



IMMS

JAHRESBERICHT
2014

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, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Grafik und Bildbearbeitung

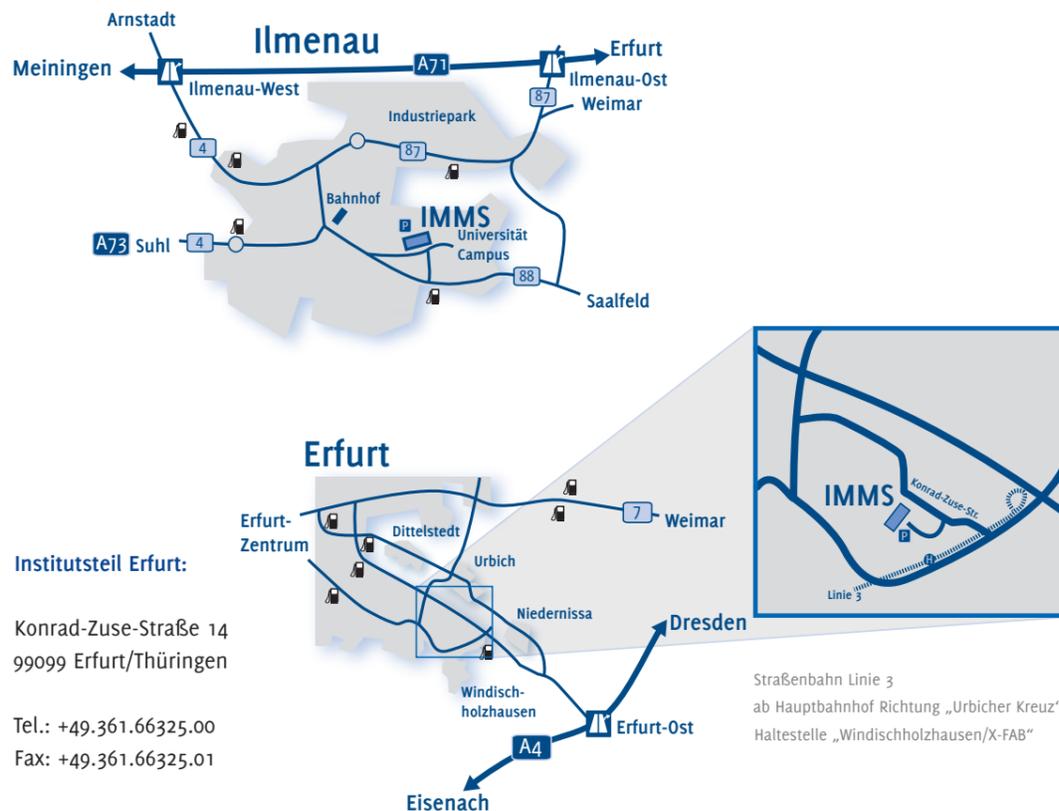
Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans
Danielle Warnecke, B.A.
Nicole Brühl, B.A.

Druck

Brandtdruck e.K., www.brandtdruck.de

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

Redaktionsschluss: 18. Mai 2015



Institutsteil Erfurt:

Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt/Thüringen

Tel.: +49.361.66325.00
Fax: +49.361.66325.01

Straßenbahn Linie 3
ab Hauptbahnhof Richtung „Urbicher Kreuz“
Haltestelle „Windischholzhausen/X-FAB“

Inhalt

- 4 Vorwort
- 5 Kooperation mit der TU Ilmenau
- 6 Forschungsstrategie
- 8 Stimmen aus Wirtschaft und Wissenschaft
- 11 Nachwuchsförderung am IMMS
- 15 **Forschungsthema: Energieeffiziente und energieautarke Systeme**
- 18 Energy Harvesting für autarke Sensorsysteme
- 21 Intelligente Strommesszange erfasst Störströme in Industrieanlagen
- 24 sMobility – Energieoptimierte Funksensoriklösung für Verkehrsanwendungen
- 27 EROLED – OLED-Treiberschaltung für energieeffiziente Beleuchtung
- 30 Weitere Highlights 2014
- 32 **Forschungsthema: MEMS**
- 36 MEMS-Design auf Knopfdruck – Methodik zur Synthese von MEMS am Beispiel eines Beschleunigungssensors
- 36 Ausleseschaltung für ein intelligentes Kraftsensor-MEMS
- 45 **Forschungsthema: Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik**
- 48 4TPixel – ASIC-Entwicklung für Röntgenapplikationen
- 50 Halbleiterbasierte Biochips zur Vor-Ort-Diagnose von Tierseuchen
- 53 **Zahlen, Strukturen und Belege**
- 54 IMMS in Zahlen
- 55 Organisation
- 56 Lehrangebot
- 56 Messen
- 56 Publikationen 2014
- 60 Förderung

Abkürzungen

- ADC Analog-to-Digital-Converter (Analog-Digital-Wandler)
- ASIC Application-specific integrated circuit (Applikationsspezifische integrierte Schaltung)
- AVT Aufbau- und Verbindungstechnik
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung
- BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- CAN Controller Area Network (Bus-Standard für die Kommunikation in Kraftfahrzeugen)
- CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor (Komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter)
- DALI Digital Addressable Lighting Interface (Protokoll zur Steuerung von lichttechnischen Betriebsgeräten in der Gebäudeautomation)
- DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
- DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- EDA Electronic Design Automation (Rechnergestützte Entwurfsmethodik)
- EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
- EMV Elektromagnetische Verträglichkeit
- FPGA Field Programmable Gate Array (vor Ort programmierbare Logik-Gatter-Anordnung)
- FTE Full-time equivalent (Vollzeitäquivalent)
- IC Integrated Circuit (Integrierte Schaltung)
- IKT Informations- und Kommunikationstechnologien
- IP Intellectual Property (vorgefertigter Funktionsblock eines ASIC-/FPGA-Designs)
- KMU Kleine und mittelständische Unternehmen
- LIN Local Interconnect Network (Bus-Standard für die Kommunikation in Kraftfahrzeugen)
- 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)
- RFID Radio-frequency identification (Hochfrequenz-Identifikationsverfahren)
- RMS Root Mean Square (Quadratischer Mittelwert)
- SAE Society of Automotive Engineers
- SENT Single Edge Nibble Transmission for Automotive Applications
- TU Technische Universität



Vorwort

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 2014 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 2014 erreicht haben – über die Auszeichnung unserer wissenschaftlichen Arbeiten mit zwei Best Paper Awards auf führenden 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

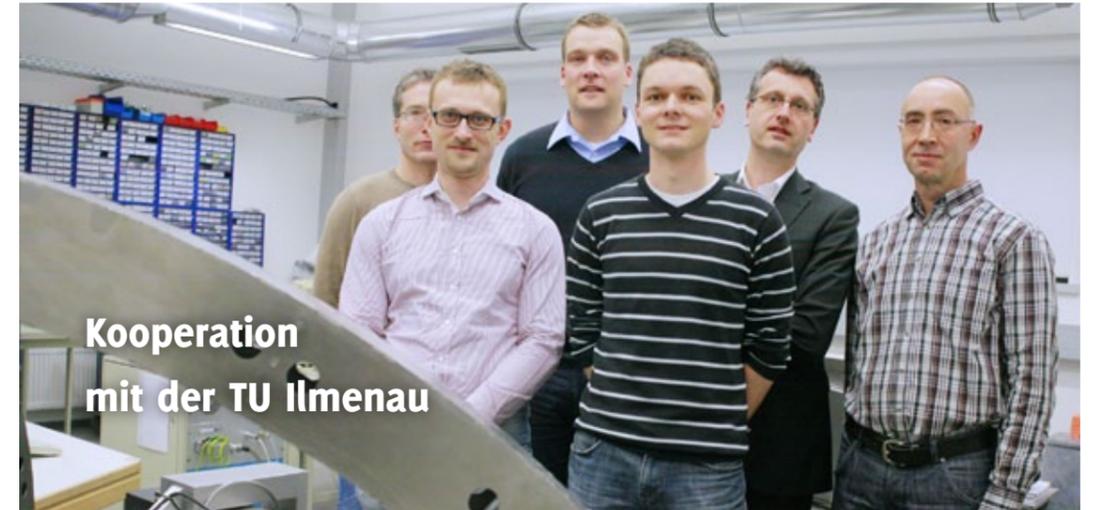
aussprechen, die sich durch die Kooperation mit dem IMMS Wettbewerbsvorteile erschließen können. Vor allem für mittelständische Unternehmen ist das IMMS als einziges Thüringer Forschungsinstitut für Mikroelektronik- und Mechatronikanwendungen nicht nur regionaler Technologiepartner, sondern auch Koordinator 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.

R. Sommer
Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer

H.-J. Kelm
Dipl.-Ing. Hans-Joachim Kelm



Kooperation mit der TU Ilmenau

Eines der Autorenteams von 2014 aus Vertretern von TU Ilmenau und IMMS. Die hier porträtierten Forscher haben gemeinsam an Nanopositioniersystemen gearbeitet. Die TU Ilmenau und das IMMS kooperieren auf diesem Gebiet seit mehr als 10 Jahren. Foto: IMMS.

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 2014 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, 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

Das IMMS hat u.a. im Projekt „GreenSense“ mit der Forschergruppe Powertrain/radio train (PORT) im Rahmen des Thüringer Innovationszentrums Mobilität (ThIMo) gemeinsam mit der TU Ilmenau wichtige Beiträge zum Aufbau „grüner“ Produktionstechniken und Verbrauchsprozesse geleistet, die im Kapitel zum Thema Energy Harvesting näher beschrieben sind.

Im DFG-Projekt „MUSIK“ erforschen Wissenschaftler des IMMS mit Partnern der TU Ilmenau die verstärkenden, steuernden, oszillierenden und schaltenden Eigenschaften von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS), um sie zusammen mit der Elektronik für komplexe Hochfrequenz-Schaltungen und Systeme zu entwerfen. Die Erkenntnisse sind bereits in das Forschungsprojekt MEMS2015 eingeflossen. Dort

hat das IMMS ein Design-Tool als Teil einer universellen Designmethodik für Mikromechanik und -elektronik entwickelt, das in diesem Bericht ausführlich beschrieben ist.

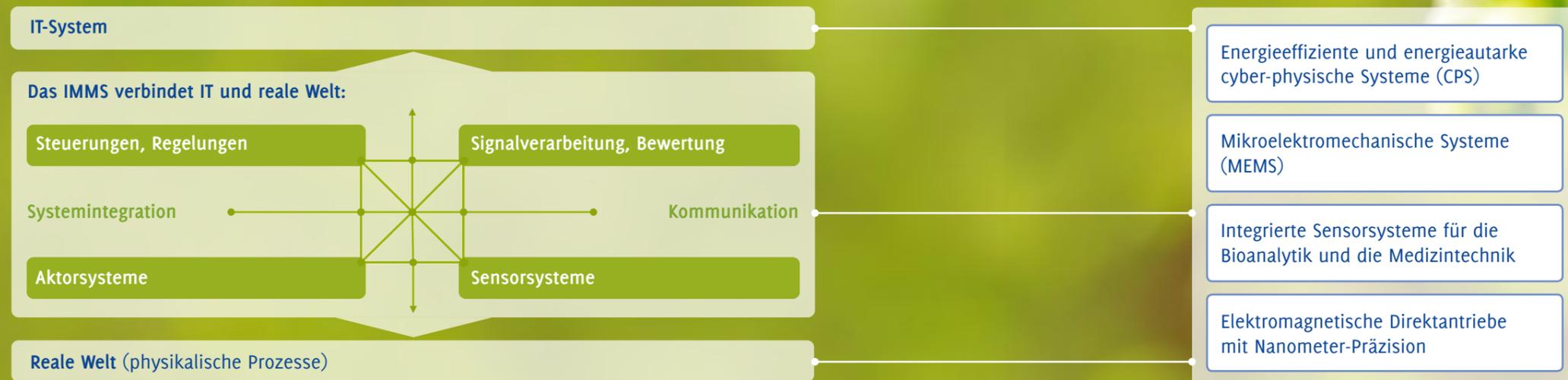
Im dreijährigen Projekt „KOSERNA“ wird seit 2014 ein industrieller Prototyp mit einer robusteren und genaueren Empfangseinheit für die Satellitennavigation entwickelt, die auf Ergebnissen aus dem gemeinsamen Forschungsprojekt KOMPASSION basiert. Hierfür erweitert das IMMS im Unterauftrag der TU Ilmenau die Frontend-Schaltungen und überträgt die neuen Konzepte auf ein zweites Frequenzband.

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 industrienahe Angebote, wie z.B. durch Besichtigungstouren und zahlreiche Themen für Praktika.

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 erkennen Handys Stimmen, Musik und Gesichter?“ demonstrierte das Institut über 650 Schülern im Alter von 8–12 Jahren praktisch und in vielen interaktiven Spielen, wie man Musik und Signale analog und digital speichern und verarbeiten kann.

Forschungsstrategie



Wir verbinden die IT mit der realen Welt

Im Auftrag unserer Kunden aus Wissenschaft und Wirtschaft sowie als Partner in regionalen, nationalen und internationalen Verbundforschungsprojekten führen wir anwendungsorientierte ingenieurwissenschaftliche Forschungsarbeiten in den Bereichen Mikroelektronik, Mechatronik und eingebettete Systemtechnik durch. Unsere Forschungstätigkeit ist geprägt durch den Bedarf an technologischen Beiträgen zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen wie dem Umweltschutz, der Energie- und Ressourceneffizienz, der Gesundheit und Sicherheit im industriellen, öffentlichen und privaten Raum. In diesem Umfeld arbeiten wir an energieeffizienten, hochpräzisen elektronischen und mechatronischen Systemen zur Messung und Beeinflussung physikalischer Prozesse sowie zu deren Vernetzung mit der virtuellen Welt der Datenverarbeitung.

Unter unserer Leitlinie „Wir verbinden die IT mit der realen Welt“ forschen wir dazu an innovativen Sensorik-, Aktorik- und Systemlösungen zur Erfassung, Verarbeitung, Kommunikation und Steuerung von Prozessparametern für eine Vielzahl industrieller und wissenschaftlicher Anwendungen.

Wir konzentrieren uns hierbei auf Applikationsfelder und Zielbranchen, in denen die Integration von Elektronik, Mechatronik und Software in intelligente Systemlösungen hohes Innovations- und Wachstumspotential birgt, insbesondere

- Automatisierungstechnik,
- Medizintechnik / Life Sciences,
- Umwelttechnik,
- Verkehrstechnik und
- Halbleiterfertigung.

Unser Leistungsangebot umfasst anwendungs- und grundlagenorientierte Forschungs Kooperationen sowie forschungsbezogene Entwicklungsdienstleistungen von der Machbarkeitsstudie über den Hardware/Software-Komponenten- und Systementwurf bis zur Entwicklung, Herstellung und Messung funktionsfähiger Prototypen. Interdisziplinäre Forschungsfragestellungen bearbeiten wir mit strategischen Partnern wie der Technischen Universität Ilmenau sowie regionalen und überregionalen Forschungseinrichtungen und Technologieanbietern.

Forschungsschwerpunkte

Mit unseren Forschungsarbeiten liefern wir Beiträge zur Weiterentwicklung von Schlüsseltechnologien wie der Informations- und Kommunikationstechnik, der Mikrosystemtechnik, der Nanotechnologie und ihrer Anwendungen in Zukunftsprojekten wie „Industrie 4.0“, „Smart Mobility“, „Digitale Gesellschaft“ und „Individualisierte Medizin“.

Unsere wissenschaftlichen Aktivitäten konzentrieren sich dabei auf die vier Schwerpunktfelder

- energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS),
- mikroelektromechanische Systeme (MEMS),
- integrierte Sensorsysteme für die Bioanalytik und die Medizintechnik und
- elektromagnetische Direktantriebe mit Nanometer-Präzision.

Innerhalb dieser Felder forschen wir an Technologien und Methoden zur Entwicklung, zur Integration und zum Test von applikationsspezifischen Sensorik-, Aktorik- und Systemlösungen.

Unsere hierzu im Jahr 2014 durchgeführten Forschungsprojekte sowie deren Bezug zu den übergeordneten Schwerpunktfeldern sind in den Fachartikeln dieses Jahresberichts ausführlich dargestellt.

Wir verbinden Wissenschaft und Wirtschaft

Diese wichtige Aufgabe kann nicht von der reinen, an Universitäten betriebenen Grundlagenforschung wahrgenommen werden. Sie ist jedoch essenziell, um eine Idee zu einer Produktinnovation und bis zur Marktreife zu führen. Den hiermit verbundenen aufwändigen und personalintensiven Transfer können kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) aufgrund eng begrenzter Forschungs- und Entwicklungsressourcen häufig nicht aus eigener Kraft bewältigen.

Als Forschungsinstitut des Freistaats Thüringen tragen wir daher insbesondere dazu bei, mit produktbezogenen Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Technologieunternehmen aus der Region zu steigern. Hierzu stellen wir speziell an den Bedürfnissen von KMU ausgerichtete F&E-Kompetenzen, technische Infrastruktur und Kooperationsmodelle zur Entwicklung elektronischer und mechatronischer Systemlösungen bereit.

Die Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft festigt das IMMS durch gemeinsame Forschungs- und Ausbildungskooperationen mit der Technischen Universität Ilmenau und Industriepartnern, durch das Engagement in Netzwerken und Kompetenzclustern sowie durch konsequente Nachwuchsförderung in den Ingenieurwissenschaften.

Forschungsinfrastruktur

Um unsere Kunden dauerhaft mit elektronischen Systemlösungen auf dem neuesten Stand der Technik zu unterstützen, erschließen wir zum einen kontinuierlich neue Fertigungstechnologien und Partnerschaften für unsere F&E-Arbeiten. Zum anderen erweitern wir permanent unsere technische Labor- und Geräteinfrastruktur, um im internationalen wissenschaftlichen Wettbewerbsumfeld konkurrenzfähig bleiben zu können.

Das IMMS baut unter anderem Forschungs Kooperationen im Bereich elektronischer Mikro- und Nanosysteme mit führenden Unternehmen und Forschungseinrichtungen auch auf nationaler und europäischer Ebene aus. Um hier zukunftsweisende Projekte akquirieren zu können, hat das Institut in dem vom Freistaat Thüringen geförderten Infrastrukturprojekt SensorLab Ende 2014 sein Halbleiter-Messtechniklabor um einen semiautomatischen, analytischen 300-mm-Waferprober erweitert. Mit diesem neuen Gerät beabsichtigt das IMMS seine Forschungs Kooperationen zur Entwicklung und zum Test von mikroelektronischen Analog/Mixed-Signal/RF- und Smart-Power-Schaltungen in den kommenden Jahren international auszubauen und damit aktuelle Halbleitertechnologien für regionale Partner zu erschließen.

Kontakt:

Dr. Eckhard Hennig, Scientific Strategy Manager,
Eckhard.Hennig@imms.de

Stimmen aus Wirtschaft und Wissenschaft



René Heidl,
Geschäftsführer der
Indu-Sol GmbH.
Foto: Indu-Sol.

René Heidl, Indu-Sol

„Unsere Lösungen und Komponenten verbessern die EMV-Qualität in Industrieanlagen in einer felddbusnahen Umgebung. Für unsere Kunden haben wir nach einer Lösung gesucht, mit der sich Störströme auf Kommunikationsleitungen bei laufendem Betrieb einer Anlage erfassen und bewerten lassen. Ziel war ein kleines, mobiles Gerät, das weit mehr kann als herkömmliche Analysegeräte und -verfahren, indem es den Anwender vor Ort dabei unterstützt, eigenständig Störquellen zu bestimmen, Störniveaus zu beurteilen und Daten für spätere Analysen zu speichern. Das IMMS hat uns hierfür mit seinen langjährigen Erfahrungen mit energieautarken Systemen und mit der integrierten Hard/Software-Entwicklung perfekt ergänzt. Die Partner haben mit uns das Zielsystem exakt spezifiziert und für uns eine batteriebetriebene Strommesszange entwickelt, die 14 Tage Messwerte im kHz-Bereich aufnimmt, verarbeitet und zwischenspeichert. Dazu hat das IMMS u.a. umfangreiche Tests zu Magnetkreisen durchgeführt, entsprechende Hardware und analoge Anpassschaltungen sowie Software-Komponenten unter Effizienzkriterien ausgewählt, Software entwickelt und das Gesamtsystem energetisch optimiert. Wir sind mit dem Produkt sehr zufrieden, das in Serie gefertigt unser Angebot erweitern wird, und gehen davon aus, dass wir die Messzange in Stückzahlen von ca. 200 pro Jahr verkaufen werden – mit steigender Tendenz.“

Auch die Zusammenarbeit war reibungslos und stets geprägt von lösungsorientiertem Arbeiten und einem Höchstmaß an Eigeninitiative. So haben die IMMS-Kollegen nicht nur selbstverständlich Lösungen für Änderungswünsche erarbeitet, sie haben etliche eigene Vorschläge eingebracht, wie z.B. zur Umsetzung der Menüstruktur, zur Gewährleistung des Isolierschutzes und Platzierung der SD-Karte. Auch dank der ebenso am Institut erarbeiteten Gehäusekonst-

ruktion konnten wir mit einer Komplettlösung unmittelbar in die Planung der Serienfertigung einsteigen. Für diese Vorbereitungen steht uns das IMMS als kompetenter Partner zur Seite.

Im Bereich Hard- und Softwareentwicklung werden wir mit Sicherheit wieder auf das IMMS zurückkommen, um weitere marktfähige Lösungen auf den Weg zu bringen und erneut vom Know-how im Umgang mit Förderprojekten zu profitieren.“

www.indu-sol.com



Dipl.-Phys. Reinhard Jurisch,
Geschäftsführer der
microsensys GmbH, Erfurt.
Foto: microsensys.

Reinhard Jurisch, microsensys

„Als Mitglied des Industriebeirats der Forschergruppe GreenSense habe ich über die vergangenen drei Jahre die Forschungsarbeiten des IMMS zu energieeffizienten intelligenten Sensorsystemen aktiv begleitet. Die Forscher hatten sich zum Ziel gesetzt, mikroelektronische Multisensoren mit RFID-Schnittstelle und neue Verfahren zur Realisierung mikromechatronischer Energy Harvester zu entwickeln. Mein Team und ich haben die Forschergruppe dabei in umfangreichen Beratungsgesprächen mit technischem Know-how zur RFID-Sensorik und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten unterstützt. Aus den Forschungsarbeiten sind vielversprechende Technologien hervorgegangen.“

Um an diese Ergebnisse anknüpfen zu können, hat sich das IMMS bereits für zukünftige gemeinsame F&E-Kooperationsprojekte engagiert, die das Gebiet der vernetzten Industriesensorik im Verbund mit unserem und weiteren Unternehmen der Sensorik-Branche voranbringen sollen. Als einziges Thüringer Forschungsinstitut für Mikroelektronik-Anwendungen spielt das IMMS hierbei für mittelständische Unternehmen wie dem unseren eine zentrale Rolle als regionaler Technologiepartner und als Koordinator von öffentlich geförderten industriellen Verbundforschungsvorhaben.“

www.microsensys.de



Dr. Gisbert Hölzer,
MEMS Prozess-Entwicklung,
X-FAB MEMS Foundry GmbH.
Foto: X-FAB.

Dr. Gisbert Hölzer, X-FAB MEMS Foundry

„MEMS-Technologien sind weltweit stark gefragt, daher bauen wir derzeit unsere Fertigungskapazitäten für dieses hochinnovative Geschäftsfeld aus. Wir erweitern und stärken deshalb auch unsere Angebote für einen Design-Support im Bereich MEMS, um Kunden die optimale Unterstützung beim Entwurf von MEMS-Elementen bieten zu können. Dazu planen wir, zukünftig auch für MEMS-Technologien Process Design Kits (PDK) bereitzustellen. Ein wichtiger Aspekt zum Erreichen dieses Ziels ist für uns die enge Kooperation mit dem IMMS im Forschungsprojekt MEMS2015. Das IMMS hat zum einen Teststrukturen entworfen, mit denen sich die Materialparameter bestimmen lassen, die die Genauigkeit der Simulationen von MEMS-Strukturen verbessern. Zum anderen hat das IMMS einen Design-Flow für Beschleunigungssensoren entwickelt, der für den Entwurf und die Simulation von Sensoren mit unterschiedlichen Spezifikationen verwendet werden kann und dazu bereits erste Bausteine eines MEMS-PDK nutzt. Die Sensoren wurden mit einer Foundry-Technologie der X-FAB gefertigt und anschließend im IMMS vermessen. Die Ergebnisse fließen in die MEMS-Technologieentwicklung der X-FAB ein. Das IMMS hat in vielen gemeinsamen Diskussionsrunden neue Ideen u.a. für die Layoutverifikation bei MEMS entwickelt.“

Das IMMS unterstützt unsere „More-than-Moore“ Roadmap seit Jahren als wichtigster Forschungspartner und hat im Projekt MEMS2015 sein Know-how in der ASIC-Designmethodik souverän mit der Mikromechanik zusammengeführt. Über das Fachliche und über die vertrauensvolle und reibungslose Zusammenarbeit hinaus möchten wir auch künftig jene Kompetenzen des IMMS nutzen, mit denen es öffentlich geförderte Projekte auf den Weg bringt. Wir rechnen damit, die erfolgreiche Kooperation im Bereich MEMS-Entwicklung in einem weiteren gemeinsam beantragten Forschungsprojekt fortsetzen zu können.“

www.xfab.com



Dipl.-Ing. Eric Markweg, Mechatronikentwicklung, TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH. Foto: Norman Petzold, TETRA.

Eric Markweg, TETRA

„Für Kraftmessungen im industriellen Umfeld haben wir eine mikromechanische Lösung für Qualitätsprüfungen von Oberflächen entwickelt. Der Sensorkopf ist für kurze Rüstzeiten im Produktionsablauf geeignet. Wichtiger Baustein dieses flexiblen Schnellwechselsystems ist die integrierte Schaltung des IMMS, die Kraft und Temperatur hochpräzise erfasst sowie vorverarbeitet und dabei ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis sicherstellt.“

Das IMMS hat uns mit seiner hohen Kompetenz und seinen Erfahrungen bei der Sensorsignalerfassung und -vorverarbeitung wesentlich vorangebracht und neue Entwurfsmethoden in die Entwicklung eingebracht. Die Kollegen haben über den ASIC hinaus unser MEMS-Gesamtsystem betrachtet und somit entscheidend dazu beigetragen, dass wir nun eine speziell auf den Anwendungszweck zugeschnittene Lösung anbieten können, die so nicht am Markt erhältlich ist und beispielsweise auch über intelligente Mechanismen zur Fehlererkennung verfügt.

Wir schätzen die Zusammenarbeit mit dem IMMS bereits seit vielen Jahren. Auch in diesem Projekt haben wir von der zielgerichteten Arbeitsweise, der engen Abstimmung und auch von den anschaulichen Darstellungen profitiert. Das IMMS ist für uns ein starker Partner in allen Projektphasen von der Konzeptentwicklung bis zum Prototypen – in MEMS2015 und auch in Zukunft.“

www.tetra-ilmenau.de



Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil.
Dr. h. c. Prof. h. c. mult.
Peter Scharff, Rektor der
Technischen Universität
Ilmenau. Foto: TU Ilmenau.

Prof. Dr. Peter Scharff, TU Ilmenau

„Als Rektor der Technischen Universität Ilmenau freue ich mich über ein erfolgreiches Geschäftsjahr 2014 unseres Partners, des IMMS. Als unser An-Institut ist es uns ganz besonders verbunden, transferiert es doch Ergebnisse gemeinsamer wissenschaftlicher Forschung in die Wirtschaft. Hand in Hand betreiben wir Forschungs- und Entwicklungstransfer, um unseren industriellen Partnern in wichtigen Wirtschaftsbereichen von Thüringen zu unterstützen, die aktuellen globalen Herausforderungen wirtschaftlicher Neugestaltung zu meistern. Im Fokus unserer Zusammenarbeit stehen dabei Elektromobilität, Mikro-Nano-Integration und Industrie 4.0.

Im Rahmen des Transfers von Lösungen aus der Forschung in industrielle Lösungen operiert das IMMS – so unsere langjährige Erfahrung – schnell und hochflexibel im Markt. Nicht weniger als 28 unserer Fachbereiche kooperieren derzeit mit dem IMMS. In unserer langjährigen Zusammenarbeit haben wir schon viele Projekte miteinander bearbeitet und höchst erfolgreich abgeschlossen. Das Projekt MUSIK (Multiphysikalische Synthese und Integration komplexer Hochfrequenz-Schaltungen) bekommt derzeit ausgezeichnete Bewertungen von der DFG, was uns die Möglichkeit geben wird, diese Forschungen auch in Zukunft gemeinsam weiter zu vertiefen. Gleiches ist uns bereits mit dem Projekt KOSERNA (Kompakte Satellitenempfangssysteme für robuste Navigationsanwendungen) gelungen, für welches das IMMS im Auftrag der TU wichtige ASIC-Entwicklungen durchführt. Auch für diese gemeinsame Arbeit wurden vom DLR beste Bewertungen vergeben.

Persönlich freue ich mich ganz besonders darüber, dass wir uns in allen unseren Kooperationsprojekten denselben Zielen verpflichtet sehen: IMMS und TU Ilmenau betreiben angewandte Forschung zum Wohl der Gesellschaft. Genauso fühlen wir uns gleichermaßen verantwortlich, die Entwicklung der Region und hier insbesondere die Entwicklung des Wissen-

schaftsstandortes „Technologieregion Ilmenau und Arnstadt“ zu fördern. Hierfür wollen wir auch zukünftig viel gemeinsam tun.

