



IMMS

JAHRESBERICHT

2018

Inhalt

- 3 Vorwort
- 6 Neue Themenbereichsleiter
- 7 Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau
- 10 Nachwuchsförderung am IMMS verbindet Theorie und Praxis
- 17 Stimmen von Partnern
- 22 Ausstattung und neue Infrastruktur 2018

- 28 Forschungsthema CPS: Energieeffiziente und -autarke cyber-physische Systeme**
- 29 Highlights 2018 im Bereich CPS
- 48 **RoMulus** – UHF-RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren in I4.0-Anwendungen
- 54 Green-ISAS – Messumgebung zur dynamischen Charakterisierung des Leistungsverbrauchs von Ultra-Low-Power-Schaltungen
- 60 **Green-ISAS** – Entwurfsmethodik für applikationsspezifische elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester
- 69 **StadtLärm** – Lärm-Monitoring-System unterstützt städtische Verwaltung
- 77 **fast wireless** – Inverses Pendel demonstriert neue Übertragungskonzepte für 5G
- 86 Forschungsthema Integrierte Sensorsysteme für die Bioanalytik & Medizintechnik**
- 87 Highlights 2018 im Bereich Integrierte Sensorsysteme für die Bioanalytik
- 93 **ADMONT** – mikroelektronischer Kontakt-Bildsensor für die In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs

- 101 Forschungsthema MEMS: Mikroelektromechanische Systeme**
- 104 **RoMulus** – Tool für den effizienten Entwurf von dreidimensionalen MEMS-Beschleunigungssensoren

- 111 Zahlen, Strukturen und Belege**
- 112 Das IMMS in Zahlen
- 114 Organisation, Aufsichtsrat und Wissenschaftlicher Beirat
- 116 Lehrangebot, Veranstaltungen
- 118 Publikationen
- 128 * Förderung (Förderangaben für alle im Text mit * gekennzeichneten Projekte)
- 131 Abkürzungen
- 132 Impressum, Datenschutz (Hinweise zur anonymisierten Analyse verlinkter Inhalte)

Titelfoto: Teile eines im Projekt INSPECT* für die Krebsdiagnostik realisierten Testsystems. Proben werden direkt auf den Chip in einem Steckmodul in das an PCs anschließbare Gerät gegeben und analysiert. Fotos und Montage: IMMS.



Dipl.-Ing. Hans-Joachim Kelm, Prof. Dr. Ralf Sommer und Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

die Nase vorn haben – ohne eigene Forschung und Entwicklung für viele kleine und mittlere Unternehmen schwer bis unmöglich. Damit es trotzdem möglich wird, engagieren wir uns seit jeher als Transferinstitution, Forschungs- und Ausbildungseinrichtung und als Entwicklungsdienstleister.

Angesichts rasanter technologischer Entwicklungen haben wir das Jahr 2018 intensiv genutzt und in einem großen Projektteam eine Strategie für das IMMS erarbeitet, mit der wir dieser Rollenvielfalt auch 2030 gerecht werden und als einer der zentralen Partner im Innovationssystem des Freistaates Thüringen KMU voranbringen können.

Wichtigstes Ergebnis – mit vielen Forschungsthemen waren wir schon auf dem richtigen Kurs. Mit der Strategie als Kompass werden wir auf dem Weg bis 2030 aus den heutigen vielfältigen Ansatzpunkten unseres Forschungsportfolios und den über Jahre ausgebauten Kompetenzen den richtigen Fokus für Innovationen von morgen setzen.

Nehmen wir als Beispiel das Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme: Hier erforschen und entwickeln wir bereits seit langem besonders energieeffiziente mikroelektronische sowie eingebettete Systeme zur Erfassung, Verarbeitung und Kommunikation von Mess- und Steuerdaten. Auf dieser Basis werden wir gemeinsam mit unseren Partnern und deren Know-how für ihre Zielanwendung in den Bereichen Life Sciences und Automation zukunftsfähige Lösungen auf den Weg bringen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Wie das konkret aussehen kann, lässt sich aus Arbeiten ablesen, die wir in diesem Bericht vorstellen. Unter anderem haben wir 2018 im ADMONT-Projekt die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für ein optoelektronisches Testsystem abgeschlossen, mit dem künftig gezielte Entscheidungen für Brustkrebstherapien mit quantitativen Messungen untermauert werden sollen. Der Prototyp wird derzeit vom Projektpartner für Untersuchungen zu biochemischen Nachweisen mit Zellproben verwendet. Im Projekt RoMulus ist es uns gelungen, einen energieeffizienten UHF-RFID-Transponder-Chip zu realisieren, mit dem sich verschiedene handelsübliche digitale I2C-Sensoren batterieles und kostengünstig betreiben lassen. Darüber hinaus haben wir in der Forschergruppe Green-ISAS Ergebnisse erzielt, mit denen Industrie-4.0-konforme Sensorsysteme energieautark arbeiten können, indem sie über elektromagnetische Energie-Harvester versorgt werden und alle Bauteile und Funktionen höchst energieeffizient ausgelegt sind. Sensoriklösungen wie diese sind ein Schlüssel zu innovativen Geschäftsmodellen in der Industrie mit neuen Wertschöpfungsnetzwerken, datenbasierten Dienstleistungen und Plattformen.

Für diese und andere zukunftsweisende Lösungen möchten wir uns bei unseren Mitarbeitern bedanken, die sich mit ihrem Expertenwissen und ihren persönlichen Kompetenzen in das IMMS-Team einbringen und sich in konstruktiver und vertrauensvoller Zusammenarbeit für unsere gemeinsame Zukunft engagieren.

Die Nase vorn und den Stand der Technik maßgeblich erweitert zu haben, dafür wurde Georg Gläser mit dem „EDA Achievement Award 2018“ des edacentrums in Hannover ausgezeichnet. Darauf sind wir sehr stolz, ist doch Herr Gläser ein Musterbeispiel für einen Werdegang am IMMS vom studentischen Fachpraktikanten über die Betreuung seiner Bachelor- und Masterarbeit hin zu seiner wissenschaftlichen Mitarbeit und schließlich seiner Promotion zu den prämierten neuartigen Methoden für schnelle und fehlerfreie Entwürfe komplexer integrierter Schaltungen. Wir blicken voller Erwartungen auf die Forschergruppe IntelligEnt, die 2019 unter seiner Federführung mit künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen für den Entwurf von Mikroelektronik daran anknüpft.

Die Weichen für Erfolgsgeschichten wie diese hat Hans Joachim Kelm gestellt, der zum Februar 2019 die kaufmännische Geschäftsführung an Martin Eberhardt übergeben und sich in den verdienten Ruhestand verabschiedet hat. Wir und das Team des IMMS danken Herrn Kelm für über 20 Jahre herausragenden Engagements und

- 4 
- > *RoMulus:RFID*
- > *Green-ISAS:Test*
- > *Green-ISAS:EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus:MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

 *Hier können Sie in der PDF navigieren.*

Hier können Sie zusätzliche Infos abrufen. 

Mehr zum EDA Achievement Award.

Mehr Jahresberichte auf www.imms.de.

 *Jahresbericht*

für eine Zusammenarbeit, die durch hohe Sachkenntnis und Offenheit, große Zuverlässigkeit und Vertrauen geprägt war. Herr Kelm war seit 1998 am IMMS tätig, hat seit 2000 als kaufmännischer Geschäftsführer viele Entwicklungen von Anfang an begleitet und das Profil des Instituts mit geformt.

Wettbewerbsvorteile für Kooperationspartner zu erschließen, Nachwuchswissenschaftler zielgerichtet zu fördern, uns in Verbänden, Clustern und Gremien zu engagieren – für all das ist die institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen die Grundlage, für die wir uns im Namen des IMMS-Teams bedanken.

Um unserem Anspruch als Transferinstitution gerecht zu werden, reflektieren wir unsere Strategie und deren Umsetzung mit unserem Wissenschaftlichen Beirat und unserem Aufsichtsrat. Ein großes Dankeschön für Ihr Engagement!

Unseren Forschungspartnern – insbesondere der Technischen Universität Ilmenau – danken wir für die hervorragende Zusammenarbeit, die unser Schaffen nicht nur enorm bereichert, sondern durch die Verbindung der Forschungsthemen über verschiedene Wissenschaftsdisziplinen hinweg Synergieeffekte hervorbringt.

Wir danken allen Förderern, Freunden und Menschen, die uns in unserem Tun bestärken und nicht zuletzt all unseren F&E-Partnern, die gemeinsam mit uns in die Zukunft blicken und ohne deren Impulse und ohne deren Vertrauen viele Lösungen so nicht entstanden wären.

Eine kleine Auswahl dieser Lösungen finden Sie in diesem Bericht. Wir wünschen viel Spaß beim Lesen und freuen uns, wenn wir gemeinsam mit Ihnen an den nächsten Ideen für die Zukunft arbeiten können.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer
Wissenschaftlicher Geschäftsführer



Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

- 5 
- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr Jahres-
berichte auf
www.imms.de.

Neue Themenbereichsleiter in der Mikroelektronik sowie in der Industriellen Elektronik und Messtechnik

6

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung



2018 haben gleich zwei Kollegen ihre neue Aufgabe als Themenbereichsleiter angetreten. Das IMMS startete mit **Eric Schäfer** als Leiter des Institutsteils Erfurt und des Themenbereichs Mikroelektronik ins neue Jahr. Er kam 2007 als Student ans IMMS und wurde dort 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter. Herr Schäfer hat am IMMS bereits als Themengebietsleiter für Sensor- und Aktorelektronik im Bereich Mikroelektronik mit vielen Partnern des IMMS zusammengearbeitet und wichtige große Projekte zum Erfolg geführt.

Vor Eric Schäfer hatte Holger Pleß für fünf Jahre den Themenbereich Mikroelektronik und den Institutsteil Erfurt geleitet, nachdem er Themengebietsleiter für Optoelektronik war. Herr Pleß war nach insgesamt acht Jahren am Institut zurück in die Industrie gewechselt. Er hatte in seine Tätigkeit am IMMS seine langjährigen Erfahrungen aus der Mikroelektronikindustrie eingebracht und mit diesem Fokus Projekte sowie die Ausrichtung des Themenbereichs gestaltet. Das IMMS dankt Herrn Pleß für die engagierte, zuverlässige und vertrauensvolle Zusammenarbeit, wünscht ihm bei seinen aktuellen Aufgaben viel Erfolg und bleibt weiterhin mit ihm verbunden.



Michael Meister hat am 1. Juni 2018 die Leitung des Themenbereichs Industrielle Elektronik und Messtechnik von Dr. Klaus Förster übernommen, der sich in den Ruhestand verabschiedet hatte. Seit 2001 war Herr Meister als Student am IMMS tätig und wurde 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter. Ab 2014 hat Herr Meister am IMMS als Themengebietsleiter für Sensorik und Optronik im Bereich der optoelektronischen Messtechnik erfolgreich verschiedene Projekte geleitet und mit vielen Partnern zusammengearbeitet.

Herr Dr. Förster wurde von zahlreichen Kolleginnen und Kollegen verabschiedet, die mit ihm auf 20 Jahre am IMMS zurückblickten und ihm persönlich viele gute Wünsche für den neuen Lebensabschnitt mitgaben. Die Geschäftsleitung und das Team vom IMMS danken Herrn Dr. Förster für viele Jahre sehr engagierten Wirkens und eine Zusammenarbeit, die durch Vertrauen und große Zuverlässigkeit geprägt war. Es ist dem IMMS Freude und Verpflichtung, die von ihm aufgezeigten Ziele weiter zu verwirklichen.

Kontakt Eric Schäfer auf www.imms.de

Kontakt Michael Meister auf www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

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 2018 hat das IMMS mit 21 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 der Halbleiterbranche, in den Bereichen Life Sciences sowie Automatisierungs-, Umwelt- und Verkehrstechnik ist es ebenso in regionale und nationale Innovationsnetzwerke eingebunden wie in industrielle Cluster. Die Nutzung und Bündelung technologischer Kompetenzen und die Entwicklung gemeinsamer Marktstrategien liefert für die Forschungstätigkeit des Instituts und der TU Ilmenau wertvolle Praxisimpulse.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Gemeinsame Projekte

Forscherguppe MagSens*: MEMS-Sensoren zur Detektion schwächster Magnetfelder

Die von der TU Ilmenau geleitete Forscherguppe MagSens untersucht seit 2018 magnetoelektrische MEMS als Sensoren zur Messung schwächster Magnetfelder u.a. für Anwendungen in der Medizin. Herkömmliche ultrasensitive Magnetfeld-Sensoren erfordern aufwändige Kühlungen auf mindestens -196 °C. Das in MagSens erforschte Sensorprinzip basiert auf magnetostriktiv-piezoelektrischen Mehrschichtsystemen und wird diese Messungen ohne Kühlung ermöglichen. Das IMMS bringt sich u.a. in die Finite-Elemente-Modellierung und Simulation des Sensorprinzips ein.

*Mehr zu
MagSens auf
www.imms.de.*

Graduiertenkolleg „NanoFab“*: Hochdynamische Fertigung mit Nanometer-Präzision

Seit 2017 arbeiten 13 Doktoranden, darunter einer am IMMS, in dem von der DFG für 4,5 Jahre geförderten NanoFab-Graduiertenkolleg 2182 an Lösungen für die spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in erweiterten makroskopischen Arbeitsbereichen. Betreut werden sie von Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern der Technischen Universität Ilmenau und des IMMS unter der Leitung des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik der Fakultät Maschinenbau. Das IMMS entwickelt Lösungen für ein Antriebssystem, das mehrachsige hochdynamische Bearbeitungen von Objekten mit Nanometer-Präzision ermöglichen soll.

*Mehr zu
NanoFab auf
www.imms.de.*

Ziel in Musik war es, die funktionalen Eigenschaften mikroelektromechanischer Systeme bei hohen Frequenzen verstärkend, steuernd, oszillierend und schaltend in eine multiphysikalische Synthese und Integration komplexer Hochfrequenz-Schaltungen konsequent und konsistent einzubeziehen. In enger Kooperation mit der TU Ilmenau hat das IMMS hierfür Eigenschaften von MEMS erforscht, die Baustein hochfrequenter Systeme sind. Das IMMS hat konzentrierte Grundblöcke bzw. Bibliothekselemente entwickelt, die als Basis für die Systemsimulation, unter anderem unter thermischen Gesichtspunkten, dienen.

- > *RoMulus: RFID*
- > *Green-ISAS: Test*
- > *Green-ISAS: EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus: MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Forschergruppe Green-ISAS*:

Sensor/Aktor-Systeme als autonome Industrie-4.0-Komponenten

Mit dem Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme hat das IMMS von 2016 bis 2018 in der Forschergruppe Green-ISAS neue Methoden und Technologien erarbeitet, um Sensor/Aktor-Systeme zu autonomen Industrie-4.0-Komponenten auszubauen. Dazu wurden breit einsetzbare Basislösungen erforscht. Durch die Verknüpfung von Basismodulen lassen sich neue Systeme effizient entwerfen, aufbauen, testen und betreiben. Ansätze für eine hohe Eigenintelligenz, Vernetzung und Energieautarkie dieser Systeme wurden zusammengeführt und mittels zweier Demonstratoren validiert.

*Mehr zu
MUSIK auf
www.imms.de.*

*Mehr zu
Green-ISAS in
diesem Bericht.*

Forschungsprojekt fast-wireless*: Neue Übertragungskonzepte für 5G

Im Forschungsprojekt fast-wireless hat das IMMS von 2016 bis 2018 gemeinsam mit dem Fachgebiet Integrierte Kommunikationssysteme der Fakultät für Informatik und Automatisierung an neuen Übertragungskonzepten für die fünfte Generation im Mobilfunk (5G) gearbeitet. Mit ihnen sollen künftig mobile Geräte und Steuereinheiten für Anwendungen im Bereich des Internet der Dinge und Industrie 4.0 in Echtzeit und mit hoher Zuverlässigkeit kommunizieren.

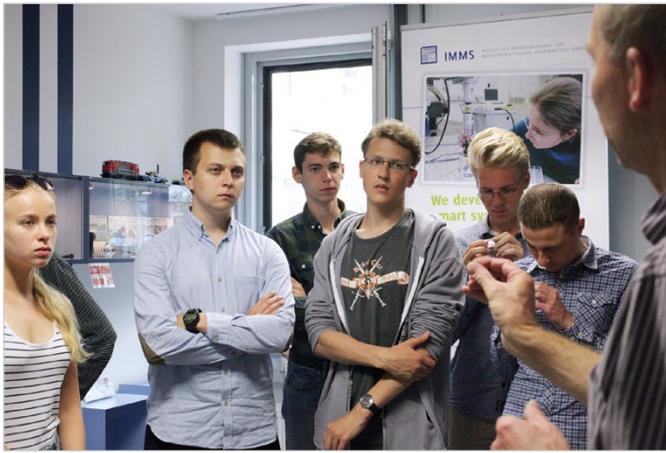
*Fachartikel zu
fast-wireless.*

IMMS als „Modellfabrik Migration“ des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau*

Das IMMS gibt als „Modellfabrik Migration“ Impulse zur Einführung von Industrie-4.0-Technologien für die Verbesserung von Anlagen und Prozessen. Konkret lassen sich beispielsweise Maschinen und Anlagen durch drahtlose und vernetzte Sensoren nachrüsten und damit Daten für die Entwicklung von innovativen Diagnose-, Wartungs- und Servicekonzepten ermitteln und verarbeiten. Durch universelle Elektronikplattformen für Industrie-4.0-Komponenten und durch Open-Source-Software lassen sich echtzeitfähige Lösungsansätze schnell und kostengünstig realisieren.

*Mehr zu Mittel-
stand 4.0 auf
www.imms.de.*

Jahresbericht



2018 nutzten u.a. über 40 Studenten der Sommerkurse der TU Ilmenau die Laborführungen am IMMS, um sich über passende Praktika und Betreuungsangebote zu informieren.

Foto: IMMS.

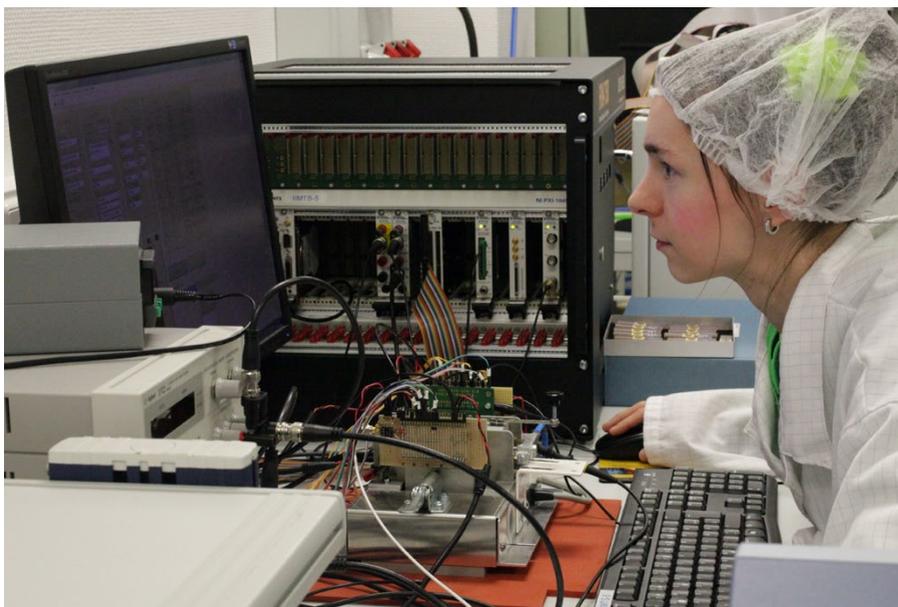
- 9
- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Gemeinsame Nachwuchsförderung

Das IMMS ergänzt nicht nur die Lehre an der TU durch umfangreiche Praxisangebote. Auch einige Lehrveranstaltungen werden von IMMS-Mitarbeitern gegeben. Darüber hinaus engagiert sich Prof. Sommer als Lehrender in der Grundlagenausbildung und im Masterstudium. Das IMMS fördert die Motivation und Ausbildung der Studenten durch seine praktischen und industrienahen Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika, Bachelor- und Masterarbeiten, Besichtigungstouren und Veranstaltungen. Beispielsweise nutzten 2018 über 40 studentische Besucher der TU-Sommerkurse die Laborführungen am IMMS, um sich über passende Praktika und Betreuungsangebote zu informieren.

Zum Themenangebot auf www.imms.de.

Auch dem kleinen Nachwuchs hat sich das IMMS gemeinsam mit der TU Ilmenau in Veranstaltungen zur Kinderuni gewidmet. In einer Vorlesung mit dem Titel „Was kann der Computer mit Musik und deiner Stimme machen?“ demonstrierte Prof. Sommer über 1200 Schülern im Alter von acht bis zwölf Jahren an vielen (Bei-)Spielen und Experimenten zum Mithören, Mitsehen und Mitmachen, wie aus Tönen Zahlen werden, sodass der Computer damit „rechnen“ und somit Songs und Sprache erkennen und sogar verändern kann.



Absolventin bei Alterungsuntersuchungen für ein Präzisions-Sensorinterface in einer Hochtemperaturumgebung für ihre am IMMS betreute Bachelor-Arbeit. Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Nachwuchsförderung am IMMS verbindet Theorie und Praxis

Im Zusammenhang mit laufenden Forschungsprojekten bietet das IMMS Studentinnen und Studenten der Ingenieurwissenschaften ständig die Betreuung zu einer umfangreichen Auswahl herausfordernder und praxisorientierter Themenstellungen für Praktika, Bachelor- und Master-Arbeiten an. Dabei wird theoretisch fundiertes Methodenwissen vermittelt und dieses frühzeitig mit der praktischen Umsetzung in Anwendungen verknüpft. Zudem bietet das Institut Trainingskurse und Firmenbesichtigungen an.

Es sind pro Jahr bis zu 40 Studenten als Praktikanten oder studentische Hilfskräfte am IMMS tätig oder schreiben hier ihre Abschlussarbeiten. 2018 wurden 36 Studentinnen und Studenten am IMMS betreut. Darüber hinaus arbeiteten sieben Mitarbeiter an ihrer Promotion. Der hohe Anteil von Studenten der TU Ilmenau am IMMS zeigt, dass die intensiven Bemühungen im Bereich der Grundlagenausbildung Früchte tragen. So finden regelmäßig hochmotivierte Studenten der TU mit hervorragenden Leistungen den Weg ans IMMS, was uns besonders freut. Auch Schüler erhalten bei Events und Praktika Einblicke in die Arbeiten des IMMS oder werden von den Wissenschaftlern bei Facharbeiten betreut.

Zum Themenangebot auf www.imms.de.

Die üblicherweise für einzelne Bachelor- und Master-Arbeiten vorgesehenen Bearbeitungszeiträume von zwei bis sechs Monaten sind meist viel zu kurz, um komplexe Aufgabenstellungen wie z.B. die Entwicklung einer mikroelektronischen Schaltung vom Entwurf bis zur Fertigung und Messung vollständig erlernen und durchführen zu können.

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 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.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Zum Themenangebot auf www.imms.de.

Nachwuchsevents 2018 am IMMS

Studententag im August in Erfurt bot alle Facetten der Mikroelektronik für Ingenieure von morgen

Das IMMS hat im Institutsteil Erfurt gemeinsam mit den Partnern X-FAB Semiconductor Foundries GmbH und Melexis GmbH im August 2018 einen Studententag im Zeichen der Mikroelektronik mit einem abwechslungsreichen Programm auf die Beine gestellt. Ziel war es, die von Prof. Dr. Ralf Sommer eingeladenen Studenten der TU Ilmenau für eine Laufbahn in der Mikroelektronik zu begeistern, die ganze Palette



Führung bei X-FAB zum Mikroelektronik-Studententag in Erfurt im August 2018. Das IMMS hatte im Institutsteil Erfurt gemeinsam mit X-FAB und Melexis ein abwechslungsreiches Programm auf die Beine gestellt, um Studenten für eine Laufbahn in der Mikroelektronik zu begeistern.

Foto: IMMS.

der Betätigungsfelder in Forschung und Industrie aufzuzeigen und ihnen zu vermitteln, dass in Thüringen viele Karrierewege auf diesem Gebiet in innovativen und international aufgestellten Unternehmen möglich sind. Die drei Partner nahmen die Studenten in Vorträgen und Laborführungen mit in die Halbleiterwelt mit dem Trend zu immer größeren Wafer-Durchmessern, immer kleineren Bauelementen und den damit verbundenen Herausforderungen, denen sich Ingenieure verschiedener Disziplinen dafür immer wieder stellen.

Der Tag begann mit Diskussionen und Fachvorträgen von Prof. Dr. Ralf Sommer und dem Mikroelektronik-Team des IMMS Erfurt zu aktuellen Forschungsprojekten und konkreten Themen, wie z.B. die Weiterentwicklung von Entwurfsmethoden für das Chip-Design oder die Charakterisierung von integrierten optischen biomedizinischen Sensoren für die In-vitro-Diagnostik, für die am IMMS ein studienbegleitendes, langfristiges Praxistraining für Studenten angeboten wird.

Weiter ging es bei der X-FAB mit einem Fachvortrag zu Anforderungen und Lösungen in der Halbleiterproduktion. Als sogenannte Foundry fertigt X-FAB analog-digitale integrierte Schaltkreise auf Siliziumwafern an sechs verschiedenen Standorten in Deutschland, Frankreich, Malaysia und den USA mit insgesamt über 3.800 Mitarbeitern, davon 1.000 in Deutschland. Bei der anschließenden Führung durch die Fertigung wurden Einblicke in die Halbleiterherstellung gewährt, die Produktionsabläufe beim Blick in den Reinraum erklärt und viele Fragen der Studenten beantwortet.

Danach ging es zur Melexis, die als internationales Unternehmen mit mehr als 1.500 Mitarbeitern verteilt auf 20 Standorte in 14 Ländern mikroelektronische Halbleiterslösungen im Automotive-Bereich in verschiedenste Anwendungen bringt, wie z.B. zur Fahrgastraumbeleuchtung. Fachvorträge behandelten den Weg der Mikrochipentwicklung sowie Herausforderungen bei der Verifikation entwickelter Chips. Nach den Führungen mit mehreren Stationen in Fehleranalyse- und Applikations-Laboren, die zahlreiche Fragen beantworteten, gingen die Studenten mit vielfältigen Informationen und Eindrücken nach Hause.

Führungen wie die bei Melexis (links) sowie Vorträge wie am IMMS (rechts) gab es zum Mikroelektronik-Studententag in Erfurt im August 2018. Fotos: IMMS.



- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.

Besuch der Sommerkurse der TU Ilmenau im August und September

Im August und September 2018 besuchten insgesamt 40 Studentinnen und Studenten aus der Russischen Föderation, Belarus, Ungarn, Mazedonien, Moldau, Polen, Tschechische Republik, Iran, Mexiko, Argentinien und Hong Kong das IMMS. Die Studenten von Partnerhochschulen der TU Ilmenau belegen u.a. Fachrichtungen wie Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik und kamen zu Deutschkursen an die TU, um sich auf ihr Austauschstudium oder Fachpraktikum vorzubereiten.

In den Vorträgen und Laborführungen am IMMS wurden ihnen Beispiele und Möglichkeiten für betreute Arbeiten am Institut nähergebracht und konkrete F&E-Projekte vorgestellt, in die sich Studenten am IMMS bereits einbringen. Unter anderem ging es um Digitalisierungslösungen zur Verbesserung von Anlagen und Prozessen durch nachrüstbare drahtlose und vernetzte Sensorik, um universelle Elektronikplattformen für Industrie-4.0-Komponenten und um Open-Source-Software für echtzeitfähige Lösungsansätze. Im MEMS-Labor wurde auch demonstriert, wie mit einem Laser-Doppler-Vibrometer kleinste Strukturen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften berührungsfrei untersucht werden können.

Schülerbesuch im Januar

Im Januar 2018 waren Grundschüler der Assisi-Schule Ilmenau auf Entdeckungsreise durch das IMMS unterwegs. Sie machten erste Versuche im Programmieren, erfahren anhand von Spielen und Versuchsaufbauten etwas über Sensorik, wo und wie sie angewendet, entsprechend entwickelt, programmiert und vernetzt wird. Direkt am Arbeitsplatz bekamen die Schüler Einblicke, wie der Alltag eines Forschers und Entwicklers am IMMS aussieht.



Schüler der Assisi-Schule Ilmenau auf Entdeckungsreise durch das IMMS im Januar 2018.

Foto: IMMS.

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.



Daniel Molina Bravo,
M.Sc., Embedded-
Software-Ingenieur
am IMMS.

Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Stimmen von Kollegen

Daniel Molina Bravo, M.Sc., Embedded-Software-Ingenieur am IMMS

„Als ich im Oktober 2015 von Kolumbien nach Deutschland kam, entschied ich mich, mein Masterstudium an der Technischen Universität Ilmenau aufzunehmen. Währenddessen hatte ich die Möglichkeit, an meinen Studienarbeiten unter der Leitung von Dr. Silvia Krug zu arbeiten. Durch sie kam ich auf die Idee, am IMMS als studentische Hilfskraft anzufangen, um mein Wissen ständig zu erweitern und gleichzeitig neue Ideen im Bereich Delay Tolerant Networks (DTNs) und Wireless Sensor Networks (WSNs) einzubringen, eine Gelegenheit, bei der ich nicht zögerte, sie zu nutzen.“

Ab Juli 2017 begann ich als studentische Hilfskraft am IMMS. Das erste Forschungsziel war die Implementierung des Standards IEEE 802.15.4 in Omnet++, einem Simulationswerkzeug, das für WSN weit verbreitet ist und dem das Protokoll 802.15.4 fehlte. Durch diese Implementierung konnte man besser verstehen, wie sich das Protokoll in verschiedenen Szenarien verhält. Als zweites Forschungsziel habe ich mich auf die Anpassung von Contiki OS an die ATmega256RFR-Chips konzentriert.

Von dem Moment an, als ich beim IMMS anfang, begann ich, den Forschungsgeist, der das IMMS ausmacht, in mich aufzunehmen. Deshalb wuchs bis zum Abschluss meines Masterstudiums meine Motivation und mein Interesse, weiterhin mit dem IMMS zusammenzuarbeiten, nur nicht mehr als Student, sondern als Mitarbeiter. So begann ich im April 2018 am IMMS als Embedded-Software-Ingenieur zu arbeiten.

Ab da hieß es also für mich, weiter lernen und meine Kenntnisse und Fähigkeiten im Bereich der drahtlosen Sensornetze vertiefen zu können. Das Kennenlernen

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.

neuer Tools, Hardware und neuer Wege zur Durchführung von Programmierprozessen war die erste Motivation, die ich bekam. Ich muss sagen, dass das letzte Jahr ein sehr interessantes Jahr für mich war, und das IMMS war der Hauptgrund dafür.

Seit ich angefangen habe zu arbeiten, habe ich mich immer von meinen Kollegen unterstützt gefühlt, die mich sehr gut aufgenommen haben. Sie wurden schließlich meine Mentoren und zeigten mir neue Wege, Dinge zu tun und den Wunsch nach Neugier zu entwickeln. Ich konnte gleich in zwei Projekte einsteigen, in eine Lösung zum Test von Kommunikationskabeln und in eine Implementierung eines drahtlosen Sensornetzwerks auf der Nordic-Plattform. Dieser Start hat mich auf einem Niveau gefordert, von dem ich nicht wusste, dass ich es beherrschen kann.

Ich danke dem IMMS für die Unterstützung, die es mir gegeben hat, und dafür, dass es meinen Horizont, meinen Geist und meine Ideen erweitert hat.“

Maximilian Wiener, M.Sc., Analog IC Design Engineer am IMMS

„Den ersten Kontakt zum IMMS hatte ich bereits im 5. Semester. Durch Prof. Sommer bekam ich einen Einblick in die vielseitigen Tätigkeitsfelder des Instituts. Mit gewecktem Interesse bewarb ich mich für eine Stelle als studentische Hilfskraft, um die im Studium erworbenen theoretischen Fertigkeiten durch regelmäßige praktische Tätigkeiten in der Abteilung Industrielle Elektronik und Messtechnik zu vertiefen. Im 7. Semester folgten schließlich Fachpraktikum und Bachelor-Arbeit, welche ich am Institutsteil Erfurt im Fachbereich Mikroelektronik zum Thema ‚Entwurf eines Ultra-Low-Power Ringoszillators für den Einsatz in Time-to-Digital-Convertern‘ anfertigte. Parallel zum Master-Studium setzte ich dort meine Tätigkeiten als studentische Hilfskraft fort, um das Ergebnis meiner Bachelor-Arbeit in ein abgeschlossenes

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.



Maximilian Wiener,
M.Sc., Analog IC
Design Engineer
am IMMS.

Foto: IMMS.

Schaltungsdesign zu überführen. Damit trug ich zum Entwurf eines Sensor-Chips bei, welcher im Projekt „RoMulus“ entstand. Ziel dieses Projekts ist es, robuste Sensoren zu entwerfen, welche zur Zustandsüberwachung in Industrie-4.0-Anwendungen eingesetzt werden können. Schließlich folgte meine Master-Arbeit zum Thema ‚Systementwurf eines kapazitiven Low-Power Feuchtesensors mit adaptiver Auflösung für den Einsatz in der energieautarken Funksensorik‘. Die individuelle Themenfindung, fachliche Unterstützung und Anwendung der bislang erworbenen Fertigkeiten ermöglichten mir hierbei einen hervorragenden Einstieg. Größere Herausforderungen boten mir dabei die Möglichkeit, meinen Horizont zu erweitern, da es neue, komplexere schaltungstechnische Problemstellungen zu lösen galt.

Unmittelbar nach der Verteidigung der Master-Arbeit ergriff ich die Chance, meine Tätigkeiten am Institut weiterführen zu können: Seit Dezember 2018 arbeite ich als Schaltungsdesigner für analoge, integrierte Schaltungen. Die mehrjährigen Erfahrungen, welche ich als Student sammeln konnte, haben mir hierbei einen fließenden Übergang zum Mitarbeiter und einen bestmöglichen Berufsstart ermöglicht.

Durch die studienbegleitenden Tätigkeiten am Institut, die Arbeit an verschiedenen Themenstellungen sowie in verschiedenen Fachbereichen lernte ich die Unternehmensstruktur und die Mitarbeiter des Instituts schnell kennen. Die flexiblen Arbeitszeiten und interdisziplinären Tätigkeitsfelder förderten hierbei meine fachliche und persönliche individuelle Entwicklung. Die Arbeit in einem internationalen Team sowie mit Kollegen anderer Fachrichtungen ermöglicht es mir, meine persönlichen Fähigkeiten kontinuierlich zu erweitern und das stets neu erworbene Wissen zu vertiefen.

