



Die Arbeiten im Verbundprojekt **ADMONT** werden als industrielle Forschung (Innovation Action) im ECSEL-Programm als Teil des Forschungsrahmenprogramms Horizont 2020 durch die Europäische Union und das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **661796** gefördert, das Teilvorhaben des IMMS „Entwurf intelligenter in-vitro-diagnostischer und bioanalytischer Sensor- und Aktorsysteme“ unter dem Kennzeichen **16ESE0057**.



- Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben **3DNeuroN** wurde von der Europäischen Union unter dem Förderkennzeichen **296590** gefördert.
- Das Projekt **S4CoB** wurde von der Europäischen Union im Programm FP7-ICT2011-7 unter dem Kennzeichen **284628** gefördert.



- Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben **EROLEDT** wurde mit Mitteln des Freistaates Thüringen und der Europäischen Union (EFRE) unter dem Förderkennzeichen **2012 FE 9045** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Das Projekt **GreenSense** wurde gefördert durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Förderkennzeichen **2011 FGR 0121**.



- Das Infrastrukturprojekt **SensorLab** wurde gefördert vom Freistaat Thüringen unter dem Förderkennzeichen **13027-514**.



Das IMMS wird als Mitglied der Forschergruppe FOR 1522 **MUSIK** der DFG im Teilprojekt 5 unter dem Förderkennzeichen **SCHA771/2-1** gefördert.



Forschungsstrategie:

IT-System

Das IMMS verbindet die IT mit der realen Welt:

Steuerungen, Regelungen

Signalverarbeitung, Bewertung

Systemintegration

Kommunikation

Aktorsysteme

Sensorsysteme

Reale Welt (physikalische Prozesse)



Forschungsschwerpunkte:

Energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS)

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)

Integrierte Sensorsysteme für die Bioanalytik und die Medizintechnik

Elektromagnetische Direktantriebe mit Nanometer-Präzision