Ein besonderes Anliegen ist uns dabei die Nachwuchsförderung. Im Kern geht es natürlich um die Ausbildung junger Wissenschaftler, die fachliche Kompetenz und gesellschaftliche Verantwortung miteinander vereinen. Das IMMS ist fest in das Ausbildungssystem der Universität integriert. Auch mit der sehr praxisnahen Betreuung von Bachelor- oder Masterarbeiten und Praktika leistet das IMMS einen wertvollen Beitrag für die Ausbildung und die Motivation unserer Studierenden und ermöglicht eine frühzeitige, stark praxisbezogene berufliche Orientierung und Profilierung.“

www.tu-ilmenau.de

Lutz Wohlleben, ARS

„Wir prüfen mit unseren Lecksuchmolchen die Dichtigkeit von Pipelines bei laufendem Betrieb. Die Geräte werden in die Rohrleitung eingeführt, schwimmen bis zu 30 Tage mit dem Strom mit und können durch die Erfassung und Auswertung von Wegstrecke, Druck, Temperatur und dem Geräuschpegel in der Pipeline auf einer Distanz von bis zu 1000 km Lecks auf den Meter genau orten.“



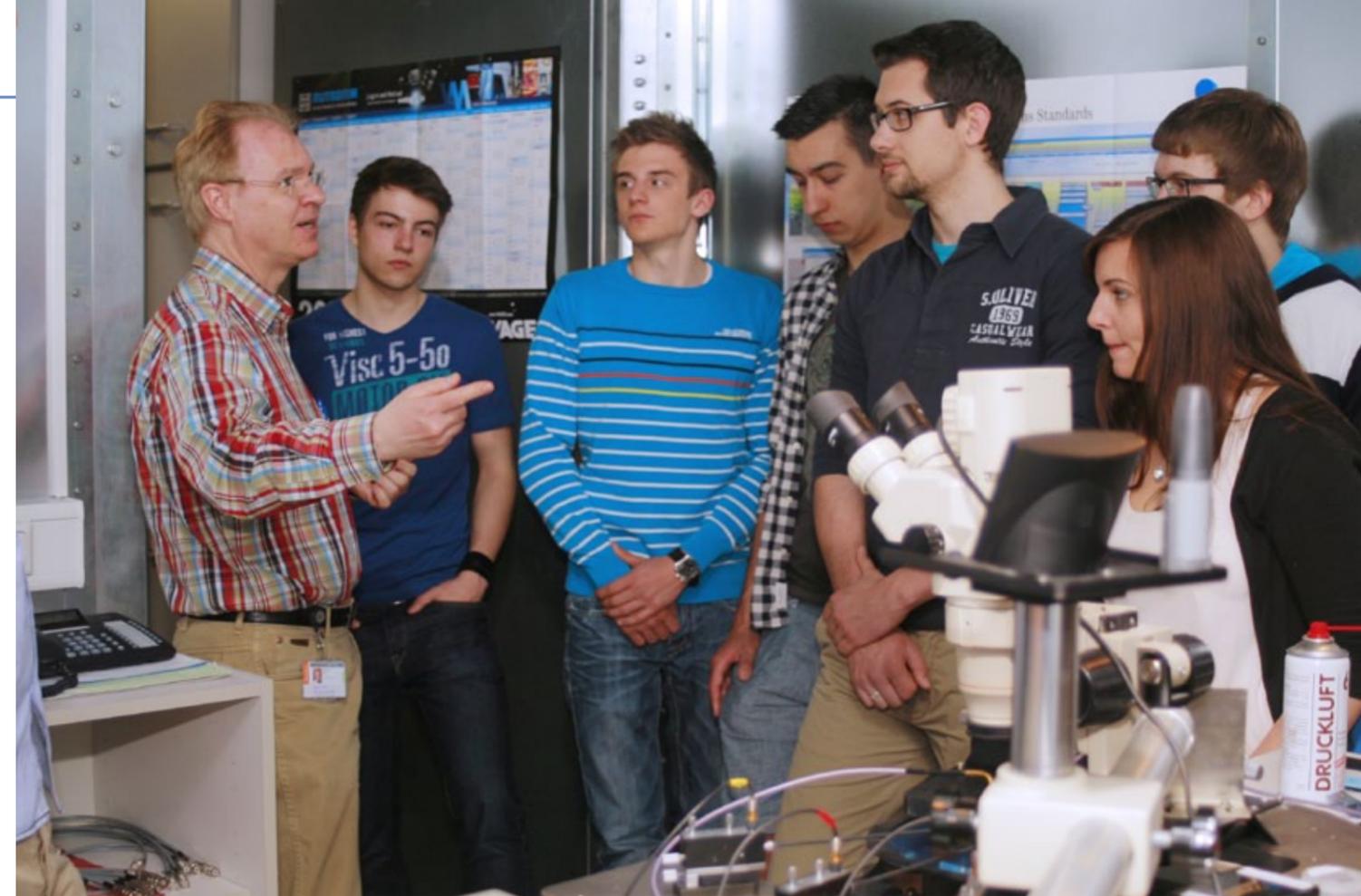
Einsetzen eines Lecksuchmolches der Firma ARS in eine Pipeline. Foto: Kathrin Butter, ARS Betriebsservice GmbH.

Das IMMS hat für unser System die gesamte Elektronik realisiert und insbesondere eingebettete Elektronikbaugruppen erarbeitet, Mikrocontroller- und Anwendungsprogramme entwickelt sowie vielfältige Untersuchungen und Tests vorgenommen.

Das IMMS hat uns im Rahmen der Entwicklung und Weiterentwicklung unserer Technologie hervorragend unterstützt und ist für uns ein zuverlässiger Partner, auf den wir auch in Zukunft gern zurückgreifen.“

Lutz Wohlleben, Projektingenieur für den Bereich Lecksuchmolchung, ARS Betriebsservice GmbH.

www.ars-bs.com



Prof. Dr. Ralf Sommer mit Studenten der TU Ilmenau bei einer Laborführung am IMMS. Foto: IMMS.

Nachwuchsförderung am IMMS

Wissenschaftlicher Nachwuchs hat am IMMS besondere Priorität. Auch 2014 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. 2014 arbeiteten insgesamt 53 Studenten als Praktikanten oder studentische Hilfskräfte am IMMS oder sie schrieben hier ihre

Bachelor-, Master- oder Diplomarbeiten. 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.



Studentische Arbeiten im Forschungsprojekt GreenSense

Im Zusammenhang mit laufenden Forschungsprojekten bietet das IMMS Studentinnen und Studenten der Ingenieurwissenschaften ständig eine umfangreiche Auswahl herausfordernder und praxisorientierter Themenstellungen für Praktika, Bachelor- und Master-Arbeiten an. Unsere studentischen Mitarbeiter tragen dabei in erheblichem Umfang zum Erfolg unserer Forschungsarbeiten bei, indem sie wichtige wissenschaftliche Vorlauffragestellungen analysieren und den Projektteams mit unterstützenden Entwicklungstätigkeiten zur Seite stehen.

So beteiligten sich während der Planungsphase und der anschließenden dreijährigen Laufzeit des Forschergruppenprojektes „GreenSense“ mehr als 20 studentische Mitarbeiter mit über 30 einzelnen Aufgabenstellungen an den Forschungsaktivitäten des Instituts zu energieeffizienten und energieautarken elektronischen Sensorsystemen. Das Themenspektrum reichte von Rechercharbeiten zum Stand der Technik von Energy-Harvesting-Verfahren bis hin zu technisch und zeitlich aufwändigen Konstruktionsaufgaben wie der Entwicklung einer RFID-Basisstation mit spezieller Feldspulengeometrie und einer mikroelektronischen Interface-Schaltung für RFID-Sensoren.

Im Projekt GreenSense konnten Studenten vielfältige Aufgaben bearbeiten. Das Bild zeigt Messungen im Reinraum-Labor des Institutsteils Erfurt für eine am IMMS betreute Abschlussarbeit zu Entwurf und Aufbau eines Reader-Systems für ein passives RFID-Mikrosensor-Array. Foto: IMMS.

„Die üblicherweise für einzelne Bachelor- und Master-Arbeiten vorgesehenen Bearbeitungszeiträume von zwei bis sechs Monaten sind dabei meist viel zu kurz, um komplexe Aufgabenstellungen wie die Entwicklung einer mikroelektronischen Schaltung vom Entwurf bis zur Fertigung und Messung vollständig durchführen zu können“, erläutert Projektkoordinator Dr. Eckhard Hennig. „Häufig nutzen unsere Studenten daher unser Angebot, sich schon frühzeitig während ihres Studiums über Tätigkeiten als studentische Hilfskraft oder in Praktika die notwendigen Praxiskenntnisse zur Bearbeitung anspruchsvoller Themen in den Bereichen Mikroelektronik, Systemtechnik und Mechatronik anzueignen und anschließend sowohl ihre Bachelor-Arbeiten als auch ihre Master-Arbeiten nacheinander bei uns durchzuführen. Hierdurch erhalten unsere Studenten einen besonders umfassenden und realistischen Einblick in die Inhalte sowie die organisatorischen und zeitlichen Abläufe ingenieurwissenschaftlicher Arbeiten. Nicht selten führen die entstehenden langfristigen Bindungen auch zu einer späteren Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS.“

Alexander Hofmann, M.Sc.,
Analogschaltungsdesigner im
Bereich bioanalytische und
biomedizinische Sensorik,
Mikroelektronik. Foto: IMMS.



Alexander Hofmann, M.Sc.

„Entscheidend für die Wahl meines Studiums und meiner Tätigkeit am IMMS war die Erkenntnis, Ergebnisse meiner Kreativität erleben zu wollen und – was über allem steht – damit Menschen unmittelbar helfen zu können. Schnittstellen zwischen Biologie und Technik zu schaffen und damit Blinden das Sehen zu ermöglichen, Querschnittsgelähmten wieder zum Laufen zu verhelfen, Krankheiten wie Alzheimer, Parkinson, Multiple Sklerose, Krebs, AIDS und viele andere schneller zu diagnostizieren und damit die Entwicklung effizienterer Therapien zu ermöglichen oder ein besseres Verständnis darüber zu erhalten, wie das menschliche Denken funktioniert, stellen für mich nicht nur hochkomplexe und herausfordernde Problemstellungen dar, sondern vor allem vielfältige Möglichkeiten mich zu verwirklichen.“

Während meines Studiums der biomedizinischen Technik an der TU Ilmenau war ich am Fraunhofer IBMT (Institut für Biomedizinische Technik) in St. Ingbert an der Entwicklung eines biomedizinischen Messsystems zur drahtlosen Überwachung der Atemanstrengung beteiligt und im Fachgebiet Biosignalverarbeitung der TU-Ilmenau an der Entwicklung eines makroskopischen piezoelektrischen Energy-Harvesting-Systems zur autarken Energieversorgung biomedizinischer Implantate.

Diese Arbeiten bestärkten mich darin, mich weiter analogen Schnittstellen zu widmen. Ferner verdeutlichten sie mir, dass viele biologische Prozesse und damit verbundene Zusammenhänge im Mikro- bis Nanokosmos stattfinden, makroskopische medizinische Messsysteme für diese Prozesse aber „blind“ sind oder den Patienten in seiner Lebensqualität zu sehr einschränken. Es existierten keine kommerziellen technischen anwendungsspezifischen Mikrosysteme, die flächendeckende medizinische Probleme auf dieser Ebene lösten.

Das IMMS ermöglichte mir direkt nach meinem Studium 2012 im Projekt 3DNeuro¹ einen großen Einblick in den Mikrokosmos, wodurch ich wichtige Erfahrungen in der Mikrosystementwicklung und dem Design analoger integrierter Schaltkreise sammeln konnte. In diesem Projekt entwickelten wir einen ASIC zur rauscharmen Signalverstärkung neuronaler

Aktivitäten und zur Stimulation von Nervenzellen. Unter anderem habe ich die komplette analoge Signalverstärkerkette für ein entsprechendes Mikrosystem realisiert. Im Projekt 4TPixel² und bei den Arbeiten für Biochips konnte ich meine Design-Kenntnisse zu ASICs und Mikrosystemlösungen erweitern, die als CMOS-Bildsensoren in Röntgengeräteapplikationen einfließen bzw. Krankheitserreger auf molekularer Ebene zur Vor-Ort-Diagnose von Tierseuchen³ erfassen. Zurzeit evaluiere ich die im Biochip-Projekt entwickelten Systeme. Am IMMS schätze ich vor allem die stets kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit, die ein großes Maß an Kreativität zielgebunden fördert und das Lösen komplexer Probleme in einer freundschaftlichen Atmosphäre angenehm gestaltet. Ich empfinde es als großes Glück, mich in diesem Arbeitsumfeld zu verwirklichen.“

Vojtech Dvorák

„In meinem ersten Jahr als Doktorand der Technischen Universität in Brno suchte ich die Möglichkeit, ein Forschungsinstitut in Europa zu besuchen. Nach einer Recherche entschied ich mich für das IMMS. Der erste Kontakt wurde durch Prof. Háze, dem Leiter der Mikroelektronikabteilung der TU Brno, hergestellt. Über die positive Antwort von Georg Gläser war ich sehr erfreut und er ermöglichte mir ein dreimonatiges Praktikum. Georg bot mir die Chance, mich mit dem interessanten Thema „High-Level Modellierung und Synthese von Fließkomma-Arithmetik für FPGA-basierte mixed-signal Simulationen“ in SystemC einzuarbeiten. Diese Materie passt auch sehr gut zu meinen Forschungstätigkeiten an der TU Brno.“

Mein Praktikum am IMMS bot mir die Möglichkeit, Fließkomma-Datentypen und die entsprechenden Operationen in Form einer Bibliothek zur Modellierung von analogen Komponenten erfolgreich zu implementieren. Der Vorteil dieses neuen `sc_float`-Datentyps im Vergleich zu C++ Datentypen ist die Option, die Größen der internen Register beliebig anzupassen und damit die Performance von FPGA-basierten Simulationen steigern zu können. Auf dieser Basis habe ich mich im nächsten Schritt an der Entwicklung eines Modells für die analoge Schaltung eines RC Oszillators beteiligt. Dieser wurde mit verschiedenen Genauigkeiten der internen Berechnungen synthetisiert, im FPGA simuliert und im Labor mit guten Ergebnissen getestet. Die Machbarkeit des Ansatzes konnte so bewiesen werden. Ebenso habe ich an dem Modell einer Phasenregelschleife (phase-locked-loop, PLL) mitgewirkt, das jetzt in einem laufenden Projekt verwendet wird.“

¹ Vgl. Fachartikel zu 3DNeuroN im Jahresbericht 2013, S. 26ff.

² Vgl. Fachartikel zu 4TPixel in diesem Jahresbericht, S. 48f.

³ Vgl. Fachartikel zu Biochips in diesem Jahresbericht, S. 50ff.

A photograph of two scientists in a laboratory. They are wearing white lab coats and hairnets. One scientist is pointing at a computer monitor displaying a software interface with various data points and graphs. The other scientist is using a mouse. In the background, there is a microscope and other laboratory equipment.

FORSCHUNGSTHEMA
ENERGIEEFFIZIENTE UND
ENERGIEAUTARKE
SYSTEME

Das IMMS hat im Forschungsprojekt „GreenSense“ einen energieeffizienten CMOS-Tempersensoren für Anwendungen in energieautarken integrierten Sensorsystemen entwickelt und wurde für diese Arbeit auf der IEEE-Konferenz APCCAS 2014 in Japan mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Mit dem hier gezeigten Aufbau im Labor des IMMS wird bereits eine weiterentwickelte Variante dieses Sensors charakterisiert, die u.a. eine RFID-Anbindung ermöglicht. Foto: IMMS.

Energieeffiziente und energieautarke Systeme

Motivation

Sektoren mit hohem Energieverbrauch, wie verarbeitende Industrie, Verkehr und Gebäudewirtschaft, besitzen ein hohes Potenzial Energie einzusparen. Dort sind Lösungen gefragt, die den Energieverbrauch senken und Energieverschwendung vermeiden. Energieeffiziente Systeme helfen dabei, Energie einzusparen und die von EU und Bundesregierung gesteckten Klimaziele zu erreichen. Darüber hinaus bilden solche Systeme die Voraussetzung für den Megatrend der mobilen Geräte, der ohne sparsame Mikroelektronik-Chips und Displays so nicht in unseren Alltag Einzug gehalten hätte. Dieser Trend wird zwar sehr stark von den Consumer-Geräten getrieben. Die Nachfrage nach mobilen Geräten nimmt jedoch in der Industrie mehr und mehr zu. Hier werden allerdings erheblich höhere Anforderungen hinsichtlich Laufzeit, Robustheit und Leistung an die Systeme gestellt. Ein weiterer Megatrend auf dem Weg zu „Industrie 4.0“ wird unter dem Begriff „Internet der Dinge und Dienste“ zusammengefasst, bei dem nicht mehr der Mensch im Zentrum des Datenaustauschs steht, sondern dies von den Sensoren und Aktoren via Internet übernommen wird. Funktionen von Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen aller Art werden bereits heute von eingebetteten Computersystemen gesteuert.

Die neue Generation dieser Systeme sind „Cyber-physische Systeme“. Sie sind die Basis für das „Internet der Dinge und Dienste“, das Dienstleistungen der realen Welt in das Internet der Zukunft einbinden wird. Darin wird alles mit allem kommuniziert. Hierfür ist es notwendig, neue Dimensionen zu erschließen. In diesen sollen Umweltdaten erfasst sowie internetbasiert bereitgestellt werden und Systeme durch zunehmende kognitive Fähigkeiten interagieren und autonom handeln können. Wichtig ist dabei, die wachsende Dynamik und Komplexität der Prozesse durch intelligente Verfahren zu beherrschen.

„Cyber-physische Systeme“ werden daher eine enorme Menge von Sensoren und Chips beinhalten, durchgängig vernetzt sein und über ein stark erweitertes Leistungsspektrum verfügen. Sie werden nicht nur Informationen erfassen, sondern sollen auch überwachen, analysieren, modellieren, eigenständig

kommunizieren und somit industrielle Prozesse effizient automatisieren und selbstregulierend steuern und optimieren. Damit stellen sich aber vor allem Herausforderungen an die Zuverlässigkeit, geringen Wartungsaufwand und vor allem niedrigen Energieverbrauch. Für solche kleinen Systeme könnte die Gewinnung der zum Betrieb notwendigen Energie aus der Umgebung der Durchbruch für ihren flächendeckenden Einsatz sein.

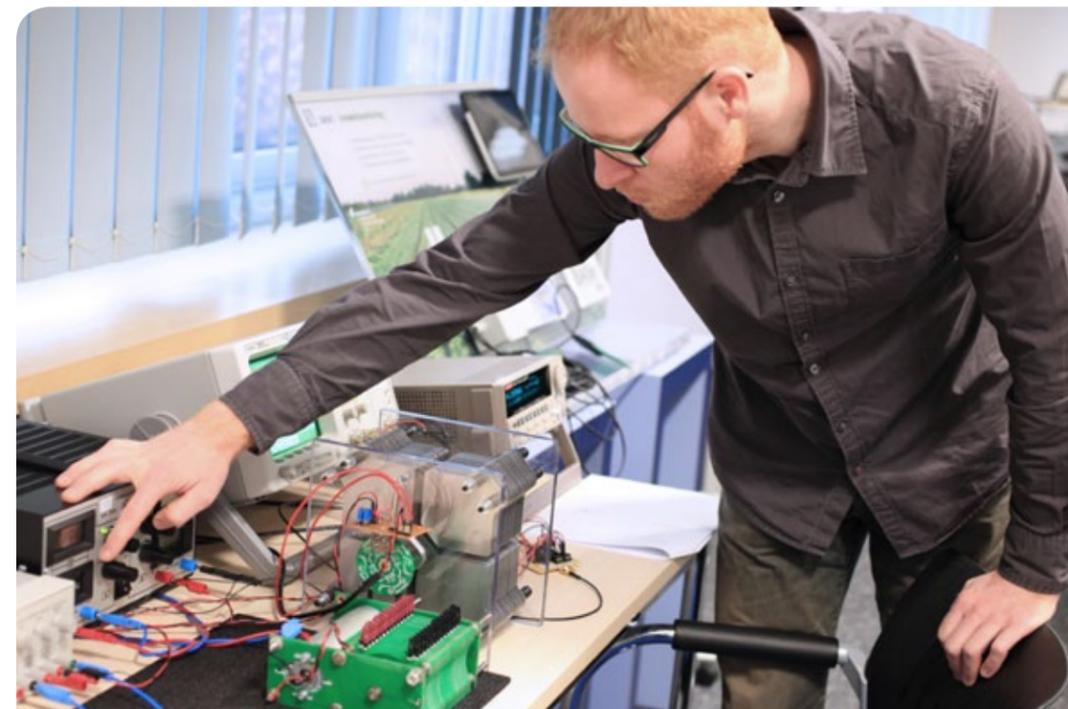
Erfahrung

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das IMMS schon seit mehreren Jahren in den Bereichen Sensorsysteme, Kommunikation, Signalverarbeitung und Systemintegration mit dem energieeffizienten Design von eingebetteten Systemen und applikationsspezifischen integrierten Schaltungen (ASICs) sowie mit Lösungen für deren autarke Energieversorgung. Bereits seit 2005 entwickelt das IMMS Plattformen für drahtlose Sensornetze für Anlagen-, Gebäude- und Umweltmonitoring mit einer Batterielaufzeit von mehreren Jahren. Dazu hat das Institut u.a. im Wachstumskern CBS viele Grundlagen erarbeitet. Hierbei spielen Konzepte zum Batteriemangement und energieeffizienter Prozessverarbeitung auf Software-Ebene eine große Rolle. Diese hat das IMMS u.a. auch in das Cool-Silicon-Projekt „CoolConSens“ eingebracht.

Für die intelligente Heim-Steuerung erforscht und entwickelt das Institut seit 2009 in Projekten wie „SmartHomeServices“ neue Ansätze. Entstanden ist u.a. ein Smart-Home Gateway mit einem Energieverbrauch von weniger als 2 Watt, was im Vergleich mit heutigen Lösungen am Markt noch immer einen Spitzenwert darstellt. Das IMMS hat diese Prinzipien genutzt, um effiziente Sensorknoten für die Lokalisierung von Personen und Geräten auf dem Flughafen vorfeld energetisch zu modellieren und auf dieser Basis marktnahe Lösungen zu entwickeln (vgl. Jahresbericht IMMS 2013).

Autarke Systeme können über Batterien oder aber auch über Harvesting von Energie aus der Umgebung versorgt werden. Um Energiespeicher optimal zu dimensionieren, analysiert das IMMS sehr genau und detailliert den tatsächlichen Stromverbrauch eines Gerätes. Das Institut bezieht hierfür auch Stromspitzen mit ein, die von der Batterie oder dem Speicher geliefert werden müssen, da diese die abrufbare Kapazität beeinflussen.

Eine besondere Herausforderung stellen hierbei Systeme dar, die ihre Energie ausschließlich aus der Umgebung beziehen (**Energy-Harvesting**). Diese Systeme müssen so dimensioniert werden, dass immer genügend Energie für den Betrieb zur Verfügung steht,



auch wenn sich der Energieeintrag durch externe Einflüsse vermindert. Zusätzlich sind Mechanismen zu implementieren, die einen geordneten Weiterbetrieb nach einem Stromausfall gewährleisten. Diese Fragen erforscht das Institut seit 2007 und hat auf dieser Basis u.a. einen Vibrationsharvester zum Betrieb eines drahtlosen Auslesesystems im Baubereich entwickelt. Heute konzentrieren sich die Arbeiten auf elektrostatische und elektromagnetische Harvester-Module, die elektrische Ausgangsleistungen im Bereich von 10 μ W bis zu 10 mW bereitstellen und damit für die Energieversorgung autarker Sensoren geeignet sind. Das Institut entwickelt hierfür sowohl die elektromechanischen Komponenten als auch integrierte Harvester-Frontend-Schaltungen und Energiemanagement-Funktionen.

Stand 2014

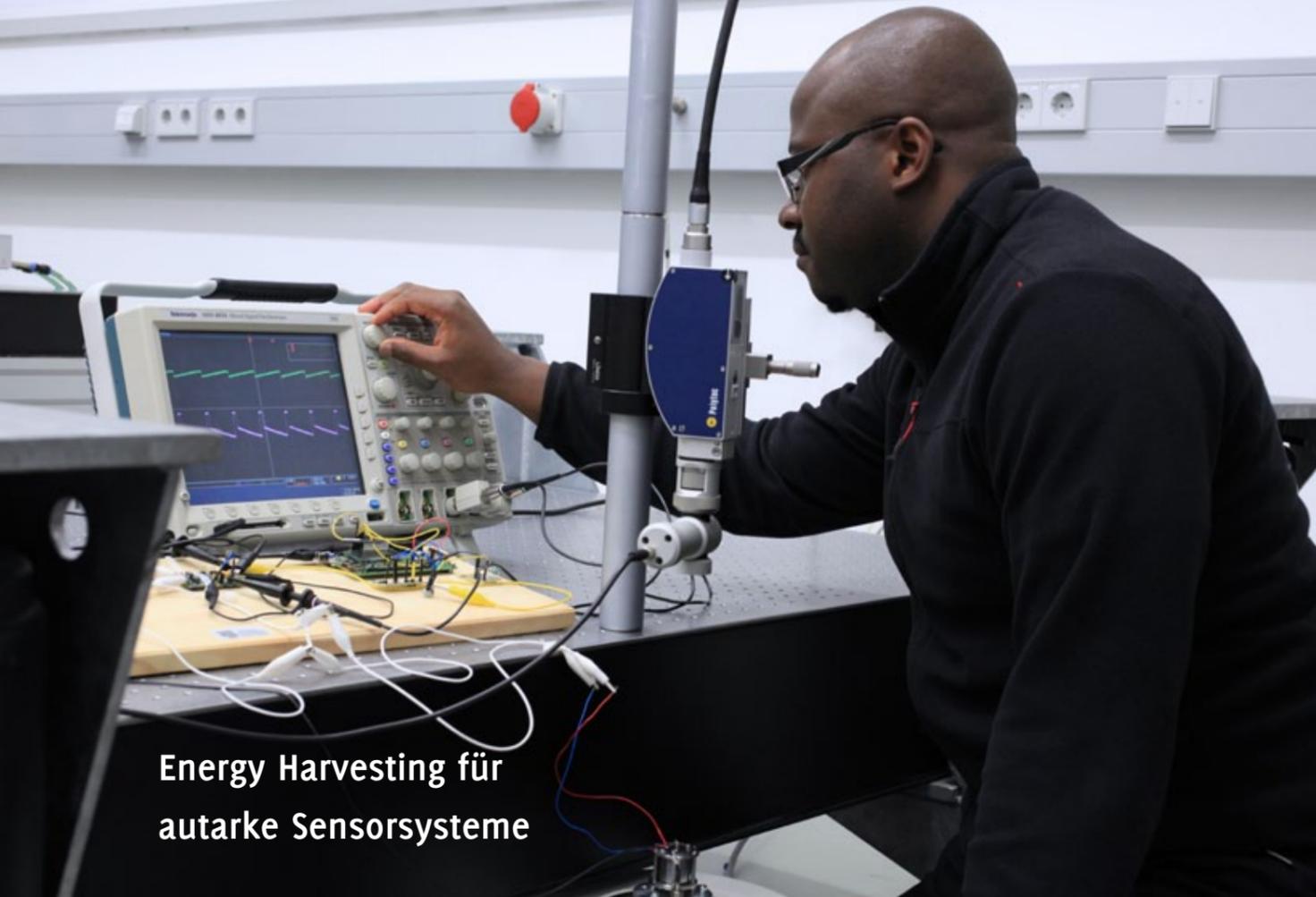
Mit diesem systematisch erworbenen Know-how und der dafür ausgerichteten Messausstattung entwickelt das IMMS nicht nur einzelne Komponenten. Vielmehr analysiert das Institut auf dieser Grundlage alle Anforderungen eines Gesamtsystems und erarbeitet dafür eine optimale Lösung. Die 2014 abgeschlossenen Arbeiten in der Forschergruppe GreenSense haben wesentlich dazu beigetragen, die Leistungsfähigkeit des IMMS auf dem Gebiet der energieautarken Systeme zu erhöhen. So hat das Institut neue effektive integrierte Sensor-ASIC-Lösungen für pH-Wert und Temperatur geschaffen, die künftig in der Bioanalyse

Eines der vielen zum Abschluss-Workshop des Projekts GreenSense Ende 2014 präsentierten Ergebnisse. Mit dem abgebildeten Drehkondensator wurde der im Projekt entwickelte MEMS*-Energy-Harvesting-Frontend-IC charakterisiert. Der Kondensator dient als makroskopisches Äquivalent des elektrostatischen MEMS-Harvesters. Foto: IMMS.

eingesetzt und im Kapitel zum Forschungsthema Bioanalytik näher beschrieben werden. Neue Kommunikationslösungen des IMMS koppeln viele solcher Sensor-ASICs gleichzeitig mit einer Basisstation über RFID. Im Kompetenzfeld Systemintegration hat das Institut eine Technik zur energetischen Modellierung von Applikationsszenarien im Umfeld von Sensornetzen entworfen. Diese geht von der Anwendung aus, bildet diese auf Software und Hardware ab und reduziert so den Energieverbrauch für die Lösung auf ein Minimum.

Das IMMS verbindet sein Know-how im Design energieeffizienter Sensor-ASICs mit dem Verständnis und der Abbildung von Gesamtsystemen in IT-technische Umgebungen, um energieeffiziente und energieautarke Lösungen zu entwickeln – vom Sensor bis zum Gesamtsystem und zugeschnitten für die jeweilige Applikation. In GreenSense und in den im folgenden beschriebenen Arbeiten zu Energy Harvesting und zu den Projekten Strommesszange, smobility und EROLEDT wird dieses Wissen systematisch gestärkt, um die Kompetenzen des IMMS in den Bereichen des Energy Harvesting und autarke Systeme insbesondere für die Bioanalytik und im Umfeld von Industrie 4.0 weiter auszubauen.

* MEMS Mikroelektromechanische Systeme, vgl. Forschungsthema MEMS.