Daher lautet mein persönliches Fazit: Das IMMS bietet sehr gute Möglichkeiten, seine Kompetenzen in interessanten Themenfeldern mit Bezug zur Praxis zu erweitern – als Student und auch als Mitarbeiter.“

- > *RoMulus: RFID*
- > *Green-ISAS: Test*
- > *Green-ISAS: EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus: MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

*Mehr Stimmen
von Kollegen:
www.imms.de.*



Stimmen von Partnern

Vertretern des Projektbeirats der Forschergruppe Green-ISAS wurden am IMMS Demonstratoren zu Industrie-4.0-Grundlagentechnologien präsentiert. Foto: IMMS.

Dr. Katja Nicolai, IL Metronic

„Wir von IL Metronic entwickeln, produzieren und vertreiben kundenspezifische Glasdurchführungen sowie Sensoren, Sensormodule und elektronische Geräte in den Bereichen UV-Sensorik und Feuchte-sensorik. Weiterhin arbeiten wir mit Universitäten und wissenschaftlichen Instituten permanent an Forschungs- und Entwicklungsthemen. Vor diesem Hintergrund habe ich als Sprecherin des Industriebeirats der Thüringer Forschergruppe Green-ISAS das IMMS bei seinen Arbeiten begleitet. Es ging um Grundlagentechnologien für autonome Industrie-4.0-konforme Sensor/Aktor-Systeme – ein Thema, das nicht nur für uns, sondern auch für viele Firmen aus unserem Umfeld interessant ist.“



Dr. Katja Nicolai, Leiterin
Forschung und Entwicklung
IL Metronic Sensortechnik GmbH.
Foto: IL Metronic.

*Mehr zu
Green-ISAS in
diesem Bericht.*

Jahresbericht

© IMMS 2018

Die Unternehmen wünschen sich eine vernetzte, automatisierte und flexible Produktion, um effizienter hohe Qualität bieten zu können. Dazu muss man an vielen Stellen viele Mess- und Steuerdaten erfassen, verarbeiten und transportieren. Die Maschinenparks in den Firmen sind dafür oft noch nicht ausgelegt, lassen sich aber auch nicht ohne weiteres mit der notwendigen Sensorik nachrüsten. Diese Sensorik kann nicht einfach überall ergänzt werden, sondern müsste in vielen Fällen autark an einer Anlage arbeiten. Dort muss die Sensorik zunehmend komplexe Aufgaben erfüllen, darf dabei aber nur wenig Energie verbrauchen. Dieser Spagat ist noch nicht ohne weiteres möglich, hier stößt die Technologie häufig an Grenzen und es ist noch einiges an Forschungsarbeit notwendig. Kleine und mittlere Unternehmen können das allerdings nicht im Alleingang leisten.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Die Wissenschaftler des IMMS haben uns von Beginn an im direkten Dialog und bei regelmäßigen Status-Workshops Zwischenstände ihrer umfangreichen Arbeiten präsentiert, die genau an diesen Anforderungen ansetzen. In nur zwei Jahren haben sie verschiedene Lösungen erforscht und entwickelt, um smarte Sensorik energieeffizienter zu machen, für diese Systeme mehr Energie bereitzustellen und den Ressourcenbedarf durch neue Ansätze für Systemarchitekturen und intelligentes Energiemanagement zu optimieren. Unter anderem entstanden zwei Chips mit sehr niedrigem Energiebedarf sowie eigens dafür entwickelte Messtechnik, energieautarke smarte Sensorsysteme mit intelligentem Energiemanagement und ein Design-Tool für anwendungsspezifische Energie-Harvester, die aus Vibrationen die Energie für autarke smarte Sensorik liefern, die Maschinen und Anlagen überwachen sollen.

*Mehr zu
Sensorsystemen:
www.imms.de*

*Mehr zu Chip-
entwicklungen:
www.imms.de*

Aus meinem Blickwinkel sprechen die zahlreichen, in vielen Fällen mit Demonstratoren validierten Ergebnisse für sich. Die energieautarken und drahtlosen Lösungen bahnen den Weg für einfache und kostengünstige Nachrüstmöglichkeiten. Anwendungen sehe ich über Industrieprozesse hinaus unter anderem auch bei Transport und Logistik.

*Mehr zu System-
integration:
www.imms.de*

Wir freuen uns auf weitere Themen des IMMS und auf die angestrebte Zusammenarbeit in einem gemeinsam beantragten Forschungsprojekt.“

*Mehr zu
Green-ISAS in
diesem Bericht.*

„Am IOM werden u.a. Mechanismen der Wechselwirkung chemisch reaktiver Atmosphärendruck-Plasmajets untersucht. Daraus werden deterministische Bearbeitungstechnologien zur ultrapräzisen Formgebung von Oberflächen bis hin zu industrietauglichen Fertigungsketten entwickelt. Hauptanwendungsfeld der Technologien ist die Herstellung komplexer Oberflächenformen wie Asphären und Freiformflächen für Ultrapräzisionsoptiken, die mit Fertigungstoleranzen von wenigen Nanometern gefertigt werden müssen. Hierfür werden auch strahlbasierte Bearbeitungswerkzeuge wie Plasmajetquellen und deren Wirkmechanismen experimentell erforscht und weiterentwickelt.

Für eines unserer Anwendungsprojekte, welches vom AiF/FEI gefördert wurde, sollte ein Demonstratorgerät für ein 3-Achs-Positioniersystem entwickelt und realisiert werden, mit dem ein Plasma-Kopf über ein Werkstück hinweg mit vorgegebenen Pfaden zu bewegen ist.

Das IMMS hat uns mit der Erarbeitung des gesamten Gerätekonzepts inklusive Mechanik-Hardware, EDV-Hardware und Software unterstützt, dieses Konzept umgesetzt und den Prototyp entwickelt, aufgebaut, getestet und bei uns im Haus in Betrieb genommen.

In enger Absprache haben die Partner vom IMMS unsere Anforderungen in die Konzeption einfließen lassen und für einen kostenoptimierten Ansatz auch kommerziell verfügbare Teillösungen recherchiert, ausgewählt und implementiert.

Mit dem entstandenen Demonstratorgerät sind wir äußerst zufrieden. Dazu hat neben der ausgewiesenen Kompetenz für Antriebstechnik und Erfahrung mit Entwicklungsdienstleistungen für Forschungsinstitute die professionelle, zielgerichtete und konstruktive Herangehensweise des IMMS beigetragen. Wir bedanken uns für die hervorragende Zusammenarbeit und werden für künftige Projekte gern wieder auf die Expertise des IMMS zurückgreifen.“



Prof. Dr. Thomas Arnold, Gruppenleiter Ultrapräzisionsformgebung mit Plasmen und Ionen, Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. Foto: © Arnold.

„Wir arbeiten auf den Gebieten der interaktiven 3D-Visualisierung und des Transfers von Daten in CAD und GIS in der Geodäsie, Industrie, Vermessung, Geoinformation und Infrastruktur unter anderem für Versorgungsunternehmen, Vermessungsämter und -büros.

Im Projekt StadtLärm haben wir mit dem IMMS, dem Fraunhofer IDMT und der Bischoff-Elektronik

GmbH ein neuartiges Lärm-Monitoring-System entwickelt. Es erfasst permanent und über mehrere in Jena verteilte Sensoren großflächig Schalldaten und liefert der städtischen Behörde Pegel und Typ von Lärmereignissen als Entscheidungshilfe. Unser Part war es, alle Daten als Lärm-Raum-Modelle in eine neuartige Anwendung zu bringen, in der sie sich webbasiert bearbeiten lassen und dreidimensional in Karten und über Diagramme dargestellt werden.

Der Input für unsere Anwendung kam über die zentrale Datendrehscheibe, die das IMMS als Gesamtsystem-Kommunikationsarchitektur mit dem offenen Standard MQTT realisiert hat. Das dortige Publish/Subscribe-Prinzip hat das IMMS für eine effiziente Kommunikation mit einer hierarchischen Struktur ausgestaltet, die erweiterbar ist, sobald neue Komponenten hinzukommen. Zudem hat das IMMS MQTT so eingesetzt, dass der Anwender damit auch Abfragen mit unserer Anwendung durchführen, also z.B. einen Zeitbereich auswählen und die entsprechenden Daten visualisieren kann. Die vom IMMS implementierte Administrationskomponente ist mit Java/Kotlin im Spring-Framework realisiert. Dort registrieren sich alle Lärm-Sensoren, werden im Verzeichnis mit Status gelistet und bieten so eine gute Hilfestellung für unsere Anwendung. Neue Sensoren können damit vom Nutzer einfach eingebunden werden.

Wir fanden nicht nur den Architekturentwurf des IMMS als solchen überzeugend, sondern auch die Unterstützung bei der Anbindung unserer Anwendung an den MQTT-Standard. Sowohl beim gemeinsamen Feldtest in Jena als auch während der gesamten Projektlaufzeit standen uns die Partner vom IMMS mit schneller Unterstützung bei Fragen und Problemen zur Seite. Wir konnten uns jederzeit abstimmen und haben uns in gemeinsamen Workshops zur Systemkonzeption und Umsetzung ausgetauscht. Für die hervorragende Zusammenarbeit im Projekt möchten wir uns herzlich beim IMMS bedanken und freuen uns auf die nächsten gemeinsamen Aktivitäten.“

www.john-software.de

www.vis-all.de



Dipl.-Ing. Dirk-Hendrik John, Geschäftsführer der Software-Service John GmbH. Bildrechte: Software-Service John GmbH.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

*Details
im StadtLärm-
Fachartikel.*

*Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de.*



Wafer-Test am IMMS. Foto: IMMS.

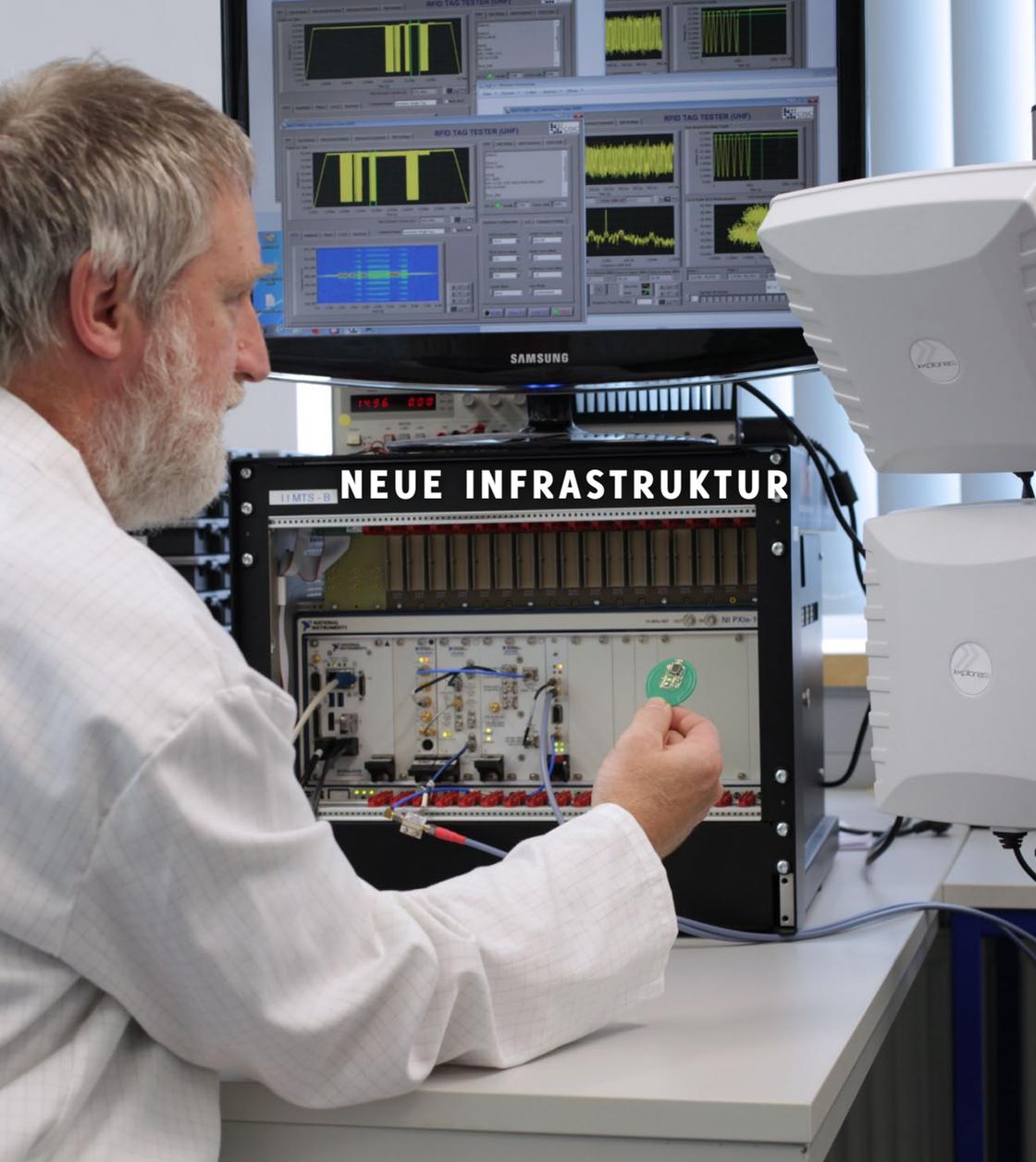
Hans-Peter Kraus, COO, Productivity Engineering GmbH / Serma Group

„Wir bieten seit 20 Jahren Design und Produktion spezifischer Schaltungen insbesondere für die industrielle Automatisierung, Medizintechnik sowie den Messgerätebau an. Unsere Kunden erhalten auf Wunsch alles für analoge und Mixed-Signal-ASICs aus einer Hand – vom Design bis zum kompletten Supply Chain Management in der Produktion.

Unser ISO-zertifiziertes Supply Chain Management koordiniert und überwacht den kompletten Ablauf von der Wafer-Herstellung bis hin zur Auslieferung des

fertigen Produktes mit allen notwendigen Testanalysen sowohl beim Prototyping als auch beim Serienprodukt. Alle erforderlichen Tests sind Bestandteil der Wertschöpfungskette.

Wir haben das IMMS bereits 2014 in diese Produktionskette als Testdienstleister für Partner in der Industrie eingebunden. Das IMMS entwickelt dabei speziell angepasste Testumgebungen für Wafer Tests und Final Device Tests, führt diese Tests durch und bietet darüber hinaus auch professionelle Unterstützung bei der Testoptimierung und Yield-Ausbeute an. Wir bieten unseren Kunden hohe Liefertreue und hervorragende Qualität bei der Belieferung von Bauelementen und bauen durch unser flexibles Dienstleistungsmodell und kurze Kommunikationswege langjährige Partnerschaften auf. Genau diesen Anspruch erfüllt unser Partner IMMS. Wir können uns nicht nur auf eine gleichbleibend hohe Qualität, höchste Termintreue und flexible Reaktionen auf applikationsbedingte Änderungen verlassen, sondern profitieren von der proaktiven Zusammenarbeit mit Ideen und Verbesserungsvorschlägen und können das IMMS daher uneingeschränkt als Testdienstleister für die Industrie empfehlen.“



Am IMMS wurde 2018 ein RFID-Prüfstand aufgebaut, um den weitverbreiteten Standard RFID für vielfältige Einsatzszenarien hinsichtlich Empfindlichkeit, Energiebedarf, erzielbare Reichweite und RFID-Protokolle bewerten und um Leistungsabhängigkeiten erfassen zu können. Foto: IMMS.

Diese im Vorhaben REMEDIA angeschaffte Geräteinfrastruktur wurde vom Freistaat Thüringen unter der Richtlinie zur Förderung der Forschung, Kennzeichen 2018 FGI 0008, gefördert.

Jahresbericht

© IMMS 2018

Um unsere Partner 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 verfügt über eine umfangreiche Ausstattung für den Entwurf, die Charakterisierung und den Test der am Institut entwickelten Systeme bzw. für Testdienstleistungen. Das Spektrum deckt dabei die unterschiedlichen Systemebenen ab – begonnen bei Materialparametern, vom Transistor über Baugruppe bis hin zu komplexen Applikationen.

REMEDIA* – Erweiterung der Messtechnik für biomedizinische Applikationen

Für seine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich Sensorsysteme für die Bioanalytik und Medizintechnik hat das IMMS 2018 Fördermittel des Freistaats Thüringen in Materialien und Geräte investiert, mit denen ultra-violettes Licht detektiert und beeinflusst werden kann, und mit denen RFID-Komponenten auf einem Prüfstand charakterisiert werden können. Mit dieser Messtechnik hat das IMMS seine Forschungsarbeiten für die Entwicklung von Point-of-Care-Testsystemen (POCT) wesentlich vorangebracht.

Diese POCT-Systeme sollen künftig Ärzten eine schnelle und sichere Vor-Ort-Diagnose mit Gewebe- oder Flüssigkeitsproben eines Patienten ermöglichen und langwierige, teure Diagnoseverfahren in zentralen Laboren ablösen.

Für POCT-Systeme entwickelt das IMMS v.a. anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise (ASICs) in Form von Sensor-ASICs, die Probenparameter u.a. mit UV-Licht erfassen, und in Form von RFID-ASICs, die Messwerte zu einem Auswertegerät drahtlos übertragen. Mit der neuen Messtechnik lassen sich applikationsspezifische Umgebungsbedingungen für Sensor- und RFID-ASICs schaffen, die eine gezielte technische Anpassung sowie eine Verkürzung der Iterationszyklen ermöglichen.

Materialien und Geräte zur Beeinflussung und Detektion von UV-Licht

UV-Licht wird häufig zur Detektion biochemischer Nachweisstoffe eingesetzt. Um neuartige, innovative bioanalytische POCT-Systeme aufbauen zu können, müssen sich daher optische Parameter gezielt bestimmen und beeinflussen lassen. Die Erfassung der Lichtleistung, die Verteilung der Intensität, die Strahlformung und der Ein-

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zur
Ausstattung auf
www.imms.de

fluss des Einfallswinkels sind wesentlich, um ein geeignetes UV-Licht-Eingangssignal generieren und charakterisieren zu können. So konnten dank der neuen Messtechnik beispielsweise in den Forschungsprojekten ADMONT und INSPECT die notwendigen homogenen Beleuchtungsintensitäten für die dort entwickelten POCT-Systeme erreicht werden.

RFID-Prüfstand

Die Datenschnittstelle ist für Systeme wesentlich, die direkt beim behandelnden Arzt eingesetzt werden sollen. Um vielfältige Einsatzszenarien adressieren zu können, werden daher für die POCT-Systeme einfache, weitverbreitete Standards wie RFID verwendet. Um diese drahtlose Datenschnittstelle zu verifizieren, wurde am IMMS ein RFID-Prüfstand aufgebaut, um Empfindlichkeit, Energiebedarf, erzielbare Reichweite und RFID-Protokolle bewerten und Leistungsabhängigkeiten erfassen zu können. Die erstellten Messaufbauten konnten bereits in den Forschungsprojekten ADMONT und RoMulus zur Optimierung, Fehlersuche oder Charakterisierung einzelner Komponenten des RFID-Signalpfads eingesetzt werden.

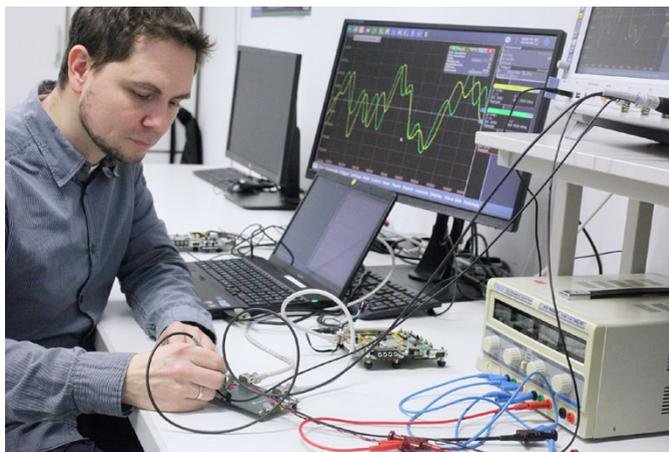
- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zur
Ausstattung auf
www.imms.de

IMMS ist erste I4.0-Testumgebung Thüringens – Kooperation für KMU vom BMBF gefördert

Unternehmen können ihre Industrie-4.0-Entwicklungen unter realistischen Bedingungen testen

Das IMMS wurde im Februar 2018 von der Nationalen Kontakt- und Koordinierungsstelle „Industrie-4.0-Testumgebungen für KMU – I4KMU“ als erste Thüringer Testumgebung klassifiziert. Die vom BMBF geförderte Initiative I4KMU unterstützt und



Beispiel für eine I4.0-Testumgebung: Voruntersuchungen für Lösungen, mit denen sich Datenleitungen in laufenden Industrieanlagen kostengünstig und kontinuierlich auf Fehler überprüfen lassen.

Foto: IMMS.

begleitet kleine und mittlere Unternehmen auf dem Weg in das digitale Industriezeitalter mit einem bundesweiten Netz aus bis dato 50 solcher I4.0-Testumgebungen. Dort können KMU ihre entwickelten digitalisierten Prozesse und Produkte, innovativen Systemansätze und damit zusammenhängenden vernetzten Geschäftsmodelle unter realistischen Bedingungen testen und zur Produktreife bringen. Die in der Regel an Forschungseinrichtungen angesiedelten Testumgebungen verfügen neben einer technisch breiten Infrastruktur über die notwendigen Kompetenzen, um in I4KMU-Projekten gezielte Impulse für die Weiterentwicklung der von den Unternehmen initiierten Lösungen zu geben. Die Bewerbung des IMMS als I4.0-Testumgebung wurde aufgrund der Expertise im Bereich Industrie 4.0, der vorhandenen I4.0-Hard- und Software, digitalisierter Prozesse und der Möglichkeiten für realistische Testbedingungen durch die I4KMU-Initiative bestätigt. Ein Alleinstellungsmerkmal ist dabei das am Institut vorhandene Testlabor für Time Sensitive Networking (TSN*).

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

I4.0-Testumgebung am IMMS

Die I4.0-Testumgebung des IMMS beinhaltet Planungs- und Simulationswerkzeuge, das TSN-Testlabor, in dem entsprechende Komponenten und Produkte für echtzeitkritische und datenintensive cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) untersucht werden können, Server und Cloud mit entsprechender Rechenleistung und Speicherkapazität, mobile Endgeräte, Elektroniklabore, eine mechanische Werkstatt sowie Technik für additive Fertigungsverfahren und zur Untersuchung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

*Mehr zum
TSN-Labor auf
www.imms.de*

KMU profitieren von der Expertise des IMMS im Bereich Industrie 4.0

Das IMMS erarbeitet bereits seit Jahren Industrie-4.0-Lösungen zur vernetzten Erfassung, Verarbeitung und Kommunikation von Mess- und Steuerdaten sowie zur Automation, Steuerung und Regelung von Maschinen und Industrieanlagen. Hierfür entwickelt das IMMS energie- und ressourceneffiziente Sensorsysteme, mechatronische Präzisionsaktoren sowie eingebettete Hardware/Software-Komponenten und Systeme. Diese kommunizieren in Echtzeit über ein Datennetzwerk und interagieren mit der realen Welt. Damit können Anwender komplexe Automatisierungslösungen realisieren und Wertschöpfungsketten effizienter gestalten. Das Institut forscht kontinuierlich an neuen Ansätzen für solche cyberphysischen Systeme. Diese intelligenten Lösungen vereinen Elektronik, Mechatronik und Software. Sie bieten ein hohes Innovationspotential und den Zugang zu neuen Anwendungen.

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de*

[Jahresbericht](#)

Für Fragen rund um ihre I4.0-Entwicklungen können sich Unternehmen direkt am IMMS oder bei der Nationalen Kontakt- und Koordinierungsstelle „Industrie-4.0-Testumgebungen für KMU – I4KMU“ informieren. 2018 wurden am IMMS mehrere Beratungsgespräche mit KMU geführt, für die ab 2019 gemeinsame Projekte angestrebt werden.

PraezEm* – Messtechnik für die Untersuchung von Einflussfaktoren auf Präzision und elektromagnetische Empfindlichkeit

Das IMMS hat 2018 dank der Unterstützung des Freistaats Thüringen in Messtechnik investiert, mit der mechanische und elektronische Bauteile sowie Baugruppen für stetig steigende Anforderungen in Forschungs- und Entwicklungsprojekten evaluiert werden können. Ansprüche an mechanische Bauteile, insbesondere an Antriebs- und Führungskomponenten, werden durch die steigende erforderliche Genauigkeit immer höher. Auch für elektronische Komponenten wachsen die Anforderungen bezüglich der Energieeffizienz, immer kleiner werdender Betriebsspannungen sowie vermehrt eingesetzter Funkkommunikation. Diese bewirken immer geringere Toleranzen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), Funktion und Verwendbarkeit der Komponenten.

3D-Koordinatenmesstechnik

Um Funktionsstörungen in hochpräzisen Gesamtsystemen auszuschließen, müssen vor dem Zusammenbau die von Forschungspartnern zugelieferten Teile und Baugruppen auf Maßhaltigkeit sowie die Einhaltung der Materialvorgaben geprüft werden. Das betrifft insbesondere die Ebenheit von Führungsflächen, die Geradheit von Füh-



Diese im Vorhaben PraezEm* mit Mitteln des Freistaats Thüringen beschaffte 3D-Koordinaten-Messtechnik erlaubt innerhalb von 600 x 300 x 200 mm³ eine Messgenauigkeit von $\pm 8 \mu\text{m}$. Foto: IMMS.



- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt

* Förderung

Kontakte zu
I4KMU unter
www.imms.de

Mehr zur
Ausstattung auf
www.imms.de

Jahresbericht

rungslinien sowie die exakte Ausrichtung räumlich versetzter sowie verkippter Bezugsebenen. Die beschaffte 3D-Messtechnik erlaubt innerhalb von 600 x 300 x 200 mm eine Messgenauigkeit von $\pm 8 \mu\text{m}$.

Magnetoskop für Permeabilitätsmessungen:

Bestimmte Bauteile für magnetische Aktoren, wie Spuleneinhausungen, Spulenkern, Kühleinhausungen oder Granitplatten für aerostatische Führungen müssen auf Restmagnetismus oder auf ihre Permeabilität, also ihre Magnetisierbarkeit, geprüft werden. Wird dabei ein Grenzwert überschritten, wirken Störkräfte auf das magnetische Antriebssystem. Selbst kleine Abweichungen können dabei schon zu signifikanten Störungen führen und die Gesamtfunktionalität des Systems gefährden. Mit dem beschafften Magnetoskop lassen sich die magnetische Flussdichte als Absolut- oder Differenzwert sowie die relative Permeabilität μ_r nach IEC 60404-15 und ASTM A342M bestimmen.

EMV-Nahfeld-Scanner-Board mit PC und Software

Kleiner werdende Bauräume für elektronische Schaltungen ziehen eine höhere Integration, also Funktionen pro Leiterplattenfläche nach sich. Zusammen mit immer kleineren Signalpegeln werden die Schaltungen anfälliger für elektromagnetische Störungen: Bauteile beeinflussen sich gegenseitig und können das Gesamtsystem beeinträchtigen. Mit der beschafften EMV-Messtechnik kann nun von 150 kHz bis 8 GHz untersucht werden, welche Strukturen und Bauteilplatzierungen die elektromagnetische Störabstrahlung minimieren.

Einsatz in aktuellen Forschungsprojekten

In den Projekten GraKo Nanofab*, Green-ISAS* und MagSens* wurde und wird die neue Messtechnik bereits eingesetzt für Präzisionsantriebskomponenten und Harvester- bzw. Sensorlösungen, die sowohl hohe Anforderungen an die Präzision der Bauteile sowie deren magnetische Eigenschaften stellen. Im Projekt Ko²SiBus* werden Schaltungen zur Überwachung von Datenleitungen in industriellen Anlagen erforscht. Für den Aufbau von Auswertebaugruppen, deren Signalpegel durch elektromagnetische Einflüsse schnell verändert werden kann, wird ebenso die neue Messtechnik verwendet. Im Projekt sUSE* wird Ultraschallsensorik erforscht und aufgebaut, deren Signale bis zur Digitalisierung nur sehr geringen elektromagnetischen Einflüssen ausgesetzt werden dürfen. Das IMMS kann dank der neuen Messtechnik eine direkte forschungsbegleitende Untersuchung der Konzepte und Baugruppen im eigenen Haus vornehmen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FORSCHUNGSTHEMA CPS:

ENERGIEEFFIZIENTE UND ENERGIEAUTARKE

CYBER-PHYSISCHE SYSTEME



Um Druckluft für Industrieprozesse energieeffizient zu nutzen, entwickelt das IMMS im Projekt sUSE* die Elektronikplattform für eine automatisierbare Sensorlösung. Diese wird über verteilte Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren ein ganzheitliches Monitoring von Druckluftsystemen ermöglichen. Die Lösung wird mit den Partnern SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH und Postberg+Co. GmbH erarbeitet. Foto: IMMS.

Forschungsthema „Energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS)“

29

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

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

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

Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de

Projekte im
Bereich CPS auf
www.imms.de

Highlights 2018 im Bereich energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS)

Projekt sUse* gestartet, um Druckluft für Industrieprozesse energieeffizient zu nutzen

Druckluftlecks verursachen die meisten energetischen Verluste in der Industrie. Bis zu 10% der elektrischen Energie werden dort allein dafür verwendet, Druckluft zu erzeugen. 30 Prozent davon gehen durchschnittlich aufgrund von Leckagen verloren. Umso wichtiger ist es, Lecks zu finden, Verluste zu bewerten und daraus Maßnahmen für die Instandhaltung einzuleiten.

sUse auf
www.imms.de

Ziel im Projekt sUse ist es, eine fest integrierbare oder nachrüstbare Lösung für Druckluftsysteme zu entwickeln, mit der Entscheidungen zu Reparaturen und Instandhaltung vereinfacht und die energetische Effizienz deutlich gesteigert werden.

Jahresbericht

Monitoring von Druckluftsystemen mit verteilten Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren

30

Die Partner entwickeln dafür ein ganzheitliches Monitoring-System, das aus mehreren, über ein Druckluftsystem verteilten drahtlos vernetzten und fest installierbaren Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren bestehen wird, mit denen sich die Energieeffizienz der Druckluftsysteme überwachen und bewerten lassen wird.

Zum einen wird der Volumenstrom, also die integrale Menge an Druckluft, mit entsprechenden Sensoren an verschiedenen Stellen im System gemessen und zu jener Menge in Beziehung gesetzt, die in das Druckluftsystem eingespeist wird. Zum anderen werden durch die ebenso im Druckluftsystem verteilten Ultraschallsensoren und aus deren Anordnung zueinander Lecks akustisch geortet und bewertet. Aus den zusammengeführten Daten von Gesamtvolumenstrom und identifizierten Leckagestellen lassen sich die Anteile der Leckagen am Druckluftverlust genau zuordnen.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

IMMS-Beitrag: Elektronikplattform, Signalverarbeitung und Kommunikation

Das IMMS entwickelt und realisiert die digitale Verarbeitung der Sensordaten auf einer Elektronikplattform und erarbeitet dazu ein skalierbares und performantes System. Diese Plattform wird für jeden Messpunkt des Monitoring-Systems eingesetzt.

Um die Sensoren sehr flexibel für kundenspezifische Aufgaben anpassen zu können, ohne Änderungen an der Hardware vornehmen zu müssen, entwickelt das IMMS die Komponenten zur Signalverarbeitung mit einer modellbasierten Entwurfstechnologie und konfiguriert auf dieser Basis die Anwendungsalgorithmen für die Integration in die elektronischen Komponenten (FPGA).

Damit die Plattform auch zu künftigen Anforderungen kompatibel ist und sich in Instandhaltungssysteme integrieren lässt, wird das IMMS dafür notwendigen Kommunikationsschnittstellen und -protokolle umsetzen und die entsprechende Kommunikationsfähigkeit der drahtlosen Sensoren herstellen.

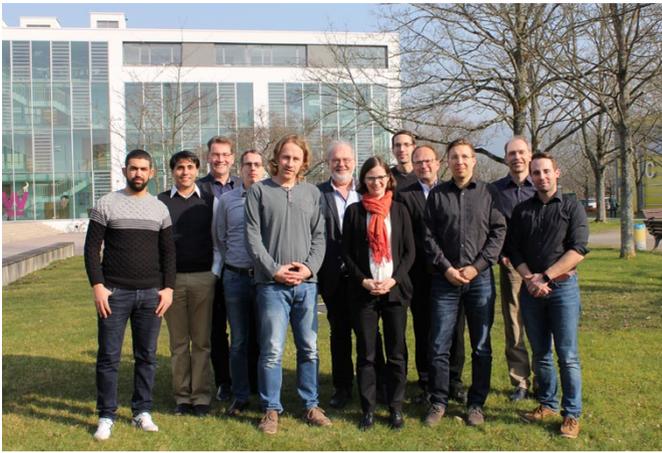
Forschungsvorhaben Ko²SiBus zum Konsortialtreffen vor Industrievertretern vorgestellt

Am 21. Februar 2018 wurden Vertretern des projektbegleitenden Ausschusses aus zehn Unternehmen zum Konsortialtreffen in Offenburg Details zu dem 2017 gestarteten zweijährigen Forschungsvorhaben „Ko²SiBus – Kontinuierliche und kostengünstige Signalüberwachung für industrielle Bussysteme“ präsentiert. Das Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) an der Hochschule Offenburg und das Team der Professur für Mess- und Sensortechnik an

Ko²SiBus auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF AF
DFAM

Am 21.02.2018 wurden
Industrievertretern Details zum Forschungs-
projekt „Ko²SiBus“
präsentiert. Foto:
Hochschule Offenburg.

31

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

der Technischen Universität Chemnitz erarbeiten gemeinsam mit dem IMMS neue Lösungen, mit denen sich solche Ausfallzeiten und Wartungsaufwände in Industrieanlagen deutlich verringern lassen, die auf bislang schwer auffindbare Störungen in Datenkabeln zurückzuführen sind.

Einschätzung der Industrievertreter zum Vorhaben positiv

„Viele unserer Kunden wünschen eine vorausschauende Fehlererkennung bei Ethernetkabeln“ so Friedrich Becker, Leiter Kompetenzfeld Software & Kommunikation bei der TURCK Electronics GmbH. „Um die Fehler zu finden und zu beheben, vergehen oft Stunden mit Fertigungsstillstand. Die neuen Methoden sollen derartige Fehler im Vorhinein erkennen und so Stillstand vermeiden. Wir werden daher die Ansätze, über die wir uns heute ein genaueres Bild machen konnten, mit Rat und Tat begleiten.“ Neben der Firma TURCK begleiten das Projekt Vertreter der Unternehmen Bosch Rexroth AG, GEMAC – Gesellschaft für Mikroelektronikanwendung, Hilscher Gesellschaft für Systemautomation, Indu-Sol GmbH, Pilz GmbH & Co. KG, R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Renesas Electronics Europe GmbH, SICK AG und STACKFORCE GmbH.

Bislang kein durchgehendes Monitoring von Kommunikationsleitungen vernetzter Anlagen

Damit in der Industrie hochautomatisierte Prozesse reibungslos ablaufen können, werden Zustände und Abläufe in Maschinen und Anlagen einem permanenten Monitoring unterzogen. Die drahtgebundenen Ethernet-basierten Kommunikationsleitungen für den schnellen und sicheren Datenaustausch und für die Vernetzung von Industrieanlagen werden gegenwärtig jedoch noch nicht kontinuierlich überwacht. Ein Grund dafür ist neben der hohen Anzahl an Ethernet-Kabeln, dass die meisten

dieser Leitungen verdeckt und schwer zugänglich verlegt sind, um Produktionsabläufe nicht zu behindern. Kabelbrüche und Störungen müssen bislang meist bei Maschinenstillstand und losgelöst von der Anlage mithilfe von zusätzlichen Messgeräten untersucht werden.

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung

Ziel: störungsfreie Produktion durch Monitoring drahtgebundener

Kommunikationsleitungen

Um die damit verbundenen Ausfallzeiten und Wartungsaufwände zu minimieren, werden im Projekt Ko²SiBus Lösungen erarbeitet, mit denen künftig die Signalqualität der drahtgebundenen Ethernet-basierten Installationen während des regulären Anlagenbetriebs kontinuierlich und kostengünstig überprüft werden kann. Damit sollen sich nicht nur Wartungen besser planen lassen. Das neue Konzept soll es auch erlauben, die Monitoring-Daten über eine einheitliche und offene Schnittstelle weiterzugeben, so dass eine Integration in kundenspezifische Monitoring-Lösungen einfach möglich ist. Die Lösung soll in bestehende Anlagen nachgerüstet werden können, z.B. als Erweiterung für Switches, und sich als Feature direkt in Netzwerkknoten von Industrie-4.0-Anlagen integrieren lassen.

Die TU Chemnitz liefert die theoretische Vorarbeit für die Entwicklung des eingebetteten Kabeldiagnoseverfahrens in Ko²SiBus. Die Hochschule Offenburg befasst sich in dem Projekt überwiegend mit den erforderlichen Kommunikationsschnittstellen, über welche die Analysedaten an höhere Systeme weitergegeben werden.

IMMS entwirft Schaltungskonzepte und baut einen Demonstrator auf

Das IMMS entwirft auf der Grundlage der Zuarbeiten der Partner ein eingebettetes System und erarbeitet hierfür passende Schaltungskonzepte. Basierend auf dem Know-how aus Entwicklungen für Sensoriklösungen unter anderem zum Monitoring von Industrieanlagen wird in Ko²SiBus ein System realisiert, das physikalische Signalparameter mittels integrierter analoger und digitaler Bauteile verfolgt und Abweichungen an eine Überwachungszentrale meldet. Die Funktionalität wird anhand eines Demonstrators erprobt, den das IMMS aufbaut.

2018 hat das IMMS drei Schaltungskonzepte zur Signalanalyse untersucht, simuliert und bewertet. Weiterhin wurde eine Methode zur Abschätzung der Signalqualität durch Auswertung der Signalamplitudenstatistik evaluiert. Zur Überprüfung dieser Methoden hat das IMMS eine Testumgebung zur Simulation von Kabelfehlern entwickelt, die es ermöglicht, die Signalqualität während der Übertragung zu beeinflussen und so die Konzepte auch empirisch zu validieren. Daran konnte gezeit

werden, dass die gefundene Methode zur Auswertung der Signalamplitudenstatistik für eine Abschätzung der Signalqualität ausreichend ist. Diese wird 2019 gemeinsam mit den Ergebnissen der TU Chemnitz in das Konzept der Kabelüberwachung einfließen.

EDA Achievement Award 2018 für Methoden zum Entwurf integrierter Schaltungen

Der edacentrum e.V. hat Georg Gläser am 17. Mai 2018 zum edaWorkshop18 in Hannover für seine Arbeiten zu neuen Methoden für schnelle und fehlerfreie Entwürfe komplexer integrierter Schaltungen mit dem „EDA Achievement Award 2018“ für besondere Forschungs- und Entwicklungsleistungen für die elektronische Designautomation (EDA) und die maßgebliche Erweiterung des Standes der Technik auf diesem Gebiet ausgezeichnet.

Komplexe Chips müssen automatisiert verifiziert und vor der Fertigung auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden

Designfehler in der Mikroelektronik können negative Auswirkungen auf sicherheitsrelevante Systeme wie z.B. im Automobilbereich haben und hohe Schäden verursachen, die hunderte Mio. Euro betragen können. Daher wird die Entwicklung mikroelektronischer Systeme seit jeher wissenschaftlich bearbeitet und durch immer anspruchsvollere Entwurfsmethoden optimiert. Die Anforderungen an Mikrochips steigen stetig: Komplexität und Verarbeitungsgeschwindigkeit nehmen exponentiell zu, gleichzeitig sollen jedoch Aufwand und Risiko im Entwurf reduziert werden. Neuartige, hochkomplexe Mikrochips lassen sich bislang auch mit modernen Verfahren vor ihrer Produktion nicht vollständig auf Schwachpunkte analysieren. Un-



Georg Gläser (3. v.r.), IMMS, bei der Verleihung des EDA Achievement Awards 2018 zum edaWorkshop18 in Hannover. Mit dem Preis wurden seine Arbeiten zu neuen Methoden für schnelle und fehlerfreie Entwürfe komplexer integrierter Schaltungen geehrt. Foto: IMMS.

GEFÖRDEBT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

erwünschte Wechselwirkungen, die das Layout, also der Bauplan für die Fertigung, auf die Funktion einer Schaltung ausüben kann, lassen sich bislang nicht vollständig untersuchen.

Prämierte Methoden weisen korrekte Funktion von Schaltungen schon während des Entwurfs zuverlässig nach

Georg Gläser hat am IMMS verschiedene spezialisierte Methoden entwickelt. Mit ihnen lassen sich zum einen die genannten Layout-bedingten Wirkungen automatisch auffinden, bezüglich ihres konkreten Einflusses bewerten und somit Potenziale für Optimierungen aufzeigen. Zum anderen erlauben die Methoden, das Zusammenspiel komplexer Systemkomponenten in Systemmodelle zu integrieren und effizient zu simulieren. Darüber hinaus hat Herr Gläser neue Methoden erarbeitet, mit denen sich das Systemverhalten auch bei noch unbekanntem Betriebsverhalten vor der Fertigung analysieren lässt.

Parasitic-Impact-Analyse und Symmetrieanalyse

Der Entwurf integrierter Schaltungen beginnt meist auf Systemebene, auf der Funktionsblöcke kombiniert werden. In diesen Komponenten werden Schaltungen erstellt, die die gewünschte Funktion realisieren, wie z.B. eine Verstärkung. Nach diesem Entwurfsschritt werden die Funktionalität und die elektrischen Eigenschaften dieser Blöcke in Simulationen verifiziert. Ist dieser Schritt erfolgreich, so wird ein Layout erstellt, das der Bauplan für den Chiphersteller ist: Hier werden die Bauelemente, wie z.B. Transistoren und Widerstände, platziert und mittels Metalleitungen miteinander verbunden.

Durch die Anordnung der Bauelemente im Layout kann es jedoch zu neuen Effekten kommen, wie z.B. zum Übersprechen durch nebeneinanderliegende Leitungen, was durch parasitäre Kapazitäten verursacht wird. Aufgrund solcher physikalischen Effekte, die nicht mit der gewünschten Funktion zusammenhängen, muss die Schaltung erneut verifiziert werden. Meist führen die Effekte dazu, dass das Layout in weiteren Schritten optimiert werden muss. Hier sind die „Parasitic-Impact-Analyse“ und die „Symmetrieanalyse“ hilfreich: Mit der Symmetrieanalyse können Optimierungspotentiale schon vor dem eigentlichen Layout aufgezeigt werden. Mit der Impact-Analyse werden vorhandene Layouts betrachtet, um einen vielversprechenden Angriffspunkt für die Verbesserungen zu bestimmen. Der aufwendige Prozess der Layout-Optimierung kann so stark verkürzt werden.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Automatische Berücksichtigung von Betriebsbedingungen

Nachdem die korrekte Funktion sichergestellt wurde, kann das System schrittweise in immer größeren Funktionsgruppen geprüft werden. Wenn dabei neben der Funktionalität auch die Betriebsbedingungen überwacht werden sollen, ist meist eine sehr detailtreue Simulation auf niedriger Abstraktionsebene notwendig, d.h. mit aufwendigen und zeitintensiven Lösungsverfahren. An dieser Stelle setzt eine weitere Methode an: Mit ihr werden Informationen über erlaubte Betriebsbedingungen einzelner Funktionsblöcke automatisch extrahiert. Diese Informationen werden dann in abstraktere Modelle eingearbeitet, mit denen Simulationen stark beschleunigt und gleichzeitig die Betriebsbedingungen abgesichert werden.

35

- > *RoMulus:RFID*
- > *Green-ISAS:Test*
- > *Green-ISAS:EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus:MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Methoden erfolgreich für Forschungs- und Industrieentwicklungen eingesetzt – Fortsetzung folgt

Die im 2017 abgeschlossenen Forschungsprojekt ANCONA* erarbeiteten Methoden sind bereits in die Entwicklung von Schaltungen am IMMS eingeflossen, u.a. in den Forschungsprojekten RoMulus* und ADMONT*. Auf der Basis dieser Methoden werden ab 2019 in der Forschergruppe IntelligEnt neuartige EDA-Ansätze entwickelt. Dreh- und Angelpunkt ist dabei die Praxistauglichkeit, die für die Methoden aus ANCONA bereits in Industrieprojekten nachgewiesen wurde: „Das IMMS hat eine neue Methode entwickelt und in einem Programm implementiert, das automatisch kritische parasitäre Elemente beim Schaltungsentwurf findet und bewertet. Die zeit-aufwendige Layout-Optimierung kann so stark beschleunigt werden,“ so Dr. Dirk Nurnbergk, Melexis GmbH Erfurt. „Eine Evaluation dieser Methode machte das hohe Potential deutlich: Wir konnten in kürzester Zeit die Problemstellen dreier Schaltungen identifizieren. Wir gratulieren zum EDA Achievement Award 2018 und freuen uns darauf, das neue Vorgehen auch zukünftig für unsere Designs einzusetzen.“

Mehr zu ANCONA auf www.imms.de.

Mehr zu IntelligEnt auf www.imms.de.



Abbildung 1:

Messungen an einer Energiemanagement-Komponente für einen Industrie-4.0-konformen Funksensor, der mit elektromagnetischem Energie-Harvester betrieben wird. Foto: IMMS.

Projektabschluss Green-ISAS*: Grundlagentechnologien für autonome Industrie-4.0-konforme Sensor/Aktor-Systeme

Das IMMS hat im Oktober 2018 die Arbeiten in der Forschergruppe Green-ISAS zu grundsätzlichen Fragestellungen und technologischen Lösungsansätzen beim Entwurf und der Realisierung Industrie-4.0-konformer energieautarker Systeme nach zwei Jahren erfolgreich abgeschlossen.

Motivation und Anforderungen an Industrie-4.0-konforme Systeme

Zukünftige industrielle Produktionssysteme und darauf basierende neuartige Dienstleistungen erfordern zunehmend autonome Sensor- und Aktor-Systeme. Der dafür konzipierte Industrie-4.0-Ansatz stellt spezifische Anforderungen an die Vernetzung und Funktionalität der beteiligten Komponenten, wofür sie vor allem mit mehr Eigenintelligenz ausgestattet werden müssen. Daraus ergeben sich folgende zentrale Herausforderungen:

Industrie-4.0-Konformität: Damit Sensoren und Aktoren innerhalb von Industrie-4.0-Systemen nahtlos einsetzbar sind, müssen sie sich am Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 orientieren und daraus resultierende Anforderungen an Komponenten erfüllen. So müssen sie u.a. im Netzwerk eindeutig identifizierbar sein, eine virtuelle Beschreibung ihrer Eigenschaften und Dienste bereitstellen sowie vorgegebene standardisierte Kommunikationsprotokolle unterstützen.

Höherwertige Intelligenz: Um die beschriebenen Merkmale zu realisieren, müssen die Komponenten Fähigkeiten besitzen, die über klassische Signalverarbeitungsaufgaben hinausgehen und beispielsweise auch validierte Sensordaten bereitstellen, Kontextinformationen und dynamische Dienstgüteanforderungen berücksichtigen

Mehr zu
 GreenISAS auf
www.imms.de.

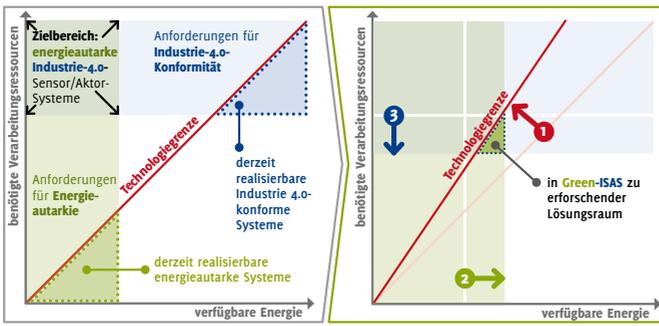


Abbildung 2:

Herausforderungen beim Entwurf energieautarker Industrie-4.0-konformer Funksensorsysteme und Lösungsansätze innerhalb von Green-ISAS.

Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

sowie die Selbstüberwachung und -adaption beherrschen. Dafür müssen die Systeme mit entsprechend leistungsfähiger Hardware und Software ausgestattet werden.

Energieautarkie: In vielen Anwendungsszenarien für Industrie 4.0 kommt mobilen und einfach nachrüstbaren Instanzen eine hohe Bedeutung zu. Nur in wenigen Fällen können diese drahtgebunden mit Energie versorgt werden, sodass ein energieautarker Betrieb unumgänglich ist. Voraussetzungen dafür sind sogenannte Energie-Harvester oder Batterien sowie höchste Energieeffizienz aller Bauteile und Funktionen.

Um ein Sensorsystem im beschriebenen Anwendungsumfeld als autonome Industrie-4.0-Komponente auszulegen, muss es sowohl mit höherwertiger Intelligenz ausgestattet als auch energieautark zu betreiben sein. Die Verknüpfung dieser beiden Anforderungen stellt eine hohe wissenschaftliche und technische Herausforderung dar, da hierbei auch die Industrie-4.0-Konformität, die geforderte Mindesteinsatzdauer und der verfügbare Bauraum zu berücksichtigen sind, vgl. Abbildung 2. Die Forschergruppe Green-ISAS hatte sich daher das Ziel gesetzt, grundsätzliche Fragestellungen und technologische Lösungsansätze beim Entwurf und der Realisierung solcher Industrie-4.0-konformer energieautarker Systeme zu erforschen und neue Lösungsräume durch die Kombination von höherer Energieeffizienz mittels Ultra-Low-Power-Schaltungstechnik (Abbildung 2 (1)), effizientem Energy-Harvesting (2) und der ressourcenoptimierten Implementierung höherwertiger Funktionalitäten (3) zu erschließen.

In Green-ISAS erreichte Ergebnisse

Energieeffiziente Verarbeitung von zeitkodierten Sensorsignalen

Um die Energieeffizienz von Sensorsystemen zu steigern, wurden in Green-ISAS neue Konzepte für die Verarbeitung von zeitkodierten Sensorsignalen erforscht und als

Mehr zu
GreenISAS auf
www.imms.de.

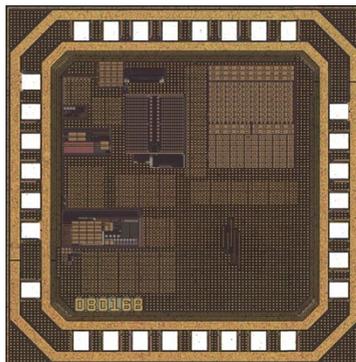


Abbildung 3: Arbeiten am Layout (links) des ULP-Sensorchips D8016B (rechts), der in Green-ISAS entwickelte Ultra-Low-Power-Schaltungen enthält. Fotos: IMMS.

Ultra-Low-Power-Schaltungen (ULP) exemplarisch umgesetzt. Die Forschungsarbeiten fokussierten sich dabei auf für Zeitbereichssensorik in integrierten mikroelektronischen Schaltungen besonders relevante Time-to-Digital-Converter (TDC) für den Mikro- bis Millisekundenbereich, auf Schaltungslösungen für die asynchrone Verarbeitung zeitkodierter Sensorsignale, auf im Zeitbereich arbeitende Capacity-to-Digital-Converter (CDC) und auf asynchrone Infinite-Impulse-Response-(IIR)-Filter zur Mittelwertbildung von Sensorsignalen aus CDC und TDC. Weiterhin wurde zu einer neuen Methode zur Leistungseinsparung in eventgesteuerten Systemen beigetragen. Die Ergebnisse flossen in den ULP-Sensorchip D8016B ein (Abbildung 3), welcher in der Technologie XTO18 bei der X-FAB GmbH gefertigt wurde. Diese anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) wird derzeit im IMMS charakterisiert und steht im Anschluss für Mess- und Testzwecke zur Verfügung.

Charakterisierungskonzepte für Ultra-Low-Power-Schaltungen (ULP)

Der verstärkte Einsatz von ULP-Schaltungen in autonomen Sensorsystemen stellt mit schnell und sehr stark wechselnden Stromverbräuchen in Standby- und aktiven Betriebszuständen immer schwierigere Anforderungen an dafür benötigte Messsysteme und -methoden. In Green-ISAS wurde für diese Zwecke eine neue Testhardware entwickelt, aufgebaut und an ULP-Sensoren erfolgreich getestet, welche einen Dynamikbereich von 1 nA bis 10 mA mit einem Messfehler von unter 1 % stufenlos abdeckt und somit Grenzen kommerziell verfügbarer Messlösungen überwindet. Details werden im Fachartikel „Green-ISAS – Messumgebung zur dynamischen Charakterisierung des Leistungsverbrauchs von Ultra-Low-Power Schaltungen“ in diesem Bericht vorgestellt.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

*Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de.*

*Mehr zu
ASIC-Designs:
www.imms.de.*

*Mehr zu Test-
entwicklungen:
www.imms.de.*

*Zum
Fachartikel*

Jahresbericht

Ultra-Low-Power-Schaltungen für passive Long-Range UHF-RFID-Frontends

Die in der Industrie weit verbreiteten passiven RFID-Tags können, wenn sie mit integrierter Sensorik ausgestattet werden, als RFID-Sensor-Tag zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. in der Anlagenüberwachung oder Logistik eröffnen. In vielen Fällen müssen jedoch mehrere Meter Abstand zwischen Tag und RFID-Lesegerät überwunden werden, weshalb durch das vom Lesegerät ausgesendete elektromagnetische Feld am RFID-Tag nur wenige μW für die Energieversorgung zur Verfügung stehen. Das Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme der TU Ilmenau widmete sich in Green-ISAS der Aufgabe, ULP-Schaltungen für ein dafür geeignetes RFID-Tag-Frontend zu entwickeln und zu optimieren sowie in dem Forschungschip D1029A experimentell umzusetzen. Für Messzwecke wurde der Chip zusammen mit dafür optimierten Antennenstrukturen auf eine eigens dafür entwickelte Testplatine gebracht.

Entwurfsmethodik für applikationsspezifische elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester

Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt von Green-ISAS waren Lösungsansätze für eine autarke Energieversorgung von Sensorsystemen mittels Energie-Harvestern, wobei in der Umgebung verfügbare Energiequellen, wie z.B. Vibrationen oder elektromagnetische Wellen, für die Erzeugung von elektrischer Energie genutzt werden. Für industrielle Anwendungen weisen elektromagnetische Vibrationsharvester aufgrund ihrer Robustheit und Temperaturbeständigkeit spezifische Vorteile auf. Sie generieren die Induktionsspannungen aus zeitlich veränderlichen Magnetfeldern, müssen für den jeweiligen Einsatzfall jedoch optimal konstruiert und ausgelegt werden, was zeit- und kostenaufwändig ist. Um dieses Problem zu lösen, wurde in der Forscher-

gruppe eine automatisierte rechnergestützte Entwurfsmethodik erarbeitet, die im Fachartikel „Green-ISAS – Entwurfsmethodik für applikationsspezifische elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester“ in diesem Bericht vorgestellt wird.

- 39
- > RoMulus: RFID
 - > Green-ISAS: Test
 - > Green-ISAS: EH
 - > StadtLärm
 - > fast wireless
 - > ADMONT
 - > RoMulus: MEMS
 - > Inhalt
 - * Förderung

Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de.

Zum
Fachartikel

Jahresbericht

© IMMS 2018



Abbildung 4: Kompakter Demonstratoraufbau eines Harvester-betriebenen Funksensors.
Foto: IMMS.

Adaptive Energiemanagement-Komponente für energieautarke Sensor/Aktor-Systeme

40

Um Energie-Harvester für energieautarke Systeme sinnvoll einsetzen zu können, muss die gewonnene Energie durch spezielle Maßnahmen effizient gewandelt und genutzt werden. Insbesondere elektromagnetische Energie-Harvester stellen aufgrund ihrer niedrigen Wechselspannungen und der für eine hohe Wandlereffizienz notwendigen Impedanzanpassung besondere technologische Anforderungen, die mit kommerziell verfügbaren Harvester-Frontend-Chips nur eingeschränkt umsetzbar sind. In Green-ISAS wurden daher mehrere Konzepte für geeignete Harvester-Frontend-Schaltungen entwickelt und an mehreren Testaufbauten praktisch untersucht. Dank der Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg konnte dabei auch ein dort entworfener hocheffizienter Frontend-Chip zum Einsatz kommen. Ergänzend zu den Frontend-Schaltungen wurden universelle Software-Komponenten erforscht und auf verschiedenen Hardware-Plattformen experimentell umgesetzt, die Sensorik- und Kommunikationsfunktionen des Systems steuern und dabei die verfügbare Energie, Kontextinformationen und Anforderungen übergeordneter Kommunikationspartner wie z.B. bei Industrie-4.0-Systemen berücksichtigen.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu

Energieeffizienz:
www.imms.de.

Konzepte für Industrie-4.0-konforme Kommunikation in stark ressourcenbeschränkten Systemen

Die Kommunikationsarchitektur für Industrie 4.0 und die zugehörigen Protokolle stellen umfangreiche Anforderungen an Komponenten. In autonomen Sensorsystemen stehen allerdings bezüglich Rechenleistung, Speicher und Energie nur limitierte Ressourcen zur Verfügung. Daraus ergab sich in Green-ISAS die Forschungsaufgabe, Industrie-4.0-Protokolle und -Funktionen für die genannten Randbedingungen zu erschließen. Hierfür wurden umfangreiche messtechnische Charakterisierungen von Kommunikationsplattformen und Protokollen sowie deren Bewertung mit Hilfe energetischer Modelle vorgenommen.

Mehr zu

Kommunikation:
www.imms.de.

Im Ergebnis wurden mehrere Ausbaustufen energieautarker Funksensoren realisiert, indem bisher nur proprietär implementierte Protokollschichten mit eingeschränkter Funktionalität stufenweise durch standardkonforme Protokollstacks mit jeweils variierendem Funktionsumfang ersetzt und auf ausgewählten ULP-Prozessorplattformen implementiert wurden (Abbildung 5). Die höchste Ausbaustufe 3 weist neben der geforderten Standardkonformität noch zahlreiche weitere Vorteile wie niedrige Kommunikationslatenz, Routingfähigkeit und Plug-and-Play-Funktionalität auf. Die dafür durchschnittlich benötigte Leistung beträgt lediglich 115 μW und ermöglicht somit

Mehr zu

GreenISAS auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2018

Ausbau­stufen Funksensoren

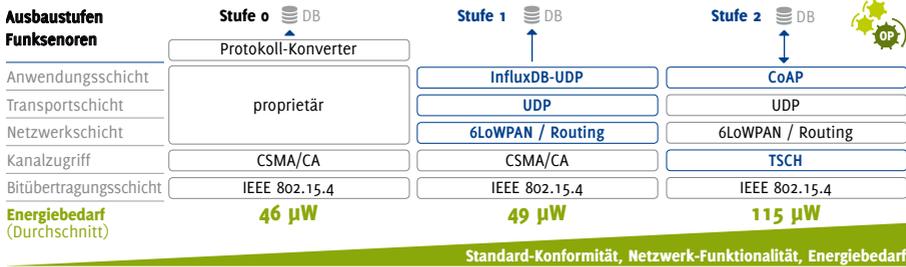


Abbildung 5: Ausbaustufen der Unterstützung Industrie-4.0-konformer Kommunikationsprotokolle für energieautarke Funksensoren. Grafik: IMMS.

die Energieversorgung durch einen kompakten elektromagnetischen Harvester bei moderaten Anregungen und praxisrelevanten niedrigen Frequenzen von 12 – 14 Hz.

Ausblick

Die Realisierung autonomer Industrie-4.0-konformer Sensor/Aktor-Systeme stößt derzeit in der industriellen Praxis noch an zahlreiche technologische Grenzen. Innerhalb der Thüringer Forschergruppe Green-ISAS wurden Lösungsansätze erarbeitet, die diese Grenzen sowohl auf der Komponenten- als auch auf der Gesamtsystemebene verschieben. Dies konnte anhand verschiedener Demonstratoren auch praktisch gezeigt werden (Abbildungen 1 und 4). Die Ergebnisse wurden auf zahlreichen nationalen Veranstaltungen und internationalen wissenschaftlichen Konferenzen und Workshops präsentiert. Der im Projekt entwickelte Technologiebaukasten stieß insbesondere bei den Unternehmen des Thüringer Industriebeirats auf vielfältiges Interesse und steht nun für die weitere Verwertung zur Verfügung. Neben der Fortführung der Forschungsarbeiten zu ULP-Schaltungen und zu ganzheitlichen Entwurfsansätzen für Harvester-basierte Sensorsysteme betrifft dies vor allem die Überführung in praktische industrielle Anwendungen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu
GreenISAS auf
www.imms.de.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



U.a. in den vom BMWi geförderten und damit kostenfreien regelmäßigen Workshops gibt das IMMS KMU konkrete Lösungsansätze an die Hand, mit denen sich Industrie-4.0-Technologien zur Verbesserung von Anlagen und Prozessen einführen lassen. Foto: IMMS.

42

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Aktivitäten des IMMS im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“*

Know-how-Transfer durch Workshops, Stammtische, Infotage und Informationsgespräche

2018 haben Experten des IMMS in ihrer Rolle als „Modellfabrik Migration“ des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau (M4.0) elf Workshops, sechs Stammtische und Infotage sowie acht Vorträge auf Veranstaltungen Dritter realisiert. Mit diesen vom BMWi geförderten kostenfreien Angeboten, die KMU bei der schrittweisen Einführung von Digitalisierungslösungen unterstützen sollen, wurden rund 450 Unternehmensvertreter aus der Region und weitere Interessenten erreicht. Über das ganze Jahr hat das IMMS außerdem 50 Informationsgespräche mit KMU geführt, aus denen einige Vorhaben zur Zusammenarbeit mit dem Institut und mit anderen Unternehmen entstanden.

Die bereits 2017 am IMMS etablierte M4.0-Workshop-Reihe „Sensorik 4.0“ wurde 2018 mit Themen zu Linux-basierten, echtzeitfähigen Sensorsystemen und zur Sensordatenverarbeitung in der Cloud fortgesetzt sowie um einen dreiteiligen Workshop zum Thema OPC-UA erweitert.

Termine auf:
www.imms.de.

In diesen Veranstaltungen gibt das IMMS Unternehmern, Ingenieuren und Entscheidern konkrete Lösungsansätze an die Hand, mit denen sich Industrie-4.0-Technologien zur Verbesserung von Anlagen und Prozessen einführen lassen. In Vorträgen mit Praxisbeispielen wird aufgezeigt, wie sich Maschinen und Anlagen durch

Jahresbericht

© IMMS 2018

drahtlose und vernetzte Sensorik nachrüsten lassen und wie man damit Daten für die Entwicklung von innovativen Diagnose-, Wartungs- und Servicekonzepten ermitteln und verarbeiten sowie mit Cloud-basierten Diensten verknüpfen kann. Die Teilnehmer werden Schritt für Schritt angeleitet, mit universellen Elektronikplattformen für Industrie-4.0-Komponenten und mit Open-Source-Software erste Beispiele im Workshop zu bearbeiten. So wird greifbar, wie sich echtzeitfähige Lösungsansätze schnell und kostengünstig realisieren lassen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mit dem dreiteiligen Workshop-Angebot „Industrie-4.0-konforme Kommunikation mit OPC-UA“ bot das IMMS die Gelegenheit, sich im Detail mit dem neuen industriellen Kommunikationsstandard auseinanderzusetzen und lieferte konkrete Einblicke durch zahlreiche Anwendungsbeispiele aus der Praxis. Aktive Übungen verdeutlichten, wie die Kommunikation in der Industrie 4.0 abläuft und wie Komponenten dafür vorbereitet sein müssen.

Darüber hinaus bot das IMMS mehrere Workshops zum „Design Thinking“ an und organisierte Stammtische zu Themen wie „Prozessdatenerfassung“ und „Ressourceneffizienz durch Sensorik 4.0“ sowie „Wem gehören die Sensordaten und wer darf darauf zugreifen“ und „Social Intranet“ an, zu denen zahlreiche externe Referenten Fachbeiträge präsentierten und mit den Teilnehmern diskutierten.

In vielen der genannten Veranstaltungen informierte das IMMS zudem über Möglichkeiten, Lösungen unter realistischen Bedingungen in einer der bundesweit über 55 **Industrie-4.0-Testumgebungen** mit Förderung des BMBF zu testen und zur Produktreife zu bringen. Das IMMS war Anfang 2018 von der Nationalen Kontakt- und Koordinierungsstelle „Industrie-4.0-Testumgebungen für KMU – I4KMU“ als erste Thüringer Testumgebung registriert worden.

Mehr
zu I4KMU:
www.imms.de

Um allgemein über die Angebote des IMMS in M4.0 zu informieren und kurze Einblicke in ein Beispielszenario zu geben, fanden Anfang 2018 Dreharbeiten am IMMS für ein Video zur „Modellfabrik Migration“ statt.



Um allgemein über die Angebote des IMMS in M4.0 zu informieren und kurze Einblicke in ein Beispielszenario zu geben, fanden Anfang 2018 Dreharbeiten am IMMS für ein Video zur Modellfabrik Migration statt.

Video ab-
rufen via
www.imms.de.

Bildquelle: Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau.



Datenabruf aus der Cloud für „KSS-Sensoren für die Überwachung des Kühlmittelzustandes“ (links) und „Fabinit“-Demonstrator (rechts) für die fertigungsplangesteuerte Inbetriebnahme von Anlagen. Fotos. IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Das IMMS hat Projekte und Demonstratoren für den Know-how-Transfer realisiert

2018 hat das IMMS das M4.0-Teilprojekt „KSS-Sensoren für die Überwachung des Kühlmittelzustandes“ abgeschlossen. Es wurde überprüft, inwieweit sich das Sensorsystem des Ilmenauer Startups Imsens GmbH dazu eignet, Parameter von Kühlschmierstoffen vollautomatisch zu überwachen. Dazu wurden zwei CNC-Fräsmaschinen und eine CNC-Schleifmaschine des Partners GFE Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V. („Modellfabrik Prozessdaten“) mit je einem Imsens-System ausgerüstet. Zusätzlich hat das IMMS („Modellfabrik Migration“) ein hybrides Funksensornetzwerk installiert, das Umweltdaten, wie Temperatur, Luftfeuchte und Helligkeit, in der Werkhalle erfasst und alle Sensordaten an einen energieeffizienten Industrie-PC sendet. Dieser verarbeitet die Daten vor und sendet sie an eine cloudbasierte Datenplattform, wo sie dauerhaft gespeichert und weiter verarbeitet werden. Im Ergebnis dieses kleinen Umsetzungsprojektes konnte nachgewiesen werden, dass die gesamte Sensorinstallation geeignet ist, die für KSS relevanten Daten zu ermitteln. Auf dieser Grundlage wurden Anforderungen für Weiterentwicklungen abgeleitet, die ab 2019 in einem durch den Freistaat Thüringen geförderten Folgeprojekt umgesetzt werden.

Das IMMS hat 2018 einen Demonstrator realisiert, der den Produktionsanlauf nach Sonn- und Feiertagen zeigt. Der Aufbau simuliert die im M4.0-Teilprojekt „Fabinit“ verfolgte fertigungsplangesteuerte Inbetriebnahme von Spritzgussanlagen. Diese müssen so hochgefahren werden, dass der Energieverbrauch aller Anlagen eine definierte Höchstgrenze nicht überschreitet. Möglich wird das, indem das Erwärmen der Maschinen energetisch überwacht und für den gesamten Maschinenpark gezielt gesteuert wird. Gleichzeitig lässt sich der Gesamtprozess auf einem mobilen Endgerät beobachten, das auch bei auftretenden Problemen warnt.

Mehr zu
Mittelstand 4.0:
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2018

Im M4.0-Teilprojekt „**Energiemanagement**“ hat das IMMS Nachrüstlösungen aufgebaut, mit denen der Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen einfach und kostengünstig gemessen, aufgezeichnet und visualisiert werden kann, ohne in die Maschineninfrastruktur einzugreifen. Die Messungen erfolgen jeweils mit handelsüblichen Komponenten, die für den industriellen Einsatz geeignet sind und die entsprechenden Industrie-4.0-Standards erfüllen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Das IMMS hat im M4.0-Teilprojekt „**Füllstandsüberwachung**“ einen Demonstrator realisiert, mit dem sich veränderte Bestandsmengen in Magazinen beobachten lassen. Dazu erfasst ein Ultraschallsensor Abstände zu Füllhöhen. Ändern sie sich, können z.B. automatisierte Benachrichtigungen für rechtzeitigen Nachschub sorgen. Diese einfache Nachrüstlösung ist vielfältig einsetzbar, z.B. in Lagern, in Transport und Logistik.