Energy Harvesting für autarke Sensorsysteme

Motivation

Ein Baustein von „Industrie 4.0“ sind intelligente „Cyber-physische Systeme“, die feinverteilte und vernetzte Sensoren beinhalten. Für solche und andere Systeme wird weltweit seit etwa 15 Jahren an deren umweltfreundlicher Energieversorgung geforscht. Bislang werden in vielen Fällen Batterien verwendet. Diese enthalten nicht nur umwelt- und gesundheits-schädliche Chemikalien, sondern nehmen oft auch einen enormen Bauraum ein und sind bei umfangreichen Sensornetzwerken unwirtschaftlich in der Wartung. An unzugänglichen Stellen können sie zudem nicht gewechselt oder aufgeladen werden.

Lösungen

Mit Energy-Harvesting-Lösungen lassen sich Systeme mit Energie aus der Umwelt versorgen. Stand der Technik sind Konstruktionen, mit denen Licht, Wärme, Bewegung und elektromagnetische Felder in elektrische Energie umgewandelt werden. Das IMMS entwickelt vor allem Energy-Harvesting-Ansätze für kinetische Anregungen und elektromagnetische Felder weiter und verbessert sie hinsichtlich ihrer Leistungsdichte. Je nach Leistungsklasse der Applikation

Das IMMS hat für die Anbindung eines elektromagnetischen Wandlers an seine Funksensorknoten unterschiedliche Harvester-Schaltungen untersucht und aufgebaut. Das Foto zeigt einen solchen Aufbau beim Test an einem Vibrationsanreger im Mechatroniklabor des IMMS. Foto: IMMS.

kommen MEMS*-Harvester für Mikrosensoren oder feinmechanische Energiewandler für leistungsstärkere Funksensorknoten zum Einsatz. So hat das IMMS nicht nur ein neuartiges Design-Konzept für MEMS-Harvester entwickelt und zum Patent angemeldet. Das Institut hat 2014 auch Arbeiten für eine modulare energieeffiziente Funksensorplattform vorangebracht, die für verschiedene Sensorik genutzt und über Energy Harvesting versorgt werden kann.

Darüber hinaus entwickelt das IMMS energieeffiziente Sensorlösungen. Nur so lassen sich energieautarke Systeme mit verträglichen Produktabmessungen realisieren. Grund ist, dass Energy Harvester hinsichtlich der erforderlichen mittleren Leistungsaufnahme dimensioniert werden und nicht wie Batterien für die Gesamtenergiemenge über die Lebensdauer. Insbesondere für langlebige Applikationen können daher mit einer autarken Energiequelle miniaturisierte Lösungen realisiert werden.

Um die Effizienz des Systems zu steigern, betrachtet das IMMS immer die gesamte autarke Energieversorgung. Diese besteht aus einem physikalischen Wandler, welcher Energie verschiedener Energiefor-

* MEMS Mikroelektromechanische Systeme, vgl. Forschungsthema MEMS.

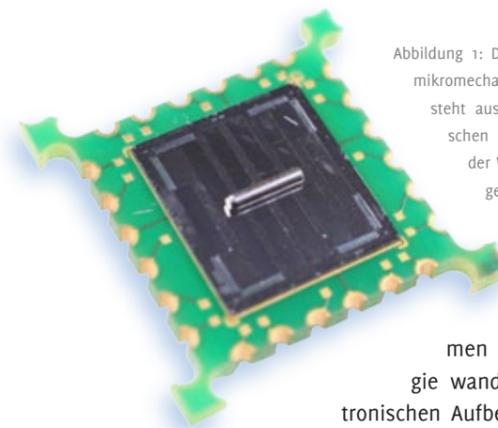


Abbildung 1: Der vom IMMS entwickelte mikromechanische Energiewandler besteht aus beweglichen elektrostatischen Kammstrukturen, die aus der Wafer-Ebene herauschwingen und eine kontinuierliche elektrische Ausgangsleistung von ca. 10 μ W erzeugen. Foto: IMMS.

men in elektrische Energie wandelt, und einer elektronischen Aufbereitung, welche die Energie für den Verbraucher nutzbar macht. Dazu ist beispielsweise die Wandlung des Spannungspegels, Gleichrichtung und Zwischenspeicherung von Energie für Zeiten mit erhöhtem Verbrauch notwendig.

MEMS-Harvester des IMMS für Mikrosensorik

Das IMMS hat im Projekt GreenSense mikromechanische Energiewandler mit einer kontinuierlichen elektrischen Ausgangsleistung von ca. 10 μ W entwickelt. Diese Leistung reicht aus, um beispielsweise einen ebenfalls im Projekt realisierten energieeffizienten integrierten Low-Power-CMOS*-Temperatursensor zu versorgen und dessen Daten passiv über RFID** auszulesen. Ziel ist es, die Energie aus sehr niederfrequenten Schwingungen, wie sie beispielsweise bei menschlichen Bewegungen auftreten, zu wandeln.

Grundprinzip für die Lösung ist eine bewegliche elektrostatische Kamm-Struktur. Die Herausforderung bestand darin, eine niedrige Eigenfrequenz, eine möglichst hohe Grundkapazität und eine große Kapazitätsänderung bei Auslenkung auf einer möglichst geringen Chipfläche zu erreichen. Für diese Anforderungen hat das IMMS ein neuartiges Design-Konzept für einen MEMS-Harvester realisiert und zum Patent angemeldet. Dieses beinhaltet einen „Out-of-plane“-Oszillator, dessen Zentralmasse aus der Wafer-Ebene herauschwingt. Die niederfrequenten Federelemente wurden zugunsten einer kompakten Bauform abgedünnt. Für die Technologieentwicklung und Fertigung der MEMS-Strukturen hat das IMMS eng mit dem Institut für Mikro- und Nanotechnologie MacroNano der Technischen Universität Ilmenau kooperiert.

Die Ansätze des IMMS zur Temperatursensorik und zur Systemarchitektur des MEMS-Energy-Harvesting-Moduls wurden 2014 auf den Konferenzen APCCAS 2014 bzw. Analog 2014 mit Best Paper Awards ausgezeichnet und sind in den Highlights in diesem Kapitel bzw. im Forschungsthema MEMS näher beschrieben.

Feinmechanische Energiewandler für Funksensorknoten

Um die Daten häufig zu erfassen und zu übertragen oder um große Distanzen zu überwinden, können die eben beschriebenen Lösungen, die Leistungen im unteren Mikrowatt-Bereich bereitstellen, nicht mehr eingesetzt werden. Die Leistungsaufnahme einer Sensorplattform kann für solche Aufgaben auf bis zu 10 mW ansteigen. Wird beispielsweise ein digitaler Drucksensor im Sekundentakt ausgelesen und die Information direkt und drahtlos mit einer Sendeleistung von +3 dBm weitergegeben, wird eine mittlere Leistung von 0,4 mW benötigt.

Im Projekt GreenSense hat das IMMS daher auch Funksensorknoten energetisch optimiert, um diese ausreichend mit Energie aus der Umwelt zu versorgen. Hierzu hat das Institut verschiedene Designansätze für Funksensoren verglichen, den Energiebedarf für bestimmte Applikationen gemessen und eine Designmethodik für autarke Sensorknoten erarbeitet. Hierfür hat das IMMS einen Energiesimulator entwickelt. Solche Werkzeuge werden bislang von einigen Herstellern für einzelne Mikrocontroller mit angeboten und erlauben Untersuchungen von Zyklen und verschiedenen Szenarien zur Datenauslese, Verarbeitung und Weiterleitung bezüglich ihres Energieverbrauchs. Der Energiesimulator des IMMS arbeitet herstellerunabhängig. Mit dieser bis dato für den Schaltungsentwurf für Leiterplatten in der Form nicht verfügbaren Lösung kann der Stromverbrauch von komplexen Mikrocontroller-basierten Systemen vor dem Aufbau der Hardware abgeschätzt werden. Zudem lässt sich nun auch der Austausch von peripheren Hardwarekomponenten und deren Interfaces energetisch bewerten. Solche Informationen sind essenziell, um ein optimales Design für energieautarke Funksensorknoten entwickeln zu können. Die auf dieser Basis erarbeitete modulare Funksensorplattform lässt sich für unterschiedliche Sensoren verwenden und über Harvester mit Energie versorgen.

Das energieautarke Funksensorsystem hat das IMMS in Kooperation mit der Forschergruppe PORT der TU Ilmenau realisiert. Der am Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik entwickelte und an dieses System angebundene elektromagnetische Energiewandler gleicht im Grundprinzip einem Fahrraddynamo oder Schütteltaschenlampen. Er beruht auf einem beweg-

*CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor (Komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter)

**RFID Radio-frequency identification (Hochfrequenz-Identifikationsverfahren)

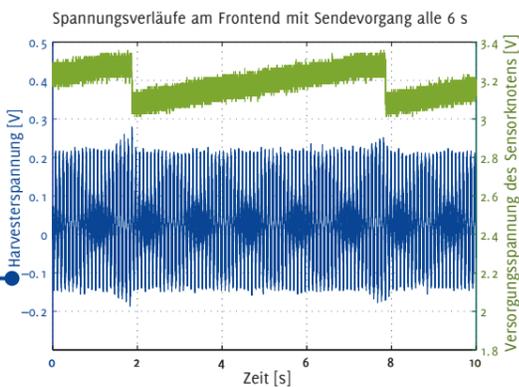
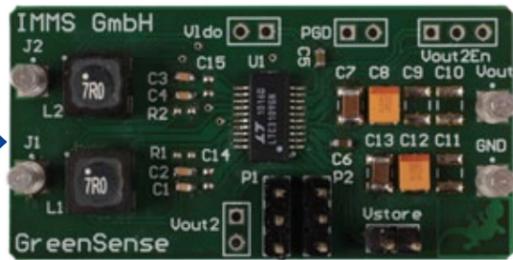


Abbildung 2: Vom IMMS realisierte Schaltung für die Energieentnahme aus feinmechanischen Energiewandlern. Die mit dem Harvester erzeugte geringe Wechsellspannung wird gespeichert und eine relativ konstante Gleichspannung von 3,3 V bereitgestellt. Foto & Grafik: IMMS.

Ausbau der Messtechnik für Energiewandler

Um diesen und andere Energiewandler anzuregen, hat das IMMS einen Messplatz zur Charakterisierung von Vibrationswandlern realisiert. Die Messtechnik umfasst zwei verschiedene Vibrationsanreger (Shaker), welche durch geringfügige Eingriffe für Messungen an MEMS-Strukturen oder feinmechanischen Wandlern umgerüstet werden können. Das IMMS hat nicht nur die Einzelkomponenten für den Messstand mechanisch verbunden, sondern hat für deren funktionelles Zusammenspiel eine Software entwickelt. Die Anregungscharakteristik wird am PC vorgegeben. Das Institut charakterisiert hierzu das reale Einsatzgebiet des Harvesters und bildet es dann am Shaker nach. Die Anregungskraft wird mit Hilfe eines dSpace-Systems und der Rückkopplung eines Beschleunigungssensors geregelt. Die Bewegung der oszillierenden Masse wird mit einem Vibrometer erfasst und zeitgleich mit der Anregung aufgezeichnet.

Mit diesen Messungen trifft das IMMS Aussagen über die Resonanzfrequenz und das Dämpfungsverhalten der Energiewandler. Diese Erkenntnisse nutzt das Institut, um die Modellbildung und damit die Entwicklung von Harvester-Systemen und Gesamtsystemen zu verfeinern.

Ausblick

Die Ergebnisse im Bereich Energy Harvesting wird das IMMS künftig weiter ausbauen und mit energieeffizienten Sensorsystemen koppeln, die das Institut u.a. in Projekten im Bereich Bioanalytik und Medizintechnik, Automatisierungstechnik und Umweltmonitoring erarbeitet hat. Das vom IMMS für autarke Sensorknoten entwickelte Vorgehen und der Energiesimulator sollen künftig in eine Gesamtdesignmethodik für autarke Systeme aus Mechanik und Elektronik überführt werden.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de
Dr. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de

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.

lich aufgehängten Magnetkreis und einer Spule, die am Gehäuse befestigt ist. Wird dieses angeregt, folgt zwischen Magnetkreis und Spule eine Relativbewegung, die eine Spannung induziert. Um radnahe Sensoren in Fahrzeugen mit Energie zu versorgen, wurde das System mit einer Eigenfrequenz im Bereich von 10 Hz entwickelt.

Das IMMS hat für die Anbindung dieses elektromagnetischen Wandlers innerhalb von GreenSense unterschiedliche **Harvester-Schaltungen** untersucht und aufgebaut. Diese hat das Institut bezüglich ihrer Energieausbeute und ihrer Eignung für den eingesetzten Energiewandler verglichen. Auf dieser Basis wurden die Schaltungen dimensioniert und optimiert, um aus dem Energy-Harvester die maximal mögliche Energie entnehmen zu können. Um diese für das System lange speichern zu können, wurden nicht nur Art und optimale Kapazität geeigneter Kondensatoren bestimmt, sondern solche mit sehr geringer Selbstentladung ausgewählt. Mit Testreihen hat das Institut optimale Konfigurationen für verschiedene Anwendungsszenarien ermittelt. Die so optimierten Harvester-Schaltungen funktionieren bereits bei verhältnismäßig geringen Wechsellspannungen mit Effektivwerten unter 100 mV.



Intelligente Strommesszange

erfasst
Störströme in Industrieanlagen

Energetische Messungen für die intelligente Strommesszange. Foto: IMMS.

Motivation

Teure Fertigungsstillstände komplexer Industrieanlagen sind oft auf Funktionsstörungen in der Steuerungs- und Regelungstechnik zurückzuführen, die durch unerwünschte Wechselwirkungen zwischen Stromversorgung und Steuerung verursacht werden. Solche Effekte beeinträchtigen die Kommunikation zwischen den Komponenten. Ist das Niveau der Störungen zu hoch, werden diese durch die Fehlertoleranz der Steuerung nicht mehr ausgeglichen und lassen so Komponenten und damit die Produktion ausfallen.

Klassische Fehleranalysemethoden, mit denen Ursachen für solche Störungen gesucht werden können, lassen sich nicht immer einsetzen. Um Signale auf den Kommunikationsleitungen zu beobachten, müsste der laufende Betrieb der Anlage unterbrochen werden. Mehrere relevante Messstellen zeitgleich auszuwerten, ist oft unmöglich, da zum einen die Anlagen meist sehr komplex aufgebaut sind und teilweise vor Ort keine detaillierte Dokumentation verfügbar ist. Zum anderen können die funktionell zusammenwirkenden Bestandteile der Anlage wegen ihrer großen Entfernung zueinander häufig nicht von

einem Punkt aus beobachtet werden. Darüber hinaus treten die Funktionsstörungen scheinbar sporadisch und in der Regel in großen Zeitabständen von mehreren Stunden bis einigen Tagen auf. Eine entsprechend langanhaltende Analyse durch fachkundiges Personal mit Hilfe komplexer Messtechnik vor Ort verursacht hohe Kosten.

Entwicklung

Das IMMS hat daher für die Firma Indu-Sol eine kompakte, intelligente Strommesszange entwickelt, die als energieautarkes mobiles Gerät selbständig das Störniveau auf einer Leitung des Automatisierungsbusses einer Industrieanlage über 14 Tage dauerhaft erfasst, bewertet und für eine spätere detaillierte Auswertung auf SD-Karte aufzeichnet. Als Energiespeicher werden sechs LR6-Mignonzellen mit insgesamt ca. 20Wh verwendet. Das entspricht etwa der dreifachen Kapazität eines normalen Smartphone-Akkus. Die Zange erkennt das Störniveau anhand von Schwellwerten und kann Werte in einem großen Messbereich zwischen 10 mA und 30A mit bis zu 40 kSa/s erfassen und die



Die vom IMMS in einem Kooperationsprojekt mit dem Industriepartner Indu-Sol entwickelte intelligente Strommesszange EMCheck® ISMZ I kann bei der Fa. Indu-Sol bestellt werden (Art.-Nr. 122010020). Foto: IMMS.

se mit einer Auflösung von 16 Bit digitalisieren. Sie zeigt den Effektivwert (RMS) des aktuellen Störniveaus numerisch, grafisch oder spektral an und ist einfach und intuitiv zu bedienen. Nutzen Industrieanlagenbetreiber mehrere Zangen gleichzeitig, können sie den Ort der Störung bestimmen und somit den Analyseaufwand deutlich reduzieren. Die Datenauswertung wird mit einer zugehörigen Software auf dem PC vorgenommen. Dank besonderer Maßnahmen zur Gewährleistung der Elektrosicherheit ist das Gerät auch an stromführenden Leitungen mit hohen Berührungsspannungen entsprechend der Überspannungskategorie III einsetzbar. Das bedeutet, dass z.B. auch Messungen in fest verdrahteten Schaltschränken von Industrieanlagen vorgenommen werden können.

Lösungsweg

Grundlage für die Entwicklung des IMMS waren detaillierte Informationen zur Analyse von Störproblemen in Industrieanlagen, die die Firma Indu-Sol als Praxispartner und Experte auf diesem Gebiet lieferte. Das Unternehmen hat seine zahlreichen Einsätze in solchen Anlagen untersucht. Es hat festgestellt, dass auf den gestörten Kommunikationsleitungen oft ein hohes Niveau von Ausgleichströmen zu finden ist, die überwiegend entlang der Abschirmung der Kabel fließen. Ursache dieser Ströme sind in der Regel ungünstige Erdungsverhältnisse im Zusammenhang mit Komponenten, die ein- oder abgeschaltet werden, oder die funktionsbedingt ein hohes Niveau an transienten oder hochfrequenten Ableitströmen haben, wie z. B. Frequenzrichter. Der Datenstrom wird i.d.R. differentiell gegenphasig übertragen und

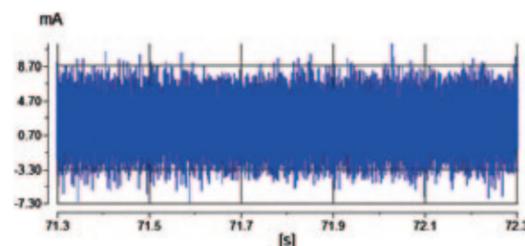


Abbildung 1: Verlauf des Stromes auf der Abschirmung einer Kommunikationsleitung ohne Auffälligkeiten. Quelle: Indu-Sol.

kann daher außerhalb des Leiters nicht detektiert werden. Allein durch die Analyse der Ausgleichströme kann jedoch auf ein mögliches Störrisiko geschlossen werden, d.h. der Datenstrom muss hierfür nicht untersucht werden. Als Beispiel ist in Abbildung 1 der Verlauf des Stromes dargestellt, der mit Hilfe einer Stromzange gemessen wurde, die eine solche Kommunikationsleitung vollständig umfasst. Erfahrungsgemäß ist wegen des niedrigen Stromniveaus und der unauffälligen Hüllkurve auf dieser Kommunikationsleitung nicht mit einem hohen Störniveau zu rechnen. In Abbildung 2 dagegen weist die Hüllkurve einen auffälligen Verlauf auf, was auf ein möglicherweise höheres Störniveau hinweist.

Um einen möglichen Störeintrag beurteilen zu können, wurden Merkmale identifiziert. Diese umfassen eine zeitweilige oder permanente hohe Stromamplitude, eine hohe Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes und das Auftreten bestimmter Frequenzanteile im Stromverlauf.

Herausforderung für das Design dieser Strommesszange am IMMS war die geforderte Laufzeit über 14 Tage bei Nutzung herkömmlicher LR6-Batterien, welche einen weltweiten Einsatz ermöglichen. Dies setzt einen niedrigen Energieverbrauch der eingesetzten Komponenten und energieeffiziente Algorithmen in der Software voraus. Gleichzeitig stellte der große Messbereich von 10mA bis 30A hohe Anforderungen an die Aufnahmespule, die Elektronik und den Analog-Digital-Wandler des Systems, da diese Ströme nur aus dem Streufeld des Leiters gemessen werden. Für die Auswahl der Komponenten hat das IMMS verschiedene **Magnetkreise** auf Ihre Genauigkeit im angestrebten Frequenzspektrum von 40Hz bis 10kHz untersucht und auf dieser Basis die erforderlichen analogen Schaltungsteile bestimmt.

Das Institut hat eine große Anzahl von Messreihen zum Energieverbrauch unterschiedlicher **Mikrocontroller** und deren Ausführungszeiten für bestimmte Algorithmen durchgeführt. Diese Zeiten sind in Abbil-

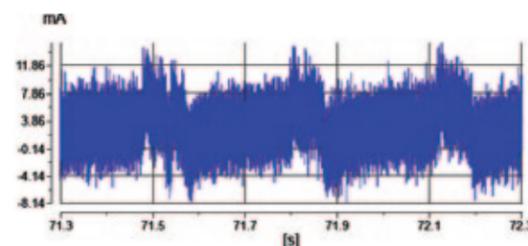


Abbildung 2: Verlauf des Stromes auf der Abschirmung einer Kommunikationsleitung mit auffälliger Hüllkurve. Quelle: Indu-Sol.

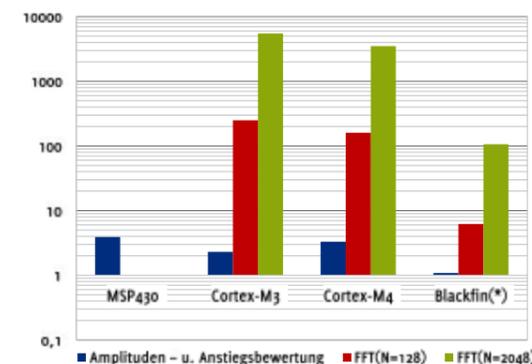


Abbildung 3: Vergleich der Ausführungszeiten (µs) verschiedener Berechnungen. Blau: Berechnung der Amplituden- und Anstiegsbewertung bei Taktfrequenz von 12MHz. Rot/grün: Berechnung verschiedener schneller Fourier-Transformationen (FFTs) mit jeweils maximal möglicher Taktfrequenz. Grafik: IMMS.

Abbildung 3 für vier ausgewählte Mikrocontroller zusammengefasst dargestellt. Zu Vergleichszwecken wurde von 200kHz ausgegangen, mit denen die Werte erfasst wurden. Hierfür muss alle 5 µs ein neuer Messwert in die Berechnung einfließen. Das Diagramm zeigt, dass alle vier Mikrocontroller die Amplituden- und Anstiegsbewertung des Signals schneller als in der maximal erlaubten Zeit von 5 µs vornehmen. Außerdem wurden die gleichen Berechnungen bei einer geringen Taktfrequenz von 12MHz und folglich die niedrigeren Energiebedarfe verglichen. Abbildung 4 stellt den Energiebedarf der Mikrocontroller für eine 14-tägige Laufzeit gegenüber.

Nach der Auswertung der Messreihen hat das IMMS einen geeigneten Mikrocontroller für diese Aufgabe bestimmt, der gleichzeitig die erforderliche Peripherie für die notwendigen Messaufgaben und Stromsparmodi besitzt.

Um die **notwendige Batteriekapazität** optimal zu dimensionieren, hat das Institut die Stromaufnahme des Systems in jedem Arbeitszyklus bestimmt. Hieraus sowie aufbauend auf den Erfahrungen aus anderen Projekten wurde die erforderliche Kapazität abgeleitet. Die entnehmbare Energie einer Batterie ist jedoch auch von der Spitzenlast abhängig, die bei der Prozessverarbeitung im System auftritt. Daher wurden solche Stromspitzen während des Messvorgangs bestimmt und die Reihenfolge der Prozessverarbeitung auf Software-Ebene optimiert, um die Batterien während des Betriebes nicht zu stark zu belasten. Zum Beispiel verbraucht das Schreiben vieler kleiner Datenmengen auf die SD-Karte sehr viel Energie. Deshalb wurden Zyklen definiert, in denen auf die SD-Karte geschrieben wird. Darüber hinaus wurden die zu schreibenden Datenmengen an die Clustergrößen des Filesystems angepasst und damit der Stromverbrauch gesenkt. Zudem konnte durch das Schreiben von mehreren Clustern mit einer Schreiboperation

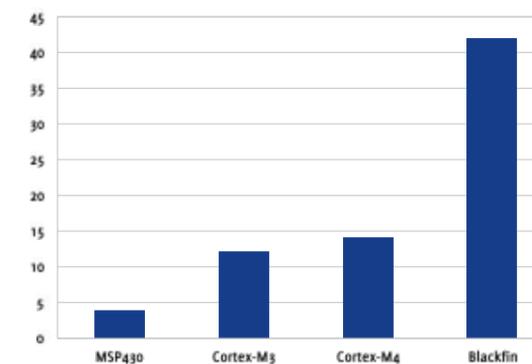


Abbildung 4: Vergleich des Energiebedarfs (Wh) für eine 14-tägige Laufzeit bei einer Taktfrequenz von 12 MHz. Grafik: IMMS.

der Energieverbrauch um ca. 50% gegenüber dem Ausgangswert reduziert werden. Für weitere Einspar-effekte wurden zusätzliche Stromsparmaßnahmen umgesetzt, wie z.B. die Reduzierung der Taktfrequenz des Mikrocontrollers in bestimmten Betriebsmodi und das Abschalten nicht benötigter Komponenten des Controllers.

Umfangreiche Messreihen zu handelsüblichen Batterien gaben schließlich Auskunft darüber, wie sich Batterien bei gegebenen Entnahmekyklen verhalten. Dadurch konnte die **verfügbare Batteriekapazität** für konkrete Benutzungsszenarien der Strommesszange genauer bestimmt und die Dimensionierung verbessert werden.

Das IMMS hat das **System** zunächst experimentell aufgebaut, vermessen und weiter optimiert. Das finale Design der Hardware wurde anhand der ebenfalls am IMMS vorgenommenen Konstruktion des Gehäuses entwickelt, das System wurde in Betrieb genommen, getestet und in das Gehäuse integriert. Die Software, die die erste Bewertung der Daten auf der Stromzange vornimmt, wurde ebenfalls am IMMS erarbeitet und implementiert.

Ausblick

Die Stromzange wurde auf der Messe „sps ipc drives“ im November 2014 in Nürnberg von der Firma Indu-Sol einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Gegenwärtig gibt es keine vergleichbaren Lösungen. Der Start der Serienfertigung soll im Sommer 2015 erfolgen.

Kontakt:

Dr. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de



Das zweijährige und 2014 abgeschlossene ZIM-Projekt „Intelligente Strommesszange EMCheck ISMZ I“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen KFZ534508 DB2 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



sMobility

Energieoptimierte Funksensoriklösung für Verkehrsanwendungen

Arbeiten an Prototypen für outdoor-taugliche, zuverlässige Drahtloskommunikations-Sensorik, die in der „taktile Straße“ eingesetzt werden und die Elektromobilität voranbringen soll. Foto: IMMS.

Motivation

Elektrofahrzeuge haben kürzere Reichweiten als konventionelle Pkw und längere „Strom-Tankzeiten“. Aktuelle lokale Informationen zu Staus, Strompreisen und Erreichbarkeit von Reisezielen sind wichtig, um ein reisezeit- und reichweitenoptimierendes Navigieren zu ermöglichen. Hierfür erarbeiten die zehn Projektpartner des Projekts „sMobility“ Lösungen, die die Elektromobilität entscheidend voranbringen sollen. Das IMMS erforscht und entwickelt ein Sensorsystem, das Fahrzeugdaten, wie Anzahl, Fahrzeugklasse oder Geschwindigkeit, in der „taktile Straße“ erfasst. Zudem etabliert das Institut eine sichere Übertragung der Daten an ein Verkehrslage- und -managementsystem, stellt die Verkehrsinformationen an der Schnittstelle zum Verkehrslagesystem bereit und entwickelt ein drahtloses Umweltsensorsystem.

Entwicklung des IMMS

Um im Straßenverkehr die Fahrzeugdaten zu erheben, arbeitet das IMMS an drahtlosen Sensoriklösungen, die mit minimalem Aufwand installierbar sind und geringere Kosten verursachen als in der Verkehrsdetektion bislang verbreitete kabelgebundene Systeme.

Die vom Institut eingesetzte Magnetfeldsensoren misst in der „taktile Straße“ die Verkehrsströme. 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 neue Drahtlosnetzwerk bereits bestehende Erfassungslösungen. Die Verkehrsdaten werden so feingranularer als bislang erhoben. Erst auf dieser Basis ist es möglich, detailliertere Verkehrsmodelle zu bilden, um daraus wiederum in Echtzeit Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung ableiten zu können.

Lösungsweg

Um die Sensorik für die „taktile Straße“ einsetzen zu können, hat das IMMS Untersuchungen zu den zahlreichen damit verbundenen Herausforderungen



Abbildung 1: Vom IMMS entwickelte Detektor-Elektronik (A), die in der Sensorhülse (B) in der „taktile Straße“ (C) eingebaut wird. Fotos: IMMS.

vorgenommen. Unter anderem müssen die Geräte outdoor-tauglich sein, in der Straßendecke installiert und gewartet werden können, die zuverlässige Drahtloskommunikation sicherstellen und darüber hinaus

eine möglichst lange Batterielaufzeit bei begrenztem Bauraum und stark schwankenden Temperaturen sicherstellen. Außerdem soll das System flexibel sein, indem sich Detektoren nicht nur nachträglich entnehmen und umpositionieren lassen. Es soll auch um eine über die reine Verkehrsdatenerfassung hinausgehende Sensorik erweitert werden können, wie z.B. um Umweltdetektoren. Spätere Insellösungen lassen sich so vermeiden und damit Kosten und administrativer Aufwand minimieren.

Da für diese Anforderungen die Funkkommunikation eine zentrale Bedeutung besitzt, hat das Institut umfangreiche diesbezügliche Messungen durchgeführt und dabei verschiedene Frequenzbänder, Antennenstrukturen und -ausrichtungen, Protokollparameter etc. berücksichtigt (Vgl. Abb. 2). Darüber hinaus wurden Energieverbrauchsdaten (Vgl. Abb. 3) der Detektoren und Gateways bei unterschiedlichen Realisierungsvarianten der Anwendungsszenarien erhoben und analysiert.