2018 hat das IMMS im M4.0-Teilprojekt „**Sensorik-Koffer 2**“ damit begonnen, einen weiteren Demonstrator zum Mitnehmen aufzubauen. Im Unterschied zum ersten Sensorik-Koffer, der Funksensorknoten enthält, die am IMMS entwickelt wurden, werden die Sensoren im zweiten Koffer mit kommerziell erhältlichen SmartMesh®-IP-Modulen ausgestattet, welche für industrielle Einsatzzwecke geeignet sind. Diese bilden ebenfalls ein automatisch vollvernetztes drahtloses Sensornetz mit routing-fähigen Knoten. Letztere werden zunächst mit Umwelt- und Schwingungssensoren ausgerüstet und sind jederzeit mit anderer Sensorik erweiterbar.

Im M4.0-Teilprojekt „**Visualisierungsfrendend für Demonstrations- und Live-Daten**“ hat das IMMS eine Möglichkeit aufgezeigt, Maschinen- und Sensordaten auf geeignete Art und Weise auszuwerten und zu visualisieren. Das Frontend wird für mehrere Demonstratoren verwendet, z.B. den Sensorik-Koffer 1, die Anlage zur UV-Wasserentkeimung in der Schwimmhalle Ilmenau und die o.g. Kühlschmierstoffüberwachung.

*Mehr zu
Mittelstand 4.0:
www.imms.de.*

#ZukunftThüringen startete am IMMS

Zum Auftakt der dritten Woche seiner Sommertour „#ZukunftThüringen“ besuchte am 16.07.2018 der Thüringer Ministerpräsident Bodo Ramelow das IMMS, einen der fünf Thüringer Akteure im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“. Er wurde von zahlreichen Vertretern aus der regionalen Politik, Verwaltung und Wirtschaft begleitet. Über die Besuche wurde medienwirksam in der Tagespresse, durch das MDR-Fernsehen und auf verschiedenen Internetplattformen berichtet.

Ramelow informierte sich über die Arbeit des IMMS und über dessen Rolle als „Modellfabrik Migration“ im Kompetenzzentrum, besichtigte den Kundendemoraum und Labore. Dort wurden ihm verschiedene Demonstratoren präsentiert, die verdeutlichen, wie sich Prozesse in bestehenden Maschinenparks kosteneffizient durch nachrüstbare vernetzte Sensoren und Cloud-Lösungen optimieren lassen und damit für die steigende Nachfrage an kundenspezifischen Produkten und Dienstleistungen fit gemacht werden können.

„Digitalisierung ist hier nicht nur ein Hebel für effizientere Abläufe, die man mit einer Vernetzung von Daten erreichen kann,“ fasste Ramelow zusammen. „Man muss auch aus einer anderen Perspektive auf Vernetzung schauen: Gerade für die Thüringer Wirtschaft mit vorrangig kleinen und mittelständischen Unternehmen bietet die Digitalisierung die Chance, ihre Kräfte noch mehr als bisher in Wertschöpfungsnetzwerken zu bündeln, um im internationalen Wettbewerb zu bestehen. Die Arbeit des Kompetenzzentrums ist dafür genau richtig angesiedelt.“

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung

Mehr zu

Mittelstand 4.0:

www.imms.de.



Thüringens Ministerpräsident Bodo Ramelow beim Besuch am IMMS in Ilmenau. Foto: Angelika Stern (Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau).

Besuch von Tankred Schipanski

Am 12. Juli 2018 besuchte der für den Landkreis Gotha und den Ilm-Kreis gewählte Bundestagsabgeordnete Tankred Schipanski, der digitalpolitischer Sprecher der CDU/CSU-Fraktion im Bundestag ist, das IMMS. Anhand von Demonstratoren wurden aktuelle Arbeiten aus verschiedenen, vom Bund geförderten Projekten zur Digitalisierung im Bereich Industrie 4.0 vorgestellt.

Das IMMS arbeitet an sicheren, vernetzten, echtzeitfähigen und energieautarken eingebetteten Systemen für die Produktion. Konkret wurde ein Projekt für die Industrie-4.0-Konformität für Assistenzsysteme zur automatischen Analyse von vernetzten Anlagen vorgestellt sowie eine batterielose RFID-Sensorik, mit der Parameter wie Temperatur, pH-Wert und Luftfeuchte zum Monitoring industrieller Fertigungsprozesse genutzt werden kann. Darüber hinaus gab es für Herrn Schipanski eine Führung im Testlabor für Time Sensitive Networking (TSN*), mit dem das IMMS über ein Alleinstellungsmerkmal als eine vom Bund geförderte „Industrie-4.0-Testumgebung für KMU – I4KMU“ verfügt.

Darüber hinaus konnte sich Herr Schipanski in einem Vortrag und einer Führung über die Arbeiten des IMMS im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“ informieren: „Für Großkonzerne ist Industrie 4.0 mittlerweile tägliches Brot,“ so die Einschätzung von Schipanski. „Viele kleine und mittlere Unternehmen, die traditionell im Ilm-Kreis angesiedelt sind, sind hier aber auf Unterstützung angewiesen. Mit seinem Beitrag als Modellfabrik des Kompetenzzentrums sowie der Entwicklung anwendungsorientierter Lösungen ist das IMMS daher ein Motor für Industrie 4.0.“



Tankred Schipanski, MdB, bei der Führung im Labor für Time Sensitive Networking (TSN). Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu TSN:
www.imms.de.

Mehr zu i4KMU:
www.imms.de.

Mehr zu
Mittelstand 4.0:
www.imms.de.

Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de.



RoMulus – UHF-RFID-Chip zum batterie- losen Betrieb kommerzieller Sensoren in I4.0-Anwendungen

Messungen am energieeffizienten UHF-RFID-Sensor-Transponder-Chip. Mit ihm lassen sich verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit unterschiedlichem Leistungsbedarf batterie-los betreiben. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Drahtlose Sensoren sind eine Schlüsselkomponente für den Erfolg von Industrie 4.0

Die Wertschöpfung verlagert sich zunehmend von der Produktion zu datenbasierten Dienstleistungen und Plattformen, um Prozesse und das Zusammenspiel von Unternehmen abzustimmen. Vor allem kleine und mittlere Industriebetriebe stehen vor der Herausforderung, ihre globale Konkurrenzfähigkeit in Zukunft nicht nur durch hohe Produktqualität und Prozess-Exzellenz, sondern auch durch neue Wertschöpfungsnetzwerke und digitale Geschäftsmodelle zu sichern. Um diese technisch zu realisieren, sind Kerntechnologien wie Sensorik zur Datenerfassung und drahtlose Vernetzung notwendig. Für viele Anwendungen sind viele mobile Sensoren ohne Verkabelung unerlässlich, insbesondere bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen. Das IMMS hat daher Lösungen erforscht und entwickelt, die Sensorik mit RFID-Systemen kostengünstig und batterie-los verbindet und damit verschiedene industrielle Anwendungen erschließt.

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de*

*Mehr zu
RoMulus auf
www.imms.de*

UHF-RFID-Systeme für größere Reichweiten und parallele Identifikationen

Ein typisches RFID -System besteht aus einem oder mehreren Transpondern (Tags) und mindestens einem Lesegerät. Dieses kommuniziert über ein hochfrequentes (HF),

— Jahresbericht
© IMMS 2018

engl. RF) Feld mit den umgebenden RFID-Tags. Diese antworten mit ihrer eindeutigen Identifikationsnummer und dienen der Nachverfolgung und Zugangskontrolle. UHF-RFID-Systeme arbeiten im UHF-Band (Ultra High Frequency) in der Regel im Frequenzbereich von 860 bis 960 MHz und verwenden die Prinzipien der Fernfeld-Strahlungskopplung und des Backscattering. UHF-RFID-Tags bieten so mit bis zu fünf Metern eine viel größere Lesereichweite als magnetfeldgekoppelte HF-Tags, die bei 13,56 MHz lediglich im Zentimeterbereich kommunizieren. UHF-RFID-Systeme sind dank ihrer hohen Datenübertragungsrate ideal für Anwendungen, bei denen mehrere Objekte gleichzeitig ausgelesen werden müssen. Sie sind daher im industriellen Umfeld bereits vielfältig etabliert, z.B. um Waren zu erkennen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

UHF-RFID-Sensorsysteme liefern neben der Identifikation auch Messdaten

Bindet man in diese UHF-RFID-Systeme Sensoren ein, sind weitaus mehr Industrie-4.0-Applikationsszenarien möglich. Durch Standard-Protokolle kann bereits vorhandene Infrastruktur mit Lesegeräten weiterverwendet werden. Die Sensordaten werden hierbei über den Adressbereich ausgelesen, in dem sich zusätzliche Produktinformationen speichern lassen.

Energieeffiziente, flexible Transponder-Architekturen für batterielosen Betrieb fehlen

Kann man nun diese UHF-RFID-Sensorsysteme passiv, also nur mit der Energie aus dem Lesegerät, betreiben, lassen sie sich für Anwendungen nutzen, wo Batterien oder kabelgebundene Systeme nicht in Frage kommen, wie z.B. an rotierenden Teilen. Hierfür sind energieeffiziente Lösungen notwendig.

Stand der Technik sind dabei auf spezifische Anwendungen ausgelegte RFID-Sensor-Transponder-ICs, bei denen der Sensor direkt im RFID-Chip *integriert* ist, um Energieeffizienz, Funktionalität und Sensorgenauigkeit innerhalb des ICs zu optimieren. Für den breiten Einsatz in mehreren Anwendungsszenarien sind diese ICs nicht flexibel genug.

Die meisten kommerziellen RFID-Sensorsysteme werden jedoch aus klassischen RFID-Transponder-ICs, Mikrocontrollern (MCU) und einzelnen Sensor-ICs *diskret* aufgebaut. Die meiste Energie, die aus dem Lesegerät gewonnen werden kann, verbraucht der Mikrocontroller, was die Reichweite und damit die Anwendungsbreite einschränkt.

UHF-RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren

Das IMMS hat daher einen energieeffizienten UHF-RFID-Transponder-Chip entwickelt. Mit ihm lassen sich verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit



Abbildung 1:
UHF-RFID-Transponder mit dem am IMMS entwickelten UHF-RFID-Sensor-Transponder-Chip (Mitte) und Temperatursensor (unten rechts) für drahtlose Messungen. Foto: IMMS.

unterschiedlichem Leistungsbedarf passiv betreiben. Hierfür ist der Chip mit einem flexiblen On-Chip-I²C-Master und einer konfigurierbaren Power-Management-Einheit ausgestattet. Der entwickelte Chip benötigt keine Wartung oder Stromversorgung und kann so problemlos in verschiedene Produkte, Maschinen und Objekte in den unterschiedlichsten Anwendungsszenarien zur Sensordatenerfassung eingebunden werden. Ein solcher RFID-Transponder-IC war bisher nicht verfügbar.

Lösung im Detail

Ausgangspunkt: Nachteile etablierter diskreter Lösungen überwinden

In diskret aufgebauten kommerziellen RFID-Sensorsystemen werden die Sensoroperationen vom Mikrocontroller per SPI oder I²C gesteuert, d.h. die MCU agiert als Master und der RFID-Transponder-IC sowie die Sensoren operieren als Slave. Solche Systeme haben drei wesentliche Nachteile bezüglich:

- 1. Energieeffizienz:** Der Großteil der verfügbaren Energie wird von der MCU mit ca. 100 μ A/MHz verbraucht. Im Gegensatz zu HF-RFID haben UHF-RFID-Transponder ein sehr knappes Energiebudget, da die Fernfeldenergie sehr klein und der Wirkungsgrad der Energieextraktion mit ca. 30 – 40 % sehr niedrig ist. Die Kommunikationsreichweite und die Lesezuverlässigkeit des RFID-Sensors werden durch den Mikrocontroller stark limitiert.
- 2. Flexibilität:** Der Sensorbetrieb wird nicht direkt durch das RFID-Lesegerät, sondern durch die MCU gesteuert. Die Firmware der MCU muss Sensor-spezifisch programmiert werden basierend auf der Startzeit, dem Energieverbrauch und dem Messzeitraum. Das bringt Komplexität und zusätzlichen Aufwand bei der Entwicklung und dem Aufbau der RFID-Sensoren mit sich.
- 3. Kosteneffizienz:** Die MCU inklusive der für sie benötigten externen Bauelemente macht einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten des RFID-Sensors aus.

Lösungsansatz: Transponder-Architektur ohne Mikrocontroller

Es bedurfte neuer Transponder-Architekturen, um digitale Sensoren ohne MCU betreiben und die genannten Nachteile überwinden zu können. Das IMMS hat daher

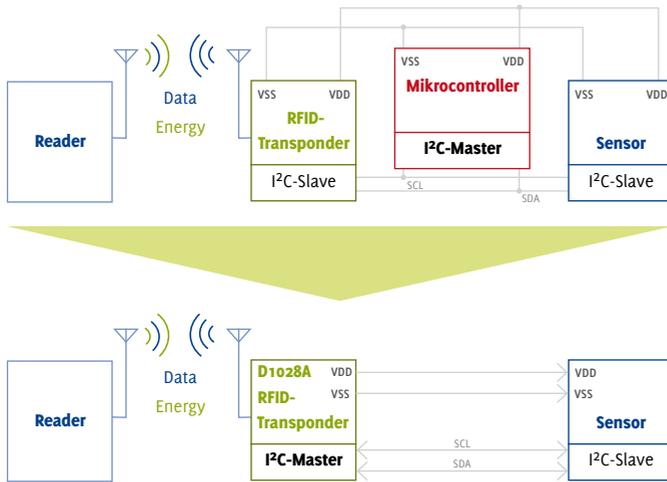


Abbildung 2:

Oben: In herkömmlichen diskret aufgebauten RFID-Sensorsystemen werden die Sensoren (Slave) vom Mikrocontroller als Master gesteuert.

Unten: In RFID-Sensorsystemen mit dem neuen RFID-Transponder-IC D1028A mit integriertem (on-chip) Master ist kein Mikrocontroller mehr notwendig. Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

im Projekt RoMulus einen neuen RFID-Transponder-IC mit integriertem (on-chip) Master entwickelt (Abbildung 2). Die Master-Slave-Kommunikation wird direkt durch das RFID-Lesegerät mittels Schreiben der I²C-Kommunikationsinformationen in die Befehlsregister im Transponderspeicher gesteuert. Diese Informationen werden vom On-Chip-I²C-Master verwendet, um die I²C-Transaktionen mit den externen Sensoren zu initiieren.

RFID-Sensor-Transponder-IC des IMMS mit I²C-Master

Der vom IMMS entwickelte EPC-C1-G2-kompatible UHF-RFID-Sensor-Transponder-IC kann dank des flexiblen On-Chip-I²C-Masters und der konfigurierbaren Power-Management-Einheit eine regulierte Spannung für verschiedenartige externe Sensoren bis zu 1,8 V bei einem maximalen Strom auf 1 mA liefern. Durch den On-Chip-I²C-Masterblock ist ein Mikrocontroller für Lese-/Schreiboperationen mit externen Sensoren nicht notwendig. Dies senkt den Stromverbrauch des Gesamtsystems und die Anzahl der externen Komponenten, die zum Aufbau eines RFID-Sensortransponders benötigt werden.

Weiterhin bietet der Chip folgende Konfigurationsmöglichkeiten: mehrfacher Lese- und Schreibbetrieb; kombinierter Lese- und Schreibbetrieb (Schreibinformationen zum Starten des Sensorbetriebs und Zurücklesen der erfassten Daten nach dem Betrieb); Startverzögerung (Zeit für das Starten des Sensors); Verzögerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden I²C-Schreibvorgängen (erforderlich beim Schreiben von Informationen in einen externen nichtflüchtigen Speicher). Die Architektur des Chips ist in Abbildung 3 dargestellt.

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de

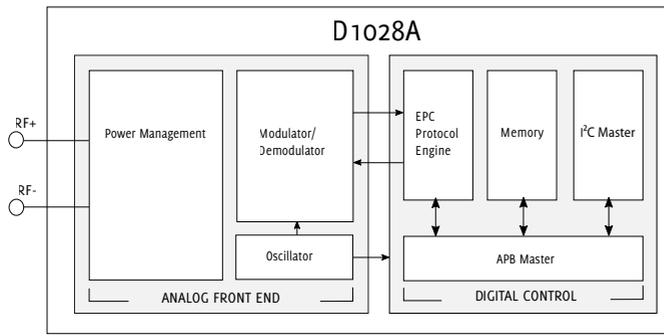


Abbildung 3:

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Architektur des am IMMS entwickelten RFID-Transponder-ICs mit der Bezeichnung D1028A.

Grafik: IMMS.

Energiespeicherung und Verbrauchsfluss

Einzigartig am entwickelten Chip ist das flexible Power Management, mit dem eine stabile Kommunikation mit den externen I²C-Sensoren erreicht wird. Es liefert stabile Spannungen nicht nur für die internen Schaltungen, sondern auch für die externen Sensoren. Der Chip nutzt einen externen Kondensator, auf dem automatisch Energie gespeichert wird, während sich der Sensortransponder im Energiefeld des Lesegeräts befindet. Wenn die erforderliche Energie für den System- und Sensorbetrieb erreicht ist, wird ein internes Interrupt-Signal "Power_OK" initiiert. Ab diesem Zeitpunkt kann der Betrieb der verbundenen I²C-Slave-Chips eingeleitet werden. Der Ladevorgang des externen Kondensators, die Schreib-/Lesesequenz und die Verzögerung zwischen zwei Befehlen sind über Standard-Lese-/Schreibbefehle konfigurierbar, um die Art und den unterschiedlichen Stromverbrauch von handelsüblichen Sensoren zu berücksichtigen. Das Power Management und der Energieverbrauchsfluss mit externem I²C-Sensor sind in der Abbildung 4 dargestellt.

Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de

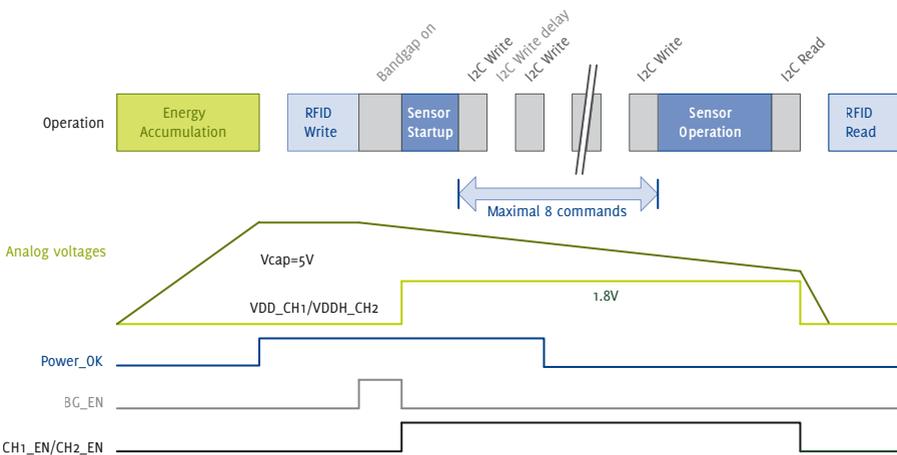


Abbildung 4: Power Management und Energieverbrauchsfluss des RFID-Transponder-ICs mit externem I²C-Sensor. Grafik: IMMS.

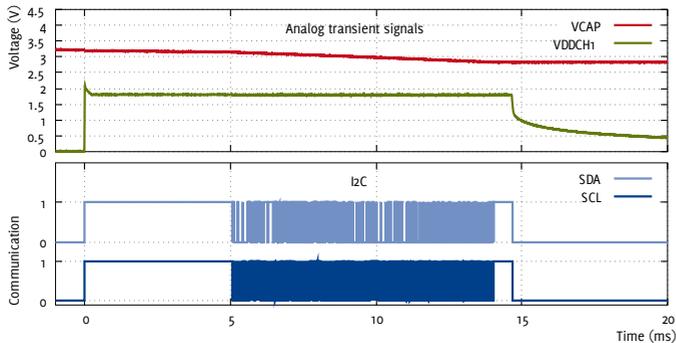


Abbildung 5:
Der RFID-Transponder-IC liefert eine stabile 1,8 V-Spannung für den I²C-Betrieb. Die Messergebnisse bestätigen die Funktionalität des Power Managements und der Kommunikation mit einem externen I²C-Slave-IC.
Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Messung und Charakterisierung

Der RFID-Sensor-Transponder-IC ist in einer 0,18- μ m-Standardtechnologie von X-FAB entwickelt worden. Für die Messung und Charakterisierung des entwickelten Chips hat das IMMS eine Evaluierungsplatine mit eingebetteter Antenne entwickelt. Um den Funktionstest des Power Managements und der I²C-Kommunikation durchzuführen, wurde ein kommerzieller I²C-Slave-IC mit dem Transponder-IC verbunden. Der Chip lieferte eine stabile 1,8 V-Spannung für den I²C-Betrieb. Die in der Abbildung 5 dargestellten Messergebnisse bestätigen die Funktionalität des Power Managements und der Kommunikation mit einem externen I²C-Slave-IC.

Mehr zu Test
und Charakterisierung:
www.imms.de

Ausblick: Digitale Wertschöpfung dank RFID-basierter Sensorik

Der von IMMS entwickelte UHF-RFID-Transponder-IC bietet für die Industrie eine Grundlage, innovative Produkte zur drahtlosen Sensordatenerfassung zu entwickeln und mit neuen datengesteuerten Geschäftsmodellen Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Nach den Messungen und der erfolgreichen Auswertung des Proof-of-Concept arbeitet das IMMS derzeit an einem Redesign des Chips, um es seinen Industriekunden für die Entwicklung drahtloser Produkte zur Verfügung zu stellen. Die Wertschöpfung auf Basis von Sensordaten wird für die Industrie in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Daher arbeitet das IMMS ständig mit seinen strategischen Industriepartnern zusammen, um innovative energiesparende und effiziente Chips zu entwickeln.

Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de

Kontakt:

Muralikrishna Sathyamurthy, M.Sc., MBA, muralikrishna.sathyamurthy@imms.de

Alle RoMulus-
Publikationen:
www.imms.de

Wir danken unserem Partner microsensys für die vielen Diskussionen zu praktischen Anforderungen an den ASIC sowie an nachfolgende Entwicklungen von Produkten und für die konstruktive Zusammenarbeit im Projekt RoMulus.

Das Projekt RoMulus wurde unter dem Förderkennzeichen 16ES0362 im Förderprogramm IKT 2020 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Messumgebung zur dynamischen Charakterisierung des Leistungsverbrauchs von Ultra-Low-Power-Schaltungen



Arbeiten für eine Messschaltung, die das IMMS entwickelt hat, um Ultra-Low-Power-Schaltungen dynamisch charakterisieren zu können. Mit diesen ULP-Schaltungen können vernetzte integrierte Sensorsysteme energieautark arbeiten. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Industrie 4.0 und IoT benötigen energieautarke vernetzte Sensorik

Digitalisierung ist der Schlüssel zur effizienten, vernetzten, automatisierten und flexiblen Produktion. Um hierfür Zustände, Prozesse und Qualität in der Fertigung zu überwachen, werden immer mehr Sensorsysteme eingesetzt. Sie sind einer der wesentlichen Wegbereiter für die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) und das Internet der Dinge (IoT).

Mit diesen cyber-physischen Systemen (CPS) werden an zahlreichen Stellen Mess- und Steuerdaten erfasst, verarbeitet und transportiert. Um bestehende Maschinen und Anlagen mit der notwendigen Sensorik nachrüsten zu können, muss diese energieautark arbeiten, z.B. an schwer zugänglichen Stellen, wo ein Batteriewechsel oder eine kabelgebundene Stromversorgung nicht möglich sind. Hier wie auch im gesamten IoT-Umfeld steigen die Anforderungen an integrierte Sensorik und Auswerteelektronik stetig, da immer komplexere Aufgaben zu erledigen sind und dabei nur wenig Energie verbraucht werden soll.

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de*

*Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de*

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2018

Neue Ultra-Low-Power-Schaltungen bringen höhere Energieeffizienz in die Systeme, lassen sich aber noch nicht mit Standard-Messtechnik validieren

Für diese autarken Systeme werden immer häufiger Ultra-Low-Power-Schaltkreise (ULP-IC) eingesetzt. Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS Ultra-Low-Power-Schaltungen für eine sehr energieeffiziente Verarbeitung von Sensorsignalen für einen Temperatursensorchip entwickelt und in die Fertigung übergeben. Diese anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) wurde mit einem äußerst niedrigen Energiebedarf ausgelegt, was insbesondere bei Ein- und Umschaltvorgängen eine Herausforderung für handelsübliche Messtechnik zur Charakterisierung der dynamischen Leistungsaufnahme darstellt.

Für ULP-Schaltungen liegt der Energiebedarf im Standby-Betrieb im Nanowatt-Bereich, kann jedoch im Normalbetrieb auf das Millionenfache ansteigen. Für die Messtechnik zieht das einige Herausforderungen nach sich. Die wichtigste Kenngröße zur Bewertung der Leistungsaufnahme von ULP-ASICs ist ihre Stromaufnahme, die im Wertebereich typischerweise zwischen Nanoampere (nA) im Standby-Betrieb bis Milliampere (mA) im Normalbetrieb schwankt. Daher muss der Strombedarf mit einem sehr hohen Dynamikbereich von $1 \text{ nA} : 1 \text{ mA} \triangleq 1 : 10^6$ messtechnisch erfasst werden – und das stufenlos. Ein Umschalten zwischen Normal- und Standby-Betrieb dauert zudem nur Bruchteile von Sekunden und muss ebenfalls erfasst werden. Das erfordert eine hohe Geschwindigkeit des Messsystems.

Erst wenn ein Messsystem diese Anforderungen erfüllt, kann die Leistungsaufnahme von elektrischen Verbrauchern, sprich ULP-ASICs in einem autarken vernetzten Sensorsystem, während ihres Einsatzes untersucht und charakterisiert werden. Diese Messergebnisse bilden die Basis für die Auslegung der Energieversorgung energieautarker elektronischer Systeme. Am Markt verfügbare Strommessgeräte erfüllen diese Anforderungen nur unzureichend.

Mehr zu Energieeffizienz:
www.imms.de

Mit der Messschaltung des IMMS lassen sich Ultra-Low-Power-Schaltungen charakterisieren

Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS eine Messschaltung, die die beschriebenen Anforderungen erfüllt, als Vorsatzgerät für handelsübliche Oszilloskope entwickelt, aufgebaut und erfolgreich eingesetzt. Mit der Hardware wird der Strombedarf im Dynamikbereich von 1 nA bis 10 mA in Abhängigkeit von der Zeit mit einem Messfehler von unter 1% erfasst. Die Messschaltung ist zudem so gestaltet, dass die Betriebsspannung über der Last während der gesamten Messung unabhängig vom Laststrom konstant gehalten wird.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf
www.imms.de

Anforderungen und Messkonzepte

Die angestrebten Messparameter der am IMMS entwickelten Schaltung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Parameter	Anforderungen
Spannungsbereich der Last	$U_L = 0 \text{ V} \dots 3,3 \text{ V}$
Laststrombereich	$I_L = 1 \text{ nA} \dots 10 \text{ mA} \pm 1 \%$
Frequenzbereich	$f = \text{DC} \dots 1 \text{ MHz}$
Spannungsdrop	$U_{\text{drop}} < 1 \text{ mV}$
Rauschpegel (<100 kHz)	$I_{\text{noise}} < 1 \text{ nA}$

Zur Realisierung der Messschaltung, die in Abbildung 1 dargestellt ist, wurden mehrere Konzepte untersucht und bezüglich ihrer Eignung bewertet.

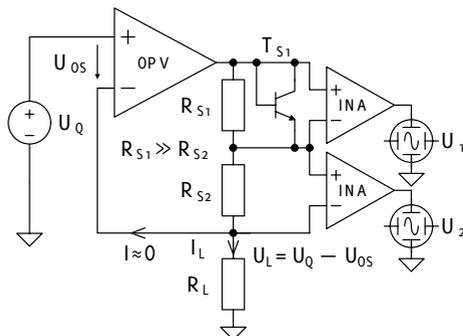
Schritt 1: Laststrom ermitteln

Für eine erste Variante der Strommessung an ULP-ICs wurde ein Shunt-Widerstand zwischen Quelle und Last vorgeschaltet. Aus dem gemessenen Spannungsabfall U_S über dem Shunt R_S wird der Laststrom $I_L = U_S/R_S$ berechnet. Bei dieser passiven Variante entsteht jedoch der Nachteil, dass die Versorgungsspannung der Last U_L nicht mit der Spannung der Quelle U_Q übereinstimmt und somit ein Spannungs-Drop U_{drop} in Abhängigkeit des Betriebsstroms entsteht.

Schritt 2: Betriebsspannung konstant halten

Um diesem Effekt zu begegnen, wird zum Shunt-Widerstand ein Operationsverstärker (OPV) zwischen Quelle und Last geschaltet. Dieser OPV regelt dann die Spannung der Last U_L auf die Spannung der Quelle U_Q abzüglich der Offsetspannung U_{OS}

Abbildung 1:



Prinzipielle Schaltungsstruktur der Messschaltung mit geregelter Spannung an der Last und erweiterbarem Dynamikbereich der Strommessung.

Grafik: IMMS.

des Operationsverstärkers. Der Spannungsabfall über dem Shunt wird differenziell mit einem Instrumentationsverstärker (INA) aufgenommen, verstärkt und mit einem Messgerät, z.B. mit einem Oszilloskop, gemessen. Somit wird die Betriebsspannung unabhängig vom Messbereich beibehalten.

Schritt 3: Dynamikbereich der Strommessung erweitern

Der angesprochene große Dynamikbereich erfordert ebenfalls weitere Neuerungen. Hierfür werden Transistoren parallel zu den Shunt-Widerständen geschaltet. Sobald der Spannungsabfall über dem Shunt die Größe der Flussspannung des Transistors von ca. 700 mV erreicht, wird der Transistor leitfähig und schließt den Shunt kurz. Auf diese Weise können mehrere Shunts in Reihe geschaltet werden, um mit Hilfe des variierenden Widerstandswertes des Shunts einen deutlich größeren Dynamikbereich des messbaren Stromes abzudecken.

Entsprechend dieses Konzepts wurde eine Messschaltung mit vier Strommessbereichen entwickelt und aufgebaut (Abbildung 2).

Charakterisierung der neuen Messschaltung

Die Messschaltung wurde bei zeitlich konstantem Strom mit einem Präzisions-IV-Analysator charakterisiert. Statt eines Verbrauchers wurde der Analysator als Last eingesetzt und damit ein Strom von 1 nA bis 10 mA generiert. Gleichzeitig wurden parallel die Spannungsabfälle über den Shunts an den Ausgängen aller INAs gemessen und daraus die Ströme ermittelt. Verglichen wurden die Messergebnisse mit dem eingespeisten Strom. Die prozentuale Abweichung zwischen dem eingespeisten und

gemessenen Strom beläuft sich innerhalb des geforderten Bereiches von 1 nA bis 10 mA auf unter $\pm 1\%$. Auch bei den anderen

Parametern der Messschaltung konnte nachgewiesen werden, dass die ursprünglich angestrebten Werte erreicht wurden.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de

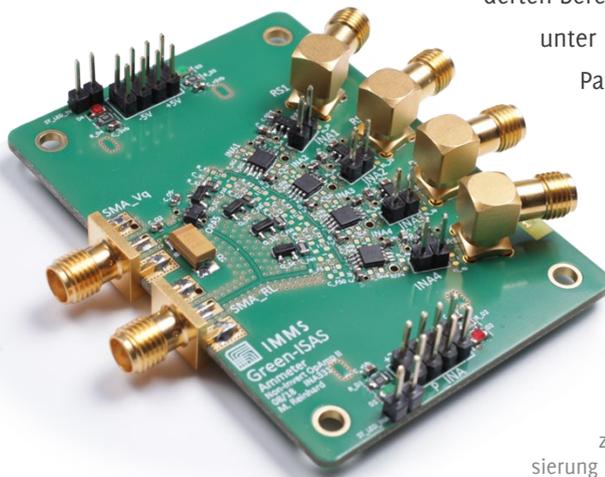


Abbildung 2:
Am IMMS entwickelte Messschaltung mit vier Strommessbereichen für die zeitaufgelöste Leistungscharakterisierung von ULP-Schaltungen. Foto: IMMS.

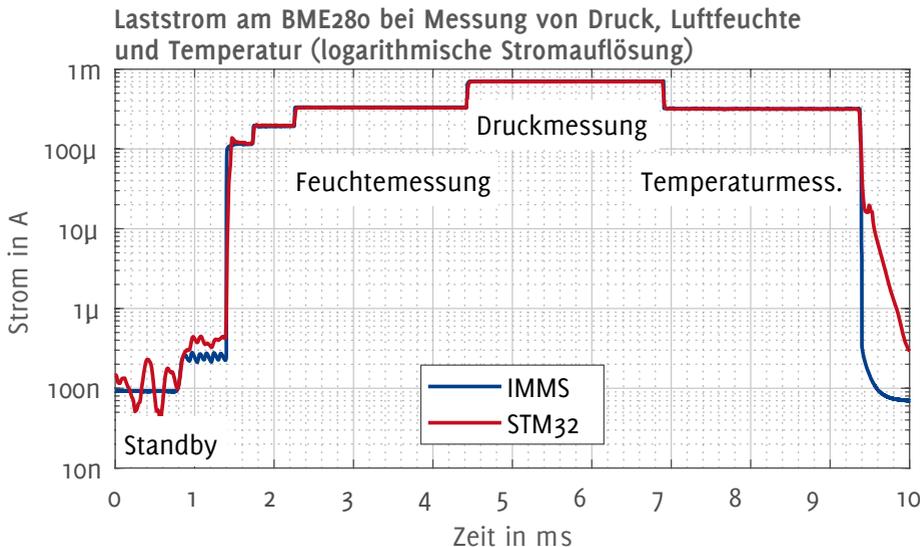
Besonders deutlich werden die erzielten Verbesserungen im direkten Vergleich mit handelsüblichen Messgeräten, wie dem STM32CubeMonitor-Power, der einen Strombereich von 100 nA bis 50 mA und eine Bandbreite von 100 kHz aufweist. Im Vordergrund stehen dabei vor allem die Einflüsse der Erweiterung des Strommessbereichs bis zu minimalen Strömen von 1 nA sowie der erhöhten Bandbreite von bis zu 1 MHz. Hierzu wurde die Stromaufnahme am Beispiel des ULP-Sensors BME280 von Bosch untersucht. Mit diesem IC werden Temperatur, Druck und Luftfeuchte bestimmt. Laut seiner Spezifikation benötigt der Sensor im Standby-Betrieb 100 nA und im Normal-Betrieb bis über 700 µA. Der BME280 wurde so programmiert, dass er aus dem Standby-Modus aufwacht, Messungen ausführt und danach wieder in den Standby-Betrieb zurückkehrt. Der Strom wurde dabei in Echtzeit aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Messungen sind in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird vor allem die Abweichung des STM32CubeMonitor-Power im Standby-Betrieb des BME280 aufgrund der begrenzten Auflösung und der verlangsamteten Rückkehr in den Standby-Betrieb aufgrund parasitärer Kapazitäten deutlich.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessung zeigen deutlich, dass die IMMS-Messschaltung die gestellten Anforderungen erfüllt. Der Dynamikbereich des zu messenden Stroms von 1 nA bis 10 mA wird mit einem Messfehler von unter 1 % abgebildet. Auf Grund der Schaltungstopologie wird die Betriebsspannung über der Last während der gesamten Messung unabhängig vom Laststrom konstant gehalten.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de

Abbildung 4: Vergleiche von Strommessungen am Bosch-Sensor BME280 mit der am IMMS entwickelten Messschaltung für ULP-Sensoren und dem kommerziell verfügbaren Messgerät STM32CubeMonitor. Grafik: IMMS.