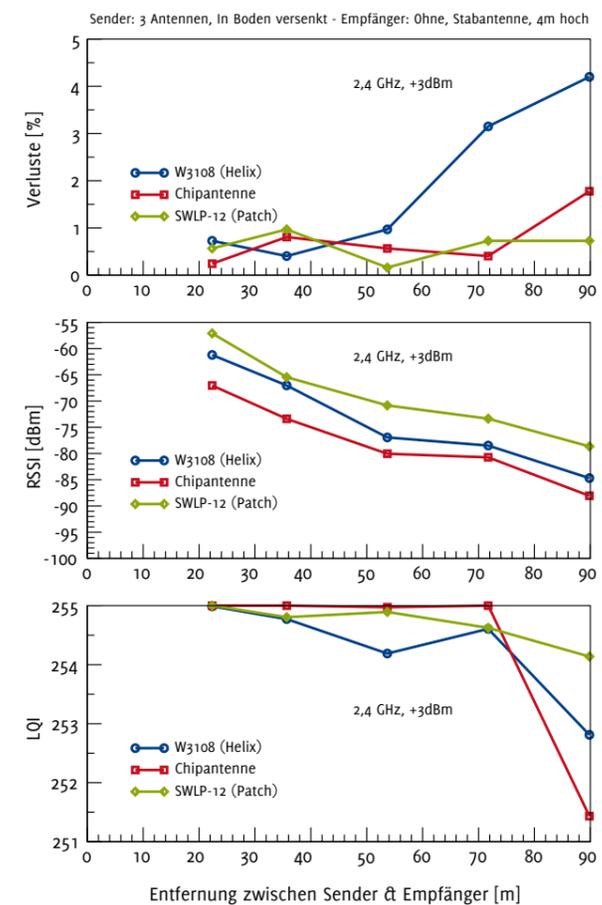


Abbildung 2: Vergleichsmessungen mit verschiedenen Antennenstrukturen (Helix-, Chip- und Planarantenne) bzgl. Reichweite und Signalqualität (LQI, RSSI). Grafik: IMMS.

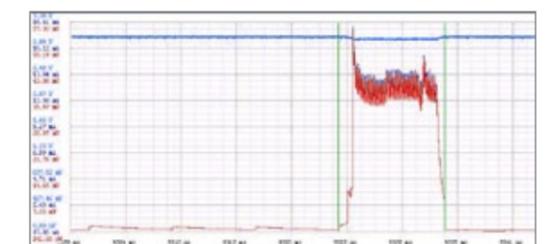


Abbildung 3: Messung des Energieverbrauchs eines Laboraufbaus eines Verkehrsdetektors (Phase erhöhten Verbrauchs: Versand einer Detektionsnachricht). Grafik: IMMS.

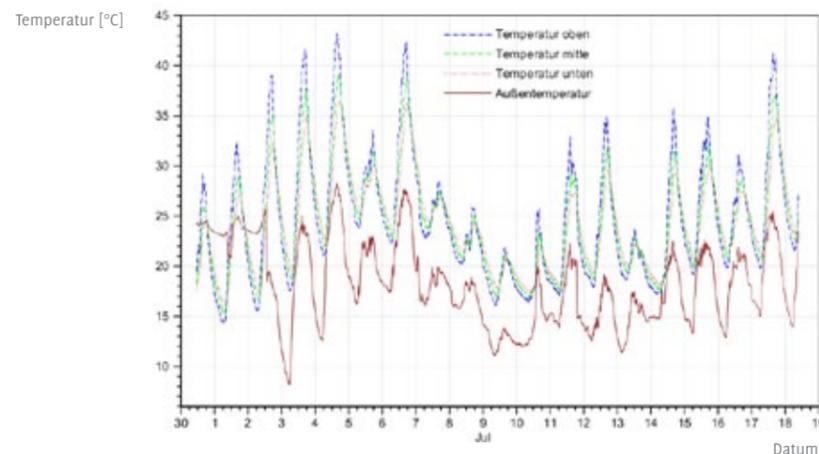


Abbildung 4:
Beispiel für eine Messung von Temperaturdifferenzen im Detektorgehäuse im Sommer 2014.
Grafik: IMMS.

Hierbei sind sowohl Einzelverbräuche von Bauteilen und -gruppen als auch Gesamtverbräuche der Systeme in unterschiedlichen Betriebsphasen untersucht worden. Darüber hinaus wurden verschiedene Batterietypen simuliert, um Laufzeiten empirisch abschätzen zu können. Die Ergebnisse sind in Designentscheidungen bezüglich der Systemkomponenten eingeflossen.

Zusätzlich hat das IMMS untersucht, ob **Energy-Harvesting-Module** im Verkehrsdetektor die Systemlaufzeit verlängern können. Hierbei hat das Institut sowohl mechanische als auch thermische Ansätze betrachtet und auftretende Vibrationen und Temperaturunterschiede im Boden analysiert. Die gewinnbaren Energiemengen aus Vibrationen erwiesen sich jedoch als zu gering, da die Frequenzen für diesen Zweck zu breitbandig auftreten. Zudem variieren die Materialien der Fahrbahndecken und die Untergrundaufbauten an den Einbauorten zu stark, um ein überall verlässliches Harvesting-Konzept realisieren zu können. Das IMMS konnte zwar zunächst vielversprechende Temperaturdifferenzen von bis zu 9 K messen. Solche größeren Werte traten allerdings nur im Sommer auf und dann meist nur zeitlich begrenzt an Tag-Nacht-Übergängen. Knapper Bauraum, Isolation durch das Gehäuse, Dichtigkeitsanforderungen und der begrenzte Wirkungsgrad thermischer Energy-Harvester haben dazu geführt, dass auch dieser Ansatz unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten verworfen werden musste.

Nach Abschluss dieser umfangreichen Voruntersuchungen hat das IMMS eine Systemlösung erarbeitet und Labormuster erstellt. Hierfür hat das Institut sein über Jahre aufgebautes Know-how zum Entwurf energieeffizienter eingebetteter und drahtlos kommunizierender Systeme sowie der Integration von Sensorik eingesetzt. Die Lösung bringt künftig eine flexible Verkehrsdetektion über

die Kette Detektor – Gateway – Datenkonzentratoren mit einer Standard-Schnittstelle (OCIT-C*) bis an den städtischen Verkehrsrechner und ist um zusätzliche Sensorik erweiterbar. Hierfür hat das IMMS exemplarisch eine Sensoriklösung zur Schadstoffmessung mit einem Gateway entwickelt und eingebunden.

Ausblick

Derzeit arbeitet das Institut an der Optimierung dieses Systems. Grenzen werden momentan dadurch gesetzt, dass die Detektoren für die Geschwindigkeitsmessung paarweise zeitsynchronisiert und der Magnetfeldsensor mit möglichst konstanter Rate ausgelesen werden müssen. Für beide Anforderungen sind hochgenaue Timer notwendig. Diese verhindern allerdings das Zurückfallen des Systems in besonders energiesparende Betriebsmodi. Daher wird zum jetzigen Zeitpunkt der Entwicklungsarbeiten davon ausgegangen, dass zunächst eine praktikable Laufzeit von ein bis zwei Jahren ohne Batteriewechsel erreicht werden wird. Zudem bereitet das IMMS 250 Prototypen der Detektoren und 30 der Gateways vor, um diese bei einem Feldtest von April bis zum Projektende im September 2015 an ausgewählten Standorten in Erfurt zu erproben. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse tragen erheblich dazu bei, das Know-how des Instituts in den Bereichen Energieeffizienz und Drahtloskommunikation zu erweitern und zu vertiefen.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

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.

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



Motivation

Organische LEDs (OLEDs*) werden seit einigen Jahren in Displays von Smartphones oder Fernsehbildschirmen eingesetzt. In der Beleuchtungstechnik stellen OLEDs momentan noch die Ausnahme dar. Dabei ist eine OLED sehr energieeffizient und ca. 60% sparsamer als eine Halogenbeleuchtung. Der physikalische Aufbau einer OLED ermöglicht darüber hinaus eine natürliche Lichtfarbe. Im Gegensatz zur Punktstrahlquelle einer LED ist eine OLED ein diffuses Flächenlicht, das eine geringere Blendwirkung hat und keine zusätzlichen optischen Elemente zur Lichtverteilung benötigt. Sinkende Produktionskosten und steigende Effizienz der OLED-Panels werden in den kommenden Jahren zu einer verstärkten Verwendung dieser Technologie in der Beleuchtungstechnik führen. OLEDs werden damit ein Baustein für effiziente Lösungen sein, mit denen in energieintensiven Sektoren wie der Gebäudewirtschaft Einsparpotenziale genutzt werden können.

Voraussetzung dafür ist eine geeignete Elektronik zur Steuerung und Regelung der OLED. Im Forschungsprojekt EROLEDT wurde am IMMS ein Halbleiter-

*OLED Organic light-emitting diode (Organische Leuchtdioden)

Aufbau zur Charakterisierung des am IMMS entwickelten OLED-Treibers im Labor des Instituts. Der auf die Spezifika von OLED-Panels ausgelegte ASIC ermöglicht deren energieeffizienten Betrieb und kompensiert Effekte der OLED-Alterung. Foto: IMMS.

Schaltkreis entwickelt, der auf die Charakteristik von OLED-Panels ausgelegt ist und deren energieeffizienten Betrieb ermöglicht. Das dafür gewählte Ansteuerungskonzept wurde auf die Langlebigkeit der OLED optimiert. Mit den im Schaltkreis integrierten Sensoren werden Effekte der OLED-Alterung kompensiert, da Helligkeiten und Farben auf immer gleich wahrgenommene Werte geregelt werden. Über die DALI-Schnittstelle** kann das OLED-Panel in die Gebäudeautomation eingebunden und der Schaltkreis gesteuert werden.

Bestehende integrierte Lösungen für LED-Beleuchtungen können nicht für OLEDs genutzt werden. Sie können zu deutlichen Effizienzverlusten oder sogar zur Schädigung der OLED führen. Der Grund dafür ist, dass die Spezifika der OLEDs nicht berücksichtigt werden und entsprechende Regelmöglichkeiten nur unzureichend implementiert sind oder gänzlich fehlen. Dadurch wird beispielsweise die Lebensdauer des Leuchtmittels verringert. So dürfen während des

**DALI Digital Addressable Lighting Interface (Protokoll zur Steuerung von lichttechnischen Betriebsgeräten in der Gebäudeautomation)

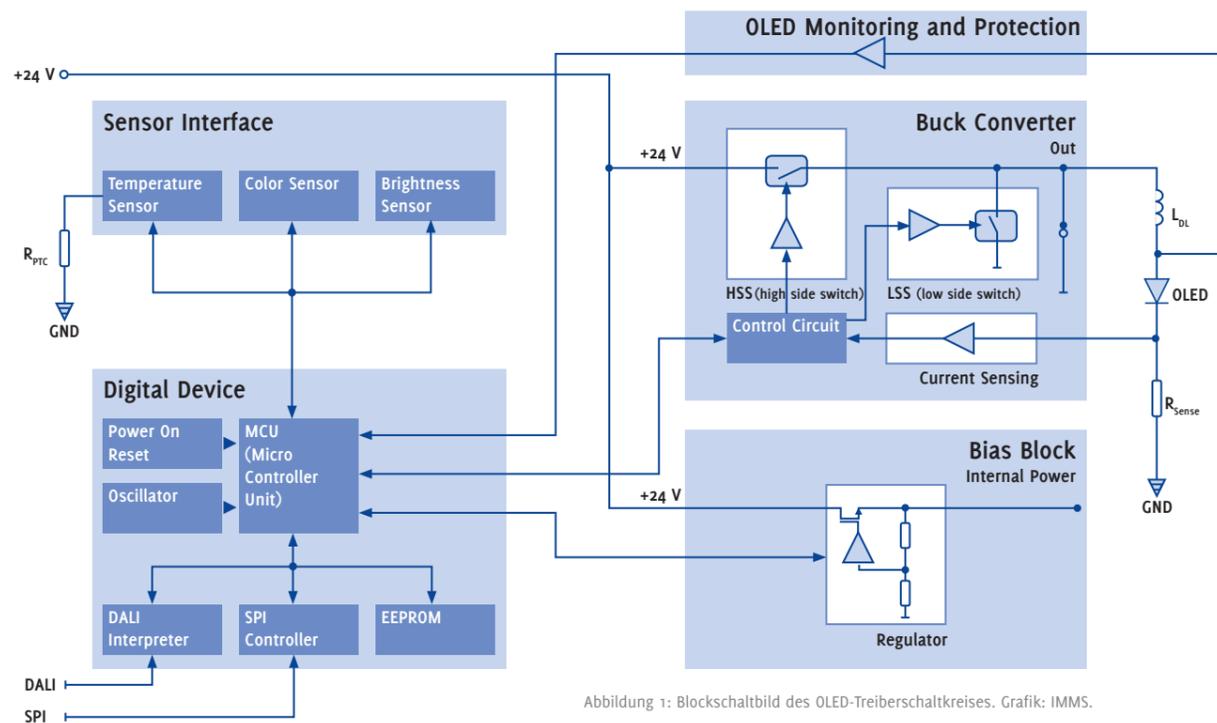


Abbildung 1: Blockschaltbild des OLED-Treiberschaltkreises. Grafik: IMMS.

Betriebes der OLED keine Stromspitzen auftreten, die durch die Ansteuerung mit einem pulsweitenmodulierten Spannungssignal entstehen und den Alterungsprozess der OLED beschleunigen. Ursache für große Stromspitzen ist die im Vergleich zur LED sehr große parasitäre Kapazität der OLED, die bei Spannungssprüngen einen erhöhten Stromfluss bewirkt und auf die große Fläche der OLED zurückzuführen ist. Während eine LED bei einem Ausfall ein hochohmiges Verhalten zeigt, stellt sich bei der OLED dagegen ein Kurzschluss ein. Daher muss die Energieversorgung einer OLED sofort abgeschaltet werden, um weitere Schäden durch den erhöhten Stromfluss in der Umgebung der OLED zu vermeiden.

Entwicklung des OLED-Treiberschaltkreises

Am Anfang der Entwicklung standen Überlegungen, wie ein hocheffizientes und langlebiges System zu erreichen ist, welche Steuermöglichkeiten und Schnittstellen erforderlich und welche Daten der OLED ständig zu erfassen sind. Da OLEDs als Raumbelichtung noch nicht etabliert und Informationsquellen daher noch rar sind, hat das IMMS Langzeituntersuchungen vorgenommen, unterschiedliche Systemkonzepte entwickelt und gegeneinander abgewogen. Hierfür hat das Institut die OLED-Parameter charakterisiert. Dazu zählen optische, thermische und vor allem elektrische Eigenschaften, die das Verhalten der OLED während des Betriebs bestimmen, die Lebensdauer

beeinflussen und in bisherigen Ansätzen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. Im Vordergrund standen daher Messungen zur Wärmeverteilung, Helligkeit, spektraler Verteilung, Strom-Spannungs-Kennlinie und Kapazität. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die Anforderungen an einen Treiberschaltkreis spezifiziert. Dessen Blockschaltbild zeigt das ausgewählte Systemkonzept. Es setzt sich aus fünf Funktionsblöcken zusammen, die vom Mikrocontroller gesteuert werden.

Zur Verifikation der Funktionsblöcke wurden diese im Projektverlauf einzeln charakterisiert. Dieses Vorgehen ermöglichte ein genaues Verständnis der Eigenschaften jedes Blocks, so dass ein optimales Zusammenwirken im Treiberschaltkreis gegeben war.

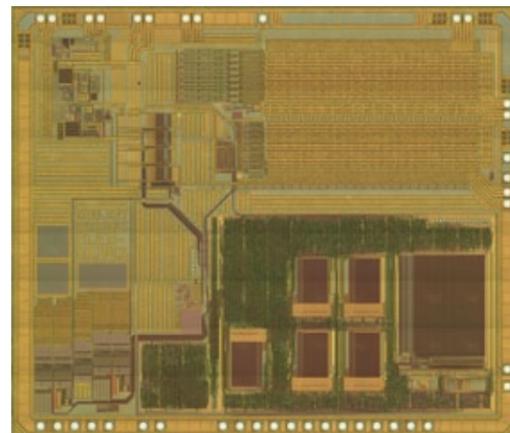


Abbildung 2: Chipfoto des OLED-Treiberschaltkreises D2036C. Foto: IMMS.

Funktionsprinzip

Der am IMMS entwickelte integrierte Schaltkreis steuert ein OLED-Panel mit einer Spannung von bis zu 34 V und einem Strom von bis zu 500 mA an. Kern des Schaltkreises ist eine Micro-Controller-Unit (MCU), die die Regelparameter beeinflussen kann (vgl. Abbildung 1). Das Steuerprogramm der MCU kann durch eine SPI-Schnittstelle (Serial Peripheral Interface) modifiziert werden. Somit ist der gesamte Programmablauf frei konfigurierbar und kann an das jeweilige OLED-Panel angepasst werden. Die Steuerung während des Betriebes erfolgt über einen DALI-Anschluss (Digital Addressable Lighting Interface).

Der Bias-Block ist für die interne Stromversorgung des Schaltkreises zuständig. Die direkte Ansteuerung des OLED-Panels wird durch den Buck-Converter übernommen. Dieser stellt den OLED-Strom ein und arbeitet nach dem Prinzip eines stromgeregelten Abwärtswandlers. Der maximale Wert dieses Stroms wird durch die Größe des Widerstands R_{Sense} eingestellt. Der Funktionsblock OLED Monitoring and Protection überwacht die Spannung an der OLED, erkennt ein Ausfallen des Panels und schaltet die Energiezufuhr sofort ab.

Mit dem Sensor Interface werden Temperatur, Farbveränderung und Helligkeit des OLED-Panels durch integrierte optische Sensoren detektiert. Deren spektrale Charakteristik zur Helligkeitsbewertung ist dem menschlichen Auge nachempfunden. Nachdem die gemessene Helligkeit mit dem über die DALI-Schnittstelle gewählten Zielwert verglichen wurde, wird der elektrische Arbeitspunkt des OLED-Panels angepasst. Auf diese Weise kann die Helligkeit unabhängig von Alter oder Temperatur des OLED-Panels konstant gehalten werden. Die OLED lässt sich so bis ans Ende der Nutzungsdauer mit gleichbleibenden Eigenschaften betreiben.

Ausblick

Der ASIC wurde bereits gefertigt und befindet sich momentan in der Testphase. Er wird Teil eines Funktionsmusters, das das IMMS gemeinsam mit den Forschungspartnern LUCAS GmbH, LUST Hybrid-Technik GmbH und X-FAB AG erarbeitet. Es wird aus verschiedenen Komponenten zu einem Modul zusammenge-

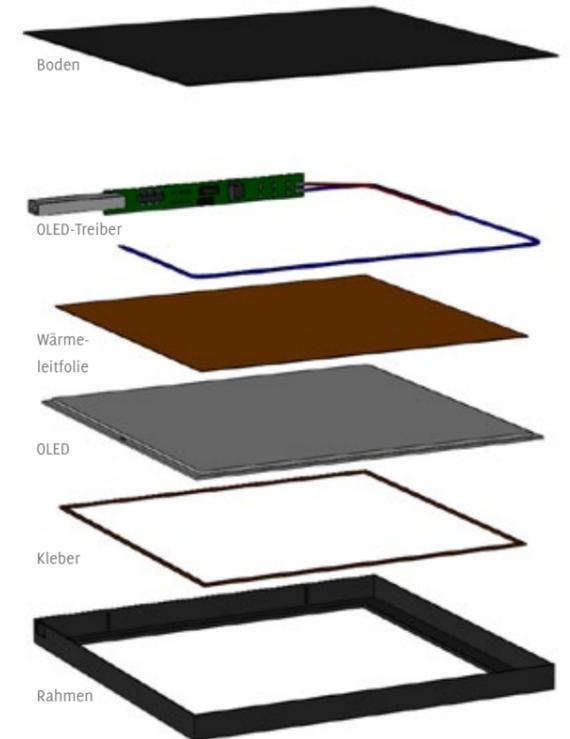


Abbildung 3: Komponenten des OLED-Moduls. Grafik: Lust Hybrid-Technik GmbH.

setzt. Der OLED-Treiberschaltkreis befindet sich dabei auf einer Leiterkarte, die in das OLED-Modul integriert ist. Das Funktionsmuster kann direkt an eine Steckdose am 230 V Wechselstromnetz angeschlossen und über einen DALI-Controller gesteuert werden. Erste Prototypen werden im 1. Quartal 2015 verfügbar sein.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Michael Meister, michael.meister@imms.de
Dipl.-Ing. Gerrit Kropp, gerrit.kropp@imms.de

Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben 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.



Weitere Highlights 2014

GreenSense-Projektabschluss mit Best Paper Award für Arbeit zu energieeffizienter Sensorik

Forscher des IMMS erhielten auf der IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2014) in Okinawa, Japan, den Best Paper Award für ihren 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". Die Autoren stellten einen im Forschungsprojekt „GreenSense“ entwickelten neuen digitalen CMOS¹-Temperatursensor für Anwendungen in energieautarken integrierten Sensorsystemen vor. Hierfür arbeitete das IMMS an mikroelektronisch integrierten Sensorkomponenten für diverse physikalische Messgrößen inklusive der Auswerteelektronik auf der Basis kostengünstiger CMOS-Fertigungsprozesse und optimierte sie in Bezug auf ihren Energiebedarf. Eine einzelne Messgröße, wie hier die Temperatur, wird lediglich mit einer elektrischen Leistung von deutlich weniger als 10 µW erfasst und digitalisiert. Damit könnte ein entsprechender Sensor aus einer Mignon-Batterie zelle mit einer typischen Kapazität von 1000 mAh mehr als zehn Jahre lang kontinuierlich betrieben werden. Das IMMS stellte Lösungen vor, mit denen der neue digitale CMOS-Temperatursensor genau und energieeffizient in einem großen Temperaturbereich arbeiten kann. Der Sensor weist eine systematische absolute Genauigkeit zwischen -0,1 °C und +0,5 °C im Temperaturbereich von -40 °C bis 125 °C bzw. +/- 0,1 °C im Bereich von 0 °C bis 125 °C auf. Er wurde in einer 0,35-µm-CMOS-Technologie gefertigt und benötigt zu seinem Betrieb einen Strom von 2,5 µA aus einer 1,4-V-Spannungsquelle. Dies entspricht einem elektrischen Leistungsbedarf von nur 3,5 µW.

Projektabschluss MARS

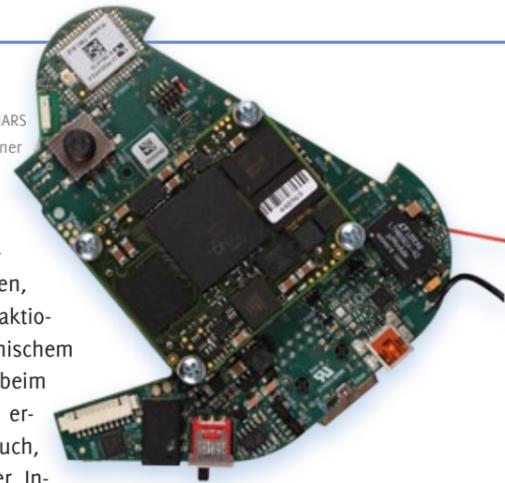
Das IMMS hat sich mit acht weiteren Partnern in das 2014 abgeschlossene dreijährige BMBF-Projekt mit Entwicklungsarbeiten für die „Mobile Authentifikation mittels Retina-Scanning (MARS)“ eingebracht. Das Blutgefäß-Muster des Auges ist wie ein Fingerabdruck sehr individuell. Retina-Scanning ist weder invasiv noch manipulierbar und damit sowohl sicher als auch schwer kompromittierbar. Bislang verfügbare Retina-Scanner sind nur für den stationären Betrieb geeignet. Der im Projekt entwickelte mobile Retina-Scanner

Vom IMMS im Projekt MARS für den mobilen Retina-Scanner entwickelte Elektronik. Foto: IMMS.

kann in vielen Bereichen des Lebens zur Authentifikation eingesetzt werden, wie z.B. bei Banktransaktionen (e-Banking), elektronischem Bezahlen (e-commerce), beim Zutritt zu Bereichen mit erhöhtem Sicherheitsanspruch, bei der Nutzung sensibler Infrastrukturen und Informationen, der Sicherung der Privatsphäre und vielem anderen mehr. Für einen mobilen Retina-Scanner sind energieeffiziente Komponenten zur Auswertung der optischen Signale notwendig. Das IMMS hat vor diesem Hintergrund ein Systemkonzept erarbeitet und eine Prozessorplattform ausgewählt, die auch eine spätere Integration der Software in ein Smartphone ermöglicht. Das Institut hat u.a. auch die Schnittstelle zum Prozessor im FPGA² erstellt, implementiert und getestet, die Betriebssystem- und Treiberintegration vorgenommen und eine Kopplung zur Visualisierung und Applikationsintegration realisiert. Der entwickelte mobile, akkubetriebene Retina-Scanner wurde vom Konsortialführer Fraunhofer IPMS auf Messen wie der Optatec vorgestellt. Das Gerät wird durch eine Nutzerbefragung auf Akzeptanz in verschiedenen Bereichen geprüft und vom Projektpartner Securitas im Einsatz auf einem Flughafen zur Zutrittsgewährung in sensible Bereiche evaluiert.

Projekt EFSUES erfolgreich abgeschlossen

Im Februar 2014 stellten das IMMS und der Projektpartner SMI GmbH den Partnern des Flughafens Erfurt-Weimar die Ergebnisse ihrer gemeinsamen zweijährigen Entwicklungsarbeit vor. Sie präsentierten den Prototyp für ein neues Überwachungssystem, mit dem künftig das Flughafenvorfeld auf kleineren und mittleren Flughäfen abgesichert und effizienter betrieben werden kann. Mit diesem System werden Flugzeuge, Fahrzeuge und Personen so sicher detektiert, dass unabhängig von der Wetterlage und von den Sichtverhältnissen ein effizienter Flugbetrieb gewährleistet ist. Künftig sollen auf Basis der Entwicklungsergebnisse Spezialfahrzeuge effizient und sicher eingesetzt, Standzeiten der Flugzeuge minimiert und die Verkehrssicherheit auf dem Vorfeld erhöht werden. Die Kompetenzen des IMMS für drahtlose Sensornetze sind in die intelligenten und energieoptimierten Sender eingeflossen, die zur Ortung von Fahrzeugen und Personen herangezogen werden (vgl. IMMS-Jahresbericht 2013).



Rapid-Prototyping-Plattform für eingebettete Systemlösungen auf der embedded world 2014 vorgestellt

Das IMMS hat auf der embedded world 2014 eine neuentwickelte Rapid-Prototyping-Lösung präsentiert. Diese setzt auf der im Vorjahr vorgestellten energieeffizienten BAsE-Box-Plattform auf und bietet die Möglichkeit, Module aus am Markt verfügbaren Entwicklungsplattformen einzubinden. Damit ist der schnelle und kostensparende Aufbau und Test eigener Applikationen auf Basis von Linux möglich. Zielmärkte für diese Plattform sind der Prototypenbau, Kleinserien und der wissenschaftliche Gerätebau. Sie erfüllt die dort gestellten Anforderungen, wie u.a. Industrietauglichkeit und Gehäusekonzept, die typische Entwicklerplattformen nicht berücksichtigen.

IMMS hat sein SENT-Transmitter-IP für die nächste Generation von intelligenten Sensoren in Automobilanwendungen weiterentwickelt

SENT ist ein digitales Punkt-zu-Punkt-Kommunikationsverfahren für die Übertragung von hochauflösenden Sensordaten von einem intelligenten Sensor an eine Steuereinheit. In der Automobilindustrie wird es als kostengünstige Alternative zum LIN- und CAN-Busstandard eingesetzt, um beispielsweise die Abgas-temperatur an das Motorsteuergerät zu übertragen. Die neueste Version des SENT-Transmitter-IP des IMMS „D2026C“ unterstützt nun auch die Übertragung von bis zu 16-Bit-Daten von zwei unabhängigen Sensoren. Das verfügbare Soft-IP ist eine flexibel konfigurierbare Implementierung eines SENT-Transmitters entsprechend dem SAE-Standard J2716 JAN2010 "SENT – Single Edge Nibble Transmission for Automotive Applications". Es ist wegen der technologieunabhängigen Implementierung in Verilog universell in FPGAs² und ASICs³ einsetzbar.

IMMS investiert mit einem Wafer-Prober für 300-mm-Halbleitertechnologien in die Zukunft Thüringer Partner

Das IMMS konnte dank des 2014 vom TMBWK geförderten Infrastrukturprojekts „SensorLab – Labor für Multisensorik in Mikro- und Nanotechnologien“ seine technische Ausstattung um einen Wafer-Prober für 300-mm-Halbleitertechnologien erweitern. Hiermit wird die infrastrukturelle Grundlage für zukünftige bilaterale und Verbundforschungsarbeiten zur Charakterisierung und zum Test mikro- und nanoelektronischer Technologien und Schaltungen für intelligente und energieeffiziente Sensor-/Aktor-Systeme geschaffen. Diese Systeme

sind unter anderem Grundlage für Entwicklungen in den Bereichen „Internet der Dinge“ und „Industrie 4.0“. Die 300-mm-Technik ist ein Schlüsselfaktor, der dem IMMS und seinen Thüringer Partnern den Anschluss an aktuelle europäische More-than-Moore-Technologien und Halbleiterhersteller für die nächsten 10 Jahre sichert. Erste Arbeiten zum Aufbau und zur Inbetriebnahme der Ende 2014 gelieferten Ausrüstung haben bereits begonnen.

EDA-Clusterforschungsprojekt ANCONA gestartet

Seit Juli 2014 bringt sich das IMMS in das dreijährige Clusterforschungsprojekt ANCONA (Analog-Coverage in der Nanoelektronik) ein. Gemeinsam mit fünf Universitäten und Forschungseinrichtungen werden rechnergestützte Verifikationsmethoden erarbeitet, die den Entwurf analog/digitaler Schaltungen erleichtern und deutlich beschleunigen sollen. Solche Schaltungen sind die technologische Basis für Visionen wie das „Internet der Dinge“ und „Industrie 4.0“. Das Zusammenspiel von hierfür neuentwickelten Systemkomponenten und deren parasitären Interaktionen, z.B. über die Versorgungsspannung, kann bislang meist erst im Versuchsaufbau getestet werden. Daher erarbeiten die Projektpartner rechnergestützte Verfahren, um die korrekte Funktion der komplexen Systeme schon während des Entwurfs zuverlässig nachzuweisen. Das IMMS entwickelt hierfür spezialisierte Methoden, mit denen unter anderem Verkopplungen in Systemmodelle integriert und diese effizient simuliert werden.

Projekt KOSERNA gestartet

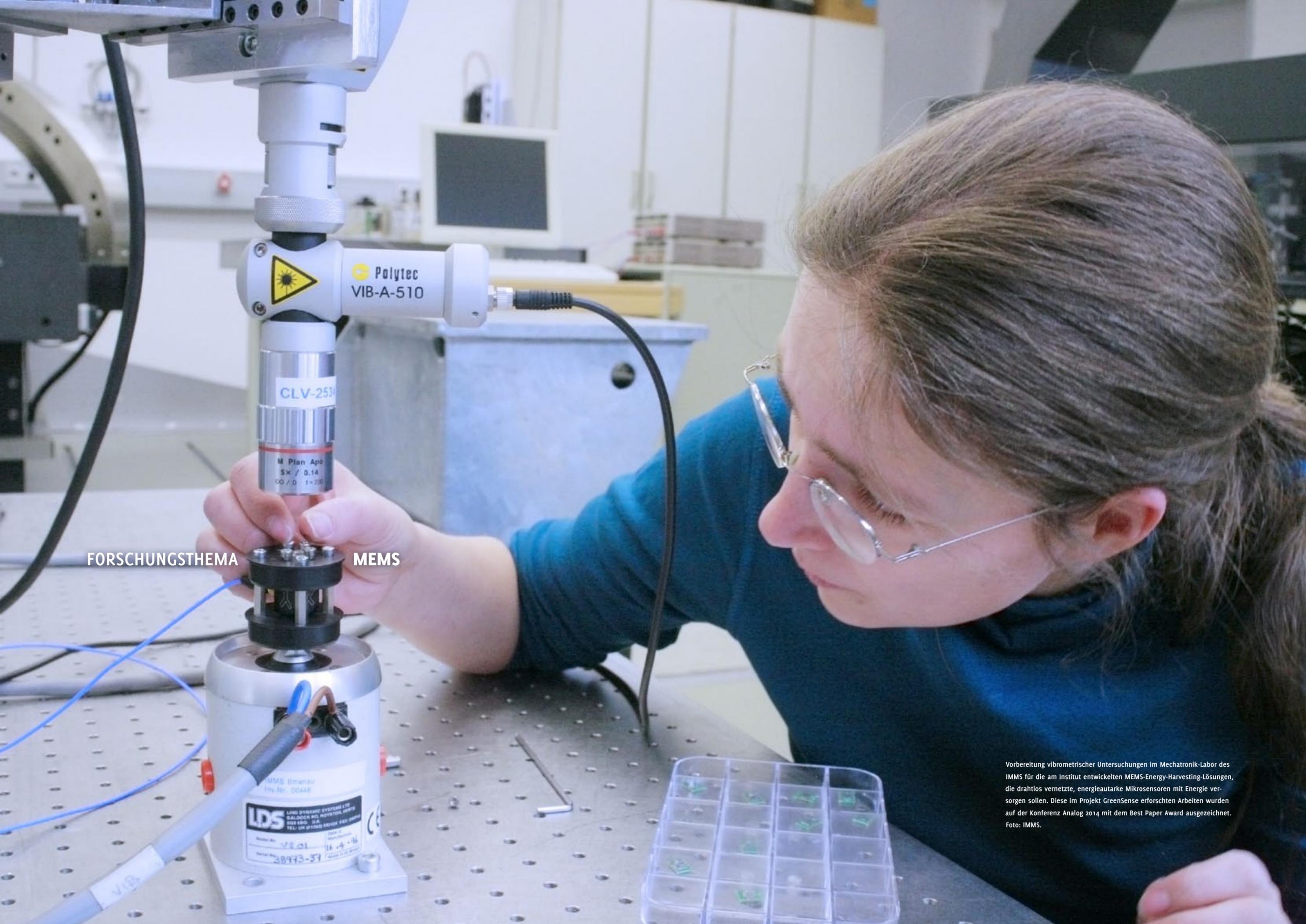
Im dreijährigen Forschungsprojekt „KOSERNA“ beteiligt sich das IMMS seit Februar 2014 an der auf Projektergebnissen aus „KOMPASSION“ aufbauenden Entwicklung eines industriellen Prototyps. In „KOMPASSION“ hatten IMMS und TU Ilmenau eine Empfangseinheit für die Satellitennavigation entwickelt, die nur ein Viertel so groß ist wie eine konventionelle adaptive Gruppenantenne mit gleicher Anzahl an Elementen. Für diese Antenne hatte das IMMS die Empfänger-Frontend-Schaltung entworfen und realisiert. Für die in „KOSERNA“ angestrebte marktnähere Lösung erarbeiten die Partner eine noch robustere und genauere Empfangseinheit. Für diese erweitert das IMMS die Frontend-Schaltungen und überträgt die neuen Konzepte auf ein zweites Frequenzband.

¹ CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor (Komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter)

² FPGA Field Programmable Gate Array (vor Ort programmierbare Logik-Gatter-Anordnung)

³ ASIC Application-specific integrated circuit (Applikationsspezifische integrierte Schaltung)

FORSCHUNGSTHEMA MEMS



Vorbereitung vibrometrischer Untersuchungen im Mechatronik-Labor des IMMS für die am Institut entwickelten MEMS-Energy-Harvesting-Lösungen, die drahtlos vernetzte, energieautarke Mikrosensoren mit Energie versorgen sollen. Diese im Projekt GreenSense erforschten Arbeiten wurden auf der Konferenz Analog 2014 mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Foto: IMMS.

Forschungsthema MEMS

Motivation

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) sind eine entscheidende Triebkraft für zukünftige Produktentwicklungen in einer Vielzahl von Marktsegmenten. Auf einer Fläche von nur wenigen Quadratmillimetern vereinen sie mikromechanische Sensoren und Aktoren sowie Steuerungselektronik in einem einzigen Bauelement. Sie werden direkt auf Silizium-Wafern mit aus der Halbleiterfertigung stammenden und für die MEMS-Produktion weiterentwickelten Verfahren hergestellt. Bereits mit etablierten MEMS-Technologien werden weltweit in rasantem Tempo integrierte Sensor- und Aktor-Systeme für Consumer-, Automotive- und Industrie-Anwendungen mit Stückzahlen und Umsätzen im Milliardenbereich entwickelt. Die winzigen Module steuern beispielsweise den Farbausstoß in Tintenstrahl-Druckköpfen und werden in Smartphones als Mikrofone sowie als Lagesensoren verwendet. Im Auto dienen MEMS-Beschleunigungssensoren und -Gyroskope der Stabilitätskontrolle und lösen Airbags aus. Als Drucksensoren überwachen MEMS-Komponenten den Zustand der Klimaanlage und der Reifen.

Das IMMS fokussiert seine Forschung und Entwicklung auf 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. Das Institut arbeitet hierfür eng mit MEMS-Technologieentwicklungs- und Fertigungspartnern zusammen und konzentriert sich auf den Entwurf neuer mechatronischer Systemlösungen. Diese bestehen aus mikromechanischen Sensoren und Aktoren, mikroelektronischen Schaltungen und eingebetteten Hardware/Software-Komponenten. Neuartige Ansätze, wie z.B. die vom IMMS entwickelten Lösungen für mikromechatronische Energy-Harvesting-Module, ermöglichen vielfältige Produktinnovationen in Anwendungsfeldern mit attraktiven Marktchancen besonders für kleine und mittelständische Unternehmen. Um diese Felder gemeinsam mit seinen Kunden erfolgreich erschließen zu können, baut das IMMS seine Fähigkeiten zur Entwicklung von MEMS-basierten Systemen seit mehreren Jahren stetig aus. Die Entwurfsabläufe für mikromechanische Komponenten und mikroelektronische Steuer- und Auswerteschaltungen eng zu verzahnen, zu systematisieren und so auch zu teilautomatisieren, liefert enorme Schubkraft für MEMS-Entwicklungen. Das IMMS entwickelt daher

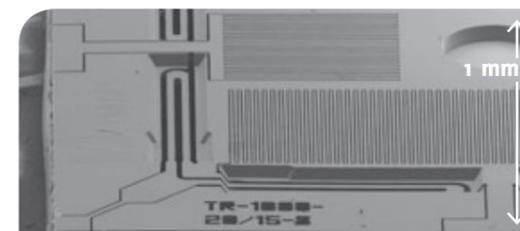
seine methodischen Kompetenzen zum kohärenten Entwurf von Mikromechanik und -elektronik weiter und richtet spezielle Labormesstechnik für die Charakterisierung und den Test von MEMS-Komponenten und -Modulen ein.

Erfahrungen

Diese Messtechnik erweitert das IMMS seit Jahren systematisch. Erst mit ihr war es möglich, im eigenen Hause Parameterwerte für MEMS zu bestimmen und diese Systeme mechanisch und elektronisch zu charakterisieren. Das Institut hat auf der Grundlage solcher Messungen Verfahren für die unten beschriebene zerstörungsfreie indirekte Parameteridentifikation entwickelt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Daten sind die Voraussetzung dafür, um MEMS genau modellieren zu können, denn ohne die richtigen Parameterwerte ist ein systematischer, modellbasierter Entwurf kaum möglich. Das IMMS hat das Verhalten von MEMS mit Hilfe von Modellen simuliert und damit das Verfahren verifiziert und verfeinert. Damit hat das Institut nicht nur die Weichen gestellt, um neuartige MEMS wie im Projekt GreenSense zu entwickeln, sondern auch eine neuartige Gesamtentwurfsmethodik für MEMS wie im Projekt MEMS2015 zu erarbeiten.

Eigene **Messtechnik** für MEMS wurde bereits unter Federführung des IMMS im 2011 abgeschlossenen Projekt SMARTHIES entwickelt. Hier entstand ein skalierbares, paralleles Messsystem, mit dem 25 MEMS-Strukturen im Wafer-Verbund gleichzeitig geprüft werden können.

Die Mikrometer kleinen MEMS-Strukturen sind für mechanisches Antasten bei Tests zu empfindlich und würden bei einer solchen Prüfung zerstört. Daher hat das IMMS über Jahre an einem **Verfahren zur zerstörungsfreien indirekten Parameteridentifikation** von Materialeigenschaften geforscht. Das IMMS nutzt hierfür Werte aus der vibrometrischen und damit zerstörungsfreien Messung von Eigenfrequenzen diverser Teststrukturen. Den Kern des Verfahrens bildet die Finite-Elemente-Simulation. Mit ihr beschreiben die Forscher den funktionalen Zusammenhang der Eigenfrequenzen von Material- und Strukturparametern. Das Institut hat dieses Verfahren seit 2005 in mehreren Projekten erweitert und validiert, wie z.B. in PARTEST, PRIMOS und USENEMS. Zum einen erleichtert es die Entwicklung künftiger ultrasensitiver integrierter MEMS bzw. Nanosysteme, die jenseits der Siliziumtechnologie auf modernen Hochleistungswerkstoffen basieren, wie z.B. Gruppe-III-Nitride, Nanolamine oder Graphen. Zum anderen ist es mit dieser Methode möglich, die Funktionalität und die Qualität von MEMS zuverlässig über



In GreenSense entwickelter u. gefertigter MEMS-Energy-Harvester. Foto: IMMS.

den gesamten Fertigungsprozess zu kontrollieren und die Forderungen nach immer kleineren Parametertoleranzen und damit nach höheren Messgenauigkeiten zu erfüllen. So können beispielsweise die Auswirkungen von Fertigungsprozessen auf die Materialspannung in dünnen membranbasierten MEMS überwacht werden, was unter anderem beim Sägen und Kleben von MEMS notwendig ist. Den entwickelten durchgängigen Ablauf zur indirekten Parameteridentifikation hat das Institut 2013 erstmals eingesetzt, um solche Klebprozesse zu optimieren und ist damit in diesem Anwendungsfeld führend.

Stand 2014

Das IMMS hat im 2014 abgeschlossenen Projekt „GreenSense“ Technologien zur Fertigung **miniaturisierter Energy-Harvesting-Module** auf der Grundlage mikromechanischer Vibrationswandler erforscht. Diese sollen neue Energieversorgungsoptionen für drahtlos vernetzte, energieautarke Mikrosensoren eröffnen (vgl. Forschungsthema „Energieeffiziente & energieautarke Sensorsysteme“). In Kooperation mit dem Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano® der Technischen Universität Ilmenau hat das IMMS Grundstrukturen und einen Fertigungsprozess für mikromechanische Kamm- und Federelemente entwickelt, auf deren Grundlage sich elektrostatische „Out-of-plane“-MEMS-Harvester-Module konstruieren und herstellen lassen. Hierbei handelt es sich um mechanische Oszillatoren, die auf Wafern gefertigt werden und deren Zentralmassen aus der Wafer-Ebene heraus schwingen und dabei eine periodische Änderung der elektrischen Kapazität zwischen den Oszillator- und Statorkämmen bewirken. Durch mit den Schwingungen synchronisiertes, elektronisch gesteuertes Laden und Entladen der zeitvarianten Kapazitäten kann mechanische Energie aus Vibrationen der Umgebung in elektrische Energie überführt werden. Die Harvester mit mechanisch stabilen, abgedünnten Führungsfedern sowie 100 µm hohen Kammstrukturen mit Luftspaltbreiten im Bereich von nur 3 – 5 µm wurden gefertigt und die Schwingfähigkeit des Oszillators nachgewiesen. Mit dem mikromechatronischen Harvester-Konzept konnte in Experimenten ein positiver Energieertrag geliefert werden.

Das Energy-Harvesting-Modul besteht aus dem beschriebenen MEMS-Vibrations-Harvester sowie einem

am IMMS entwickelten Hochspannungs-/Low-Power-CMOS-Frontend-IC und einer Lithium-Mikrobatterie zur Extraktion und Speicherung der gewandelten Energie. Das Modul arbeitet mit einer maximalen Spannung an den Harvester-Elektroden von bis zu 40 V und soll bei einem Eigenleistungsbedarf der Elektronik von weniger als 1 µW eine Gleichspannung von 3,8 V mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung im zweistelligen µW-Bereich liefern.

Das Institut hat die Ergebnisse aus diesen Arbeiten auf Konferenzen wie der 40. European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC 2014) in Venedig vorgestellt und wurde mit dem Beitrag „**Eine Systemarchitektur für ein integriertes elektrostatisches MEMS-Energy-Harvesting-Modul**“ auf der 14. GMM/ITG-Fachtagung „Analogschaltungen im Systemkontext“ (Analog 2014) mit dem **Best Paper Award** ausgezeichnet.

Eines in den laufenden Forschungsprojekten „MEMS 2015“ und „MUSIK“ verfolgten Ziele ist es, den Entwurfsprozess der mechanischen und elektronischen Bauteile von MEMS zu verbinden und zu harmonisieren. Dadurch soll die Entwurfszeit um 30% verkürzt und das MEMS-Marktpotenzial um bis zu 50% gesteigert werden. Diese neuartige **Gesamtentwurfsmethodik** soll auch kleine und mittlere Unternehmen in die Lage versetzen, sich ihre Lösungen individuell und maßgeschneidert in einem flexiblen MEMS- und Elektronik-Baukastensystem zusammenzusetzen und somit Teil des MEMS-Booms zu werden. Erste Ergebnisse dieses am IMMS entwickelten Design-Flows werden im Kapitel „MEMS-Design auf Knopfdruck“ beschrieben. Im selben Projekt hat das IMMS 2014 erste Muster eines anwendungsspezifischen Frontends für einen MEMS-Cantilever vorgewiesen. Die Elektronik soll künftig die Daten von Messnadeln von Rasterkraftmikroskopen auswerten, mit denen Kräfte von wenigen zehn Nanonewton erfasst werden. Diese Entwicklung wird im Kapitel zum Kraftsensor-MEMS vorgestellt.

Die Charakterisierung dieses Cantilever-Readout-ASICs war die erste, die im neuen Testlabor für MEMS-basierte Mikrosysteme „MEMS-T-Lab“ vorgenommen wurde. Dank dieses Infrastrukturprojektes wurde die Innovationsfähigkeit für das IMMS und dessen Forschungspartner wesentlich gestärkt. Mit dem seit 2014 vollständig arbeitenden „MEMS-T-Lab“ wurden insbesondere für KMU-Partner des IMMS die Voraussetzungen geschaffen, MEMS parametrisch zu modellieren und zu charakterisieren. Die neue Technik hat die Infrastruktur des Instituts in den Bereichen Modellierungs-Werkzeuge, Messtechnik und Laborausrüstung erweitert und ermöglicht eine bislang noch nicht erreichte Komplexität von Messungen. Diese können nun mit einem höheren Automatisierungsgrad auch für komplette Wafer durchgeführt werden.



Methodik zur Synthese von MEMS am Beispiel eines Beschleunigungssensors

Motivation

Um moderne, leistungsfähige und intelligente Sensor- und Aktorsysteme entwickeln zu können, müssen für den Entwurf von MEMS* neue Verfahren und Werkzeuge erarbeitet werden. Hierfür entwickelt das IMMS im BMBF-Forschungsprojekt „MEMS2015“ eine neue Designmethodik. Das Institut hat zu diesem Zweck das seit langem bewährte Baukastenprinzip aus der mikroelektronischen Entwurfsmethodik auf mechanische Systeme 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. Die neue Methode vereint technologische Kenntnisse, Modellierungs-, Design- und Messverfahren und wird durch leistungsfähige Entwurfswerkzeuge unterstützt. Ergebnis der bisherigen

Mit dem am IMMS neuentwickelten Entwurfswerkzeug sollen künftig kleine und mittlere Unternehmen mit wenig Designerfahrung eigenständig mikroelektromechanische Sensordesigns entwerfen können, wie z.B. für einen hier abgebildeten Beschleunigungssensor. Foto: IMMS.

Arbeiten des Instituts ist ein Design-Tool zum rechnergestützten Entwurf von mikroelektromechanischen Sensordesigns für eindimensionale Beschleunigungssensoren für die SOI-Technologie XM-SC der X-FAB AG. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage, um das neue Vorgehen auf komplexere Systeme wie 3D- oder 6D-Beschleunigungssensoren sowie Energy-Harvesting-Module zu übertragen.

Mit dem neuentwickelten Tool sollen künftig kleine und mittlere Unternehmen mit wenig Designerfahrung MEMS eigenständig entwerfen können. Das Werkzeug berechnet auf der Basis eines am IMMS entwickelten mathematischen Algorithmus automatisch verschiedene Designmöglichkeiten gemäß kundenspezifischer Anforderungen. Darüber hinaus stellt das Tool einem Anwender Sensormodelle zur Verfügung, die in Entwurfswerkzeuge der Forschungspartner Coventor und Cadence integriert werden können, und generiert die für die Sensorfertigung notwendigen Mechanik-Layouts.

* MEMS Mikroelektromechanische Systeme.

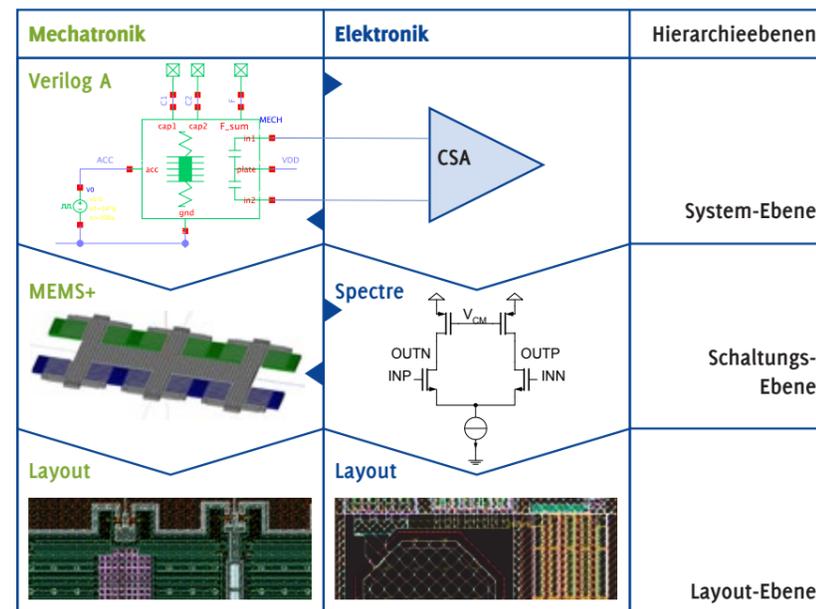


Abbildung 1: Hierarchieebenen des Gesamtentwurfsprozesses für Mechanik und Auswerteelektronik. CSA (Charge Sensitive Amplifier): Ladungsverstärker). Grafik: IMMS.

Der neuentwickelte MEMS-Design-Flow aus Nutzersicht

Ein Anwender muss für den Gesamtentwurf eines MEMS Systemsimulationen von Mechanik und Auswerteelektronik auf verschiedenen Hierarchieebenen, die in Abbildung 1 aufgeführt sind, durchführen. Auf System- und Bauteilebene benötigt er dazu Modelle sowohl für die Mechanik als auch die Elektronik auf verschiedenen Abstraktionsniveaus. Zudem braucht er Layouts für die MEMS-Produktion.

Diese Mechanik-Modelle sowie das MEMS-Layout stellt das im IMMS entwickelte Design-Tool quasi auf

Knopfdruck zur Verfügung. Der Nutzer gibt hierfür lediglich die Sensorspezifikation in das Tool ein, wie das Schema in Abbildung 2 zeigt. Der zu Grunde liegende Algorithmus wählt dann automatisch geeignete Grundstrukturen aus, berechnet deren geometrische Parameter und stellt dem Anwender relevante Designmöglichkeiten zur Verfügung. Für die berechneten Designs lassen sich mit dem Design-Tool ein Verilog-A-Modell und ein Coventor-MEMS+-Modell automatisch erzeugen. Diese Modelle bilden die Mechanik des Sensors auf verschiedenen Abstraktionsniveaus ab. Die Designer können die Modelle in übliche IC-Entwurfsumgebungen* integrieren, dort System-

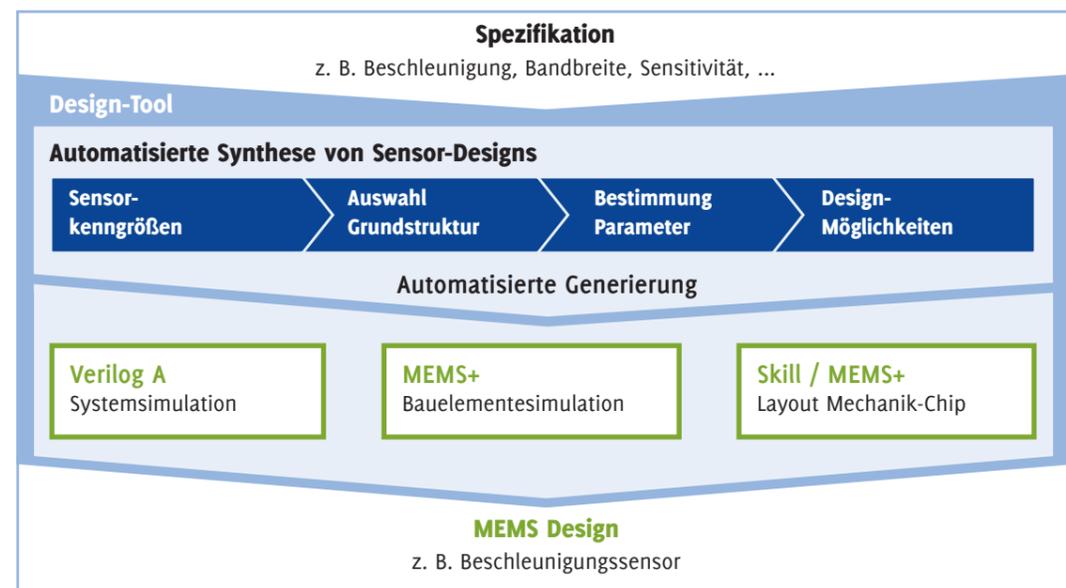
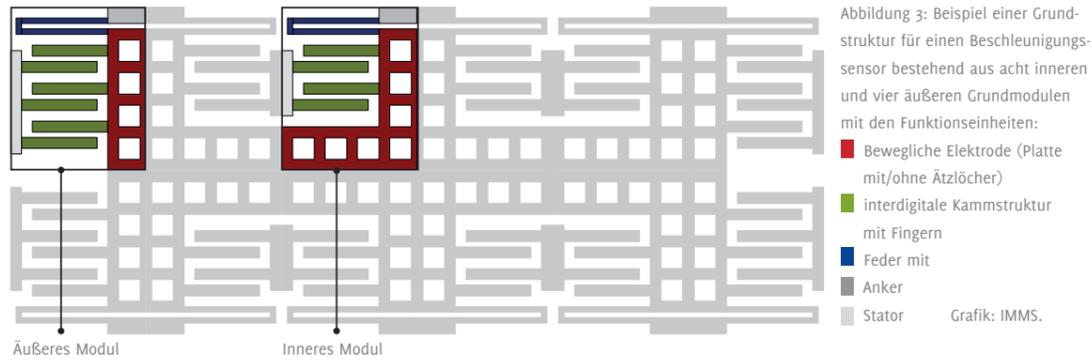


Abbildung 2: Schema des neuentwickelten Design-Tools. Grafik: IMMS.

* IC Integrated Circuit (Integrierte Schaltung)



simulationen von Mechanik und Auswerteelektronik vornehmen und somit deren Zusammenwirken begutachten. Ein MEMS-Sensor kann daher mit dem neuen Werkzeug in seiner Gesamtheit verifiziert werden. Probleme können aufgedeckt und mechanische Parameter korrigiert werden. Für die Erstellung des MEMS-Layouts wird automatisch ein Skript erzeugt, das in Cadence ausgeführt werden kann. Das neuentwickelte Tool generiert alle notwendigen MEMS-spezifischen Layout-Elemente und bindet benötigte X-FAB-Bibliothekselemente ein, wie z. B. Leiterkreuzungen.

Die neue Methodik für MEMS-Design im Detail

Das IMMS hat das Design-Tool zunächst für einen Beschleunigungssensor entwickelt. Dabei handelt es sich um einen kapazitiven Sensor, der Beschleunigungen in einer Raumrichtung erfasst. Eine solche Anregung verschiebt auf dem Sensor eine bewegliche Elektrode gegenüber zwei fixierten Stator-Elektroden (vgl. Abbildung 3) und verändert so die Kapazitäten. Diese Änderung wird mit einer am IMMS entworfenen elektronischen Schaltung ausgewertet. Um auf engem Raum möglichst hohe Kapazitäten zu erhalten, werden in der Regel die Elektroden als interdigitale Kammstrukturen angelegt. Hier greifen die Finger einer beweglichen Kamm-Elektrode und die Finger der Stator-Elektroden ineinander. Die Eigenschaften des Sensors werden insbesondere durch die Anzahl der Finger eines Kamms, ihre geometrischen Abmessungen und deren Abstände zueinander bestimmt. Zudem müssen die Charakteristika der Aufhängung der beweglichen Elektrode berücksichtigt werden. Für die betrachtete Sensorklasse besteht diese Aufhängung aus Bügelfedern, sogenannten „folded beams“, die aus zwei parallel zueinander angeordneten Balken aufgebaut sind.

Jeder der betrachteten Beschleunigungssensoren kann einer Grundstruktur zugeordnet werden. Dabei ist diese Grundstruktur aus einer bestimmten Zusammenstellung und Anzahl von Grundmodulen aufgebaut. Diese 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. Abbildung 3). Die Grundmodule und Funktionseinheiten hat das IMMS in der Software Matlab mittels einer objekt-orientierten Methode als Baukastensystem implementiert.

Beim Start des Design-Tools gibt der Anwender die folgenden gewünschten Sensorkenngrößen ein: Die Auflösung, die maximal zu detektierende Beschleunigungsamplitude, die minimal messbare Kapazitätsdifferenz sowie die Basiskapazität, d.h. die Kapazität zwischen den Elektroden, wenn keine Beschleunigung anliegt. Diese Größen stehen in direktem Zusammenhang zur Sensitivität des Sensors. Genauigkeit und maximale Beschleunigungsamplitude ergeben sich aus dem Anwendungsbereich des Sensors, die Anforderungen an die Kapazitäten aus der Leistungsfähigkeit der Auswerteelektronik.