Dank der vorgestellten Messschaltung sind exakte Vorhersagen über den Energiebedarf von Sensorchips mit integrierten Ultra-Low-Power-Signalverarbeitungsschaltungen oder auch von komplexeren ULP-Systemen, wie z.B. Funksensoren, möglich. Dadurch können beispielsweise Messintervalle so auf die vorhandene Energie abgestimmt werden, dass ein autarkes Sensorsystem realisiert werden kann. Die Messschaltung ist darüber hinaus ein leistungsfähiges Entwicklungswerkzeug bei der Optimierung von ULP-Systemen, da Auswirkungen von Hardware- und Softwareänderungen auf den Energiebedarf schnell und exakt ermittelt werden können.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Um die Messschaltung ohne ein Oszilloskop nutzen zu können, muss sie um eine Auswerte- und Darstellungseinheit erweitert werden. Dafür werden am IMMS kompakte Lösungen mit Mikrocontrollern und Analog-zu-Digital-Wandlern untersucht. Bei einer Abtastrate von über 1 MSample/s können dann die Spannungsabfälle an den Shunt-Widerständen parallel gemessen werden. Nach einem entsprechenden Algorithmus kann der Mikrocontroller daraus den resultierenden Laststrom ohne Totzeiten beim Umschalten zwischen den Shunts ermitteln.

Mehr zu Test und Charakterisierung auf www.imms.de

Kontakt: Dipl.-Ing. Michael Meister, michael.meister@imms.de



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Sozialfonds

Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

Die Forschergruppe Green-ISAS wurde gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2016 FGR 0055.

Mehr zu Green-ISAS auf www.imms.de

Alle Green-ISAS-Publikationen: www.imms.de

Green-ISAS –

Entwurfsmethodik für applikationsspezifische elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester



Arbeiten mit einem Evaluationsboard für elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester, mit denen die am IMMS hierfür entwickelte Entwurfsmethodik verifiziert wurde. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Im industriellen Umfeld und in der Logistik sind mechanische Bewegungen allgegenwärtig. Sie können über die Wandlung von Vibrationen in elektrische Energie jene smarte Sensorik versorgen, die diese Maschinen und Anlagen überwachen sollen. Mit Energie-Harvesting wird es möglich, Sensor/Aktor-Systeme zu energieautonomen Industrie-4.0-Komponenten auszubauen, die an vielen und vor allem an schwer zugänglichen Stellen ohne einen Zugang zu externer Stromversorgung Mess- und Steuerdaten erfassen, verarbeiten und übertragen und damit den Weg zu einer automatisierten, vernetzten und flexiblen Produktion ebnen.

Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS elektromagnetische Energie-Harvester für die Energiegewinnung aus Vibrationen untersucht. Ziel war es, für verschiedene Anwendungen optimierte elektromagnetische Energie-Harvester mit maximaler Energieausbeute schnell entwerfen zu können.

*Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de*

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de*

*Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de*

Elektromagnetische Energie-Harvester können sehr unterschiedlich aussehen

Elektromagnetische Energie-Harvester lassen sich in hohem Maß an verschiedene Bauräume anpassen, bestehen aus mindestens einem Magneten und einer Spule

—
[Jahresbericht](#)
© IMMS 2018

und erzeugen durch deren Relativbewegungen zueinander ein zeitlich veränderliches Magnetfeld und damit eine Induktionsspannung. Die räumliche Anordnung der Magneten, Spulen oder auch optionale Eisenrückschlüsse und die zulässigen Relativbewegungen ermöglichen unterschiedlichste Grundstrukturen. Um diese Vielfalt hinsichtlich ihrer Eignung für die Anforderungen automatisiert zu vergleichen, hat das IMMS Methoden entwickelt, die einen schnellen und kostengünstigen Entwurf anwendungsspezifischer Energiewandler ermöglichen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Design-Tool für anwendungsspezifische elektromagnetische Energie-Harvester

Dazu hat das IMMS eine Entwurfsmethodik für anwendungsspezifische Energie-Harvester entwickelt und diese als Design-Tool in MATLAB® implementiert. Das Werkzeug ermöglicht es Konstrukteuren, über eine grafische Oberfläche eine Vielzahl von Spezifikationsparametern an das Programm zu übergeben, wie z.B. zu Größe und Geometrie des verfügbaren Bauraums, zu Vibrationscharakteristika und zur gewünschten Leistung. Das Tool vergleicht anhand dieser Angaben automatisch verschiedene hinterlegte Grundstrukturen und bietet eine Auswahl von Designlösungen als Ergebnis an. Dieser Prozess basiert auf einer Vielzahl von parametrisierten Modellen, die das Verhalten der Strukturen analytisch beschreiben. Die Anzahl dieser Strukturen kann jederzeit erweitert werden. Durch die realisierte einheitliche Schnittstelle können weitere Grundstrukturen nachträglich auch vom Nutzer hinzugefügt werden.

Lösung im Detail

Ausgangspunkt und Anforderungen

Für die in Green-ISAS entwickelten energieeffizienten Industrie-4.0-Komponenten konnte durch gezielte Maßnahmen bei der Hardware und Software der Leistungsverbrauch erheblich gesenkt werden. Verschiedene Ausbaustufen von Demonstratoren benötigen 50 bis 100 μW für eine Temperaturmessung sowie standardkonforme Funkübertragungen aller 5 s und gaben damit den Rahmen für die Lösungen zur Energieversorgung mittels elektromagnetischer Energie-Harvester und das für deren Entwurf entwickelte Design-Tool vor.

Die angestrebten Leistungen der elektromagnetischen Energie-Harvester liegen im Bereich von bis zu einigen 100 μW mit Abmessungen der aktiven Wandlerstrukturen im Mikro- und Millimeterbereich. Indem diese Harvester kinetische in elektrische Energie wandeln, können sie in autarken Funksensorsystemen die Lebensdauer der dort eingesetzten Batterien erheblich verlängern bzw. diese sogar ersetzen ([3], [4], [6], [7]).

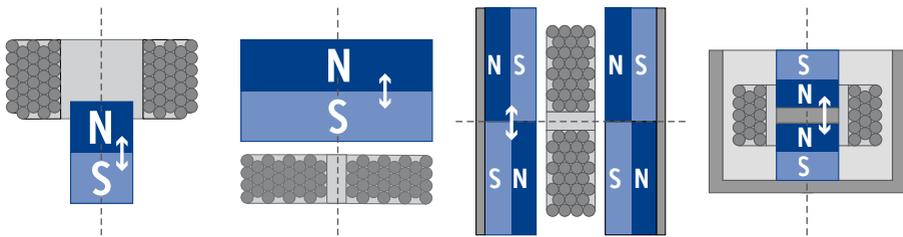


Abbildung 1: Beispiele für die Vielfalt an topologischen Grundstrukturen für elektromagnetische Energie-Harvester: Schnittdarstellung durch verschiedene Zylinderstrukturen. Grafik: IMMS.

Topologische Grundstrukturen elektromagnetischer Energie-Harvester

Vielfältige Anregungs- und Bauraumbedingungen erfordern verschiedenste Lösungsprinzipien. Eine variable Anzahl und Anordnung der Magneten und Spulen gestatten viele grundsätzlich mögliche topologische Grundstrukturen, vgl. Abbildung 1, und spannen damit einen großen Lösungsraum auf. Dieser soll mit der am IMMS entwickelten systematischen rechnergestützten Methode nicht nur auf für die Anwendung geeignete Lösungen verdichtet werden und damit einen schnellen und kostengünstigen Entwurf von robusten applikationsspezifischen Energie-Harvestern ermöglichen. Die Leistungsdichte der Vibrationswandler soll darüber hinaus über eine Ableitung von Optimierungsalgorithmen gesteigert werden ([2], [5]).

Im automatisierten Entwurfstool realisiertes Vorgehen

Die dem Entwurf zugrundeliegende Vorgehensweise ist in Abbildung 2 zusammengefasst. Zunächst wurde ein Konzept zur Definition standardisierter Spezifikationsparameter erarbeitet. Es werden neben der Anregungscharakteristik, dem Bauraum und der Form auch die elektrischen Ausgangsgrößen und fertigungstechnische

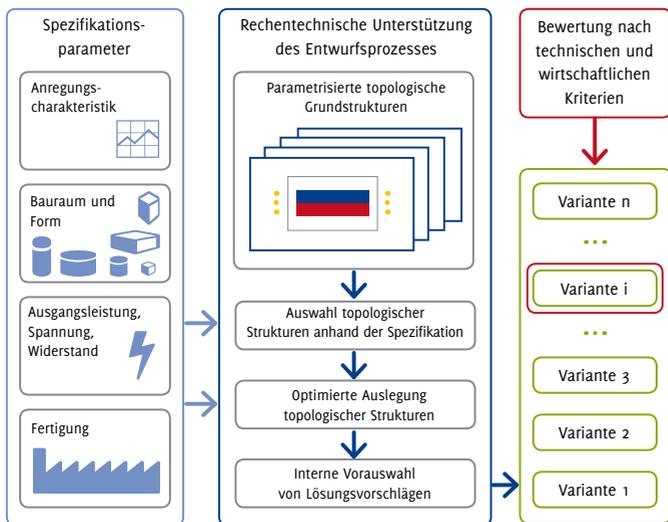


Abbildung 2:

Schema des automatisierten Entwurfstools.

Grafik: IMMS.

Randbedingungen berücksichtigt. Aufbauend auf der Spezifikation werden aus den hinterlegten topologischen Grundstrukturen potentiell geeignete Strukturen ausgewählt, um den Rechenaufwand zu verringern. Für diese werden jeweils Auslegungsvarianten ermittelt und wiederum intern vorausgewählt. Diese Lösungsvorschläge kann der Entwickler dann unter weiteren technischen oder wirtschaftlichen Kriterien bewerten.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Erarbeitung einer Bibliothek von parametrisierten Berechnungsmodellen für unterschiedliche topologische Grundstrukturen

Der Schwerpunkt lag auf der Erarbeitung von parametrisierten Modellen für viele unterschiedliche topologische Grundstrukturen. Essentiell war hierfür die Berechnung der magnetischen Felder von Permanentmagneten. Das IMMS hat verschiedene Modellansätze für die analytische Beschreibung von Magnetsystemen untersucht und in MATLAB® umgesetzt. Damit ist man unabhängig von speziellen Tools für die Finite-Elemente-Methode (FEM). Untersuchungen zeigten, dass mit den MATLAB®-Modellen sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen aus dem FEM-Programm ANSYS Maxwell erzielt werden.

FEM-Dienstleistungen auf www.imms.de.

Geringfügige Abweichungen lassen sich dadurch erklären, dass die analytischen Modelle eine homogene Permeabilität voraussetzen. Die Permeabilität beschreibt die magnetische Leitfähigkeit eines Materials, also das Verhältnis zwischen magnetischer Flussdichte und Feldstärke. Die meisten Permanentmagneten bestehen aus seltenen Erden, welche zu den paramagnetischen Stoffen zählen, deren Permeabilitätszahlen etwas größer als die von Luft sind und im Bereich von ca. 1,05 bis 1,1 liegen. In der MATLAB®-Implementierung des Design-Tools wird im gesamten Raum ein Wert von Eins angenommen. Die genannten Abweichungen wurden mit Blick auf Permeabilitätszahlen ferromagnetischer Stoffe von einigen 1.000 als vernachlässigbar eingestuft.

Realisierung des Design-Tools und Funktionsumfang

Das IMMS hat das gesamte Design-Tool inklusive grafischer Oberfläche ebenfalls in MATLAB® implementiert. Zunächst wurden hierfür parametrisierte Funktionen von häufig verwendeten Grundstrukturen umgesetzt. Anschließend wurden auch modulare Anordnungen untersucht, bei denen mehrere Spulen verwendet werden. Für jede Architektur wurde eine eigene Funktion definiert, so dass der Architekturumfang einfach erweiterbar ist. Durch die realisierte einheitliche Schnittstelle, welche

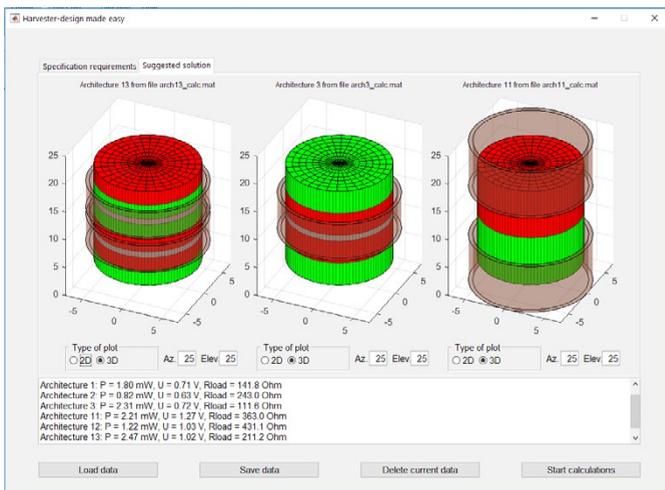


Abbildung 3:

Grafische Nutzer-
oberfläche des
entwickelten
Designtools.

Grafik: IMMS.

die Datenstruktur der Ein- und Ausgabeparameter festlegt, können weitere Grundstrukturen nachträglich auch vom Nutzer hinzugefügt werden.

Übergabe der Spezifikationsparameter

Die Eingabe der Spezifikationsparameter erfolgt über die grafische Nutzeroberfläche. Zum aktuellen Stand werden dabei das Volumen, die Höhe und die Anregungsamplitude sowie -frequenz vorgegeben. Anhand dieser Daten wird die Geometrie mit maximaler Leistungsabgabe ermittelt. Alle geometrischen Größen, die von der spezifischen Geometrie abhängen, werden im Programm in der einheitlichen Datenstruktur neben den Spezifikationsparametern abgelegt. Die Daten werden gespeichert und können in einem Konstruktionsprogramm als Parameterdatei geladen werden. Die drei Strukturen mit der höchsten Ausgangsleistung werden auch in der grafischen Nutzeroberfläche dargestellt, vgl. Abbildung 3.

Auslegung und Optimierung der elektromagnetischen Energie-Harvester

Für die Auslegung der elektromagnetischen Energie-Harvester wird der komplexe, physikalische Zusammenhang des mechanisch-elektrischen Wandlersystems analytisch beschrieben. In Folge der äußeren Anregung wird die bewegliche Baugruppe, zumeist der Magnet, ausgelenkt. Die dadurch auftretende Positionsänderung führt zu einer Induktionsspannung in der Spule, welche wiederum eine mechanische Dämpfung durch den fließenden Strom verursacht. Die Dämpfung beeinflusst dabei die resultierende Auslenkungsamplitude und den damit verbundenen Bauraum. Mittels Optimierungsfunktion werden die Magnet- und Spulenabmessungen so be-

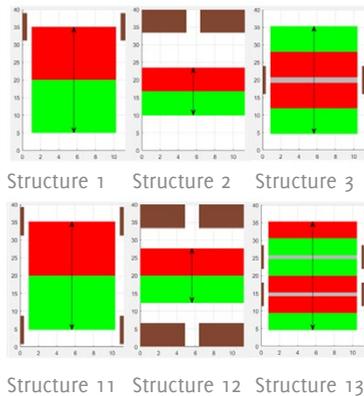
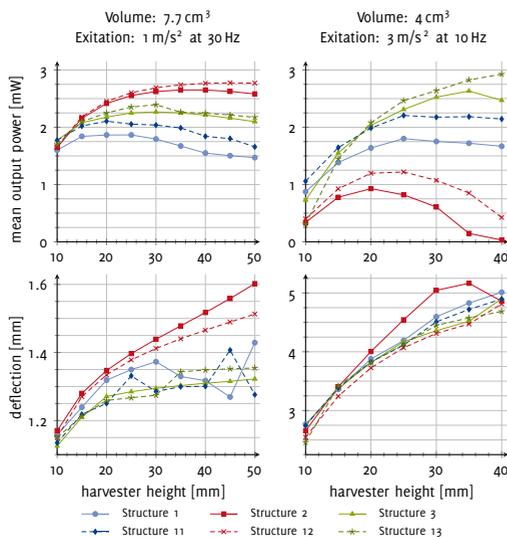


Abbildung 4:
Exemplarische Darstellung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Höhe des Harvesters für zwei unterschiedliche Szenarien. Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

rechnet, dass unter Berücksichtigung der notwendigen Auslenkung alles im vorgegebenen Bauraum angeordnet und eine maximale Ausgangsleistung erreicht wird.

Studien mit dem Design-Tool zur Bewertung von Grundstrukturen

Mit Hilfe des umgesetzten Tools wurden unterschiedliche Studien durchgeführt, um die Eignung von verschiedenen Grundstrukturen bei variablen Randbedingungen zu untersuchen ([1], [8]). Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen sechs Grundstrukturen für zwei verschiedene Szenarien. Als Bauraum für den Harvester wurden einmal 7,7 cm³, was einer AA-Batterie entspricht, und einmal 4 cm³, ähnlich einer AAA-Batterie, betrachtet. Die Anregungen wurden zunächst für Vergleichszwecke so gewählt, dass die Ausgangsleistungen im Bereich von 2 mW liegen. Für den größeren Bauraum ist die Frequenz der Anregung höher, die Amplitude jedoch geringer, so dass auch die interne Auslenkung geringer ausfällt. Im zweiten Fall treten hingegen wesentlich höhere interne Auslenkungen auf. Der betrachtete Frequenzbereich ist dabei insgesamt eher niederfrequent, was in vielen industriellen Anwendungen typisch ist.

Die Studie zeigt, dass keine der betrachteten Strukturen immer die höchste Ausgangsleistung bietet. Modulare Strukturen (hier mit den Bezeichnungen 11, 12, 13), welche durch die Erweiterung der Grundkonfigurationen um eine oder mehrere Spulen und gegebenenfalls weitere Magneten entstehen, liefern häufig höhere Ausgangsleistungen als die einfachen Strukturen. Diese sind jedoch oft mit höheren

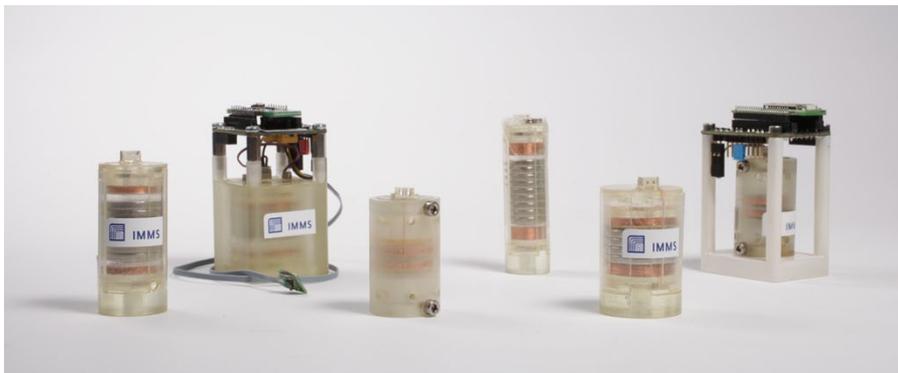


Abbildung 5: Auswahl gefertigter Demonstratoren (Aufbauten rechts und 2. v. links mit Frontend- und Funksensorschaltung). Foto: IMMS.

Produktionskosten verbunden. Insgesamt scheinen Strukturen wie bei 2 und 12, bei denen sich der Magnet axial zur Spule bewegt, ohne diese zu durchdringen, besonders für kleine Auslenkungen geeignet zu sein. Bei notwendigen großen Auslenkungen wird hingegen der Abstand zwischen der Spule und dem Magneten zu groß, sodass das magnetische Feld und auch die Änderung bei einer Relativbewegung sehr klein sind. Im Falle des Beispiels mit einem Bauraum von 4 cm^3 wird auch die Abhängigkeit von der Höhe und damit dem Aspektverhältnis des Bauraumes deutlich gezeigt. Für eher flache Systeme zeigt Struktur 11 klare Vorteile, wohingegen für recht hohe Systeme die Strukturen 3 und 13 die höchste Ausgangsleistung liefern.

Gefertigte Energie-Harvester-Strukturen zur Verifikation des Tools

Um den rechnergestützten Entwurf verifizieren zu können, wurden unterschiedliche Demonstratoren dimensioniert, die Gehäuse und Spulenkern mittels 3D-Druck gefertigt und die Spulen gewickelt. Die realisierten Energie-Harvester wurden mit einem Shaker charakterisiert, der die Vibrationen nachbildet, wie sie an Maschinen und Anlagen auftreten, vgl. Abbildung 6. Zur getrennten Analyse der mechanischen und elektrischen Übertragungsfunktion wurde die Auslenkung der beweglichen Masse mittels



Abbildung 6: Messaufbau zur Charakterisierung der Energie-Harvester mittels Shaker und Vibrometer. Foto: IMMS.

Vibrometer aufgezeichnet. Die elektrischen Ausgangsgrößen wurden einerseits mit ohmscher Last und Oszilloskop und andererseits mit elektronischen Frontendschaltungen, vgl. Abbildung 5, beschrieben.

Ausblick

Das Design-Tool hat das Potential, eine Hebelwirkung für den effizienten Entwurf von elektromagnetischen Vibrationswandlern zu entfalten, sobald das entwickelte Baukastenprinzip vollständig implementiert ist. Dazu sollen u.a. Erweiterungen erarbeitet werden, mit denen das notwendige Volumen der Energie-Harvester auch bei vorgegebener benötigter Leistung berechnet werden kann.

Die Ergebnisse wurden in acht Publikationen veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Sie bieten die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Versorgung energieautarker Systeme. Ein Ausgangspunkt für marktfähige Entwicklungen, die auf den entstandenen Grundlagen aufbauen, sind beispielsweise die unterschiedlichen anwendungsspezifischen Anregungsfrequenzen, mit denen die Vibrationswandler Energie bereitstellen sollen. Hierfür ist das IMMS bestrebt, Partner bei entsprechenden Anwendungsentwicklungen zu unterstützen.

Kontakt: Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

Gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds. Die Forschergruppe Green-ISAS wurde unter dem Kennzeichen 2016 FGR 0055 gefördert.

Eigene Veröffentlichungen:

- [1] Influence of the design space dimensions on the power density of electromagnetic vibration energy harvesters, B. LEISTRITZ, *4th Workshop in Devices, Materials and Structures for Energy Harvesting and Storage, May 17-18, 2017, Oulu, Finland.*
- [2] Design Methodology for Application-Specific Electromagnetic Energy Harvesters, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *59th Ilmenau Scientific Colloquium, September 11-15, 2017, Ilmenau*
- [3] Systematischer Entwurf Plug-and-Play-fähiger Funksensoren mit Vibrations-Energy-Harvestern, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, E. CHERVAKOVA, S. KRUG, S. EN-

67

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de

GELHARDT, A. SCHREIBER, 9. GMM-Workshop „Energieautonome Sensorsysteme“ (EAS), February 28 – March 1, 2018, Dresden.

68

> RoMulus:RFID

[4] **Wireless Sensor System with Electromagnetic Energy Harvester for Industry 4.0 Applications**, B. LEISTRITZ, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, A. SCHREIBER, W. KATTANEK, *Design, Automation and Test in Europe (DATE) Conference, March 19-23, 2018, Dresden.*

> Green-ISAS:Test

> Green-ISAS:EH

> StadtLärm

> fast wireless

[5] **Efficient design of application-specific electromagnetic vibration energy harvesters for industrial wireless sensor systems**, B. LEISTRITZ, *IDTechEx Conference and Fair, April 11-12, 2018, Berlin.*

> ADMONT

> RoMulus:MEMS

> Inhalt

[6] **Energieautarke Sensorsysteme für das IoT**, B. LEISTRITZ, T. HUTSCHENREUTHER, 22. *Magdeburger Logistiktage, „Logistik neu denken und gestalten“, June 20-21, 2018, Magdeburg.*

* Förderung

[7] **Industry 4.0-type Wireless Sensor Application Powered by a Semi-automatically Designed Mini-scale Electromagnetic Energy Harvester**, B. LEISTRITZ, F. SENF, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.*

[8] **Systematic comparison of basic structures for electromagnetic energy harvesters using an automated design methodology**, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.*

Alle Green-ISAS-

Publikationen:

www.imms.de



StadtLärm

Lärm-Monitoring-System unterstützt städtische Verwaltung

Lärm in Städten sichtbar machen, analysieren und vermeiden helfen soll die neue Plattform, die Audiodaten erhebt und verarbeitet. Das IMMS hat u.a. die Datendrehscheibe für alle Komponenten realisiert. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Schwankende Lärmbelastungen stellen Stadtverwaltungen vor Herausforderungen

Lärm beeinträchtigt die Lebensqualität. Stadtbewohner sind zahlreichen, stark schwankenden Lärmbelastungen durch Groß- und Sportveranstaltungen, Baumaßnahmen oder einzelne Verkehrsteilnehmer ausgesetzt. Kommunale Verwaltungen, die Veranstaltungen und Baumaßnahmen genehmigen, müssen dabei den Lärmimmissionsschutz beachten, dazu entsprechende Auflagen vorgeben, die Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte und Auflagen überwachen sowie Beschwerden bearbeiten. Traditionell wird dabei die Lärmbelastung in Stichproben mit qualifizierter Messtechnik nach den Vorgaben der einschlägigen gesetzlichen Norm, der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), vor Ort erfasst, d.h. mit vergleichsweise großem Aufwand und Personaleinsatz im Außendienst.

*Mehr zu
StadtLärm auf
www.imms.de*

Lärm-Monitoring-System unterstützt städtische Verwaltung: Gesamtsystem

Im Projekt „StadtLärm“ wurde ein System entwickelt und in der Stadt Jena in einem seit dem Frühjahr 2018 andauernden Feldtest erprobt. Mit dem System lassen sich

— Jahresbericht
© IMMS 2018

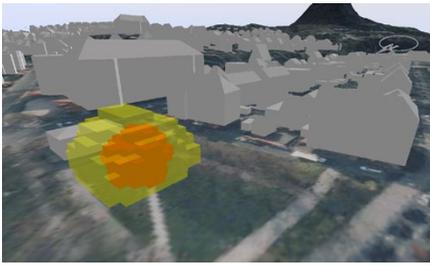


Abbildung 1:

Lärm-Raum-Modelle werden in einer neuartigen Anwendung bearbeitet und dreidimensional in Karten der Stadt Jena und über Diagramme visualisiert. Die Messdaten können zu einem bestimmten Ereignis, wie z.B. zu einem angemeldeten Konzert in der Innenstadt, zugeordnet werden. Bildquelle: Software-Service John GmbH.

schallbezogene, anonymisierte Sensordaten großflächig und fortwährend erfassen. Lärm-Raum-Modelle werden in einer neuartigen Anwendung bearbeitet und dreidimensional in Karten der Stadt Jena und über Diagramme visualisiert, vgl. Abbildung 1. Die Messdaten können zu einem bestimmten Ereignis, wie z.B. zu einem angemeldeten Konzert in der Innenstadt, zugeordnet werden.

Städtische Behörden können dabei nicht nur Lärmpegel, sondern auch vom System nach ihrer Art klassifizierte Lärmereignisse in einer webbasierten Anwendung betrachten und Lärmquellen deutlich besser beurteilen. Hierfür können zeitlich und räumlich aufgelöste Schalldaten sowohl echtzeitnah als auch rückblickend über bestimmte und längere Zeiträume zurate gezogen werden. Zudem lassen sich zukünftige Lärmsituationen aus vergangenen Lärmereignissen vorhersagen.

Die Klassifikation von Schallereignissen wurde vom Projektpartner Fraunhofer IDMT mit aktuellen Verfahren des Machine Learnings realisiert und bietet damit mehr Bewertungsgrundlagen als in der Norm TA Lärm gefordert. Im Unterschied zu anderen Forschungsprojekten mit thematischem Bezug wurden in Stadtlärm die Lösungen vor allem auf kommunale administrative Prozesse zugeschnitten, beliebige Lärmquellen sowie die Nähe zur TA Lärm berücksichtigt und eine robuste, flexibel ausbringbare Sensorlösung mit einer offenen, erweiterbaren Plattform realisiert.

Komponenten des Stadtlärm-Systems

Die erste von drei Komponenten im Stadtlärm-System ist die **Sensorplattform** als Gesamtheit einer flexiblen Anzahl von Lärm-Sensoren, die von der Bischoff-Elektronik GmbH in Hardware und vom IMMS und dem Fraunhofer IDMT in Software realisiert wurden. Die zweite Komponente ist ein **Datenservice** des Fraunhofer IDMT, der Daten zentral verarbeitet, speichert und wieder bereitstellt, und die dritte ist die durch die Software-Service John GmbH realisierte **Stadtlärm-Anwendung** für den Endanwender.

Verbunden werden die drei Komponenten über eine **zentrale „Datendrehscheibe“**, einen sogenannten Nachrichten-Broker auf Basis des im Internet der Dinge etablier-

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > Stadtlärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Sensoren auf www.imms.de.

ten Protokolls Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), vgl. Abbildung 2. Dieser Broker ermöglicht es den Komponenten, Nachrichten auszutauschen und darüber ihre jeweiligen Funktionalitäten zu realisieren.

Das IMMS hat u.a. die zentrale Datendrehscheibe für alle Komponenten realisiert

Das IMMS hat die Software-Basisplattform der Lärm-Sensoren geschaffen und die Audiodatenvorverarbeitung des Fraunhofer IDMT integriert. Darüber hinaus hat es die übergeordnete Kommunikationsarchitektur entwickelt und die Kommunikation der Lärm-Sensoren über den MQTT-Broker realisiert. Dazu zählten die Definition der Kommunikationsstrukturen und Nachrichten, die Bereitstellung und Betreuung des Brokers sowie die Umsetzung einer zentralen Administrationskomponente für das Gesamtsystem. Weiterhin hat es variable Umweltsensorik in einen Teil der Sensoren im Feldtest integriert, um den Nutzen der Plattform zu erhöhen und die Erweiterbarkeit zu demonstrieren.

Die Lösung im Detail – Beitrag des IMMS

Das StadtLärm-System hatte von vornherein den Anspruch, eine offene, erweiterbare Plattform für weitere Informations- und Dienstanbieter zu werden. Vor diesem Hintergrund wurde großes Augenmerk auf eine adäquate, Standard-basierte Systemarchitektur gelegt. Um die Kommunikation zwischen den verteilten Komponenten einer offenen, erweiterbaren Plattform zu gewährleisten, war die Kommunikationsarchitektur von zentraler Bedeutung. Daher war von Beginn an ein sogenannter Broker vorgesehen, der als zentrale Datendrehscheibe die Daten zwischen den Komponenten verteilt.

Ein Grundansatz war zudem Privacy by Design, mit dem Anforderungen des Datenschutzes proaktiv erfüllt werden. Personenbezogene oder -beziehbare Daten werden dabei durch Vorverarbeitung bereits unmittelbar im Lärm-Sensor anonymisiert und nur abstrahierte abgeleitete Informationen transportiert und weiterverarbeitet, wie Schallpegel und Klassifikationen von Schallereignissen.

MQTT-basierte Kommunikationsarchitektur

Für die angestrebte Broker-basierte Kommunikation wurde im Projekt der offene Standard MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) ausgewählt, ein im Bereich des Internets der Dinge verbreitetes Protokoll. Eine Broker-basierte Kommunikation als solche hat die Vorteile, dass Zugänge und Zugriffsberechtigungen zentral administriert und die Kommunikation zentral überwacht werden können. Zudem kommu-

71

- > *RoMulus:RFID*
- > *Green-ISAS:Test*
- > *Green-ISAS:EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus:MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de

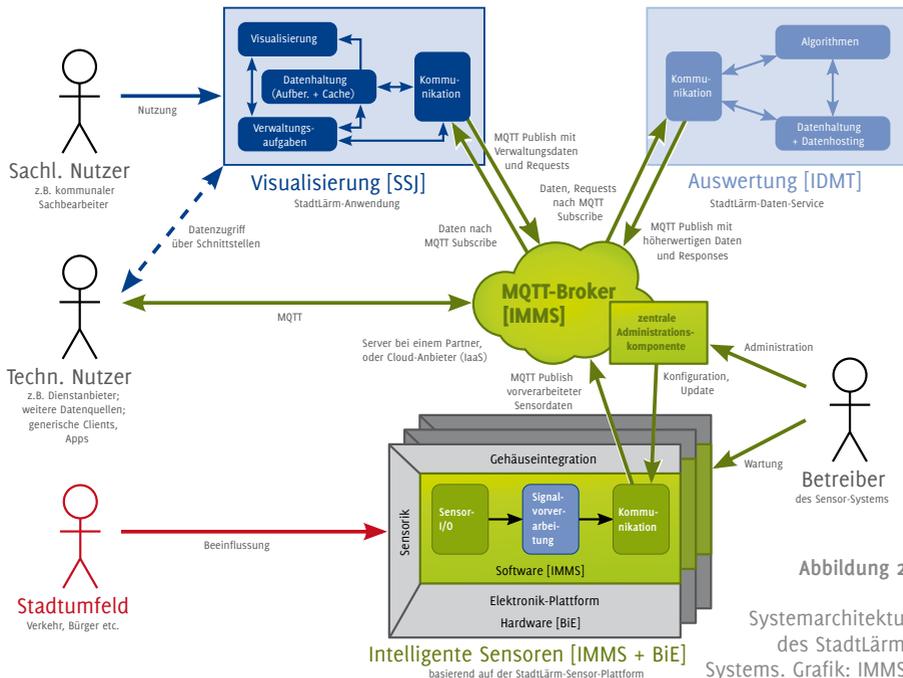


Abbildung 2:

Systemarchitektur
des Stadtlärm-
Systems. Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > Stadtlärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

niziert jeder Teilnehmer physisch nur mit einer Gegenstelle, dem Broker, nicht aber mit verschiedenen Gegenstellen mit jeweils eigenen Protokollen. MQTT ist zudem ein weniger komplexes Broker-basiertes Protokoll, was die Integration in (auch weitere) Systemkomponenten erleichtert. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Systemarchitektur.