Der dem Design-Tool zu Grunde liegende mathematische Algorithmus des IMMS arbeitet auf einer Menge von Sensoren. Die Grundstruktur dieser Sensoren wird durch die Anzahl der Grundmodule und die Anzahl der Federn pro Modul festgelegt. Der modulare Ansatz erlaubt es, aus einer Vielzahl von Grundstrukturen zu selektieren. Bei der Auswahl der Grundstruktur wird von der einfachsten Form ausgegangen. Liefert der Algorithmus für diese keine anforderungs-

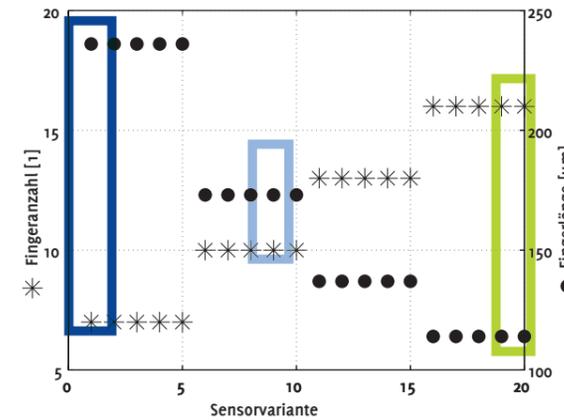
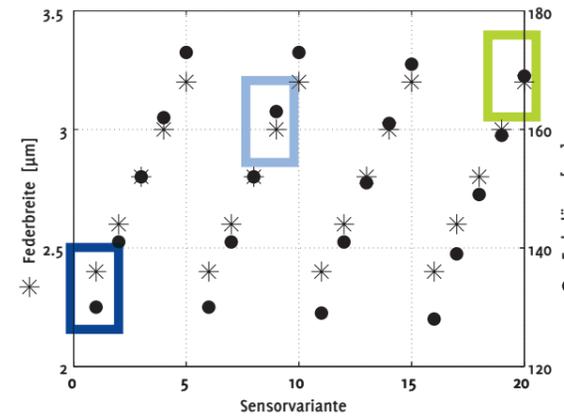
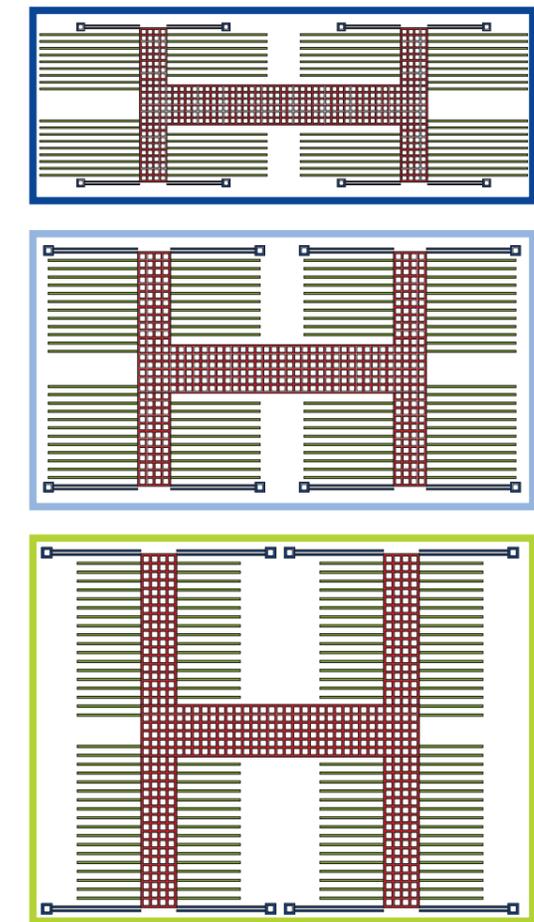


Abbildung 4: Auswahl von durch das IMMS-Design-Tool berechneten kundenspezifischen Sensorvarianten (V1: dunkelblau, V2: hellblau und V3: grün markiert). Grafik: IMMS.



gerechten Ergebnisse, so wird auf die nächstkomplexere Struktur gewechselt. Die betrachteten Sensoren unterscheiden sich durch verschiedene Fingeranzahlen, Fingerlängen, Federbreiten und Federlängen. Alle anderen Geometrie-Größen sind gleich, insbesondere wird die Tiefe der Strukturen durch die SOI-Technologie der X-FAB bestimmt. Ziel des Algorithmus ist es, die genannten geometrischen Größen so zu bestimmen, dass die Spezifikation des Anwenders für den korrespondierenden Sensor erfüllt ist. Nur Sensoren mit bestimmten Kombinationen von Fingerlänge und Fingerzahl besitzen die gewünschte Basiskapazität. Diese werden in einem ersten Schritt des Algorithmus bestimmt. Bei der Modellbildung wird ein linearer Ansatz verfolgt. Dazu muss garantiert werden, dass die Sensoren weit unterhalb der Resonanzfrequenz angeregt und lediglich kleine Auslenkungen erreicht werden. Die Linearität der verwendeten Modelle erlaubt es, einen direkten Zusammenhang zwischen Federparametern und den verbleibenden drei der genannten Sensorkenngrößen herzustellen. Somit werden im

zweiten Schritt des Algorithmus relevante Federbreiten und zugehörige Federlängen für die im ersten Schritt gefundenen Sensoren berechnet. In Abbildung 4 sind Beispiele für so ermittelte Sensorvarianten dargestellt. Aus diesen können dann nach erweiterten Gesichtspunkten Designs ausgewählt werden. Die gezeigten beweglichen Sensorteile der Varianten V1, V2 und V3 gehören jeweils zu einer Fingeranzahl und -länge sowie einer Federbreite und -länge.

Das Design-Tool liefert für jeden der relevanten Sensoren Modelle, die dessen elektromechanisches Verhalten beschreiben. Zum einen generiert das Werkzeug automatisch ein Verilog-A-Modell, welches für schnelle Systemsimulationen geeignet ist. Es beruht auf einfachen Modellgleichungen, bei denen es sich um Feder-Masse-Systeme zweiter Ordnung mit Kraftrückkopplung und Berücksichtigung von Brownschem Rauschen handelt. Zum anderen erzeugt das Tool ein Modell für MEMS+. In MEMS+ wurden durch Coventor innovative Ansätze zur Berechnung von Streukapazi-

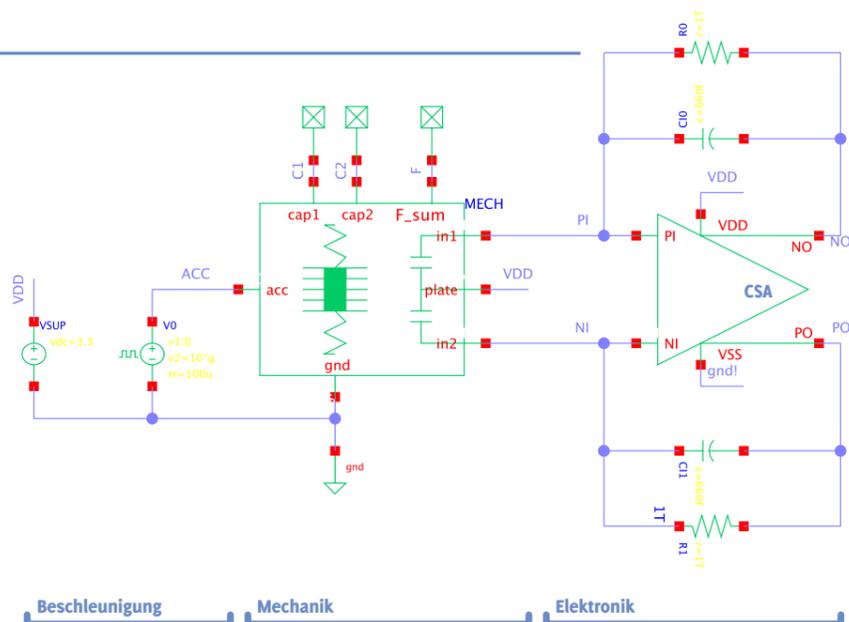


Abbildung 5: Einfache MEMS-Simulationsumgebung. Die Eingangsspannung im linken Block der Abbildung korrespondiert zu einer auf den Sensor wirkenden Beschleunigung. Die mittlere Box symbolisiert das mechanische Modell des MEMS. Hier wird die Eingangsgröße Beschleunigung in eine Kapazitätsänderung umgewandelt. Ein Ladungsverstärker (Charge Sensitive Amplifier) im rechten Block bildet den elektronischen Schaltungsteil, der die Kapazitätsänderung in eine messbare differentielle Spannung konvertiert.
Grafik: IMMS.

täten integriert, mit denen sehr genau Kapazitätsänderungen bestimmt werden können. MEMS+-Modelle lassen sich in die IC-Entwurfsumgebung Cadence einbinden, benötigen jedoch gegenüber den Verilog-A-Implementierungen längere Rechenzeiten. Integriert in Simulationsumgebungen wie in Abbildung 5 erlauben es beide Modelle, das Zusammenwirken von MEMS und integrierter Schaltung zu betrachten.

Messungen sollen die Methodik verifizieren und eine weitere Optimierung des Flows ermöglichen. Anfang 2015 wird auch die von der X-FAB gefertigte Elektronik verfügbar sein.

Kontakt:

Dr. rer. nat. Jenny Klaus, jenny.klaus@imms.de
Dipl.-Math. Dominik Karolewski, dominik.karolewski@imms.de

Ausblick

Bei der Umsetzung des Gesamtdesignprozesses hat das IMMS neben verschiedenen Sensordesigns für Beschleunigungen von 10g eine komplexe Ausleseelektronik entworfen. Die MEMS-Strukturen wurden bereits durch den Projektpartner X-FAB gefertigt. Im ersten Quartal 2015 wird das IMMS Messungen an diesen Strukturen in seinem unter anderem für dieses Projekt aufgebauten und 2014 in Betrieb genommenen Labor „MEMS-T-Lab“ vornehmen. Diese

Projektpartner des IMMS sind Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, TU München, TETRA, Universität Bremen und X-FAB.

Das Projekt MEMS2015 wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 16M3093 im Förderprogramm IKT 2020 gefördert.

GEFÖRDERT VOM

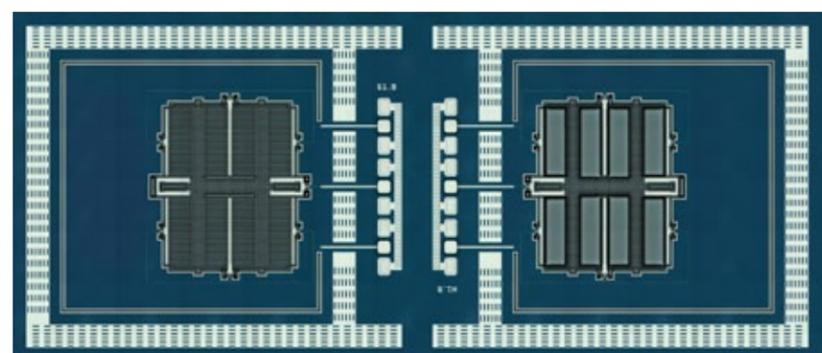
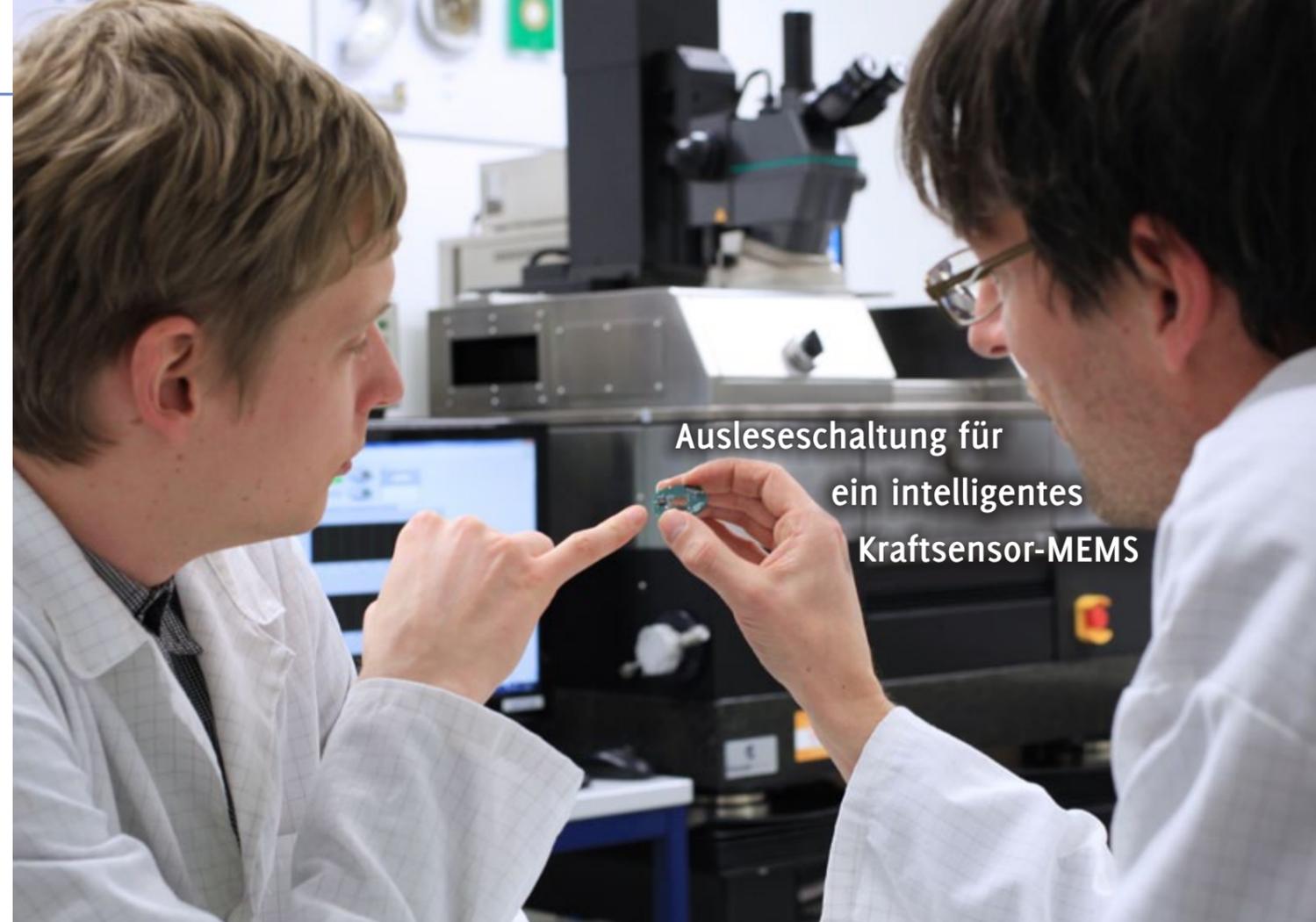


Abbildung 6: Mikroskopische Aufnahme der gefertigten MEMS-Strukturen des Beschleunigungssensors.
Foto: IMMS.



Ausleseschaltung für ein intelligentes Kraftsensor-MEMS

Motivation

Aufgrund der rasanten Entwicklung in der Mikrosystemtechnik mit dem Trend zu immer größeren Waferdurchmessern und immer kleineren Bauelementen steigen Anforderungen an Prozessüberwachung und Qualitätstests. Um Ausschussraten von Baugruppen oder gar fertigen Produkten zu minimieren, sind Untersuchungen mit immer höheren Messgenauigkeiten in einem möglichst frühen Stadium des Herstellungsprozesses notwendig. Bei der Fertigung von Mikrosystemen müssen oftmals Oberflächen auf ihre Güte getestet und ihre Eigenschaften mit Auflösungen im Nanometer-Bereich vermessen werden. Für die Erhebung dieser mechanischen Eigenschaften gibt es verschiedene Messmethoden und -geräte, z.B. Rasterkraftmikroskop, Profilometer und Nanoindentierung, die sich unter Laborbedingungen bewährt haben, für den Einsatz in Produktionslinien jedoch ungeeignet sind. Ganze Wafer lassen sich mit solchen Messgeräten nicht zerstörungsfrei analysieren. Für die begrenzte Größe der Messproben müssen die Wafer bislang geteilt werden. Mit der konventionellen Technik sind so nur Stichproben statt flächendeckender Prozesskontrollen möglich.

Die Ausleseschaltung des IMMS ist Teil eines kompakten Sensorkopfs, der in der industriellen Produktion Oberflächenbeschaffenheiten auf wenige zehn Nanometer genau vermessen kann. Foto: IMMS.

Entwicklung

Die Firma TETRA und das IMMS haben daher im Forschungsprojekt MEMS2015 Lösungen für einen kompakten Sensorkopf erarbeitet, der in der industriellen Produktion Oberflächenbeschaffenheiten auf wenige zehn Nanometer genau vermessen kann. Die Entwicklung vereint auf engstem Raum einen Sensor und eine analoge Signalverarbeitungseinheit. Durch die kompakte Bauweise kann der Sensorkopf über Hochpräzisionspositioniertischen, wie sie das IMMS entwickelt, montiert und daher ein gesamter Wafer mit hoher Genauigkeit vermessen werden. Der von TETRA entwickelte Kraftsensor basiert auf einem MEMS-Cantilever. Dieser Biegestreifen aus Silizium enthält eine Messspitze an einem Ende und eine piezo-resistive Brückenschaltung aus vier integrierten dehnungsabhängigen Widerständen am anderen Ende. Mit der Messspitze werden Oberflächen abgetastet. Die durch Unebenheiten erzeugten Kräfte bewirken in der Brückenschaltung Widerstandsänderungen. Diese generieren ein Signal, das zur elekt-

ronischen Signalverarbeitung weitergegeben wird. Die vom IMMS entwickelte integrierte anwendungsspezifische Schaltung (ASIC) ist mechanisch und elektrisch auf die Eigenschaften dieses Cantilevers angepasst. Sie wandelt und verstärkt das hochauflösende Signal für eine störungsresistente Übertragung zur Auswertereinheit. ASIC und Cantilever sind im Sensorkopf beidseitig auf der Trägerplatte direkt übereinander montiert. Die Signalleitungen werden dadurch so kurz wie möglich gehalten und eine Einkopplung von Störungen aus der Umgebung verhindert. Die Entwicklung des ASICs war zwingend notwendig, weil vorangegangene Untersuchungen zeigten, dass die angestrebte Messauflösung wegen der Störeinstrahlung auf den Verbindungsleitungen nicht mit Standard-Bauelementen zu erreichen ist. Darüber hinaus wären konventionelle Lösungen mit vergleichbarem Funktionsumfang auch zu groß für einen kompakten Sensorkopf.

Gemeinsam mit TETRA hat das IMMS die Anforderungen an die Elektronik erarbeitet, um ein marktfähiges nN-Kraftmessmodul für Produktionsanwendungen zu entwickeln. Dafür hat das IMMS Funktionen in die Schaltung integriert, die von Standardbauteilen so nicht unterstützt werden. Der ASIC enthält einen Verstärker mit einem vom IMMS entwickelten Zoom-Prinzip, wodurch ein Messbereich von bis zu 100 μN bei einer Auflösung im zweistelligen Nano-Newton-Bereich erreicht wird. Um die Oberflächengüte präzise aus den gemessenen Werten berechnen zu können, erfasst der Chip auch die Temperatur des Cantilevers. Weiterhin hat das IMMS den ASIC mit einer Schaltung zur Fehlerdetektion ausgestattet. Diese erkennt Defekte des Cantilevers und bildet die Grundlage für die Validierung der gemessenen Werte. Die Kommunikation mit dem ASIC erfolgt über eine digitale Schnittstelle.

Lösungsweg

Um eine hohe Messauflösung zu erreichen, wird die von der Kraft hervorgerufene Widerstandsänderung durch einen hochempfindlichen rauscharmen Instrumentenverstärker im ASIC verarbeitet. Die Verstärkung kann in vier Stufen eingestellt werden. In der niedrigsten Stufe wird der größte Messbereich abgedeckt, in der höchsten ist der Bereich am kleinsten, hat aber die höchste Auflösung. Im Idealfall ist die Widerstandsmessbrücke des Cantilevers im Gleichgewicht.

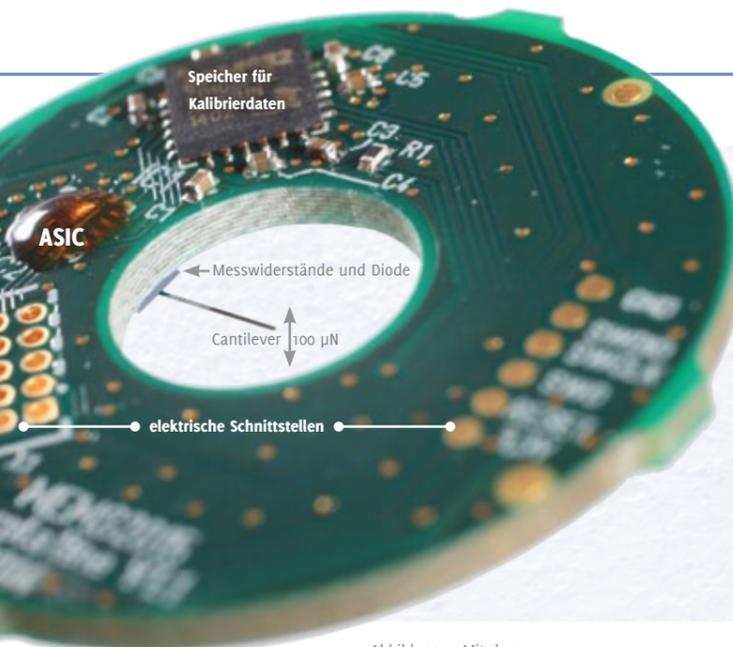


Abbildung 1: Mit dem Sensormodul von TETRA mit ASIC des IMMS sollen Kraftmessungen für die Prüfung von Oberflächenstrukturen vorgenommen werden. Foto: IMMS.

Das heißt, das Oberflächensignal bewegt sich um den Nullpunkt (Abbildung 3a). Im produktiven Einsatz ist das allerdings nicht der Fall. Bedingt durch Toleranzen der Messwiderstände und den Andruck des Cantilevers auf die Oberfläche wird der Messbereich aus dem Nullpunkt verschoben. Ohne zusätzliche Schaltungsmaßnahmen würde sich jetzt die Spannung am Ausgang des Verstärkers ebenfalls verschieben und am maximal möglichen Wert des Verstärkers begrenzt werden. Diese Ausgangsspannung entspricht dann nicht mehr dem Messwert (Abbildung 3b). Das IMMS hat deshalb ein „Zoom“-Prinzip implementiert, mit dem auch sehr kleine Signale, die nicht in der Nähe des Nullpunktes liegen, gemessen werden können. Über die digitale Schnittstelle wird zunächst die Verstärkung soweit verringert, bis das Signal im Messbereich liegt (Abbildung 3c). Anschließend werden Nullpunktverschiebung und Verstärkung des ASIC so

Abbildung 2: Prinzipschaltung des ASIC. Grafik: IMMS.

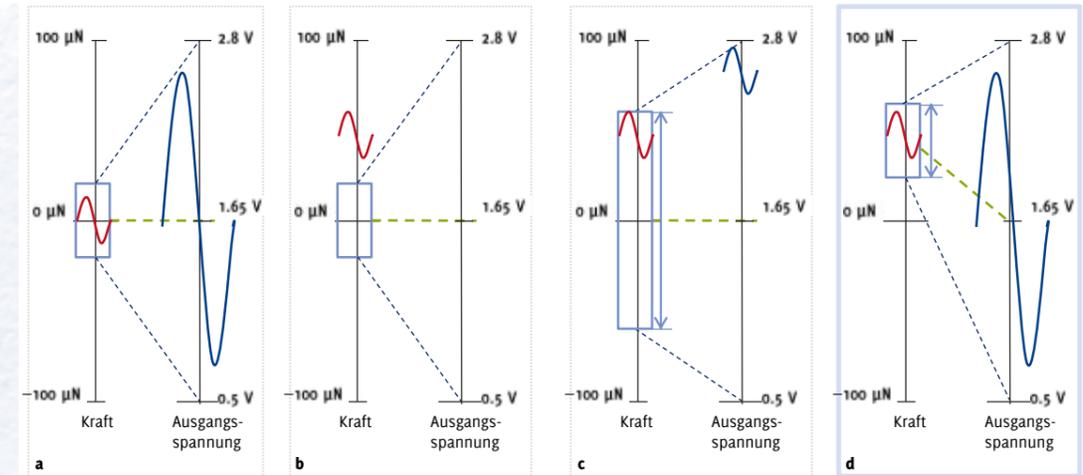
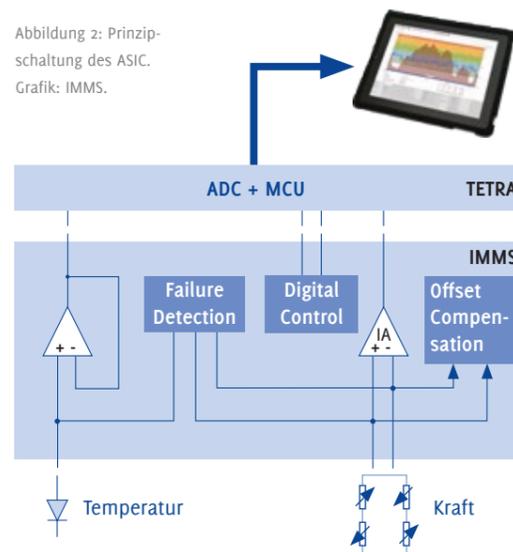


Abbildung 3: Zoom-Prinzip im ASIC des IMMS.

a) KRAFT: Ideale Einstellung. AUSGANGSSPANNUNG: Optimale Aussteuerung.

b) KRAFT: Falsche Einstellung, Signal (rot) außerhalb des Messbereichs (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Durch Aussteuerungsgrenze beschränkt, kein Signal sichtbar.

c) KRAFT: Messbereich vergrößert (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Signal sichtbar, aber nicht optimal angesteuert (dunkelblau).

d) KRAFT: Nullpunkt verschoben (grün) und Messbereich verkleinert (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Optimale Aussteuerung (dunkelblau). Grafik: IMMS.

eingestellt, dass das Signal in der Mitte des Messbereichs liegt (Abbildung 3d). Die Größe der Nullpunktverschiebung kann über den gesamten Messbereich in 64 Stufen eingestellt werden.

Die Eigenschaften des Cantilevers ändern sich mit dessen Temperatur. Die Auswertereinheit muss daher für jede Messung ebenfalls die Temperatur des Cantilevers ermitteln und mit in die Bestimmung der Kraft einbeziehen. Aus diesem Grund beinhaltet die Ausleseschaltung auch einen Messverstärker für die temperaturabhängige Flussspannung einer auf dem Cantilever integrierten Diode.

In einer industriellen Anwendung kommt es einsatzbedingt zum Verschleiß und unter Umständen auch zur Beschädigung des Cantilevers. Beispielsweise kann dieser in Folge eines zu hohen Anpressdrucks abbrechen. Ein solcher mechanischer Defekt geht mit geändertem elektrischen Verhalten einher. Der ASIC führt daher vor der Messung einen umfassenden Selbsttest durch. Die Fehlererkennung kann untypische elektrische Eigenschaften des Cantilevers und der Temperaturdiode feststellen. Der Test dauert nur einige Mikrosekunden.

Ausblick

Der vom IMMS entwickelte ASIC wurde in der CMOS-Technologie XH035 entworfen, vom Projektpartner X-FAB gefertigt und am Institut vermessen. Für den

Nachweis der hohen Empfindlichkeit hat das IMMS eigene Testhardware entwickelt, um die Störungen im Messaufbau minimal zu halten. Die gewonnenen Messdaten bestätigen, dass der ASIC die Spezifikation erfüllt. Mit den Ende Oktober 2014 an TETRA übergebenen Mustern testet das Partnerunternehmen zurzeit das Kraftsensor-Modul. Bis zum Projektende von MEMS2015 im Juni 2015 soll der Sensorkopf als Prototyp im Demonstrator einsatzbereit sein. Mit der Ausleseschaltung hat das IMMS eine Kernkomponente des Sensorkopfes entwickelt, die ihn dazu befähigt, als intelligentes, autonomes System in Industrieprozessen zu handeln. Auf seine erarbeiteten Lösungen für die integrierten Funktionalitäten zum Selbsttest, zur Selbstkalibrierung und zur Signalvalidierung wird das Institut konsequent aufbauen, um auch anderer Mess- und Prozesstechnik den Weg zu „Industrie 4.0“ zu ebnet.

Kontakt: Dr.-Ing. Volker Boos, volker.boos@imms.de

Projektpartner des IMMS sind Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, TU München, TETRA, Universität Bremen und X-FAB.



Das Projekt MEMS2015 wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 16M3093 im Förderprogramm IKT 2020 gefördert.



FORSCHUNGSTHEMA
SENSORSYSTEME FÜR DIE
BIOANALYTIK UND MEDIZINTECHNIK

Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik

Ziel des IMMS ist es, Medizintechnik, Bioanalytik und personalisierte Medizin durch elektronische Sensorsysteme voranzubringen. Insbesondere sollen solche Systeme Diagnoseverfahren erweitern und gezieltere Behandlungen ermöglichen sowie dazu beitragen, die Diagnostik risikoärmer und angenehmer für Patienten zu gestalten. Die neuen Lösungen sollen zudem kostengünstiger in der Herstellung und Nutzung sein und so einen Teil dazu beitragen, die Kosten im Gesundheitswesen zu senken. Diese sind laut Angaben des Statistischen Bundesamtes mit elf Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts hoch und sie steigen von Jahr zu Jahr. Ein Grund dafür sind u.a. die höhere Lebenserwartung und der damit verbundene Anstieg von schweren chronischen und degenerativen Erkrankungen wie Krebs, Herz-Kreislaufkrankungen und Demenz. Gleichzeitig steigen die Anforderungen und die Erwartungen der Patienten an eine höhere Lebensqualität. Life-Science und Medizintechnik als Wachstumsfeld und Megatrend wird aus diesen Gründen u.a. von der Bundesregierung in ihrer Hightech-Strategie mit den Zielen gefördert, Medizintechnik bedarfsgerecht weiterzuentwickeln, Volkskrankheiten zu bekämpfen und verbesserte Therapien durch individualisierte Medizin zu ermöglichen. Das IMMS hat für diese strategisch bedeutsamen Anwendungsgebiete seine Forschung zu Medizintechnik und Bioanalytik in den letzten Jahren mit mehreren Projekten ausgebaut und wird seine Arbeiten dazu weiter verstärken.