MQTT funktioniert über Publizieren und Abonnieren

In MQTT adressieren die Teilnehmer ihre Kommunikationspartner nicht direkt, sondern sie publizieren Nachrichten auf sogenannten Topics, gewissermaßen benannten Nachrichtenkanälen, die andere Teilnehmer wiederum abonnieren können, um die Nachrichten zu empfangen – ein Prinzip, das auch als Publish/Subscribe bezeichnet wird. Wesentlich für eine effiziente Kommunikation ist die Ausgestaltung dieser Topics in einer hierarchischen Struktur. Im Projekt gab es hierzu zahlreiche Abstimmungen, bis am Ende eine finale Topics-Hierarchie festgelegt wurde. Diese fasst auf der obersten Ebene die Topics nach Systemkomponenten zusammen: Lärm-Sensoren, Datenservice, Administrationskomponente und StadtLärm-Anwendung. Untergeordnete Topics dieser Ebene repräsentieren einzelne Kommunikationsinhalte. Bei einer Erweiterung des Gesamtsystems um neue Komponenten kann auch die Topics-Hierarchie erweitert werden.

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de.

Das IMMS hat MQTT so genutzt, dass auch Abfragen möglich sind, z.B. für historische Daten

Eine ereignisgetriebene Datenverarbeitung, wie sie mit dem Publizieren und Abonnieren ermöglicht wird, bildet nicht alle kommunikativen Belange ab. Daher hat das IMMS darüber hinaus eine Konvention entwickelt, mit der sich auch Anfragen auf MQTT abbilden lassen. Dazu werden in der Topics-Hierarchie als Request/Response ausgewiesene Topics mit einer immer gleichen Unterstruktur versehen, auf der vom Dienstbereiter und Anfragesteller in einer bestimmten Weise publiziert und abonniert wird. Anfragen und Antworten werden als JSON (JavaScript Object Notation) kodiert: Anfragen verfügen über Parameter, Antworten über ein Ergebnisattribut im Erfolgsfall bzw. Fehlerattribut bei Verarbeitungsfehlern.

Ein Anwendungsbeispiel für das Anfrage-Konzept ist der Abruf historischer Daten beim Datenservice: Er empfängt fortlaufend Daten der Sensoren und speichert sie. In der Anwendung kann der Nutzer einen Zeitbereich auswählen, der anschließend auf der Basis von Daten dargestellt wird, die die Anwendung über eine Abfrage beim Datenservice erhält.

Lärm-Sensoren: Hardware

Die im Projekt entstandenen Lärm-Sensoren sind eingebettete Systeme aus einer maßgeschneiderten Basisplatine, die ein Raspberry Pi 3 Compute Module (CM3) Lite als Verarbeitungseinheit trägt. Die Systeme sind dafür ausgelegt, per Mobilfunk zu kommunizieren, um bezüglich der Installationsorte maximal flexibel zu sein. Sie verfügen daher jeweils über ein Mobilfunkmodem.

Da Rechenlast und Mobilfunk eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von etwa 10 Watt zur Folge haben, ist ein langfristiger Akkubetrieb nicht möglich. Um dennoch flexibel zu sein und insbesondere die Installation an nur über Nacht gespeisten Lichtmasten (Abbildung 3) zu ermöglichen, wurde ein Akku integriert. Dieser ist mit 15 Wh so dimensioniert, dass das System damit sicher über einen Tag betrieben werden kann, wenn die Nachladung über Nacht erfolgt. Dies erfordert ein Akku-Management in Hard- und Software.

Den sensorischen „Kern“ der Lärm-Sensoren bildet deren Mikrofon. Hierfür wurde auf preiswerte MEMS-Mikrofone im Gegensatz zu teuren Messmikrofonen der etablierten Messtechnik gesetzt. Damit

Abbildung 3: Lärm-Sensor an einem Lichtmast in Jena. Foto: Rolf Peukert, IMMS.





Abbildung 4:

Lärm-Sensor mit
Umweltsensorik.Foto:
Rolf Peukert, IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

wurde einerseits der Gerätepreis möglichst gering gehalten und andererseits nachgewiesen, dass auch mit diesem Ansatz eine hinreichende Ergebnislösung gewährleistet ist.

Einen Teil der Systeme im Feldtest hat das IMMS zudem mit einer Wetterstation als Umweltsensorik-Komponente ausgestattet (Abbildung 4). Wetterdaten sind nicht nur für die Stadt Jena interessant, sondern auch relevant für die Audioverarbeitung. Außerdem demonstriert dies die Integrierbarkeit weiterer Sensorik mit Blick auf eine Verwertung der Plattform.

Lärm-Sensoren: Software

Während der Projektpartner Bischoff-Elektronik die Hardware der Lärm-Sensoren entwickelte und diese in wetterfesten Gehäusen aufbaute, war es die Aufgabe des IMMS, diese in Software zu erschließen und dabei die Audioverarbeitung des Fraunhofer IDMT zu integrieren.

Das Basissystem der Lärm-Sensoren bildet ein **Embedded Linux** auf Grundlage der Raspbian-Distribution. Diese hat das IMMS angepasst und den Kernel für die Belange im Projekt zugeschnitten. Auf dieser Plattform war die in Python implementierte Audioverarbeitung grundsätzlich lauffähig. Darüber hinaus waren jedoch weitere Aspekte zu adressieren, wie die kommunikative Einbindung und die Fernwartung.

Das IMMS hat daher eine Anwendungskomponente in der Implementierungssprache Go implementiert, die die **MQTT-Kommunikation** übernimmt und dabei vorverarbeitete Daten der Fraunhofer-IDMT-Software entgegennimmt und echtzeitnah versendet. Daneben kommuniziert sie, wiederum per MQTT, mit der zentralen Administrationskomponente, indem sie periodisch Statusinformationen überträgt und aus der Ferne konfigurierbar und instruierbar ist. Bei Sensoren, die das IMMS mit einer

*Mehr zu Sensoren-
systemen auf
www.imms.de.*

*Mehr zu System-
integration auf
www.imms.de.*

Umweltmonitoring-Komponente ausgerüstet hat, erfasst und überträgt sie zudem deren Daten.

Zentrale Administrationskomponente

In einem System mit einer variablen, ggf. erweiterbaren Anzahl von Geräten, deren Daten verarbeitet und die überwacht und konfiguriert werden sollen, ist eine zentrale Verwaltungskomponente sinnvoll. Daher hat das IMMS diese als zentrale Administrationskomponente mit **Java/Kotlin** im **Spring-Framework** realisiert, bei der sich die Lärm-Sensoren registrieren. Auf dieser Basis pflegt die Administrationskomponente ein Verzeichnis der Sensoren, das neben ihrer Identifikation im System auch Metadaten wie Standort- und Statusinformationen beinhaltet. Diese Informationen publiziert sie teils periodisch per MQTT, teils stellt sie sie per Anfrage zur Verfügung. Die Administrationskomponente läuft für den Feldtest, genau wie der Broker, auf einem Server am IMMS.

System-Monitoring

Um den Gesamtzustand des Systems im Feldtest wie im späteren produktiven Einsatz überwachen zu können, speichert die zentrale Administrationskomponente in der Zeitreihendatenbank **InfluxDB** kontinuierlich Informationen zum Systemzustand, wie z.B. das Nachrichtenaufkommen am Broker, sowie zu den Feldgeräten, wie z.B. Laufzeiten und Akkuladestände. Die Informationen aus der Datenbank werden visuell mit der quelloffenen Lösung **Grafana** aufbereitet und über verschiedene Dashboards angezeigt, siehe Abbildung 5. Diese ermöglichen einen intuitiven Einblick in den aktuellen Systemzustand ebenso wie einen Rückblick über längere historische Zeiträume. Interessant sind z.B. das Lade-/Entladeverhalten der Feldgeräte oder die Stabilität der Mobilfunkkommunikation.

Mehr zu System-integration auf www.imms.de.



Abbildung 5:
Visualisierung des Zustands eines Lärm-Sensors per Dashboard mit der quelloffenen Lösung Grafana.

Screenshot: IMMS.

Mit den erarbeiteten Komponenten und Diensten wurde ab dem Frühjahr 2018 eine Pilotinstallation im Gebiet der Stadt Jena im Bereich der Oberen Aue und angrenzender Gebiete ausgebracht. Diese umfasst 13 Lärm-Sensoren, davon drei mit Umweltsensorik. Die serverseitigen Softwarekomponenten sind bei den jeweiligen Partnern gehostet. Das Dezernat Stadtentwicklung und Umwelt hat Zugriff auf die webbasierte StadtLärm-Software und kann damit Erfahrungen sammeln.

Ausblick

Aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen kann ein System wie das in StadtLärm realisierte zum derzeitigen Zeitpunkt die etablierten punktuellen Messungen nicht ersetzen, wohl aber dabei unterstützen, derartige manuelle und damit aufwändige Messeinsätze zielgerichteter durchzuführen.

Der Feldtest hat zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichts bereits wertvolle Erkenntnisse geliefert, sowohl zur Stabilität der Systeme im Feld, der Güte der Audioklassifikation als auch zur Resonanz der Endanwender. Hieraus ergeben sich verschiedene Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten.

Auch haben das IMMS und die Partner bereits verschiedene Anfragen interessierter Dritter erreicht, die das System nicht nur für urbanes Lärm-Monitoring, sondern auch für verschiedene andere Anwendungsfälle mit Pegelüberwachung und Schallereignisklassifikation evaluieren möchten.

Das realisierte System bildet eine Grundlage dafür, später auch zukünftige Lärmsituationen aus vergangenen Lärmereignissen vorherzusagen. Mit einer entsprechenden Modellunterstützung ist es denkbar, bereits innerhalb von Genehmigungsprozessen die Lärmbelastung räumlich überlappender Veranstaltungen simulativ zu betrachten, wie z.B. eines Fußballspiels im Stadion und eines Konzerts im angrenzenden Park.

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

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

*Mehr zu
StadtLärm auf
www.imms.de*

*Alle StadtLärm-
Publikationen:
www.imms.de*

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt StadtLärm wurde unter dem Kennzeichen ZF4085703LF6 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



fast wireless – Inverses Pendel demonstriert neue Übertragungskonzepte für 5G

Inbetriebnahme des inversen Pendels, das das IMMS zur Demonstration von 5G-Übertragungskonzepten realisiert hat. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Heutige Mobilfunktechnologien für viele künftige Anwendungen zu langsam

Echtzeitfähige mobile Datenübertragung ist die Grundlage für vielfältige neue Anwendungen, wie z.B. für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen oder zwischen Maschinen sowie für das „taktile Internet“. Für diese Anwendungen müssen sehr viele Teilnehmer bzw. Sensoren mit sehr geringen Signallaufzeiten, sogenannten Latenzzeiten, im Millisekundenbereich kommunizieren und das mit sehr hoher Zuverlässigkeit, sprich Ausfallsicherheit der Daten- und Signalverbindungen. Heutige Funktechnologien können diese Forderungen nicht erfüllen. So wurde z.B. LTE hauptsächlich für hohe Datendurchsätze entwickelt.

Fast wireless arbeitete an latenzminimierten Basistechnologien für 5G

Im Projekt fast wireless wurden daher latenzminimierte Basistechnologien für die fünfte Generation im Mobilfunk (5G) erforscht, entwickelt und bewertet, um mobile Geräte und Steuereinheiten echtzeitfähig zu vernetzen. Ein Schwerpunkt lag in der Entwicklung von Übertragungskonzepten, die eine geringe Latenz und eine hohe Zuverlässigkeit erlauben.

Mehr zu

fast wireless:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

Das IMMS hat Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit von Betriebssystemen künftiger Lösungen erarbeitet, die mit 5G kommunizieren werden, die Projektpartner bei der Definition geeigneter Schnittstellen zwischen den Kommunikationsschichten unterstützt und Komponenten entwickelt, die eine Partitionierung latenzkritischer Elemente in Hard- und Software ermöglichen. Die im Projekt entwickelten Technologien hat das IMMS in einen Demonstrator einfließen lassen und die erarbeiteten Algorithmen der Projektpartner umgesetzt.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Da für Prozessoptimierungen künftig Maschinen oder Roboter in geschlossenen Steuerungssystemen mit per 5G übertragenen Informationen gesteuert und geregelt werden sollen, hat das IMMS gemeinsam mit der TU Dresden ein inverses Pendel als Demonstrator realisiert.

Dieser verdeutlicht, dass eine niedriglatente 5G-Funkstrecke zwar Voraussetzung für neue Anwendungen ist, aber zusätzlich die beteiligte Hard- und Software echtzeitfähig ausgestaltet werden muss.

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de

Regelung eines inversen Pendels mit niedriglatenter Funkübertragung demonstriert die neuen Übertragungskonzepte für 5G

Ziel ist es, das inverse Pendel in seiner instabilen Ruhelage aufrecht zu halten. Das neun Zentimeter lange Pendel steht frei auf einer 0,2 mm schmalen Kante auf einer bewegten Linearachse, vgl. Abbildung 1. Damit das so bleibt, wird das Pendel von einer Kamera beobachtet. Um es auszubalancieren, wird dessen Winkel permanent mit 5G-Mobilfunk in Echtzeit an die Bewegungssteuerung der Achse gefunkt. Mit heutigen Mobilfunk-Technologien wie LTE würden Informationen zu Abweichungen zu spät ankommen und das Pendel umkippen. Die mit dem Demonstrator realisierten Latenzen liegen mit 100µs pro Datenpaket weit unter der für 5G geforderten Zielgröße von einer Millisekunde.

Damit wurden nicht nur die entwickelten Algorithmen und Kommunikationskomponenten in einem Gesamtsystem prototypisch implementiert und die praktische Anwendung einer niedriglatenten Kommunikation im zellularen Mobilfunk aufgezeigt. Die Bedeutung einer niedriglatenten Kommunikation kann damit auch fachkundigem Publikum verdeutlicht werden.



Abbildung 1:

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Komponenten des Demonstrators für die Regelung eines inversen Pendels mit niedriglatenter Funkübertragung.

Grafik/Fotos: IMMS.

Lösung im Detail

5G-Anforderungen und Echtzeit

Entscheidend für eine Kommunikation in Echtzeit sind die Latenzzeiten. Lagen Verzögerungen der Signallaufzeiten in UMTS-Netzen (3G) noch bei rund 100 Millisekunden und für LTE-Netze (4G) bei etwa 30 Millisekunden, ist die im 5G-Netz angestrebte eine Millisekunde Latenz extrem kurz. Wird also über 5G ein Datenpaket auf Schicht 4 des OSI-Referenzmodells für Netzwerkprotokolle(TCP) losgeschickt, muss dieses Paket innerhalb von einer Millisekunde zur Schicht 4 des Ziels gelangen.

Demonstratoraufbau

Der Linearantrieb, auf dem das Pendel frei steht, ist in der Lage, auf einer Raumachse sehr hohe Beschleunigungen zu erreichen und muss entsprechend schnell geregelt werden. Um den aktuellen Winkel des Pendels erkennen zu können, wurden auf dessen Oberseite und an zwei Fixpunkten in dessen Umfeld rote Markierungen angebracht. Die Auslenkung des Pendels wird von oben über eine Kamera erfasst und die Bilddaten über Gigabit-Ethernet an einen Embedded Controller übertragen, auf dem die Algorithmen zur Objektdetektion realisiert wurden. Der so berechnete Auslenkwinkel wird drahtlos an eine Regelungseinheit übertragen, welche durch Bewegungen des Linearantriebs das Pendel ausbalanciert (Abbildung 1). Für die Funkübertragung der Daten werden zwei GFDM-Sende- bzw. Empfangseinheiten genutzt. GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) weist eine zu 5G ähnliche Wellenform auf.¹

¹ Details in: N. Michailow et al., "Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 9, pp. 3045-3061, Sept. 2014, DOI: 10.1109/TCOMM.2014.2345566.

Die Signallaufzeit (Latenz) beeinflusst direkt die Reglerstabilität. Bei zu hoher Latenz wird der Regler instabil und das Pendel kann nicht mehr balanciert werden. Die Gesamtlatenz setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen: Das aufgenommene Bild muss in der Kamera digitalisiert, gepuffert und mittels Gigabit-Ethernet zum Embedded-Controller übertragen werden. Dort müssen die Datenpakete empfangen und die Objektdetektion ausgeführt werden. Deren Ergebnis sind die Koordinaten der drei markierten Punkte. Diese werden an die GFDM-Sendeeinheit weitergeleitet, die in einem programmierbaren Hardware-Baustein FPGA (Field Programmable Gate Array) der USRP (Universal Software Radio Peripherals) implementiert ist. Dann werden die Koordinaten per Funk zur zweiten USRP der Empfangseinheit übertragen. Die Daten werden dann drahtgebunden an den Motorcontroller weitergeleitet. Für das Balancieren des Pendels auf dem genutzten Antrieb ist eine Gesamtverzögerung von ca. 22 ms einzuhalten.

Echtzeit-Betriebssystem

Um die hohen Echtzeitanforderungen des Demonstrators zu gewährleisten, wurde auf dem Embedded Controller ein Linux-Echtzeitbetriebssystem implementiert. Hierdurch wird es möglich, die Ausführung des Kommunikationsstacks und die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Komponenten in ein deterministisches Zeitverhalten einzuordnen. Darüber hinaus wurden erforderliche Zeitmessungen zur Charakterisierung und Optimierung durchgeführt und dabei auf die durch ein Echtzeitbetriebssystem typischerweise bereitgestellten Messmethodiken (z.B. Tracing) zurückgegriffen.

Objektdetektion

Um einen geeigneten **Algorithmus** zur Ermittlung der Pendelposition zu finden, hat das IMMS theoretisch und experimentell verschiedene Standardverfahren aus dem Bereich der Bildverarbeitung betrachtet und die folgenden drei Varianten ausgewählt:

1. **Merkmalsdetektoren** z.B. BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), MSER (Maximally stable extremal regions): Aus einem Referenzbild extrahierte Merkmale werden vom Algorithmus im aktuellen Bild unabhängig von verschiedenen Koordinatentransformationen (Skalierung, Rotation, Verschiebung) wiedergefunden. Die Pendelposition ergibt sich aus der Transformation des ursprünglichen Merkmalsvektors gegenüber dem aktuellen Bild.

2. **Hough-Circles:** Die Ränder von kreisförmigen Markierungen im Aufbau werden über eine Hough-Transformation ermittelt. Deren Position dient als Ausgangspunkt zur Bestimmung der Pendelauslenkung.
3. **Farbfilter:** Gleichfarbige Markierungen an verschiedenen Punkten des Aufbaus werden über eine entsprechende Filterung selektiert. Deren Position dient als Ausgangspunkt für das Bestimmen der Pendelauslenkung.

> RoMulus:RFID
 > Green-ISAS:Test
 > Green-ISAS:EH
 > StadtLärm
 > fast wireless
 > ADMONT
 > RoMulus:MEMS
 > Inhalt
 * Förderung

Mit verschiedenen Beispielen wurde die Laufzeit dieser Algorithmen empirisch ermittelt. Ausgehend von den Testergebnissen und aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit wurde der Farbfilter-Algorithmus ausgewählt. Hier muss der Pendelaufbau lediglich an den für die Positions- und Winkelbestimmung relevanten Punkten mit farbig markiert werden.

Für die **Kommunikation** mit der **Kamera** hat das IMMS auf die Bibliothek aus dem Aravis-Projekt² zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um ein FOSS-Projekt (Free and Open Source Software) zur generischen Anbindung von Industrie-Netzwerkcameras unterschiedlicher Hersteller. Die Konfiguration der Kamera und die Bilddatenübertragung wurden erfolgreich mit der Aravis-Bibliothek getestet.

Das IMMS erstellte eine **grafische Nutzoberfläche** für die Konfiguration der Objektdetektionsalgorithmen. Als Grundlage dafür wurde das Programm QArv³ ausgewählt. Dieses bietet bereits mit der Aravis-Bibliothek Zugriff auf die für den Demonstrator eingesetzte Kamera sowie deren Parameter. Ebenso gibt es die Möglichkeit, einfache Filterfunktionen zu verwenden sowie Einzelbilder oder auch den Videodatenstrom der Kamera abzuspeichern.

Die **Positionsbestimmung** des Pendels hat das IMMS mit Funktionen der Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV⁴ als zuschaltbaren Filter für QArv realisiert. Die grundlegenden Schritte zur Bestimmung der Position von Farbmarkierungen des Pendels bilden hierbei:

1. Transformation des Bildes vom RGB- in den HSV-Farbraum,
2. Filterung des Bildinhaltes über jeweils einen Schwellwertfilter (min und max) anhand der Parameter Sättigung, Helligkeit und Farbwert,
3. Optionale Erode-Dilate-Erode-Transformation, um Störungen zu vermindern.

² <https://github.com/AravisProject/aravis>

³ <http://www.ad-vega.si/en/software/qarv/>

⁴ <https://opencv.org/>

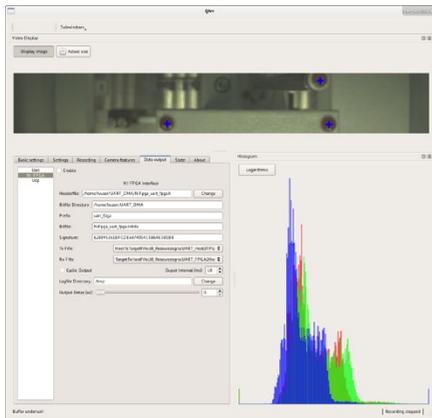


Abbildung 2: Hauptfenster von QArv mit den vom Filteralgorithmus detektierten Farbmarken. Screenshot: IMMS.

Die Parameter der einzelnen Verarbeitungsstufen können hierbei im Betrieb in der Oberfläche angepasst und abgespeichert werden, was ein einfaches Einrichten bei z.B. geänderten Lichtverhältnissen erlaubt. Zudem kann das Live-Bild von verschiedenen Zwischenstufen der Verarbeitung angezeigt werden. Damit kann die Wirkung einzelner Parameteränderungen besser beurteilt werden. Abbildung 2 zeigt das Hauptfenster von QArv mit den vom Filteralgorithmus detektierten Farbmarken.

> RoMulus:RFID
 > Green-ISAS:Test
 > Green-ISAS:EH
 > StadtLärm
 > fast wireless
 > ADMONT
 > RoMulus:MEMS
 > Inhalt
 * Förderung

Systemsimulation und Reglerentwurf

Um verschiedene Parameter des mechanischen Aufbaus zu ermitteln und die grundsätzliche Realisierbarkeit für die Randbedingungen der Funk-Datenübertragung zu testen, wurde der Aufbau als klassisches Regler-Strecke-Modell am IMMS simuliert. Hierbei wurden die erlaubten und durch die Bildbearbeitungs- und Übertragungslatenzen bedingten Totzeiten sowie die benötigte und durch die erzielbare Framerate der verwendeten Kamera limitierte Taktrate für die Ermittlung der Istwerte ermittelt.

Durch den geringen Bewegungsbereich des Antriebs von 68mm konnte nur ein relativ kurzes Pendel von 90mm verwendet werden. Daraus resultiert eine hohe Pendeldynamik.

In einem ersten Schritt wurde der geometrische Abbildungsfehler infolge der Linsenkrümmung der Kamera korrigiert. Dazu wurde der Abbildungsfehler bestimmt und mittels eines Polynoms 3. Ordnung herausgerechnet. Über eine Korrekturrechnung kann der Winkel mit einer Auflösung von $\approx 0,04^\circ$ und einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ$ berechnet werden.

Der **Regelalgorithmus** ist auf einem 32-Bit-Fixed-point-Mikrocontroller implementiert. Eine Herausforderung bestand darin, geeignete Reglerparameter zu bestimmen. Aufgrund der hohen Pendeldynamik und des kleinen Bewegungsbereichs muss die Steuerung auf Winkelauslenkungen des Pendels schnell reagieren. Die vergleichsweise niedrige Framerate der Kamera und damit Abtastrate der Winkelmessung von maximal 150 Hz sowie die Verzögerung von 20 ms plus Jitter begrenzen die Dyna-

Mehr zu
 Steuerung und
 Regelung:
www.imms.de.



Abbildung 3:

Am IMMS realisierter Demonstratoraufbau für das inverse Pendel inkl. Gehäuse und Integration aller Steuerungskomponenten. Foto: IMMS.

Die vom Partner TU Dresden entwickelte GFDM-Implementierung arbeitet bei einer Bandbreite von 20 MHz und mit Paketlängen von lediglich 16 μ s und ist somit für eine niedriglatente Übertragung bestens geeignet.

Im Vergleich zur 4G-Wellenform CP-OFDM unterstützt GFDM kurze Symbole bei gleichzeitig stark verringerter Außerbandstrahlung. Der vergrößerte Design-Space erlaubt die Parametrisierung der Wellenform für verschiedenste Szenarien. Durch einfache Modulation und Demodulation werden Latenzen von unter 100 μ s pro Paket erreicht, wodurch die Stabilität des Pendels gewährleistet werden konnte. Die Implementierung des GFDM Physical Layers erfolgte auf dem SDR (Software-Defined-Radio)-System von National Instruments.

mik der Steuerung aber substantiell. Die üblichen Methoden für den Entwurf von robusten Steuerungen, wie z.B. Polplatzierung oder LQR-Ausführung, konnten unter diesen Voraussetzungen nicht eingesetzt werden. Daher wurde ein experimenteller Ansatz zur Bestimmung der erforderlichen Reglerparameter gewählt.

Implementierung und Aufbau

Im nächsten Schritt wurde die Funkübertragung in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TU Dresden implementiert und getestet. Um die nötige Ende-zu-Ende Latenz im System zu erreichen, muss auch die verwendetechnittstelle eine möglichst geringe Latenz aufweisen. Hierfür muss sowohl die verwendete Rahmenstruktur kurze Paketlängen unterstützen, als auch die Modulation und Demodulation mit möglichst geringer Verzögerung arbeiten.

Für den Demonstratoraufbau, vgl. Abbildung 3, wurde ein Gehäuse entworfen und gefertigt. Zur besseren Ausleuchtung wurde eine LED-Beleuchtung integriert, eine Abdeckhaube aus Plexiglas gefertigt und alle Steuerungskomponenten integriert.

- > *RoMulus: RFID*
- > *Green-ISAS: Test*
- > *Green-ISAS: EH*
- > *StadtLärm*
- > *fast wireless*
- > *ADMONT*
- > *RoMulus: MEMS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Zusammenfassung und Ausblick

Der entstandene Demonstrator veranschaulicht die Machbarkeit einer drahtlosen, hochzuverlässigen und latenzarmen Kommunikation für Anwendungen im geschlossenen Regelkreis – in diesem Fall ein inverses Pendel, das durch einen Linearantrieb, Objekterkennung und geeignete Regelalgorithmen stabilisiert wird.

Der Mobilfunkstandard 5G gilt als wichtiger Faktor, um die smarte Fabrik entscheidend voranzubringen. Das IMMS hat mit dem Projekt wichtige Kenntnisse im Bereich der Steuerung und Regelung von Maschinen und Anlagen über niedriglatente drahtlose Verbindungen erarbeitet und kann diese nun sowohl für KMU in industrielle Anwendungen bringen als auch in neue Anwendungsbereiche, wie z.B. in die Landwirtschaft, übertragen.

*Mehr zu
fast wireless:
www.imms.de*

Kontakt: Dipl.-Ing. Sebastian Uziel, sebastian.uziel@imms.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

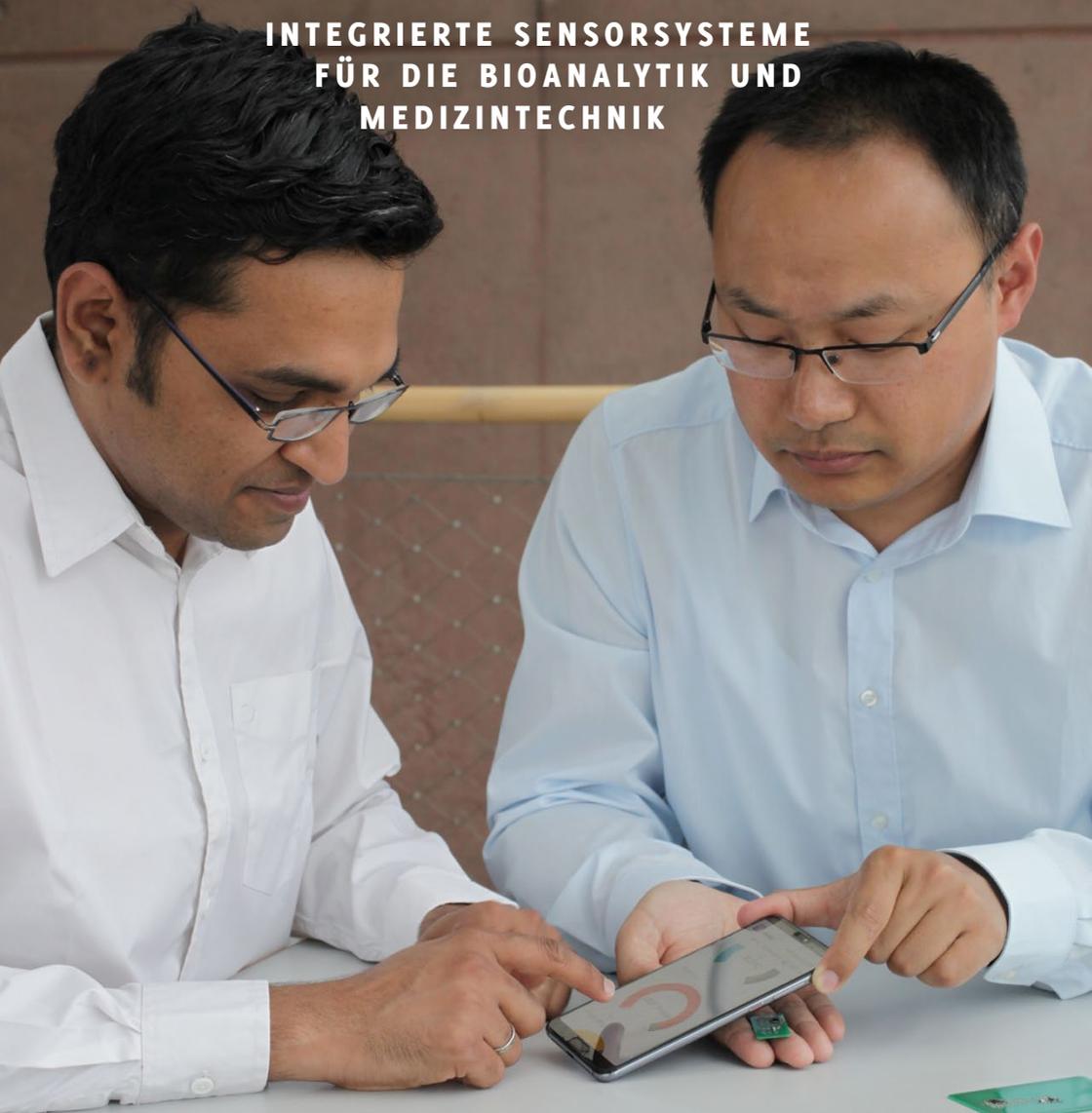


fast wireless wurde als Teil des Cluster-Projekts *fast* im Rahmen der Fördermaßnahme „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 03ZZ0505J gefördert.

*fast-wireless-
Publikationen:
www.imms.de*

FORSCHUNGSTHEMA

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME FÜR DIE BIOANALYTIK UND MEDIZINTECHNIK



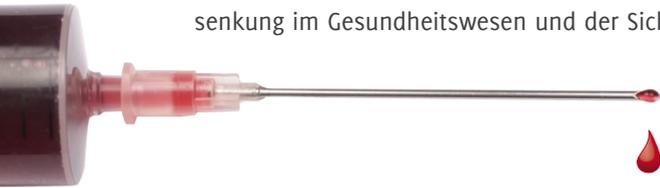
GEFÖRDERT VON



Das IMMS hat im Projekt ADMONT* einen modularen RFID-Mikroelektronik-Chip entwickelt, der Daten zu Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur über angeschlossene kommerzielle Einzelsensoren mit Standardschnittstellen erfasst und berührungsfrei an eine NFC-fähige RFID-Ausleseeinheit sendet. Der batterielose RFID-Transponder-Chip und die Sensoren werden über das Energiefeld des Lesegeräts mit Strom versorgt. Neben bioanalytischen sind vielfältige andere Sensor-Anwendungsszenarien möglich. Zum Auslesen der Messdaten hat das IMMS eine App für Android-Smartphones entwickelt. Foto: IMMS.

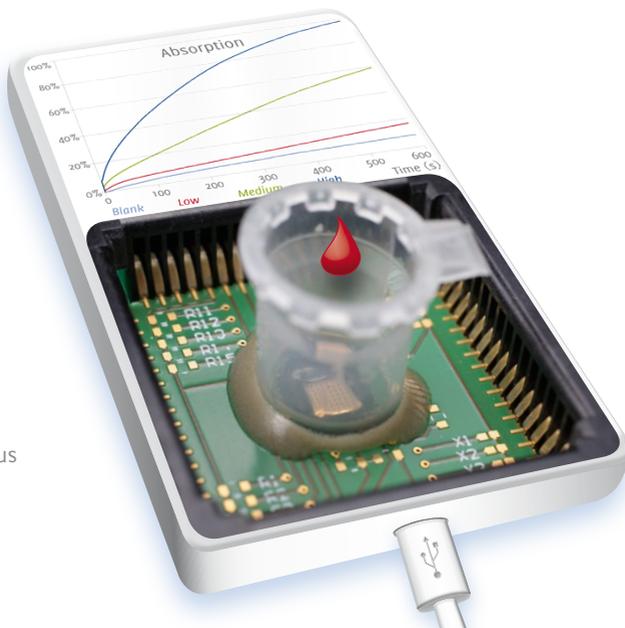
- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

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



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

Projekte zur
Biosensorik:
www.imms.de



Ideenskizze für ein mobiles System zur Bioanalytik.

Das Modul mit Leiterplatte, ASIC und Flüssigkeitsreservoir ist Teil eines Testaufbaus zur Krebsdiagnostik, der im Forschungsprojekt INSPECT eingesetzt wurde.

Grafik/Fotos: IMMS.

ADMONT* – passiver RFID-Transponder-Chip als flexible Brückenschnittstelle für Biosensoren

Das IMMS hat 2018 im Projekt ADMONT die Entwicklung eines passiven NFC-fähigen RFID-Transponder-Chips abgeschlossen, der als flexible Brückenschnittstelle für verschiedene Biosensoren dienen kann. Passive RFID-Transponder werden vom Lesegerät drahtlos mit Energie versorgt, mit der auch angeschlossene Sensoren betrieben werden können. Das macht sie zu einer attraktiven Lösung für batterielose drahtlose Sensorsysteme in Diagnostik-Anwendungen. Durch die Kompatibilität zum Übertragungsstandard NFC (dt. Nahfeldkommunikation) lassen sich Messwerte auch direkt mit Smartphones und anderen mobilen Endgeräten lesen und auswerten.

RFID-Transponder-Chip für vielfältige Life-Science-Anwendungen

Mit dem RFID-Chip des IMMS können Life-Science-Anwendungen, unter anderem in der Point-of-Care-Diagnostik, schneller und kostengünstiger werden. Das trifft auch auf Prozesse in der Laborautomation zu, wo u.a. Temperatur, Druck und Feuchtigkeit in Echtzeit überwacht werden müssen, um mit stabilen Umgebungsbedingungen die Probenqualität zu gewährleisten.

Mehr zu RFID
in ADMONT:
www.imms.de

Anpassungsfähige und energieeffiziente Transponder-Architekturen fehlten

Das IMMS hat den RFID-Chip entwickelt, weil zum einen zwar für spezifische Applikationen optimierte RFID-Chips mit integrierten Sensoren existieren, diese aber für breite Anwendungen nicht flexibel genug sind. Zum anderen gibt es zwar kommerzielle RFID-Chips, an die auch einzelne Sensoren angeschlossen werden können. Diese benötigen jedoch zur Steuerung immer einen Mikrocontroller.

Für batterielose RFID-Tags sind solche Lösungen oft nicht geeignet, da Mikrocontroller mit etwa 100 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ einen Großteil der Energie verbrauchen, die das Lesegerät liefert, und für die Sensoren nicht mehr viel übrig lassen.



Im Projekt ADMONT* vom IMMS entwickelter RFID-Transponder-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren. Foto: IMMS.

Der RFID-Chip des IMMS unterstützt verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit unterschiedlichem Leistungsbedarf. Er kann eine geregelte Spannung für externe Sensoren bis zu 2,2 V bei einem maximalen Strom von 10 mA liefern. Ein Mikrocontroller ist für die Lese-/ Schreibvorgänge mit Sensoren nicht notwendig. Dies reduziert den Stromverbrauch des Gesamtsystems sowie die Anzahl an externen Komponenten, die für den Aufbau eines RFID-Sensortransponders benötigt werden.

INSPECT* – Entwicklung eines optoelektronischen CMOS-Biochips für den quantitativen Nachweis von Prostatakrebs

Das IMMS hat auf der Grundlage der 2016 und 2017 im Projekt INSPECT durchgeführten Voruntersuchungen 2018 die Entwicklungsarbeiten für eine optoelektronische anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) für die quantitative Diagnostik von Prostatakrebs abgeschlossen und einen Prototyp mit messtechnischen Komponenten für mobile Point-of-Care-Messgeräte erarbeitet. Das System ist so ausgelegt, dass es weniger als ein Nanogramm des gesuchten Antigens pro Milliliter messen kann.

Ziel: quantitative Schnelltests für frühzeitige und genaue Krebsdiagnosen

Für einige Krebsarten könnten Schnelltests direkt durch den behandelnden Arzt vorgenommen werden, um damit zeit- sowie kostenaufwändige Laboruntersuchungen zu vermeiden. Übliche Schnelltests arbeiten qualitativ und liefern als Befund lediglich Ja-Nein-Aussagen. Perspektivisch soll es mit Mikroelektronik-basierten Schnelltests für Ärzte möglich sein, mit einem geringen, mit Streifentests vergleichbaren Aufwand quantitative Messwerte zu erhalten. Diese lassen sich bislang nur mit großen und



EFRE
EUROPA FÜR THÜRINGEN
EUROPÄISCHER FONDS FÜR REGIONALE ENTWICKLUNG


EUROPÄISCHE UNION

Das IMMS hat einen optoelektronischen CMOS-Biochip und ein Testsystem für den quantitativen Nachweis von Prostatakrebs entwickelt.

Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu RFID
in ADMONT:
www.imms.de

Details & Video
zu INSPECT auf
www.imms.de

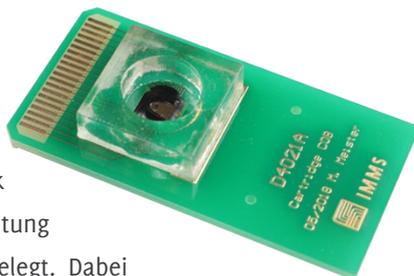
komplexen Laborgeräten für eingeschickte Proben erfassen. Um Prostatakrebs in einem sehr frühen Stadium feststellen zu können, müssen sehr geringe Konzentrationen des prostataspezifischen Antigens (PSA) von etwa einem Nanogramm pro Milliliter detektiert werden. PSA kann Hinweise auf Krebs liefern, wird jedoch stets vom Körper produziert. Die PSA-Konzentration variiert auch altersabhängig und aufgrund von Entzündungen oder mechanischen Reizungen. Mit regelmäßigen individuellen PSA-Messungen ist eine zuverlässige Frühdiagnose und damit eine frühzeitige Therapie möglich.

Grundlage für die Chip-Entwicklung: Voruntersuchungen mit Mikroelektronik und mobilem Testsystem

Das IMMS hatte mit dem Partner Senova ein Funktionsmuster für ein mobiles Mikroelektronik-basiertes Testsystem zur Früherkennung von Prostatakrebs entwickelt. Es diente dazu, nachweisrelevante Parameter zur Krebsfrüherkennung zu untersuchen und genaue Informationen zu Lichtintensitäten und zu Teilchenkonzentrationen in Proben zu erhalten. Der Kern dieses Funktionsmusters für Voruntersuchungen war ein bereits vorliegender Mikroelektronik-Chip, den das IMMS für den Nachweis von Infektionskrankheiten entwickelt hatte. Mit diesem Funktionsmuster hatten die Partner mehrstufige Versuchsreihen für die Auslegung des INSPECT-ASICs vorgenommen und 2017 durch optoelektronische Messungen Goldnanopartikel in geringsten Mengen mit einer minimal messbaren optischen Dichte von 0,009 Bel nachgewiesen. Solche Partikel werden in der Diagnostik verbreitet eingesetzt, um Biomarker sichtbar und damit für optische Messungen detektierbar zu machen.

Entwicklung eines optoelektronischen CMOS-Biochips auf Basis der Voruntersuchungen

Das IMMS hat auf der Basis dieser und anderer Untersuchungen die Mikroelektronik als anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) speziell für die Krebsdiagnostik ausgelegt. Dabei stand die Signalverarbeitung insbesondere bei extrem geringen Signalunterschieden sowie eine effiziente Rauschunterdrückung im Fokus. Das zu entwickelnde System sollte einen Messbereich von einer optischen Dichte 0,01 bis 1 Bel abdecken, um weniger als ein Nanogramm des gesuchten Antigens pro Milliliter messen zu können.



In INSPECT 2018 für die Krebsdiagnostik realisierter ASIC, der auf einer Cartridge mit der Probe in das vom IMMS entwickelte und an Rechner anschließbare Gerät gesteckt wird.
Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Details & Video
zu INSPECT auf
www.imms.de

Hierzu hat das IMMS einen speziell auf die Anwendung ausgerichteten ASIC entwickelt, der 2018 gefertigt wurde. Dieser Chip ist kleiner und damit kostengünstiger als jener für die Voruntersuchungen und die neue Chip-Architektur ist so beschaffen, dass genauere und rauschärmere Messungen möglich sind. Der entwickelte ASIC enthält zudem einen Digitalteil zur Vorverarbeitung der analog erfassten Werte. Damit wird die nachfolgende Signalverarbeitung und standardisierte Anbindung zu Informationsverarbeitungssystemen vereinfacht. Die digitalisierten Messsignale sind darüber hinaus robuster gegen äußere Störeinflüsse.

Für die optoelektronischen Messungen der biochemischen Nachweisreaktionen des prostataspezifischen Antigens hat das IMMS ein kompaktes, mobiles, lichtdicht verschlossenes Gerät entwickelt, das per USB-Kabel an einen Rechner oder Laptop angeschlossen wird. Dort lässt sich mit der am IMMS realisierten Software der Test steuern, die Daten anzeigen und weiterverarbeiten. Die Probe wird in die Reaktionskammer über dem ASIC gegeben, die beide in einem Steckmodul (Cartridge) in die Platine geschoben werden. Diese steuert den ASIC und die Beleuchtungseinheit. Drei LEDs mit unterschiedlichen Wellenlängen erzeugen in einem festen Abstand zum Chip ein homogenes Licht, das in konstanter Intensität über die Zeit die Probe ausleuchtet.

Der Projektpartner Senova hat die biochemische Funktionalisierung der Chip-Oberflächen mit immobilisierten PSA-Antikörpern vorgenommen und Messungen mit Proben unterschiedlicher PSA-Konzentrationen durchgeführt. Liegt PSA in der Probe vor, wird es mit biochemischen Reaktionen nachgewiesen, die je nach Konzentration die Probe unterschiedlich stark eintrüben und als Helligkeitsunterschiede optoelektronisch gemessen werden. Die Chipentwicklung und Messergebnisse mit biologischen Proben werden nach dem Projektabschluss 2019 im Detail vorgestellt.

- 90
- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung



[Details](#) [Video](#)
zu [INSPECT](#) auf
www.imms.de



In MEDIKIT entwickelt das IMMS Mikroelektronik für ein modulares mobiles Diagnostiksystem zur Früherkennung von Gesellschaftskrankheiten mithilfe von zeitaufgelösten Fluoreszenz-Messungen. Das Bild zeigt einen Designer beim Chip-Entwurf.
Foto: IMMS.



- 91
- > RoMulus: RFID
 - > Green-ISAS: Test
 - > Green-ISAS: EH
 - > StadtLärm
 - > fast wireless
 - > ADMONT
 - > RoMulus: MEMS
 - > Inhalt
 - * Förderung

Projekt MEDIKIT* gestartet – mobile Diagnostiksysteme für Gesellschaftskrankheiten

Je frühzeitiger und zuverlässiger Krebs- und Herzerkrankungen diagnostiziert werden können, desto höher sind die Chancen für erfolgreiche Therapien. Von 2011 bis 2016 starb jeder vierte EU-Bürger an diesen Erkrankungen. Vor diesem Hintergrund sind neue und effiziente Methoden in der Früherkennung notwendig.

Um diese Methoden voranzubringen, arbeitet das IMMS seit April 2018 im Verbundprojekt MEDIKIT an einem portablen modularen Analysesystem für die quantitative personalisierte Diagnostik von Gesellschaftskrankheiten. Ziel ist ein Gerät, das Biomarker in kürzester Zeit detektiert und direkt beim Arzt betrieben werden kann ohne weitere Reagenzien, Geräte oder Materialien.

Die Grundlage bilden die molekularbiologischen und immunologischen Assays zur Detektion verschiedener Biomarker, an denen die Projektpartner Senova GmbH und oncgnostics GmbH arbeiten.

IMMS arbeitet an Sensorik für zeitaufgelöste Fluoreszenz-Messungen

Die Messung erfolgt durch eine optoelektronische integrierte Sensorik, die das IMMS entwickelt und mit der die zeitaufgelöste Fluoreszenz erfasst wird. Die Proben werden hierfür direkt auf den Mikroelektronik-Chip des IMMS gegeben, auf dem die Biomarker selektiv gebunden werden. Die durch den Biomarker verfügbaren Fluorophore werden optisch angeregt und emittieren Photonen, die von dem Chip detektiert werden. Bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung wird diese Emission gemessen, nachdem das Anregungslicht abgeklungen ist. Dadurch lassen sich selbst sehr schwache Lichtquellen quantitativ erfassen und somit höhere Empfindlichkeiten des Sensors erreichen. Diese Sensorik wird vom Partner ALS Automated Lab Solutions GmbH in ein Kartuschen-basiertes Gerät integriert.

MEDIKIT auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung



Vortrag von Senova und IMMS zum Workshop von CiS und IMMS „Neue Sensorlösungen für Biologie und Medizin“ am 23.10.2018 in Erfurt.

Foto: IMMS.

Workshop von CiS und IMMS „Neue Sensorlösungen für Biologie und Medizin“

Am 23. Oktober 2018 waren 30 Vertreter aus Wissenschaft und Industrie mit Interesse an neuen Sensorlösungen und Technologien für Anwendungen in der Biologie und Medizin der Einladung von CiS und IMMS zum Workshop und fachlichen Austausch nach Erfurt gefolgt. Die Beiträge wurden präsentiert von Vertretern der Forschungseinrichtungen und Unternehmen CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme, Fraunhofer-Projektzentrum „Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin“, getemed Medizin- und Informationstechnik AG, IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, oncnostics GmbH und Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH.

Die Vorträge erstreckten sich über die Themenfelder invasive und nicht-invasive medizinische Sensorsysteme, Mikroelektronik-basierte Vorort-Diagnostik, Zellanalytik sowie Lab-on-Chip und beleuchteten Inhalte von Sensoren für Vitalfunktionen über faserbasierte Streulichtsensorik zur Untersuchung pathogener Keime bis zur optischen Überwachung von Archaeen in Biogasanlagen. Gemeinsam mit dem Partner Senova referierte das IMMS zum Entwurf, Aufbau und Test eines photometrischen Messsystems auf Basis eines CMOS-Sensorarrays für die schnelle und zuverlässige Vorort-Diagnostik von Prostatakrebs und mit dem Partner oncnostics zu einem mikroelektronischen Sensor-System und Verfahren für die schnelle, zuverlässige und frühzeitige Diagnostik von Gebärmutterhalskrebs.

Mehr Termine:

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018



ADMONT –

mikroelektronischer Kontakt-Bildsensor für die In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs

Das IMMS hat ein optoelektronisches Testsystem entwickelt für die quantitative Diagnostik von Brustkrebs. Der Prototyp wird derzeit vom Projektpartner Oncompass Medicine Hungary Ltd. für Untersuchungen mit Zellproben verwendet. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Brustkrebs gehört bei Frauen zu den Tumorarten mit den meisten Neuerkrankungen und der höchsten Sterberate weltweit.¹ Je genauer man die verschiedenen Typen und Stadien von Brustkrebs differenzieren kann, desto besser lassen sich wirksame Therapien einleiten und Behandlungsrisiken minimieren. Unter anderem werden Wirkstoffe verordnet, die zielgerichtet das Wachstum von Krebszellen blockieren,² indem sie den Wachstumsfaktorrezeptor HER2³ hemmen.

Dieses Protein ist an der Zellmembran jeder gesunden Brustzelle vorhanden. Bei etwa 20 – 30 Prozent der Karzinome⁴ kommt es jedoch um ein Vielfaches vor und regt die Krebszellen zu verstärktem Wachstum an. Je mehr HER2-Proteine vorhanden sind, desto effizienter ist der Wirkstoff. Ineffizient ist er bei Karzinomen mit weni-

Video
zum ADMONT-
Testsystem auf
www.imms.de.

¹ <https://doi.org/10.3322/caac.21492> (Figure 7)

² www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/brustkrebs/moderne-verfahren.php.

³ HER2: human epidermal growth factor receptor, <https://www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/brustkrebs/diagnostik.php#inhalt25>.

⁴ DOI: 10.1056/NEJMp058197.

gen HER2-Proteinen, aber die Nebenwirkungen bleiben. Daher ist es wichtig, die HER2-Ausprägung individuell für jeden Patienten vor der Therapieentscheidung zu bestimmen.

Klassische Nachweise des Proteins HER2 liefern nicht immer eindeutige Grundlagen für Therapieentscheidungen

Um zu untersuchen, wie stark dieses Protein vorhanden ist, werden Gewebeproben in einem ersten Schritt mit einem relativ kostengünstigen und schnellen Verfahren analysiert, der Immunhistochemie (IHC).

Die HER2-Proteine werden dabei eingefärbt und von Experten unter dem Mikroskop beurteilt. Je nach Ausmaß und Farbintensität werden die Proben häufig in vier Klassen eingestuft für keine, schwache, mäßig starke und starke Färbung. Diese Einstufung ist individuell vom Betrachter abhängig und kann von Labor zu Labor unterschiedlich ausfallen.⁵ Die zumeist von erheblichen Nebenwirkungen begleiteten und teuren Therapien werden in der Regel nur für Fälle aus der Klasse mit starken Reaktionen verordnet. Für mäßig starke und schwache Färbungen wird diese Entscheidung meist erst nach einer weiteren Analyse getroffen. Bei der dann vorgenommenen Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) handelt es sich um ein wesentlich aufwändigeres, aber auch genaueres, Gen-basiertes Nachweisverfahren, das an der Ursache der vermehrten Produktion des HER2-Proteins ansetzt.⁶

Mikroelektronik soll Menge des HER2-Proteins in einem einstufigen Verfahren quantitativ nachweisen

Nachteil der klassischen HER2-Nachweise in der Brustkrebsdiagnostik ist nicht nur das im Zweifelsfall mehrstufige und dann zeit- sowie kostenaufwändige Vorgehen mit zwei Analysemethoden, sondern vor allem die subjektive, bis dato nicht quantifizierbare visuelle Klassifizierung, die im ersten Schritt für alle Gewebeproben vorgenommen wird.

Ziel im Forschungsprojekt ADMONT war es daher, schnell, eindeutig und zuverlässig die Menge von HER2-Proteinen mit kostengünstigen optoelektronischen Messverfahren zu bestimmen. Das IMMS hat hierfür ein Mikroelektronik-basiertes Testsystem

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

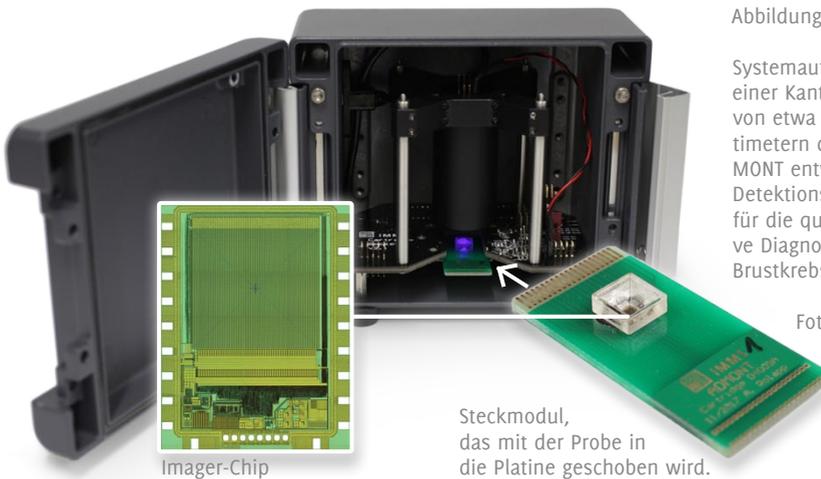
⁵ <https://www.breastcancer.org/symptoms/testing/types/ihc>

⁶ „Untersuchung der Expression des Onkogens HER2 beim Mammakarzinom“ J.-P. Rey, S. Fournier, C. Duc, C. Girardet, ZIWS; M. Stalder, CONSILIA, Sitten

Systemaufbau mit einer Kantenlänge von etwa zwölf Zentimetern des in ADMONT entwickelten Detektionssystems für die quantitative Diagnostik von Brustkrebs.

Foto: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung



Imager-Chip

Steckmodul, das mit der Probe in die Platine geschoben wird.

für die In-vitro-Diagnostik im Labor entwickelt. Es bildet u.a. alle für die Therapie relevanten Reaktionsklassen des immunhistochemischen Verfahrens ab und kann hierbei Lichtunterschiede erkennen, die von unterschiedlichen Mengen von eingefärbten HER2-Proteinen je Brustkrebszelle in einer Probenflüssigkeit hervorgerufen werden. Die Anzahl kann von einigen wenigen bis hin zu mehreren Millionen HER2-Proteinen schwanken.

Der entwickelte Prototyp (Abb. 1) lässt sich sowohl für fluoreszenzbasierte als auch für Absorptionsmessungen einsetzen. Die Zellprobe und entsprechende Marker-Substanzen für das HER2-Protein werden per Contact Imaging analysiert und hierfür direkt auf die Oberfläche des Imager-Chips in ein Flüssigkeitsreservoir gegeben. Ein zusätzliches optisches System, wie Objektive und Filter, ist nicht notwendig. Der vom IMMS für schwächste Lichtsignale ausgelegte Chip sitzt auf einem Steckmodul, das mit der Probe in eine Platine geschoben wird, die in einer lichtdichten Box mit einer LED verbaut ist. Diese Box lässt sich per USB-Schnittstelle an einen PC anschließen und über eine grafische Benutzeroberfläche ansteuern, über die auch die Daten ausgewertet oder an andere Auswerte-Software weitergegeben werden können.

Mehr zu Systemintegration auf www.imms.de.

Mehr zu Chip-Entwicklungen: www.imms.de

Dieser Prototyp wird derzeit vom Projektpartner Oncompass Medicine Hungary Ltd. für Untersuchungen zu einstufigen quantitativen HER2-basierten Analyseverfahren verwendet.

Biochemische Nachweisprinzipien

Um mit Hilfe eines optoelektronischen Systems nachweisen zu können, ob HER2 an Brustkrebszellen verstärkt auftritt, wurde bei der Auslegung dieses Systems von den etablierten Analysemethoden ausgegangen.

Für den Nachweis von HER2 per Immunhistochemie (IHC) existieren alternative Methoden. Bei der Immunfluoreszenz, einer Variante der IHC, wird HER2 mit spezifischen Antikörpern erkannt und mit passenden Fluorophoren sichtbar gemacht. Experten beurteilen die Färbung unter dem Fluoreszenzmikroskop. Dabei werden die fluoreszierenden Marker mit Licht bestimmter Wellenlängen angeregt, emittieren Licht anderer Wellenlängen und erzeugen damit das Bild. Farbfilter im Mikroskop verhindern, dass Anregungslicht auf das Bild gelangt.

Darüber hinaus basieren etablierte HER2-Nachweise auf dem Enzym Meerrettichperoxidase, das in einer enzymatisch gesteuerten Reaktion ein Substrat zu einem farbigen Produkt umsetzt. Die Farbmoleküle verändern die Absorptionseigenschaften der Probe und werden unter dem Mikroskop beurteilt.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

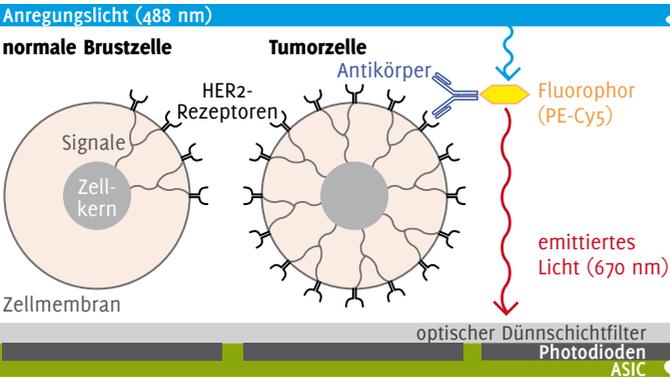


Abbildung 2:

Nachweis des verstärkten Auftretens von HER2-Proteinen an Brustkrebszellen mit Hilfe von Fluoreszenzmarkern (in diesem Fall PE-Cy5).

Grafik: IMMS.

Anforderungen und Messverfahren mit elektronischem System

Auslegung des Systems für Fluoreszenz-Messungen

Das am IMMS entwickelte mobile Testsystem wurde für die umfangreicheren Anforderungen von Fluoreszenz-Messungen ausgelegt, ist aber ebenso für Absorptionsmessungen geeignet. Es lässt sich damit für beide IHC-Varianten einsetzen. Proben mit einzelnen Brustkrebszellen werden mit Fluorophoren oder Enzymen vorbereitet und auf der Grundlage der oben beschriebenen biochemischen Nachweisprinzipien

untersucht. Anstelle des (Fluoreszenz-) Mikroskops tritt das kostengünstigere optoelektronische Messsystem (vgl. Abb. 2), um HER2-Proteine quantitativ nachzuweisen.

Für die fluoreszenzbasierten Messungen wird vom Projektpartner Oncompass der Fluorophor PE-Cy5 für die bioanalytischen Testreihen genutzt. Dieser Stoff wird von der LED im mobilen Testsystem mit einem Licht der Wellenlänge 488 nm angeregt und emittiert das zu messende Licht bei der Wellenlänge 670 nm. Um das Anregungslicht zu blockieren und vom zu messenden emittierten Licht zu trennen, ist ein optischer Dünnschichtfilter direkt auf der Chip-Oberfläche vorgesehen. Dieser Filter wird von einem Dienstleister realisiert.

Das von den Fluorophoren emittierte Licht wird von den Photodioden auf dem Chip detektiert. Die Lichtintensität gibt Aufschluss über die Konzentration der Fluoreszenzmarker und damit über die der HER2-Proteine.

Nutzung des Systems auch für Absorptionsmessungen

Das optoelektronische Messsystem wurde gleichermaßen so realisiert, dass es sich für HER2-Nachweise sowie für weitere Anwendungen mit Absorptionsmessungen nutzen lässt, bei denen schwache Helligkeitsunterschiede zum Nachweis anderer Analyten bzw. Biomarker untersucht werden.

Für die Absorptionsmessungen hat der Partner Oncompass das Enzym alkalische Phosphatase (AP) für seine Untersuchungen ausgewählt. Die mit AP gelabelten HER2 rufen nach der Zugabe des Substrates eine Farbreaktion hervor, die die Chipoberfläche durch einen violetten Niederschlag abdunkelt. Die Proben werden auf dem o.g. Weg in das Flüssigkeitsreservoir des Messsystems gegeben und von der LED beleuchtet. Findet eine entsprechende Nachweisreaktion in der Probe statt, lassen sich die Farbstoffe als Trübung auf dem Chip messen. Das Ergebnis wird mit Referenzmessungen an Proben ohne Zellen sowie mit nicht markierten Zellen verglichen und gibt Aufschluss über vorhandene Verfärbungen und damit für die Konzentration der zu untersuchenden Analyten bzw. Biomarker.

Chip-Architektur

Das Kernstück des Systems ist ein neu entwickelter **CMOS-Bildsensor**, der speziell auf die Erfordernisse für Contact-Imaging in Bioanalytik-Anwendungen optimiert ist. Der Schaltkreis hat eine Auflösung von 64 x 64 Pixeln bei einer Pixelgröße von 25 µm, was dem mittleren Durchmesser der Tumorzellen entspricht. Als Halbleitertechnologie wurde der 350-nm-Prozess XH035 der X-FAB verwendet.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

Mehr zu System-
integration auf
www.imms.de.

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de

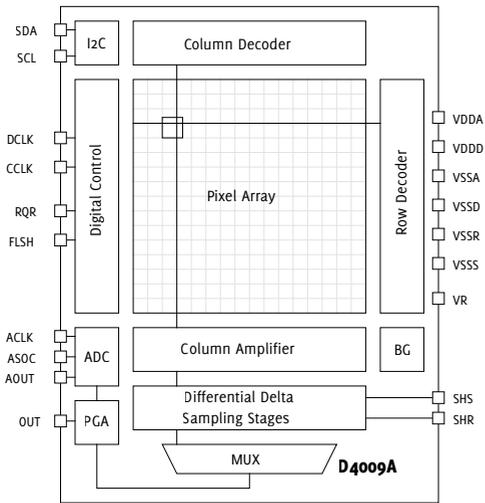


Abbildung 3:
Blockschaltbild des Bildsensors. Grafik: IMMS.

die Sampling-Stufen zur Zwischenspeicherung des Ausgangssignals der Pixel, einen einstellbaren Signalverstärker (PGA) zur rauscharmen Vorverstärkung und schließlich einen integrierten 12-Bit-SAR-Analog-zu-Digital-Wandler (ADC). Daneben hat der Chip noch ein I2C-Interface zur Konfiguration und eine Bandgap (BG) zur Erzeugung interner Referenzspannungen.

Eine der Besonderheiten der Schaltungsarchitektur liegt in den **verteilten Pixel-Verstärkern**, welche die für Bioanalytik-Applikationen essentielle hohe Sensitivität und feingranulare Unterscheidung bei geringen Lichtintensitäten ermöglicht und gleichzeitig ein geringes Bildrauschen erzielt. Um das zu erreichen, wurden die Pixel der herkömmlichen, ohne Feedback arbeitenden 3T-Pixel-Topologie um einen kompletten rückgekoppelten Verstärker erweitert. Dieser ist in einen pixelweises Differenzpaar und einen spaltenweisen Folded-Cascode Verstärkerteil aufgeteilt.

Um eine hohe Signalqualität zu gewährleisten, hat der Chip eine minimale **digitale Steuereinheit**, damit während des Bildaufnahmeprozesses möglichst wenige störende Aktivität auf dem Chip selbst stattfindet, die das Ausgangssignal negativ beeinflussen könnte. Die Ablaufsteuerung des Bildaufnahmeprozesses erfolgt daher über externe Signale, die von einem **FPGA** generiert werden. Die Bilder werden nach dem "Rolling-Shutter"-Prinzip aufgenommen. Dies bedeutet, dass die einzelnen Zeilen, aus denen das Bild aufgebaut ist, einem leichten zeitlichen Versatz untereinander

Der Chip liefert mit mehr als 4000 Pixeln statistisch relevante Aussagen für Signale von mehr als 4000 Tumorzellen. Er ist auf hohe Sensitivität bei sehr geringen Lichtmengen und niedriges Rauschen bei der Bildaufnahme optimiert. Das optische Signal der Zellen wird von den Photodioden der Pixel aufgesammelt, in elektrische Ladung gewandelt, integriert, verstärkt und anschließend digital gewandelt.

Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild des Bildsensors. Neben dem eigentlichen Bildfeld samt Treiberschaltung enthält der Schaltkreis

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

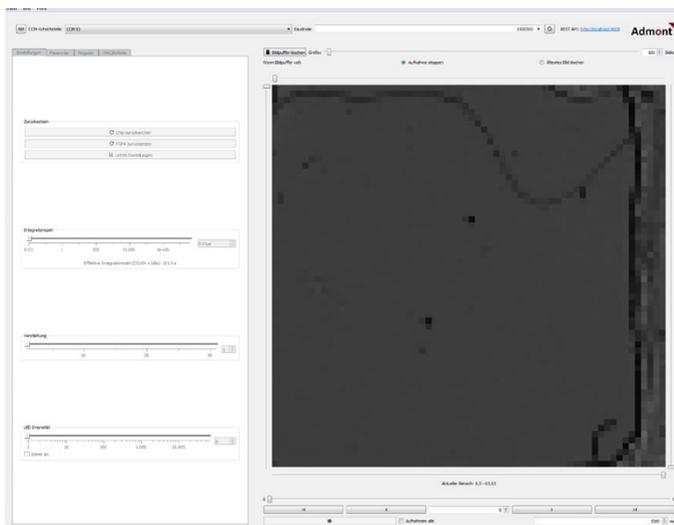


Abbildung 4:

Grafische Benutzeroberfläche für die Bedienung des Messsystems.

Grafik: IMMS.

aufweisen. Diese Aufnahmemethode folgt aus der verwendeten 3T-Pixel-Architektur und kann theoretisch zu einer Bildverzerrung bei schnell veränderlichen Bildinhalten führen. Allerdings spielt dieser Effekt für das Applikationsszenario keine Rolle.

Anwenderschnittstelle und Auswertung der Sensordaten

Der Anwender kann die Messkammer mit Hilfe eines am IMMS realisierten Programms bedienen, vgl. Abb. 4, über das sich die verschiedenen Bildsensoreinstellungen konfigurieren und die Ablaufsteuerung zeitlich koordinieren lassen. Hier kann der Anwender Bilder einzeln oder als Intervallserien aufnehmen, um sie später detailliert auszuwerten.

Darüber hinaus bietet das Programm die Möglichkeit mittels einer Representational-State-Transfer-Schnittstelle (REST API) die Messkammer über die Netzwerkschnittstelle zu bedienen sowie Mess- und Auswertevorgänge zu automatisieren.

Die Nachbearbeitung kann mit jeder Software erfolgen, die das Anwendungsprotokoll HTTP als Schnittstelle unterstützt. Den Projektpartnern, die im biologischen Labor lebende Zellen untersuchen, konnte damit in einer vertrauten PC-Umgebung eine Schnittstelle geschaffen werden. In einer Excel-Arbeitsmappe wurde mit Makros für den REST-API-Zugriff eine Grundlage für die Extraktion und Visualisierung der biomedizinisch relevanten Daten geschaffen, die vom Partner ohne Programmiererfahrung weiterentwickelt werden kann, vgl. Abb. 5.

Mehr zu Systemintegration auf www.imms.de.