Medizintechnik

Für die Medizintechnik hatte das Institut bereits 2006 seine Kompetenzen in den Bereichen Sensorsysteme und der Systemintegration in die Entwicklung eines personalisierten miniaturisierten Audiodosimeters eingebracht. Damit konnte erstmals mit einem mobilen Gerät die individuelle Reizbelastung am und im Ohr genau und schnell über die Messung von Momentan- und Dauerschallpegel ermittelt werden. Mit diesen Daten sind zielgerichtete Arbeitsschutzmaßnahmen möglich, um lärmbedingte Hörschäden zu vermeiden.

Auf Seite 48 wird über den aktuellen Entwurf eines Vier-Transistor-Pixel-(4TP)-Array-Demonstrators

berichtet. Die von der X-FAB Semiconductor Foundries AG technologisch neuentwickelte Pixelzelle soll zusammen mit der vom IMMS realisierten Ausleseschaltung eine rauscharme und qualitativ hochwertige Aufnahme zweidimensionaler Lichtbilder ermöglichen. Auf dieser Basis sollen künftig 4TP-Bildsensoren für die Radiologie entwickelt werden, die in Empfängermodulen für Röntgenbilder eingesetzt werden können, z.B. im Dentalbereich oder für Mammographien.

Darüber hinaus haben die Kompetenzen des IMMS auf den Gebieten Systemintegration, Kommunikation und Signalverarbeitung zum erfolgreichen Abschluss des Forschungsprojekts MARS im Herbst 2014 beigetragen. Für den Prototypen des hier erarbeiteten mobilen Retina-Scanners hat das IMMS die Elektronik und das hierfür erforderliche Systemkonzept, die Schnittstellen, die Linux-Software-Unterstützung und Datentransferlösungen entwickelt.

Bioanalytik

Mit neuartigen elektronischen Sensorsystemen für die Bioanalytik arbeitet das IMMS daran, insbesondere die personalisierte Krebsfrüherkennung zu vereinfachen und zu beschleunigen und damit die Überlebenschancen von Patienten zu erhöhen. Andere Forschungsarbeiten des Instituts sollen in den nächsten Jahren neue oder verbesserte sowie kostengünstigere Produkte sowohl für die Human- als auch für die Veterinärmedizin auf den Weg bringen. Für beide Zielkomplexe müssen neue Wege gefunden werden, um Mikroelektronik, Mechatronik und Systemtechnik mit aktuellen bioanalytischen Verfahren zu verbinden. Hierzu wendet das IMMS unter anderem verschiedene Sensorprinzipien zur Detektion von biologischen Messgrößen gleichzeitig an, um validere Aussagen zu erhalten und die Fehlerrate zu senken. Grundlage der Arbeiten sind vorhandene und daher relativ kostengünstige Fertigungsprozesse für die Elektronik sowie für die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT), die für die neuen Ansätze applikationsspezifisch angepasst werden sollen. In der AVT will das IMMS neue, hybride Lösungen für den biokompatiblen Sensoraufbau etablieren, die für die Massenfertigung geeignet sind. Damit soll es in Zukunft möglich sein, Vor-Ort-Tests schnell, zuverlässig, kosteneffizient und weitgehend automatisiert zu realisieren.

Das IMMS bringt für solche neuen Lösungen unter anderem sein seit der Gründung des Instituts ausgebautes Know-how im Bereich Analog/Mixed-Signal-Schaltungsentwurf und Optoelektronik ein, um integrierte Systemlösungen für optisch detektierbare Biosignale



Testaufbau für den im Projekt GreenSense entwickelten RFID-Multisensor-ASIC zur Analyse wässriger Lösungen. Foto: IMMS.

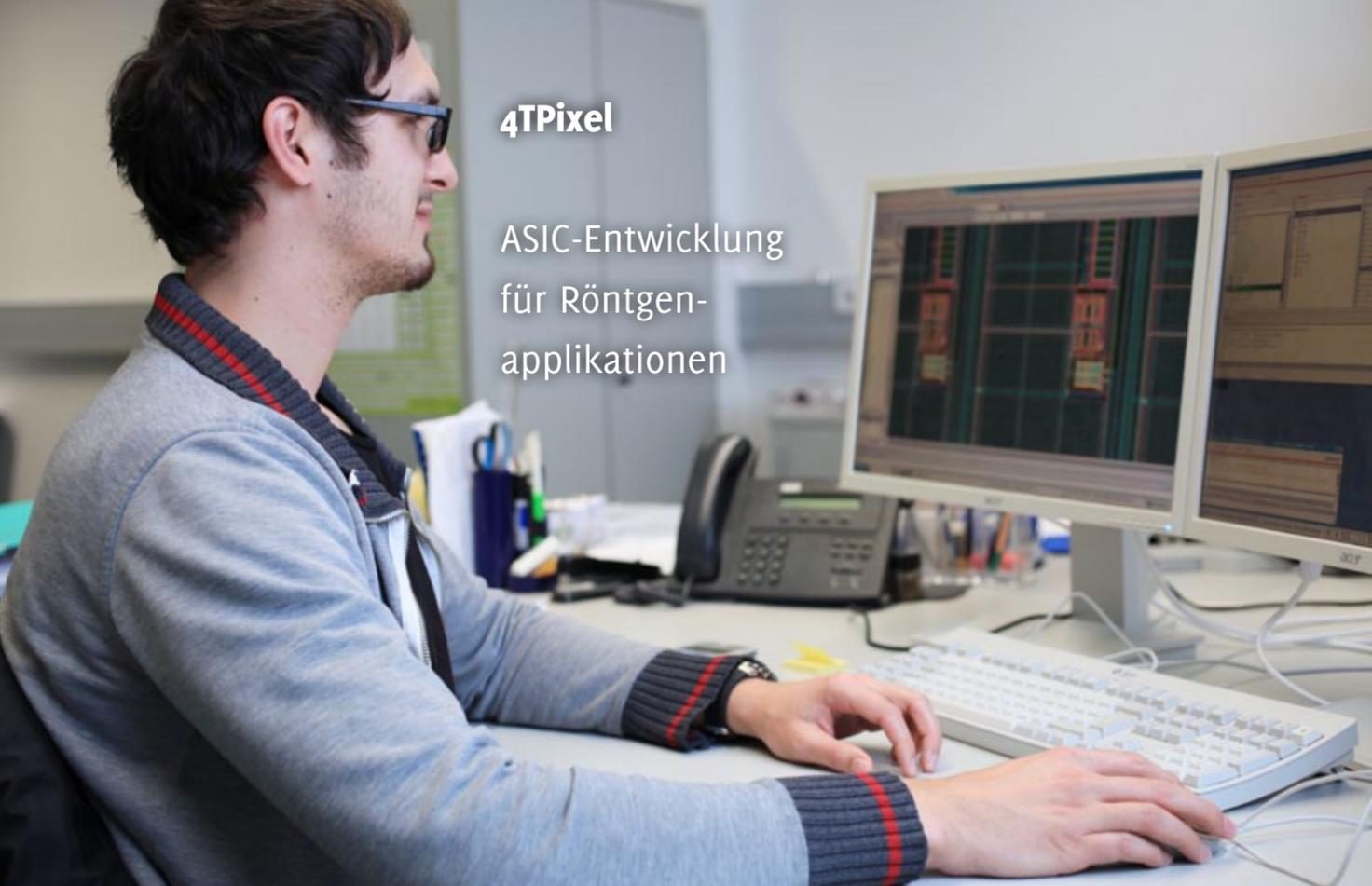
sowie biokompatible Elektronik zu entwickeln. Ein Beispiel ist eine für ein Retina-Implantat bereits 2011 entworfene und realisierte optoelektronische biokompatible Schaltung. Mit dem Implantat wird das Sehvermögen von Patienten mit degenerativen Netzhauterkrankungen teilweise wiederhergestellt. Der vom IMMS entwickelte Low-Power-Infrarot-Empfänger-Chip überträgt die Bilddaten einer externen Kamera an eine elektrische Stimulationseinheit, die auf die Netzhaut des Patienten implantiert wird.

Darüber hinaus hat das IMMS seine Kompetenzen in der Biosignalverarbeitung verstärkt, um das am Institut vorhandene Know-how konsequent für dieses Anwendungsfeld auszubauen. Das Institut hat bereits Entwicklungen abgeschlossen, die die Mikroelektronik näher an den Kern der Diagnostik und Therapie bringen.

So war das IMMS im 2013 abgeschlossenen Projekt 3DNeuroN an der Erforschung und Entwicklung eines neuen dreidimensionalen verlustleistungs- und rauscharmen Sensor-Aktor-Elektroden-Arrays zur Messung und Stimulation neuronaler Aktivitäten von Nervenzellen beteiligt. Mit diesem Ansatz soll künftig der Heilungsprozess von geschädigtem Zellgewebe des zentralen Nervensystems unterstützt werden. Mit dem 3D-Array mit 800 Elektroden werden die Nervenzellen stimuliert und deren Verhalten und Reaktionen dreidimensional aufgezeichnet. Das IMMS hat hierfür die Sensor- und Aktorelektronik erarbeitet. Mit diesem Projekt wurde erstmals die Verbindung zwischen

einem solchen dreidimensionalen Sensoraufbau und biologischem Gewebe kapazitiv statt galvanisch hergestellt. So werden ungewollte elektrische Ströme verhindert und die Biokompatibilität des Arrays gesichert.

Mit den 2014 erfolgreich abgeschlossenen Arbeiten der IMMS-Forscherguppe GreenSense können die zu analysierenden Stoffe näher an unsere mikroelektronischen Chips herankommen. Damit sind beispielsweise DNA-basierte Analysen für die Diagnostik und Therapie von Krankheiten sowie Mikroarray-basierte molekulare Analysen möglich. Hierbei sind die Sensorik und das Medium mit den nachzuweisenden Substanzen auf dem CMOS-Chip im Direktkontakt. Im Projekt wurde erstmals ein Chip hergestellt, mit dem es möglich ist, die Hybridisierung von DNA-Molekülen nach der Markierung mit metallischen Nanopartikeln mit Hilfe mehrerer Sensorprinzipien simultan zu detektieren. Über aktuelle Ergebnisse aus diesem Projekt wird hier auf Seite 50 im Detail berichtet. Darüber hinaus hat das IMMS in GreenSense eine modulare Technologieplattform zum Aufbau energie- und ressourceneffizienter drahtloser Smart-Sensor-Netzwerke entwickelt. Für diese hat das Institut einen passiven 13,56-MHz-RFID-Multisensor-ASIC entworfen und hergestellt. Dieser erfasst drahtlos Temperatur- und pH-Wert-Änderungen in wässrigen Lösungen und kann für Anwendungen in der Bioanalytik eingesetzt werden.



4TPixel

ASIC-Entwicklung für Röntgenapplikationen

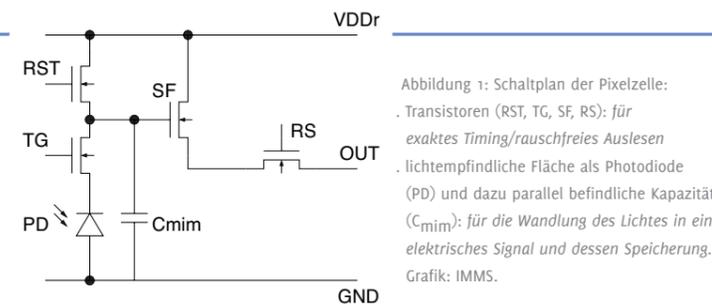


Abbildung 1: Schaltplan der Pixelzelle:
 · Transistoren (RST, TG, SF, RS): für exaktes Timing/rauschfreies Auslesen
 · lichtempfindliche Fläche als Photodiode (PD) und dazu parallel befindliche Kapazität (C_{mim}): für die Wandlung des Lichtes in ein elektrisches Signal und dessen Speicherung.
 Grafik: IMMS.

Darauf aufbauend hat das IMMS den Demonstrator schaltungstechnisch so gestaltet (vgl. Abbildung 2), dass die Eigenschaften der Pixelzelle im Array sowie im Zusammenspiel mit der Ausleseschaltung ausführlich getestet werden können. Hierfür hat das Institut eine digitalgesteuerte, über eine SPI-Schnittstelle frei einstellbare Auslese- und Kontrolllogik implementiert. Diese ermöglicht es dem Anwender, Zeitpunkt und Dauer von Schaltzyklen beliebig zu definieren, um so zeitliche Einflüsse auf die Qualität des Array-Ausleseprozesses zu untersuchen. Mit dieser Lösung können zudem verschiedene Spannungslevel für Steuersignale und Pixel-Array-Versorgungsspannungen genutzt werden, um auch darüber die Pixel-Leistungsfähigkeit beeinflussen und testen zu können.

Die Signalwerte der Pixel-Matrix werden mit dem realisierten Rolling-Shutter Konzept zeilenweise ausgelesen, entsprechend der applizierten Schaltvorgänge erfasst und verarbeitet. Am Ende der letzten Zeile schließt die zweidimensionale Signalaufnahme ab und der nächste Bildausleseprozess beginnt von vorn.

Kern der IMMS-Schaltung ist das vom Institut an das modellierte Pixel-Signalverhalten angepasste Correlated-Double-Sampling(CDS)-Prinzip. Die CDS-Stufe erfasst in einem ersten Schaltzustand die Dunkelspannung des Pixels ohne Belichtung. In einem zweiten Schaltzyklus nach der Pixelbelichtung wird das Lichtsignal aufgenommen, mit dem Dunkelsignal verrechnet und auf die systemeigene Referenzspannung bezogen. Bei voller Ausnutzung des Pixeldynamikbereichs lässt sich im Zusammenspiel mit der 4TP-Struktur außerdem das Rauschverhalten der Pixelzelle und auch das der analogen Verarbeitungselektronik sowie ihre signalverfälschenden Offseteigenschaften eliminieren. Der komplette analoge simulierte Signalpfad erreicht dabei einen Dynamikbereich von 91 dB bei einem eingangsbezogenem Rauschen von $71 \mu V_{RMS}$ und einem absoluten Signalfehler von kleiner 0,5 %. Somit kann der Demonstrator durch ein sehr gutes Signal-Rauschverhältnis und einen genauen Ausleseprozess die geforderte Bildqualität gewährleisten. Insgesamt verbraucht der simulierte ASIC dabei im Durchschnitt weniger als 70 mW und ist damit sehr energiesparsam.

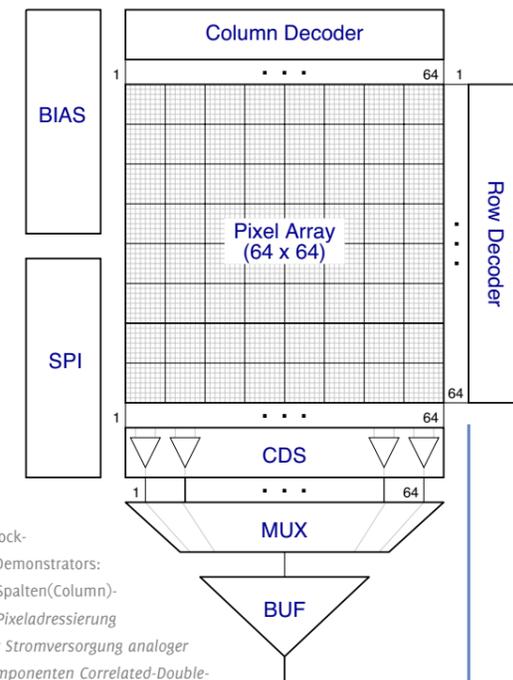


Abbildung 2: Blockschaltbild des Demonstrators:
 · Zeilen(Row)/-Spalten(Column)-Decoder: zur Pixeladressierung
 · Bias-Zelle: zur Stromversorgung analoger Schaltungskomponenten Correlated-Double-Sampling(CDS)-Stufe und Ausgangsbuffer (BUF),
 · Multiplexer (MUX): sequenzielles Weiterleiten der verarbeiteten analogen Pixelwerte von CDS zu BUF. Grafik: IMMS.

Das IMMS hat den ASIC so entwickelt, dass einzelne Schaltungskomponenten des analogen Signalpfades und des Digitalteils getestet werden können. Damit ist es möglich, Einflüsse auf das Ausleseverhalten durch den Pixel selbst und durch die Schaltung voneinander unterscheiden zu können. Um zudem parasitäre Einflüsse und Störeinkopplungen durch digital induzierte Schaltvorgänge zu minimieren sowie die Leistungsfähigkeit der CDS-Stufe zu gewährleisten, hat das IMMS layoutbasierte Feinarbeiten am ASIC vorgenommen.

Ausblick

Im ersten Quartal 2015 geht der ASIC in die Produktion. Bei dessen Charakterisierung und Test wird das IMMS vor allem die Randbedingungen für Timing und Versorgungsspannung evaluieren und optimieren sowie die Empfindlichkeit unterschiedlicher 4TP-Zellen-Topologien untersuchen. Auf dieser Basis können bei künftigen Forschungsarbeiten Redesigns und Erweiterungen in Funktionalität und Komplexität vorgenommen werden. So ließe sich etwa das Global-Shutter-Prinzip realisieren und eine Signal-Digitalisierung in den Chip integrieren. Dies bildet die Grundlage zur Weiterentwicklung von qualitativ noch höherwertigeren und preiswerteren CMOS-Bildsensoren mit integrierter Verarbeitungselektronik für Röntgengeräteapplikationen.

Kontakt: Alexander Hofmann, M.Sc., alexander.hofmann@imms.de

Motivation

Um die Diagnostik und damit die Behandlungsmöglichkeiten für Patienten zu verbessern, werden unter anderem bildgebende Verfahren, wie Röntgenaufnahmen, Computer- und Magnetresonanztomographie (MRT und CT), seit Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt. Längst haben CMOS-Bildsensoren Einzug in die Medizintechnik gehalten. Solche Halbleiterstrukturen vereinen Photodioden und Signalverarbeitungselektronik in einem einzigen energie- und kosteneffizienten Mikroelektronik-Chip. Mangelte es CMOS-Bildsensoren anfangs noch an hoher Lichtempfindlichkeit und geringem Rauschen, erlauben sie heute bereits für den professionellen Einsatz geeignete rauscharme und schnelle Bildaufnahmen. Um Radiologie-Patienten immer geringere Strahlenbelastungen zu ermöglichen, wird kontinuierlich an immer empfindlicheren Sensoren sowie an schnelleren und genaueren Bildverarbeitungsprozessen durch leistungsfähigere Auswerteelektronik geforscht.

Das IMMS hat mit seinem ASIC-Entwurf zu einem Vier-Transistor-Pixel-(4TP)-Array-Demonstrator beigetragen: Mit der von der X-FAB Semiconductor Foundries AG technologisch vollständig neuentwickelten Pixelzelle sollen künftig zusammen mit der Ausleseschaltung des Instituts rauschärmere und qualitativ hochwertigere

Mit dem vom IMMS entwickelten mikroelektronischen Chip sollen künftig hochauflösende Röntgenaufnahmen möglich werden. Foto: IMMS.

tigere Aufnahmen zweidimensionaler Lichtbilder für Röntgenapplikationen angefertigt werden. Auf dieser Basis können beispielsweise 4TP-Bildsensoren entwickelt werden, die in Empfängermodulen für Röntgenbilder einsetzbar sind, z.B. im Dentalbereich oder für Mammographien.

Die für grünes Licht empfindliche 4TP-Zelle beinhaltet einen großen lichtempfindlichen Bereich und vier Transistoren für den rauscharmen Auslesevorgang. Die für diese Bedingungen vom IMMS entworfenen integrierten Schaltungsstrukturen und realisierten Ausleseprozesse ermöglichen eine hohe Genauigkeit in der Auswertung. Sie tragen darüber hinaus zu einem großen Dynamikbereich des Demonstrators bei, indem erfasste sehr schwache aber auch sehr starke Lichtsignale entsprechend verarbeitet werden.

Der ASIC-Entwurf des IMMS im Detail

Das IMMS hat für die 4TP-Zellen Modelle entwickelt und diese adäquat in die Simulationsumgebung eingebunden, um das Signalverhalten der neuen 4TP-Zellen für den Schaltungsentwurf so genau wie möglich abzubilden. In Abbildung 1 ist der Schaltplan einer solchen Zelle dargestellt.



Halbleiterbasierte Biochips zur Vor-Ort-Diagnose von Tierseuchen

Probecard mit einem ASIC, mit dem direkt auf den Chip gegebene wässrige Lösungen analysiert werden können. Foto: IMMS.

Motivation

Qualitativ hochwertige Lebensmittel setzen regelmäßige Gesundheitskontrollen von Nutztieren voraus. Diagnosen können bislang nur mit Verzögerungen von mehreren Tagen oder gar Wochen gestellt werden, da Proben in ein Labor geschickt, dort aufbereitet und mit herkömmlichen mikrobiologischen Analysen untersucht werden. Wird eine Erkrankung mit hohem Gefahrenpotenzial festgestellt, können sich während des Diagnosezeitraums Viren bzw. Bakterien bereits verbreiten. Aus diesem Grund wird je nach Schweregrad der Infektion der gesamte Tierbestand des betroffenen Landwirts gesperrt oder sogar vernichtet, um eine weitere Ausbreitung der Seuche zu verhindern.

Das IMMS bringt sich daher zusammen mit dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien Jena (IPHT) in die Entwicklung von Lösungen ein, mit denen künftig Tierseuchen einfach diagnostiziert werden können. Mit einem tragbaren elektronischen Gerät sollen sich Proben eines Viehbestandes unmittelbar vor Ort schnell und automatisiert auf Krankheitserreger untersuchen lassen. So können betroffene Tiere frühzeitig isoliert und behandelt werden mit dem Ziel, Gefahren für Verbraucher zu eliminieren.

ren, gesunde Tiere zu verschonen und wirtschaftliche Schäden einzudämmen.

Die Entwicklung des IMMS basiert auf einem von der Jenaer BioChip Initiative (JBCI, IPHT Jena) erarbeiteten Diagnoseverfahren, mit dem unter anderem das Maul-und-Klauenseuche-Virus (FDMV)¹ auf Glaschips detektiert werden konnte. Dank einfacher und schnell möglicher Auswertungen der elektrischen Leitfähigkeit und der optischen Eigenschaften von Proben bildet dieses Verfahren die Basis für eine kompakte Vor-Ort-Diagnostik. Um solche Analysen zu präzisieren und mit einer Auswertelektronik zu automatisieren, hat das IMMS in Zusammenarbeit mit der JBCI im Projekt GreenSense die Messkonzepte auf neue mikroelektronische Sensor-Array-Plattformen übertragen, weiterentwickelt und eine spezifische Aufbau- und Verbindungstechnik sowie System-Assembly-Lösungen erarbeitet. Darüber hinaus hat das IMMS die Messmethoden erweitert und das elektronische System auch auf ein impedimetrisches Verfahren ausgelegt. Der mikroelektronische Ansatz bietet als Alternative zur bestehenden glasbasierten Plattform erweiterte Messmöglichkeiten. Ziel ist es, mit diesen Entwicklungen die während der Diagnose ablaufenden Reaktionen in Echtzeit zu verfolgen und die drei Messmethoden auf einem Halbleiter-Biochip vereinen zu können.

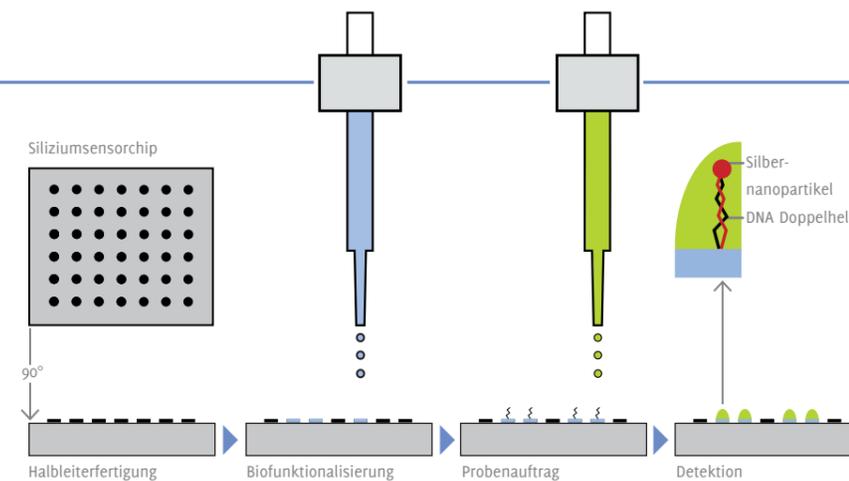


Abbildung 1: Das Biochip-basierte Diagnoseverfahren des JBCI/IPHT bildet die Basis für die drei ASIC-Entwicklungen am IMMS. Die drei Siliziumchips unterscheiden sich in der Detektionsmethode für den Nachweis von Silbernanopartikeln. Grafik: IMMS.

Drei ASIC-Entwicklungen des IMMS

Ausgangspunkt der am IMMS entwickelten Lösungen ist das in Jena erarbeitete o.g. Diagnoseverfahren. Eine aus Glas oder einem anderen Substrat bestehende planare Oberfläche mit integrierten Goldelektrodenpaaren wird hierbei zunächst funktionalisiert. Dazu werden auf den chemisch vorbehandelten Glaschip zwischen den Elektroden für die gesuchten Viren spezifische Biomoleküle aufgebracht, die als Fänger nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip dem Nachweis dienen. Die zu analysierende Probe wird vervielfältigt und in einem mikrofluidischen Kanalsystem über die Elektrodenpaare des Glaschips geleitet. Befindet sich in der Probe die gesuchte DNA, reagiert diese mit den Fänger-molekülen. In Folge dessen werden Silbernanopartikel abgeschieden, die eine leitfähige Schicht bilden. Diese überbrückt den Elektrodenspalt und verursacht dadurch einen elektrischen Kurzschluss, der sich mit einer einfachen Gleichstrommessung als veränderter Widerstandswert zwischen den Elektroden feststellen lässt. Darüber hinaus kann die Silberschicht mit Hilfe der Grauwertbestimmung im Labor optisch erfasst werden.

Das IMMS hat drei verschiedene Sensorlösungen auf CMOS-Halbleiter-Basis entwickelt, mit denen anstelle eines solchen Glaschips die Bildung von Silbernanopartikeln gemessen werden kann. Mit diesen drei Mikroelektronik-Entwicklungen wird nicht nur erfasst, dass solche Partikel entstanden sind. Das Design bietet darüber hinaus die Möglichkeit, wichtige Aussagen über die Konzentration der Nanoteilchen und die Qualität des Detektionsvorgangs treffen zu können. Um am IPHT die Proben und Kontrollen den biotechnologischen Tests parallel unterziehen, die Ergebnisse vergleichen und für weitere Forschungsarbeiten nutzen zu können, hat das IMMS zunächst die drei genannten Messprinzipien in drei getrennten Ansätzen implementiert. Ergebnis sind zwei Sensor-ASICs, auf denen die Messpunkte für Vergleiche mit dem JBCI-Glaschip-System in einer 6x7-Matrix angeordnet sind,

und Teststrukturen für den dritten ASIC-Entwurf. Die integrierten Sensoren hat das IMMS dabei in solchen Abständen auf der Elektronik arrangiert, dass die Probenlösung jeweils isoliert Elektrode für Elektrode aufgebracht werden kann. Die Mikroelektronik-Chips werden am IPHT analog zum oben beschriebenen Verfahren funktionalisiert und die Proben entsprechend vorbereitet. Die Messwerte sind bei allen drei Methoden von der Anzahl der sich ablagernden Silbernanopartikel auf den ASIC-Oberflächen abhängig. Mit diesem Verhältnis wird in allen drei ASICs die Konzentration der vorhandenen DNA anhand der abgeschiedenen Silbernanopartikel im Vergleich zu kalibrierten Messwerten rechnerisch ermittelt.

Das IMMS hat für den ersten Ansatz das Messprinzip der Leitfähigkeitsmessungen des IPHT auf einen mikroelektronischen Chip übertragen und erweitert. Hierfür wird der aktuelle Widerstandswert zwischen zwei Elektroden erfasst und ausgewertet. Das ASIC-Design berücksichtigt die Erkenntnisse der JBCI-Voruntersuchungen hinsichtlich der maximalen Strom- und Spannungswerte, denen die DNA ausgesetzt werden darf. Zudem beinhaltet es vier einstellbare Verstärkungsmöglichkeiten, dank derer sowohl die Anfangsphase des Detektionsvorganges als auch der komplette Verlauf der Detektion mit der Elektronik verarbeitet werden soll.

Bei der zweiten Chip-Entwicklung wird der Nachweis mit einem optischen Ausleseverfahren realisiert. Die Probe wird hierfür einer homogen leuchtenden Lichtquelle ausgesetzt. Der ASIC erfasst mit einem Array von Fotodetektoren, die hochempfindlich unter anderem für sichtbares Licht sind, wie sich die Beleuch-

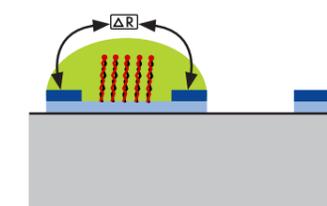


Abbildung 2: Prinzipdarstellung für die ASIC-Entwicklung des IMMS für den Nachweis von Silbernanopartikeln mit Hilfe von Widerstandsmessungen [ΔR]. Grafik: IMMS.

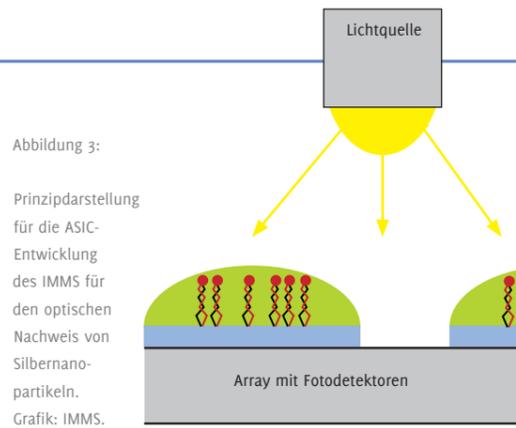


Abbildung 3:
Prinzipdarstellung für die ASIC-Entwicklung des IMMS für den optischen Nachweis von Silbernanopartikeln.
Grafik: IMMS.

tungsstärke durch die intransparenten Silbernanopartikel während des Detektionsvorganges verändert. Um die höchstmögliche Auflösung bei der optischen Signalauswertung zu erzielen sowie die Verstärkungskette der Schaltung an die variablen Ausgangsstromstärken der Fotodioden in Echtzeit anpassen zu können, hat das IMMS für das Signalverstärkungssystem 72 Einstellmöglichkeiten über 3 Stufen definiert. Diese breite Auswahl von möglichen Einstellungen soll eine vollständige optische Charakterisierung des Detektionsverfahrens hinsichtlich der minimalen Anzahl von Nanopartikeln sichern, die noch aufgelöst werden können.

Darüber hinaus sollen in einem dritten Aufbau Silbernanopartikel durch **Impedanzmessungen** ermittelt werden. Das IMMS hat bereits sechs Impedanz-Teststrukturen mit interdigitalem Finger-Aufbau entwickelt. Die kammförmig angeordneten und ineinandergreifenden Finger wurden für diese Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Abständen und Breiten entworfen, um die optimale Struktur für die höchste Sensorempfindlichkeit weiter zu verfolgen und in einen dritten ASIC-Entwurf einfließen zu lassen.

Je nach dem Verlauf, mit dem sich Silber zwischen den Kammstrukturen ablagert, ändert sich die Gesamtimpedanz zwischen den Elektroden. Diese Differenzen lassen sich mit einer Wechselspannungsmessbrücke zwischen zwei Kämmen erfassen. Aufgrund dieser speziellen interdigitalen Sensorstruktur ist von einer höheren Sensitivität der Messungen auszuge-

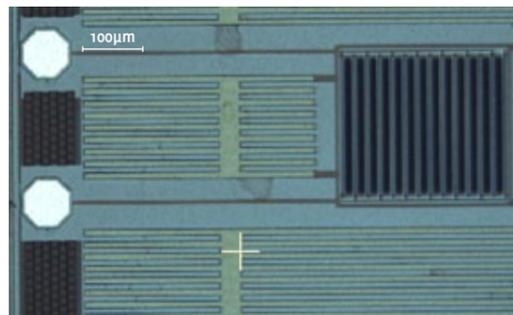


Abbildung 5: Mikroskopaufnahme der gefertigten kammförmigen Strukturen für Impedanzmessungen. Foto: IMMS.

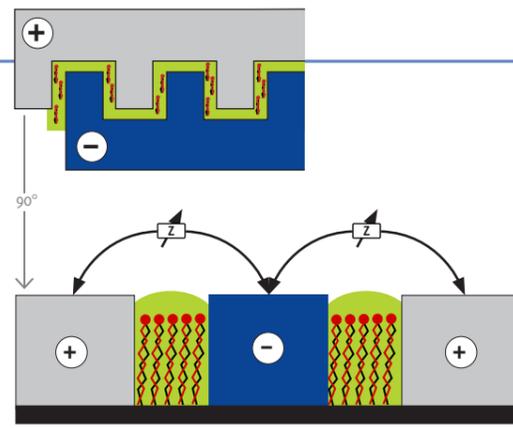


Abbildung 4: Prinzipdarstellung für die ASIC-Entwicklung des IMMS für die impedimetrische (Z) Erfassung von Silbernanopartikeln. Grafik: IMMS.

hen. Darüber hinaus lassen sich mit Impedanzmessensensoren mehrere Messgrößen dynamisch erfassen. Für die hier betrachtete Anwendung sind neben dem Widerstand vor allem die Veränderung der Kapazität und der Phase des Messsignals wichtige Größen, die künftig in diesem Messverfahren für die Bioanalytik vereint werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

In Zusammenarbeit mit dem IPHT werden seit dem 1. Quartal 2015 die drei unterschiedlichen Sensor-ASIC-Systeme auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Die biologischen Messungen erfolgen in verschiedenen Stufen. Damit kann einerseits die Biokompatibilität der in der Elektronik verwendeten Materialien getestet werden. Andererseits lässt sich nur so die Wirkung der einzelnen Verfahrensschritte hinsichtlich der Sensorempfindlichkeit charakterisieren.

Die im ersten Quartal 2015 am IMMS begonnenen elektronischen Test- und Charakterisierungsarbeiten der im Aufbau befindlichen Sensorsysteme ermöglichen den Start der ersten Validierungsmessungen. Es ist beabsichtigt, dass die Arbeiten für weitere veterinärmedizinische Fragestellungen adaptiert und die Sensorzuverlässigkeit in Folgeprojekten weiter verbessert werden. Darüber hinaus sollen künftig Anwender sowie kleine und mittelständische Unternehmen einbezogen werden, um die industrielle Verwertung des Diagnostiksystems voranzubringen.

Kontakt:

Dr. Balázs Németh, balazs.nemeth@imms.de
Alexander Hofmann, M.Sc.,
alexander.hofmann@imms.de

Literatur: 1 Seise, B. et al., Engineering in Life Sciences (2011)
doi: 10.1002/elsc.201000046

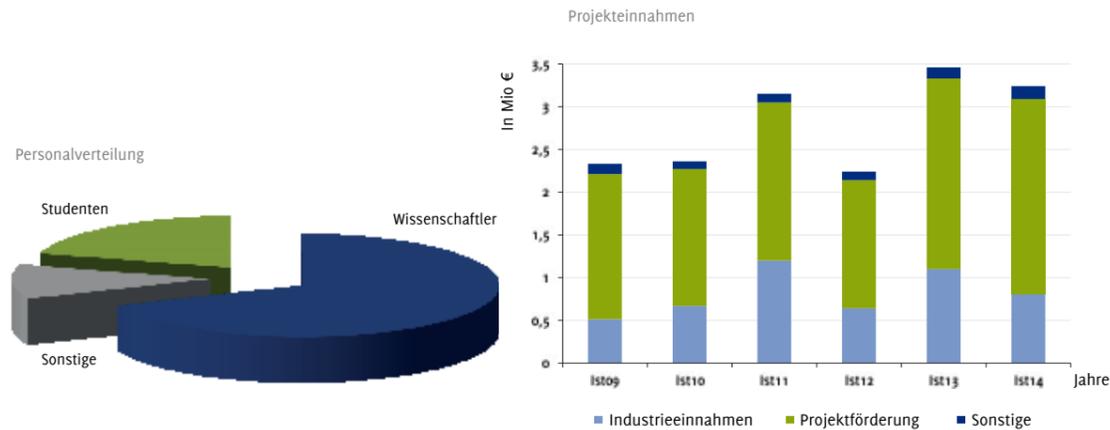
Das Projekt GreenSense wurde gefördert durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Förderkennzeichen 2011 FGR 0121.

ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE FÜR ARBEITEN DES IMMS



IMMS-Team am Hauptsitz in Ilmenau.
Foto: IMMS.

IMMS in Zahlen



2014 waren im IMMS 85 Mitarbeiter beschäftigt. Hier-von waren 57 Wissenschaftler und neun Studenten (FTE*) in der Forschung und Entwicklung tätig, was ca. 85% aller Beschäftigten entspricht.

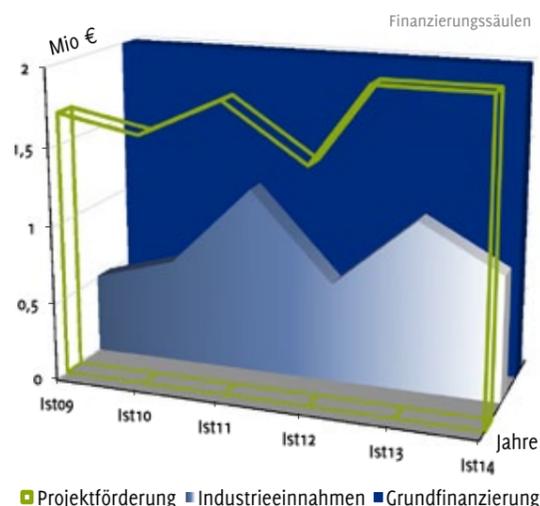
Wie bereits in den letzten Jahren hat eine große Zahl von Studenten (53) die Angebote des IMMS wahr-genommen, ihre Ausbildung in praxisorientierter Forschung zu vertiefen und zu vervollständigen: 27 Studenten absolvierten Praktika, sieben Bachelorar-beiten und Masterarbeiten wurden betreut und fünf Mitarbeiter sind gegenwärtig als Doktorand an einer Universität eingeschrieben. Das IMMS zeigt ein gro-ßes Engagement in der studentischen Ausbildung, um auf diesem Wege ausreichend Absolventen in der notwendigen Anzahl und Qualität zu gewinnen.

Die Erlöse aus industrieller Auftragsforschung sind 2014 um 8% und die Leistungen aus öffentlicher Pro-jektförderung um 5% gegenüber denen des Vorjahres gestiegen. Die Einnahmen spiegeln dieses Verhältnis nicht im Einzelnen wieder. Nachschüssige Zahlungen aus abgerufener Projektförderung bewirkten gegen-über dem Vorjahr ein Einnahmendefizit. Der Markt für Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen hat sich differenziert entwickelt. Die Bereitschaft der Wirt-schaft externe FuE-Dienstleistungen aus Eigenkapital zu finanzieren, ist etwa auf dem Vorjahresniveau ge-blieben, wohingegen an staatlich geförderter FuE ein großes Interesse zu erkennen war.

Die Ergebnisse in 2014 weisen darauf hin, dass sich die Projektförderung weiterhin positiv entwickeln wird. Fast alle Projekte finden im Verbund mit Industrie-partnern statt. Das verdeutlicht die hohe Akzeptanz des IMMS als Forschungspartner. Dem Institut ist es

gelingen, 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 Stabili-sierung dieses Prozesses erfordert die Formierung der KMU in regionale und produktorientierte Wertschöp-fungsketten. Der Zugang zu innovativen Märkten er-fordert 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 2014 für verlässli-che Bedingungen mit einer konstanten institutionel-len Zuwendung gesorgt. Das hat insbesondere die Zusammenarbeit mit den kleinen und mittelständi-schen Betrieben Thüringens gefördert. Jedoch wer-den Inflation und Tariferhöhungen nicht mehr aus-geglichen.



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

Organisation



Wissenschaftlicher Beirat

- **Vorsitzender:** Herr Dr.-Ing. Gabriel KITTLER, Innovation Manager, X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt
- **Stellv. Vorsitzender:** Herr Olaf MOLLENHAUER, Geschäftsführender Gesellschafter der TETRA GmbH, Ilmenau
- **Ehrenmitglied:** Herr Prof. Dr. habil. Eberhard KALLENBACH, Leiter des Steinbeis-Transferzentrum Mechatronik, Ilmenau
- Herr Prof. Dr. ERICH BARKE, Präsident der Leibniz Universität Hannover, Fachbereich Informatik
- 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 Dr. Jörg PRINZHAUSEN, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und digitale Gesellschaft (bis 12/2014 Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur)
- **Stellv. Vorsitzender:** Herr Dr. Frank EHRHARDT, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und digitale Gesellschaft (bis 12/2014 Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie)
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. Klaus AUGSBURG, Prorektor Wissenschaft, Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau
- Herr Dr. sc. Wolfgang HECKER, Geschäftsführer, MAZeT GmbH Thüringen
- Herr Dr. Jens KOSCH, Chief Technical Officer, X-FAB-Semiconductor Foundries AG
- Herr Thomas WEISSENBORN, Thüringer Finanzministerium

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

Dipl.-Ing. Sven Engelhardt an der Berufsakademie Eisenach:

„Automatisierungssysteme“, Vorlesung und Praktika, Studiengang Konstruktion, Bachelor-Studenten

Workshop Embedded Linux „Chancen, praktische Lösungsansätze und rechtliche Aspekte von Open Source“, gemeinsame Ausrichtung mit der OSADL eG, Ilmenau, 13.05.2014 (Gastgeber, Organisation und Vortrag)

Seminar Sensornetzwerke „Durch energieeffiziente eingebettete Systeme zu vernetzten smarten Sensoren“, 15.05.2014 (Veranstalter AMA e.V., wissenschaftliche Leitung und Durchführung: IMMS)

Messen

embedded world 2014 Messe für Hersteller und Entwickler von Hard- und Software, Tools und Dienstleistungen im embedded Bereich, 25.-27.02.2014, Nürnberg (Mitsaussteller, OSADL Gemeinschaftsstand)

Hannover Messe 7.-11.4.2014 (Präsentation auf BMBF Gemeinschaftsstand)

new mobility Fachmesse für Mobilität, 27.-29.10.2014, Leipzig (Präsentation mit dem sMobiliTy-Projektconsortium auf dem BMWi Gemeinschaftsstand)

MSV Brno, Internationale Maschinenbaumesse, eine der führenden Industriemessen Europas, 29.9.-3.10.2014, Brno, Tschechische Republik (Mitsaussteller BMBF Gemeinschaftsstand)

IENA Internationale Fachmesse „Ideen-Erfindungen-Neuheiten“, 28.10.-02.11.2014, Nürnberg (Präsentation auf Gemeinschaftsstand PATON)

Medica MEDICA internationale Fachmesse für Medizin, 12.-15.11.2014, Düsseldorf (Mitsaussteller Gemeinschaftsstand DiagnostikNet-BB)

Weitere Veranstaltungen am IMMS

Girls' Day 2014 Mädchen entdecken Berufe in Technik, IT, Handwerk und Naturwissenschaften, Ilmenau, 27.03.2014 (Vortrag und Laborführung)

Sense. Enable. SPITSE. SPITSE-Symposium, 07.-18.07.2014, Ilmenau (Laborführungen)

Publikationen 2014

Überblick zu Konferenzen mit IMMS-Beiträgen

SSD 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, 11.-14.02.2014, Barcelona, Spanien (Vortrag)

EAS 2014 7. GMM-Workshop Energieautarke Sensorik, 24.-25.02.2014, Magdeburg (Vortrag)

DATE 2014 Conference & Exhibition on Design, Automation and Test in Europe, 24.-28.03.2014 (Posterpräsentation)

eda WS2014 eda-Workshop, „Ansätze zur Entwicklung durchgängiger Entwurfsstrategien für MEMS“, 13.-14.05.2014, Hannover (Vortrag)

CDNLive2014 19.-21.05.2014, München (Poster)

IRPS2014 IEEE International Reliability Physics Symposium, 01.-05.06.2014, Hawaii, USA (Vortrag)

LED- und OLED Praxisforum, 02.-03.06.2014, Würzburg (Vortrag)

Silicon Saxony Day Fachforum »Smart City« 8. Silicon Saxony Day, Dresden, 03.07.2014 (Vortrag)

elmu4future Technologiekonferenz des Thüringer Clusters für „Elektronische Mess- und Gerätetechnik“, Friedrichroda, 15.07.2014 (Vortrag)

Sense. Enable. SPITSE. SPITSE-Symposium, 07.-18.07.2014, Ilmenau (3 Vorträge)

ISMB14 14th International Symposium on Magnetic Bearings, 11.-14.08.2014, Linz (Vortrag)

UFFC2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago (Vortrag), 03.-06.09.2014

EUROSENSORS 07.-10.09.2014, Brescia, It, (2 Vorträge)

IWK 08.-12.09.2014 58th Ilmenau Scientific Colloquium, (Vortrag)

Analog 2014 ITG/GMM-Fachtagung: Entwicklung von Anlogschaltungen mit CAE-Methoden, Hannover, 17.-19.09.2014 (Vortrag und Posterpräsentation)

ESSCIRC 2014 40th European Solid-State Circuits Conference, Venedig, Italien, 22.-26.09.2014 (Vortrag)

IWK Mittweida, 06.11.2014 (Vortrag)

APCCAS 2014 12th IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Okinawa, Japan, 17.-20.11.2014 (Vortrag)

NAVITEC 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 03.-05.12.2014, Noordwijk, Niederlande (Vortrag)

Begutachtete Veröffentlichungen

Jun TAN, Alexander ROLAPP, Eckhard HENNIG, "A Low-Voltage Low-Power CMOS Time-Domain Temperature Sensor Accurate To Within [-0.1,+0.5] °C From -40 °C To 125 °C," *12th IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2014)*, Session Sensor Systems and Emerging Memory Technology, pp. 463 – 466, IEEE Catalog Number: CFP14APC-USB, ISBN: 978-1-4799-5229-8, Ishigaki Island, Okinawa, Japan.

Eric SCHÄFER¹, Safwat IRTEZA², André JÄGER¹, Björn BIESKE¹, André RICHTER¹, Muhammad Abdullah KHAN¹, Muralikrishna SATHYAMURTHY¹, Sebastian KERKMANN¹, Alexander ROLAPP¹, Eckhard HENNIG¹, Ralf SOMMER¹, "A Four-Channel GNSS Front-End IC for a Compact Interference- and Jamming-Robust Multi-Antenna Galileo/GPS Receiver," *7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC 2014)*, Session B6 - Robust GNSS Receiver Design, ISBN: 978-1-4799-6529-8, Noordwijk, Niederlande, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, Germany, ²RF and Microwave Research Laboratory, Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany.

S. IRTEZA¹, E. SCHÄFER², R. STEPHAN¹, M. A. HEIN¹, "Compact antenna array receiver for robust satellite navigation systems," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press and the European Microwave Association 2014*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1759078714000907>, 11 pages, ¹Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik, Ilmenau, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau.

M. MEISTER¹, U. LIEBOLD¹, S. THIELE², R. WEIRAUCH², K. BACH², "A CMOS Monolithic Integrated Ambient Light Sensor based on a Single Photodiode Stack," *Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2014 11th International*, pages 1 – 3, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SSD.2014.6808875>, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Germany, Ilmenau, ²X-FAB Semiconductor Foundries AG.

S. Irteza¹, E. Schäfer², M. Ibraheam¹, B. Bieske², R. Stephan¹, M.A. Hein¹, "Beamforming in compact antenna arrays for robust satellite navigation, Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)," *2014 IEEE-APS Topical Conference on*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APWC.2014.6905569>, Page(s): 528 – 531, ¹RF and Microwave Laboratory, Ilmenau University of Technology, Germany, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Germany.

A. TAG¹, R. WEIGEL¹, A. HAGELAUER¹, B. BADER², C. HUCK², M. PITSCHI², K. WAGNER², D. KAROLEWSKI³, C. SCHÄFFEL³, "Influence of Temperature Gradient on BAW Resonators Behavior and Reliability," *Reliability Physics Symposium, 2014 IEEE International*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IRPS.2014.6860669>, Page(s): 5C.5.1 - 5C.5.7, ¹Institute for Electronics Engineering University of Erlangen-Nuremberg, ²TDK Corporation, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH.

Christoph SCHÄFFEL¹, Michael KATZSCHMANN¹, Hans-Ulrich MOHR¹, Rainer GLOESS², Christian RUDOLF², Christopher MOCK², Carolin WALENDA², "6D Planar Magnetic Levitation System – Mag6D," *14th International Symposium on Magnetic Bearings*, Linz, Austria, <http://www.magneticbearings.org/publications/>, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, D-76228 Karlsruhe, Germany.

Benjamin SAFT, Eric SCHÄFER, André JÄGER, Alexander ROLAPP, Eckhard HENNIG, "An Improved Low-Power CMOS Thyristor-Based Micro-to-Millisecond Delay Element," *ESSCIRC 2014*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ESSCIRC.2014.6942037>, pages 123 – 126, Print ISBN: 978-1-4799-5694-4.

Steffen MICHAEL¹, Astrid FRANK¹, G. HÖLZER², G. LORENZ³, "Perforated plates of inertial sensors – modeling by effective material properties," *EUROSENSORS 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers*, in *Procedia Engineering*, Volume 87, 2014, Pages 480 – 483, www.sciencedirect.com, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.400>, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²XFAB-AG, Erfurt, ³Contactor, 3 avenue de Quebec, 91140 Villebon sur Yvette, France.

Bianca LEISTRITZ^{1,2}, Michael KATZSCHMANN¹, Hannes TÖPFER^{1,2}, "Vibration energy generators for low-frequency spectral excitations," *EUROSENSORS 2014, the 28th European Conference on Solid-State Transducers*, in *Procedia Engineering*, Volume 87, 2014, 420 – 423, www.sciencedirect.com, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.283>, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Technische Universität Ilmenau, D-98693 Ilmenau, Germany.

Jacek NOWAK¹, Jenny KLAUS², Dominik KAROLEWSKI³, Ralf SOMMER^{1,2}, "Ansätze zur Entwicklung durchgängiger Entwurfsstrategien für MEMS," *edaWorkshop 14*, Hannover, 13.-14. Mai 2014, Tagungsband, VDE-Verlag, ISBN: 978-3-8007-3620-1, ¹Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, ²Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau.

Stefan HAMPL¹, Bianca LEISTRITZ¹, Benjamin SAFT¹, Eckhard HENNIG¹, Martin HOFFMANN², "Micromechanical, vertical comb-drive-structures for the construction of an electrostatic energy harvester," *Energy self-sufficient Sensors, 2014, 7th GMM-Workshop - Proceedings of*, pages 14 – 19, Print ISBN: 978-3-8007-3581-5, VDE Verlag GmbH, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Germany, Ilmenau, ²Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Mikromechanische Systeme, Germany, Ilmenau.

TAG, A.¹; WEIGEL, R.¹; HAGELAUER, A.¹; BADER, B.²; HUCK, C.; PITSCHI, M.²; KAROLEWSKI, D.³, "Influence of dissipated power distribution on BAW Resonators' behavior," *Ultrasonics Symposium (IUS), 2014 IEEE International*, vol., no., pp.2627,2630, 3-6 Sept. 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2014.0656> ¹Institute for Electronics Engineering University of Erlangen-Nuremberg, ²TDK Corporation, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH.

Benjamin SAFT, Eric SCHÄFER, André JÄGER, Stefan HAMPL, Bianca LEISTRITZ, Eckhard HENNIG, "Eine Systemarchitektur für ein integriertes elektrostatisches MEMS-Energy-Harvesting-Modul," *Analog 2014*, 14. GMM/ITG-Fachtagung, GMM-Fachbericht Band 80, Seite 60 – 65, CD-ROM, ISBN 978-3-8007-3639-3.

Georg GLÄSER, André JÄGER, "Konzept und Entwicklung eines Treiber-ASIC zur energie- und ressourceneffizienten Ansteuerung von OLED-Modulen," *Analog 2014*, 14. GMM/ITG-Fachtagung, GMM-Fachbericht Band 80, Seite 11 – 14, CD-ROM, ISBN 978-3-8007-3639-3.

S. HESSE¹, C. SCHAEFFEL¹, S. ZSCHAECK², C. AMENT², A. MUELLER³, E. MANSKE³, "Scan performance of nanopositioning systems with large travel range," *58th IWK Ilmenau Scientific Colloquium*, 8.09.2014 - 12.09.2014, Ilmenau, URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-069:6, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, ²Institute of Automation and Systems Engineering, Technische Universität Ilmenau, ³Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Technische Universität Ilmenau.

Fachartikel (Veröffentlichungen in Zeitschriften)

Stephan ZSCHÄCK¹, Steffen HESSE², Avid AMTHOR¹, Michael KATZSCHMANN², Christoph SCHÄFFEL², Christoph AMENT¹, "Vergleich der Scan-Performance bei Nanopositioniersystemen mit großem Bewegungsbereich," *tm – Technisches Messen, Oldenbourg Verlag*, Band 81, Heft 6, Seiten 335 – 342, ISSN (Online) 2196-7113, ISSN (Print) 0171-8096, DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/teme-2014-0358>, May 2014, ¹Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Germany, Ilmenau, ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau.

Gerrit KROPP, Michael MEISTER, "Neuentwicklung und Optimierung eines Treiber-ASIC für Energie- und ressourceneffiziente Ansteuerung von OLED-Modulen," in *Elektronik Praxis*, September 2014, Seite 30 – 32.

Vorträge und Posterpräsentationen

Wolfram KATTANEK¹, Sebastian UZIEL¹, Thomas ELSTE¹, Stephan GERLACH², Danilo HOLLOSI², Stefan GOETZE², "Energy-efficient High-Performance Acoustic Processing Unit," *Conference & Exhibition on Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, 24.03.2014 - 28.03.2014, <http://www.date-conference.com/date14/files/file/date14/ubooth/1322.pdf>, Dresden, Germany

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, D-98693 Ilmenau, Germany, ²Fraunhofer Institute for Digital Media Technology IDMT, Project Group Hearing, Speech and Audio Technology, D-26129 Oldenburg, Germany, Poster.

Georg GLÄSER, Eckhard HENNIG, "Timing Accurate Synthesis of Digital SystemC Components in a Mixed-Signal Environment," *CDNLive2014*, 19.05.2014-21.05.2014, München, Poster.

Georg GLÄSER, Gerrit KROPP, Michael MEISTER, "Neuentwicklung und Optimierung eines Treiber-ASIC für Energie- und ressourceneffiziente Ansteuerung von OLED-Modulen," *LED- und OLED Praxisforum*, 02.06.2014 - 03.06.2014, Würzburg, Vortrag.

Eckhard HENNIG, "Energieautarke intelligente Sensorik," *Technoloiekonferenz elmug4future*, 01.-02.07.2014, Friedrichroda, Vortrag.

Ralf SOMMER^{1,2}, Jacek NOWAK¹, "Systematic Design Strategies for Multi-physical Sensor Systems" *Sense.Enable. SPITSE-Symposium 2014*, 07.-11.07.2014, Ilmenau, Vortrag. ¹Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, ²Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau.

Elena CHERVAKOVA, Komla AGLA, Wolfram KATTANEK und Tino HUTSCHENREUTHER, "QoS-aware Ultra-low Power Wireless Sensor Networks," *Sense.Enable. SPITSE-Symposium 2014*, 07.-11.07.2014, Ilmenau, Vortrag.

Silvia KRUG¹, Jochen SEITZ¹, Hannes TÖPFER^{1,2}, Yulia LAPTEVA³, Mikhail S. KUPRIYANOV⁴, "Simulation Tools for Wireless Sensor Network Evaluation in Vehicular Environments," *Sense.Enable. SPITSE-Symposium 2014*, 07.-11.07.2014, Ilmenau, Vortrag.

¹Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland, ²Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, ³Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, ⁴Staatliche Universität für Elektrotechnik St. Petersburg «LETI».

J. BUMBERGER¹, H. MOLLENHAUER¹, P. REMMLER¹, O. MOLLENHAUER², T. HUTSCHENREUTHER³, H. TÖPFER⁴, P. DIETRICH¹, "Potentials, Challenges and Applications of Mobile Wireless ad-hoc Sensor Networks for Environmental Monitoring," *Workshop am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Kommissionssitzung der Kommission I, Bodenphysik und Bodenhydrologie*, 11.09.2014-12.09.2014, Leipzig, ¹Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Department Monitoring and Exploration Technologies, ²TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH, ³IMMS Institute for Microelectronic and Mechatronic Systems, ⁴Technische Universität Ilmenau, Department of Advanced Electromagnetics, Vortrag.

Stefan SCHRAMM, Michael RINK, Marco GÖTZE, "Zeitsynchronisation in drahtlosen Sensornetzwerken – Verfahren und Anwendungen," *IWK Mittweida*, 5.11.2014 - 6.11.2014, Vortrag.

Patente

Erteilte Patente 2014

DE102007037886 "Feldgeführter planarer Präzisionsantrieb mit einem luftgelagerten Läufer" der Erfinder N. Zeike, C. Schäffel, H.-U. Mohr, F. Spiller, S. Hesse, V. Bornmann

Offengelegte Patentanmeldungen 2014

DE102012215600 "Kapazitiver Energiewandler und Verfahren zum Betreiben eines kapazitiven Energiewandlers" der Erfinder B. Saft, B. Leistriz, S. Hampl, E. Hennig

DE102013205255 "Digitaler Temperatursensor" des Erfinders J. Tan

Förderung

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.
- Die Arbeiten des IMMS im Wachstumskern **CBS Customer Bautronic System** wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **0WKBD3C** enzeichen gefördert.
- Das Projekt **CoolConSens** wurde im Rahmen des Spitzenclusters Cool Silocon vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **13N10401** gefördert.
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **MARS** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **Förderkennzeichen 13N11760** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das Projekt **MEMS2015** wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen **16M3093** im Förderprogramm IKT 2020 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 durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **sMobility** wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen **01ME12076** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das ZIM-Projekt „Intelligente **Strommesszange EMCheck IMSZ I**“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen **KF2534508 DB2** aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



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



- Das Projekt "**ESUES-Energieeffizienzsteigerndes Flughafenvorfeld Steuer- und Überwachungs-System**" wurde durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen **TNA XI-3/2012** gefördert.
- Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben **EROLEDT** wird 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 Infrastrukturprojekt **MEMS-T-Lab** wurde gefördert vom Freistaat Thüringen unter dem Förderkennzeichen **12031-715** und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.
- Das Projekt **PRIMOS** wurde gefördert vom Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur unter dem Förderkennzeichen **B714-09060** und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.
- Das Projekt **SHS-Facility** wurde gefördert durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unter dem Förderkennzeichen **2010 FE 9073**.
- Das Projekt **USENEMS** wurde gefördert vom Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur unter dem Förderkennzeichen **B714-10012** und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Sozialfonds

- 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 diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben **3DNeuroN** wurde von der Europäischen Union unter dem Förderkennzeichen **296590** gefördert.
- Das Vorhaben **SMARTHIES** wurde von der Europäischen Union im Rahmen des FP7-ICT-2007-2 unter dem Förderkennzeichen **GA 223935** gefördert.



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



WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.