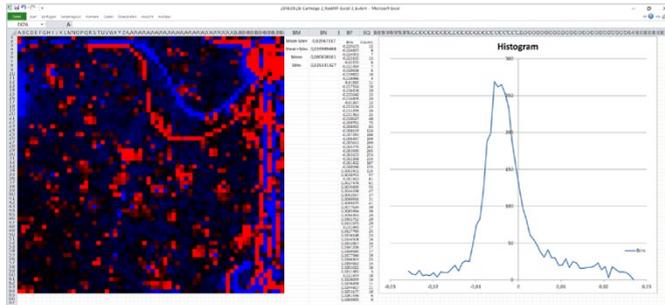
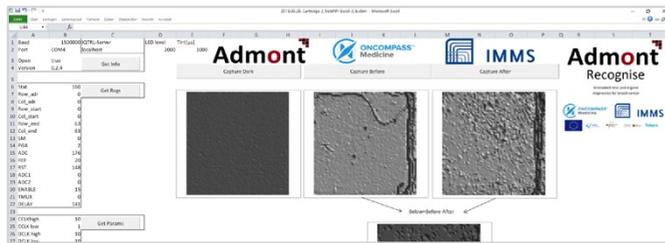


Abbildung 5:

In Excel erfolgt über die Schnittstelle REST API die Datenextraktion und Visualisierung der Messergebnisse, hier mit Testflüssigkeiten.

Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Ausblick

Das IMMS hat einen Prototyp für ein In-vitro-Diagnostiksystem zur Untersuchung von Brustkrebszellen und den quantitativen Nachweis von HER2-Proteinen entwickelt. Sowohl Fluoreszenz- als auch Absorptionsmessungen sind mit diesem System möglich. Die Flexibilität wird durch eine eigens entwickelte Software unterstützt. Die Datenverarbeitung und Visualisierung können entweder direkt in der Software als auch über Schnittstellen mit externen Tools erfolgen.

Der Partner Oncompass Medicine Hungary Ltd. hat begonnen, das System mit Brustkrebszellen zu evaluieren. Die Ergebnisse wird das IMMS für Weiterentwicklungen und als Grundlage für die Auslegung von Systemen für Antikörpersubstanzen mit anderen Fluoreszenz- bzw. Lichtabsorptionseigenschaften nutzen sowie für die Verbesserung von Messverfahren in Folgeprojekten.

ADMONT auf www.imms.de.

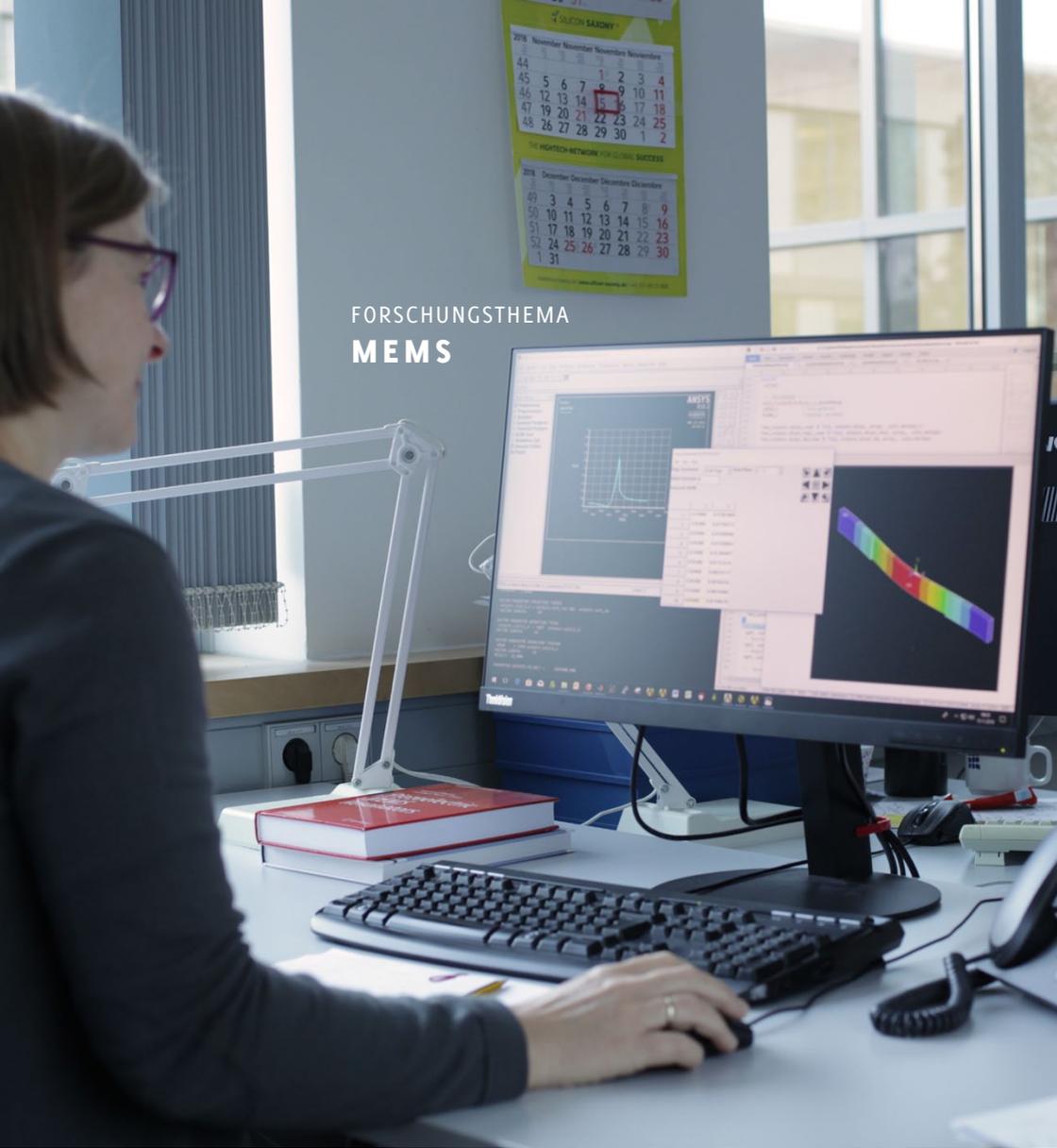
Alle ADMONT-Publikationen: www.imms.de.

Kontakt: Dr.-Ing. Valentin Nakov, valentin.nakov@imms.de

GEFÖRDERT VOM



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



FORSCHUNGSTHEMA MEMS

In der 2018 gestarteten Forschergruppe MagSens arbeitet das IMMS mit an MEMS-Sensoren, die künftig schwächere Magnetfelder detektieren sollen, wie z.B. in der Medizintechnik. Das Bild zeigt eine der dafür durchgeführten ANSYS-Simulationen des Übertragungsverhaltens einer magnetostruktiv-piezoelektrischen MEMS-Balkenstruktur. Foto: IMMS.

Die von der Technischen Universität Ilmenau geleitete Forschergruppe MagSens wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2017 FGR 0060.

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

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

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

Projekte zu
MEMS auf
www.imms.de.

Highlight 2018 im Bereich MEMS: Forschergruppe MagSens* gestartet – MEMS-Sensoren sollen künftig schwächste Magnetfelder detektieren

Herkömmliche ultrasensitive Magnetfeld-Sensoren erfordern aufwändige Kühlung

In der Medizin müssen extrem geringe Magnetfelder im menschlichen Körper sehr präzise, berührungs- und zerstörungsfrei gemessen werden, wie z.B. bei der Untersuchung von Hirnströmen.

MagSens auf
www.imms.de.

Hier, wie auch in der Geologie, Archäologie oder Materialwissenschaft, werden dazu bislang Sensoren verwendet, die auf supraleitenden Interferometern (Superconductive Quantum Interference devices, SQUIDS) basieren. Nachteil der SQUIDS ist, dass sie mit sehr hohem kryotechnischen Aufwand auf mindestens -196 °C gekühlt werden müssen, um überhaupt betrieben werden zu können.

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung

Die von der TU Ilmenau geleitete Forschergruppe MagSens untersucht daher seit Januar 2018 magnetoelektrische MEMS als alternative Sensoren, um die Messung schwächster Magnetfelder ohne Kühlung zu erreichen. Das erforschte Sensorprinzip basiert auf magnetostruktiv-piezoelektrischen Mehrschichtsystemen.

Hierfür wird in MagSens die Wandlungseffizienz in Abhängigkeit von der gewählten Sensorgeometrie und den Schichtmaterialien theoretisch berechnet und simuliert. Das IMMS trägt hierfür u.a. die Modellierung des Sensorprinzips in der FEM-Software ANSYS bei. Auf dieser Grundlage leitet das IMMS Designregeln und Richtlinien zur Entwicklung variabler magnetoelektrischer Sensorsysteme ab und erarbeitet eine Bibliothek mit Charakteristika, Fitfunktionen und geometrischen Grundformen.

FEM-Dienstleistungen auf www.imms.de.

Auf der Grundlage aller Ergebnisse zur Wandlungseffizienz werden von den Partnern die magnetoelektrischen Mehrschichtsysteme hergestellt sowie analysiert und daraus Teststrukturen und magnetoelektrische MEMS abgeleitet und technologisch realisiert.

Danach bringt sich das IMMS in die Systemintegration und Validierung mit ein. Dort wird die Wandlungseffizienz der im Projekt entwickelten und gefertigten magnetoelektrischen MEMS messtechnisch bestimmt und ihre Eignung als Sensor geprüft.

MagSens auf www.imms.de.



RoMulus –

Tool für den effizienten
Entwurf von dreidimensionalen
MEMS-Beschleunigungssensoren

Arbeiten an dem vom IMMS entwickelten Entwurfswerkzeug für das automatisierte Design und das weitgehend automatisierte Layout von mehrdimensionalen Beschleunigungssensoren. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Dem in der Mikroelektronik schon seit Jahrzehnten hochautomatisierten und rechnergestützten Entwurf von integrierten Schaltungen steht für das Design mikromechanischer Bauelemente auf Siliziumbasis bisher keine adäquate Methodik bzw. Entwurfs-Software gegenüber. Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) steuern beispielsweise Inkjet-Druckköpfe, werden in Smartphones als Mikrofon sowie als Gyroskop-Sensor zur Lageerkennung verwendet und stellen in modernen Autos als Beschleunigungs- und Drehratensensoren die Messdaten für Sicherheitssysteme bereit, wie etwa für Fahrdynamikregelungen, oder werden als Drucksensoren für das Reifendruck-Monitoring (tire-pressure monitoring systems, TPMS) genutzt. MEMS als Massenprodukte haben seit dem ersten in Serie produzierten integrierten Drucksensor von Bosch 1994 zwar eine eher junge Geschichte, weisen jedoch seit mehreren Jahren ein u.a. durch die Automobilindustrie getriebenes dynamisches und anhaltendes Wachstum auf. Immer kürzere Entwicklungszyklen erhöhen den Wettbewerbs- und damit den Kostendruck für MEMS auf Entwicklungsebene.

Mehr zu
RoMulus auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

Vorhandene MEMS-Entwurfs-Tools sind für Simulationen ausgelegt und erfordern viel Handarbeit

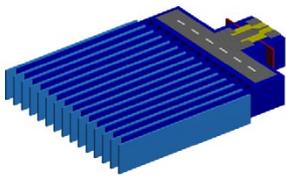
Erst seit etwas mehr als zehn Jahren gibt es Software-Tools, um MEMS mit Bibliothekselementen entwerfen und simulieren zu können. Inwieweit sich diese Entwürfe mit den verfügbaren Technologien realisieren lassen, ist mit den Tools nicht überprüfbar. Zudem haben die Tools keine Layout-Elemente, um den Layout-Prozess effizient halten zu können. Fertigungstoleranzen lassen sich von den Tools zwar berechnen, fließen aber nicht in optimierte Designs ein. Für den MEMS-Entwurf muss man jedoch prozessierbare Topologien kennen. Aufgrund vieler einzelner Sensorparameter, die oft mehrere Spezifikationsparameter beeinflussen, sind darüber hinaus Optimierungsfunktionen in einem solchen Tool sinnvoll, aber bislang nicht implementiert.

IMMS-Tool liefert automatisch optimierte MEMS-Designs und berücksichtigt dabei technologische Voraussetzungen

Das IMMS hat daher auf der Grundlage des im Projekt MEMS2015 erarbeiteten Design-Tools für eindimensionale Beschleunigungssensoren ein Entwurfswerkzeug für das automatisierte Design und das weitgehend automatisierte Layout von mehrdimensionalen Beschleunigungssensoren entwickelt. Das Werkzeug wurde zunächst als Inhouse-Tool zum Entwurf dreidimensionaler Beschleunigungssensoren ausgelegt, mit denen beispielsweise Reifendruck-Monitoring-Systeme (TPMS) um Funktionen erweitert werden.

TPMS stellen einen der Wachstumstreiber am MEMS-Markt dar und enthalten bereits heute neben Drucksensor und RFID-Komponente einen eindimensionalen Beschleunigungssensor. Mit diesem wird sichergestellt, dass nur dann Messdaten erfasst und per RFID übertragen werden, wenn sich der Reifen dreht. So wird die Batterielebensdauer des TPMS verlängert. Mit dreidimensionalen Beschleunigungssensoren werden dagegen die durch Größen- und Richtungsänderungen von Geschwindigkeiten hervorgerufenen g-Kräfte gemessen, um Fahrdynamikdaten zu gewinnen. Diese Sensoren messen alle translatorischen Freiheitsgrade, wie z.B. auch auf den Reifen wirkende Querbeschleunigungen.

Das am IMMS entwickelte Tool generiert ausgehend von der Kundenspezifikation automatisch Designs für solche dreidimensionalen Beschleunigungssensoren. Kernelement des Werkzeugs ist die zweistufige Designstrategie, um Toleranzen berücksichtigen zu können und damit ein optimales Sensordesign bei minimaler



Siliziumdioxid
Silizium
Trench
Aluminium

Abbildung 1:

Bibliothekselement Kammstruktur mit dem Layoutelement elektrischer Kontakt.

Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Sensorfläche zu ermöglichen. Die Bibliothekselemente höherer Ordnung sind ein weiteres Merkmal des entwickelten Tools. Diese enthalten neben Funktions- bzw. Disignelementen auch Layout-Elemente, um Teilschritte des Layout-Prozesses weitgehend zu automatisieren. Lediglich für die Verdrahtung sind manuelle Bearbeitungen notwendig.

Lösung im Detail

Funktionsweise und Grundstruktur des Sensors

Beschleunigungssensoren basieren alle auf dem gleichen Prinzip – eine an Federstrukturen aufgehängte bewegliche Masse wird durch eine Beschleunigung ausgelenkt. Unterscheiden lassen sich die verschiedenen Typen durch die Art und Weise, wie diese Auslenkung detektiert wird. Das erfolgt bei der XMB10-Technologie von X-FAB kapazitiv, indem sich der Abstand zwischen einer festen und einer beweglichen, mit der ausgelenkten Masse verbundenen Elektrodenstruktur ändert. Im Regelfall kommen differentielle Kammstrukturen wie in Abbildung 1 zum Einsatz.

Bei mehrdimensionalen kapazitiven Beschleunigungssensoren ist prinzipiell eine Vielzahl von Grundstrukturen möglich, die sich z.B. durch die Anzahl der Beschleunigungskomponenten bzw. Freiheitsgrade unterscheiden, die eine bewegte Masse detektiert. Kriterien für die Auswahl geeigneter Grundstrukturen sind dabei die Sensorfläche sowie die wechselseitige Beeinflussung von zu messenden Beschleunigungskomponenten (Querempfindlichkeit), wobei beide Größen möglichst klein sein sollen. Ein Sensor mit drei Massen, je einer pro Freiheitsgrad, hat eine kleine Querempfindlichkeit, aber keine optimale Sensorfläche. Dagegen besitzt ein Sensor mit nur einer Masse eine kleine Sensorfläche, aber auch eine große Querempfindlichkeit aufgrund nur eines Federsystems für alle 3 Freiheitsgrade. Ein Optimum bezüglich der Parameter Sensorgröße und Querempfindlichkeit stellt ein Sensor mit zwei beweglichen Massen dar – je eine für Bewegungsrichtungen in der Ebene (x/y) oder aus ihr heraus (z). Weitere Grundstrukturen können in der Technologie nicht realisiert

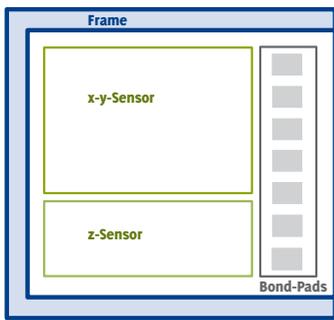


Abbildung 2:
Sensorstruktur (Prinzipiskizze).
Grafik: IMMS.

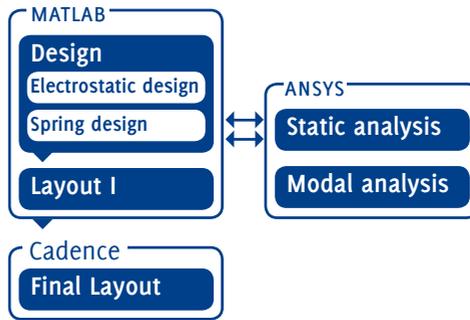


Abbildung 3:
Struktur des Design- und Layoutprozesses.
Grafik: IMMS.

werden. Sensoren mit aus der Literatur bekannten gekoppelten Massesystemen lassen sich mit dieser Technologie beispielsweise nicht prozessieren.

Zweistufige Design-Strategie für das IMMS-Tool

Am Anfang des Designprozesses steht die Kundenspezifikation, in der Parameter wie die maximal zu messende Beschleunigung, die Sensitivität (Kapazitätsänderung pro Beschleunigung, typischerweise angegeben in fF/g), Nichtlinearität (maximale Abweichung des Ausgangssignals von einer Referenzgeraden in %), Resonanzfrequenz und Schockfestigkeit etc. definiert werden. Mittels des Tools wird aus der Spezifikation ein Sensor mit minimaler Fläche in einem jeweils zweistufigen Design- und Layoutprozess generiert. Diese Prozess-Stufen dienen dem Ziel, die von Technologie-toleranzen immer hervorgerufenen Abweichungen von Spezifikationsparametern für die Sensoren zu minimieren.

Ätzprozesse rufen die größten Fertigungstoleranzen hervor

Der für die Designstrategie relevante toleranzbehaftete Prozess ist das Ätzen der Finger- und Federstrukturen aus der aktiven, wahlweise 15, 30 oder 75 µm dicken Sensorschicht. Idealerweise würde der Ätzprozess nur senkrecht in die Tiefe wirken. In der Realität greift das Ätzmittel jedoch das Silizium nicht nur in der senkrechten, sondern auch der seitlichen Richtung an. Durch diese Unterätzung ändern sich die Breiten von Finger- und Federstrukturen und mithin auch die Abstände zwischen den Fingerstrukturen.

Die Änderung der Geometrieparameter hat zwei gegenläufige Effekte zur Folge – bei einer positiven Unterätzung einerseits eine größere Sensorauslenkung aufgrund der kleineren Federbreite, andererseits eine geringere Kapazitätsänderung aufgrund

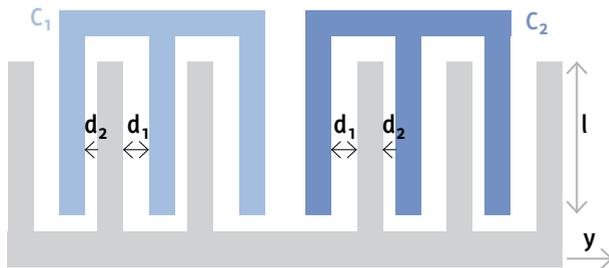


Abbildung 4:

Differentielle Kammstruktur (Prinzipskizze).

Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

des größeren Abstandes zwischen den Fingern der Kammstruktur. Diese gegenläufigen Effekte lassen sich nutzen, um den Einfluss der Prozesstoleranzen auf die Sensorcharakteristik zu minimieren.

Zwei Designstufen minimieren Einfluss der Prozesstoleranzen auf die Sensorcharakteristik

In einem ersten Schritt werden die elektrostatischen Parameter bestimmt, wie Anzahl n , Länge l und Abstände (d_1 und d_2) der Finger der Kammstruktur, und die maximale Auslenkung der bewegten Masse Δy einschließlich der Federkonstante unter Annahme einer virtuellen Feder, vgl. Abbildung 4. Im zweiten Schritt wird die Federbreite für einen minimalen Einfluss der Technologietoleranzen optimiert und nachfolgend die Federlänge berechnet.

Die für das Design verwendeten Modellierungs- und Simulationsmethoden wurden nach Rechengeschwindigkeit und Modellgenauigkeit ausgewählt. So sind bei der Berechnung der Kapazitäten Streufelder zu berücksichtigen. Im Tool wird hierbei die Methode der konformen Abbildungen verwendet. Federsteifigkeiten und Eigenfrequenzen werden mit kommerziellen Finite-Elemente-Programmen (FEM) berechnet, die für die Modellierung und Simulation über das Tool gesteuert werden. Schnittstellen des Tools existieren für ANSYS und MEMS+.

FEM-Dienstleistungen auf www.imms.de.

Design- und Layout-Beispiel

Für die beispielhafte Demonstration wurden mit dem Tool Design und Layout eines 3D-Beschleunigungssensors erstellt, dessen Spezifikation den Anforderungen eines TPMS entspricht. Als maximale Beschleunigung wird 500g angenommen, weitere Vorgaben sind eine Sensitivität von 0,1fF/g sowie eine maximale Nichtlinearität von 1%. Optimierungsziel ist eine minimale Sensorfläche für minimale Kosten. Aus der Spezifikation leitet sich der folgende, in Abbildung 5 dargestellte spezifische Designflow ab.

- Schritt 1 Maximale Verschiebung (bestimmt durch Nichtlinearität)
- Schritt 2 Finger-Parameter (bestimmt durch Schritt 1 und Sensitivität)
- Schritt 3 Feder-Parameter (bestimmt durch Schritt 1 und Schritt 2)

Abbildung 5: Sensorspezifischer Design-Flow. Grafik: IMMS.

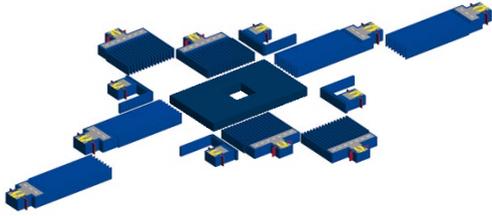


Abbildung 6: xy-Sensoreinheit (Explosionsansicht mit Bibliothekselementen). Grafik: IMMS.

- 109
- > RoMulus: RFID
 - > Green-ISAS: Test
 - > Green-ISAS: EH
 - > StadtLärm
 - > fast wireless
 - > ADMONT
 - > RoMulus: MEMS
 - > Inhalt
 - * Förderung

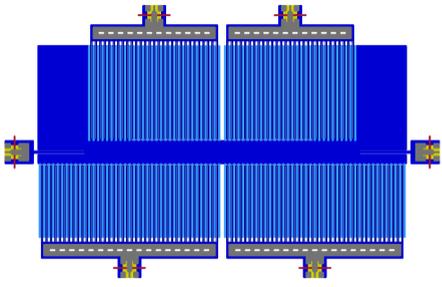
xy-Sensoreinheit

Die xy-Sensoreinheit besitzt symmetrisch angeordnete differentielle Kammstrukturen in x und y, um eine kleine Querempfindlichkeit zu erzielen. Mäanderförmige Federn an den Ecken der beweglichen Masse erlauben eine Auslenkung in der Ebene. Die Aussparung in der Mitte der beweglichen Masse ist ein Layoutelement und dient der Aufnahme von Stopperstrukturen, um eine Beschädigung des Sensors unter Schockeinwirkung zu vermeiden.

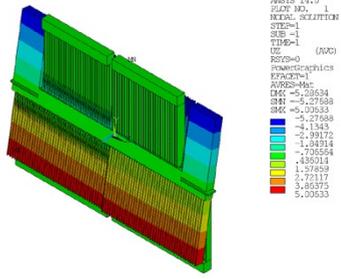
In der Spezifikation ist eine quadratische Fläche für den 3D-Beschleunigungssensor vorgegeben, woraus für beide Sensoreinheiten rechteckige Grundflächen resultieren. Für die xy-Sensoreinheit folgt daraus wiederum aufgrund der geforderten gleichen Kapazitätsänderung in x und y eine unterschiedliche Fingeranzahl und -länge in beiden Richtungen.

z-Sensoreinheit

Bei der z-Sensoreinheit ist die bewegliche Masse an Torsionsfedern aufgehängt. Diese weist eine asymmetrische Masseverteilung auf, was bei Beschleunigungen eine Torsionsbewegung der Masse bewirkt. Die Massebewegung wird technologie-spezifisch durch abgedünnte Fingerstrukturen detektiert.



a) z-Sensoreinheit



b) statische Simulation

Abbildung 7: z-Sensoreinheit. Grafik: IMMS.

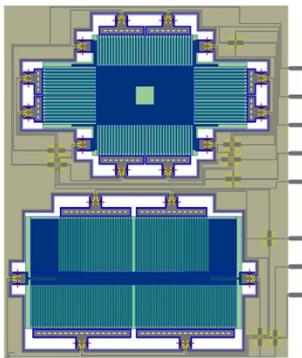


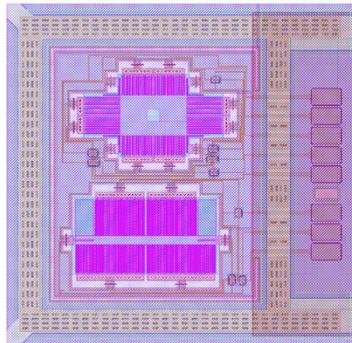
Abbildung 8:

Sensor-Layout:

◀ Nach Phase I

Finales Layout ▶

Grafik: IMMS.



- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Layout

Das Layout umfasst im Wesentlichen das Erstellen der die eigentlichen Sensoreinheiten umgebenden „festen Welt“ und die Verdrahtung inklusive Pads für die elektrische Kontaktierung. Im ersten Layout-Schritt wird die „feste Welt“ durch das Tool automatisch generiert mittels Booleschen Operationen unter Einhaltung der Designregeln. Vorhanden sind nach dem Designprozess außerdem bereits elektrische Kontakte, die Bestandteil der Bibliothekselemente sind. Die Verdrahtung der elektrischen Anschlüsse untereinander und mit den Anschluss pads erfolgt bis auf sich kreuzende Leitungen manuell; das Layoutelement „Kreuzung“ wird jeweils automatisch eingefügt. Im zweiten Schritt werden mit dem Process Design Kit von X-FAB zusätzliche technologiespezifische Layoutelemente eingefügt.

Ausblick

Mit der Entwicklung des Entwurfstools für mehrachsige Beschleunigungssensoren ist es dem IMMS derzeit möglich, als X-FAB-Designhaus zu agieren, das heißt für verschiedene Unternehmen kundenspezifische Sensorlösungen effizient zu entwerfen, die in X-FAB-Technologien gefertigt werden sollen. Die dem Tool zugrundeliegende Methodik soll in einem nächsten Schritt auf weitere mit den offenen Technologieplattformen von X-FAB herstellbare Sensortypen angewandt werden, wie z.B. Drehraten- und Drucksensoren.

Kontakt: Dipl.-Ing. Steffen Michael, steffen.michael@imms.de

*Mehr zu
RoMulus auf
www.imms.de*

*Alle RoMulus-
Publikationen:
www.imms.de.*

GEFÖRDERT VOM



Das Projekt RoMulus wurde unter dem Förderkennzeichen 16ES0362 im Förderprogramm IKT 2020 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

A scientist wearing a white lab coat and a hairnet is focused on a microscope in a cleanroom. The scientist is adjusting a component of the microscope with their right hand. The background shows various pieces of laboratory equipment and a clean, industrial environment.

**ZAHLEN,
STRUKTUREN
UND BELEGE**

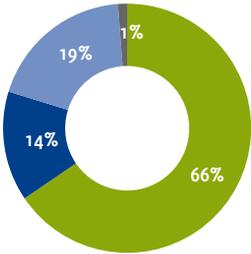
Vorbereitungen für
Messungen auf Wafer-
Ebene am Institutsteil
Erfurt im Reinraum-
Messtechniklabor.
Foto: IMMS.

Das IMMS in Zahlen

Personalstruktur:

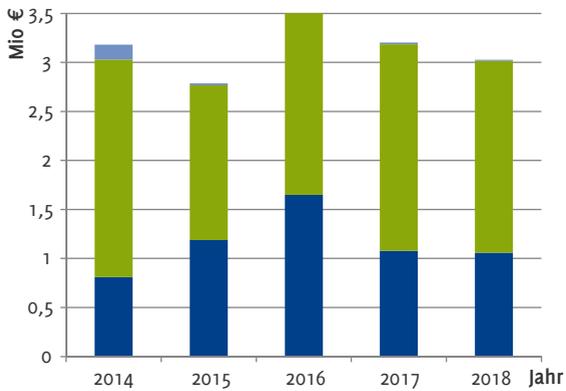
Wissenschaftler

Mitarbeiter Administration/Azubi
studentische Mitarbeiter (FTE)
sonstige Hilfskräfte



Projekteinnahmen:

Industrieeinnahmen / Förderprojekte / Sonstige



2018 waren am IMMS 84 Mitarbeiter¹ tätig. Hiervon waren 55 Wissenschaftler und 16 Studenten-FTE² in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 85 % aller Beschäftigten.

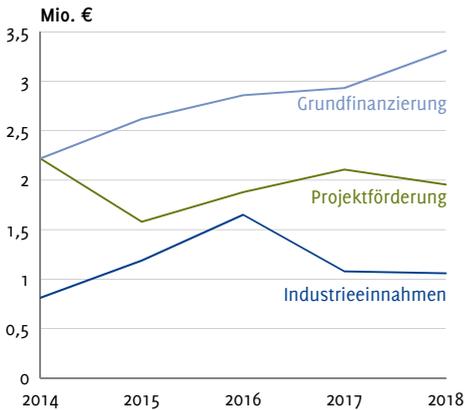
Hinter den 16 Studenten-FTE stehen 36 Studierende, die die Möglichkeit nutzten, im IMMS ihre Ausbildung in praxisorientierter Forschung zu vertiefen und zu ergänzen. 2 Bachelorarbeiten und 9 Masterarbeiten wurden in 2018 am IMMS betreut und 7 Mitarbeiter des IMMS waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben.

Die Gewinnung und Bindung motivierter und hoch qualifizierter Mitarbeiter ist für die Weiterentwicklung des IMMS von hoher Bedeutung. Durch das große Engagement in der studentischen Ausbildung hat das IMMS auch die Möglichkeit, hervorragend qualifizierte Absolventen als Mitarbeiter zu gewinnen.

Die Projekterträge sind insgesamt gegenüber dem Vorjahr um rd. 11 % niedriger ausgefallen. Dabei konnten die Erträge aus industrieller Auftragsforschung gesteigert werden bei gegenläufiger Entwicklung der Erträge aus öffentlichen Förderprojekten. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den Projekteinnahmen mit einem Rückgang von insgesamt rd. 9 % tendenziell wider.

¹ im Jahresdurchschnitt

² FTE Full time equivalent (Vollzeitäquivalent). Die erbrachten Arbeitszeiten werden zu Vergleichszwecken auf eine Vollzeit-Beschäftigung umgerechnet.



- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Dabei sind die Einnahmen aus industrieller Auftragsforschung (Industrieeinnahmen) mit einem Rückgang um rd. 2 % nahezu auf dem Vorjahresniveau geblieben. Dies ist im Wesentlichen zurückzuführen auf die Fertigstellung von Aufträgen zum Jahresende und der zeitversetzten Zahlungseingänge erst in 2019. In 2018 konnten 37 Projekte mit der Industrie beendet werden. Die Einnahmen aus Förderprojekten sind um rd. 7 % niedriger ausgefallen als im Vorjahreszeitraum. Im Berichtsjahr konnten 9 Förderprojekte erfolgreich abgeschlossen werden. Für die kommenden Jahre sehen wir mit der Umsetzung der in 2018 erarbeiteten Strategie 2030 eine gute Voraussetzung, um weiterhin erfolgreich Förderprojekt- und Industrieeinnahmen einwerben zu können.

Die unverändert hohe Akzeptanz des IMMS als kompetenter Forschungspartner zeigt sich in der Zahl der Projekte, die gemeinsam mit Partnern aus der Industrie stattfinden. Ziel ist es dabei, innovative Ergebnisse aus der Forschung frühzeitig in die industrielle Anwendung zu bringen. Gerade hier zeigt sich die hohe Kompetenz des IMMS im Transfer von Forschungsergebnissen zur Entwicklung und Herstellung von Produkten für Unternehmen.

Der Freistaat Thüringen hat wie in den Vorjahren auch in 2018 für verlässliche Bedingungen durch die Bereitstellung der institutionellen Zuwendung gesorgt. Insbesondere konnten zur Umsetzung der Strategie interne Forschungsgruppen initiiert werden. Die institutionelle Förderung des Freistaats bildet für das IMMS unverändert die Grundlage, um insbesondere kleine und mittlere Unternehmen Thüringens durch innovative und anwendungsnahe Forschung zu unterstützen.

Mehr zur
Förderung auf
www.imms.de.



Aufsichtsrat

- **Vorsitzender:** Herr ¹Robert FETTER, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau ¹Bianca KIZINA, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft
- Herr Dr. sc. Wolfgang HECKER, im Ruhestand
- Herr Dr. Jens KOSCH, Chief Technical Officer, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH
- Herr Andreas ROHWER, Thüringer Finanzministerium
- Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe SATTLER, Prorektor Wissenschaft, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, FG Datenbanken und Informationssysteme
- Herr Prof. Dr. rer. nat. Ingolf VOIGT, Stellvertretender Institutsleiter, Standortleitung Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Hermsdorf

- **Vorsitzender:** Herr Dr. Peter SCHNEIDER, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Leitung des Institutsteils Entwicklung Adaptiver Systeme EAS
- **Stellv. Vorsitzender:** Herr Prof. Dr. mont. Mario KUPNIK, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Mess- und Sensortechnik (MuSt)
- Frau Dr. Christiane EHRLING, Analytik Jena AG, Leiterin Forschung und Entwicklung, Bereich Elementaranalyse/Summenparameter und Standortleiterin Lange-wiesen
- Herr Dr. Alfred HANSEL, Geschäftsführer, Oncgnostics GmbH
- Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin HOFFMANN, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mikrosystem-technik
- Herr Dr.-Ing. Gabriel KITTLER, Innovation Manager, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH Erfurt
- Herr Dr. Ralph KLÄSGES, Vice President Research & Development, Carl Zeiss SMT GmbH
- Herr Dr. Peter MIETHE, Geschäftsführer, FZMB GmbH Forschungszentrum für Medizintechnik und Biotechnologie
- Herr Prof. Dr.-Ing. Wolfgang NEBEL, Universität Oldenburg, Fakultät II, Dep. Informatik, Abt. Eingebettete Hardware-/Software-Systeme und Vorstandsvorsitzender OFFIS e.V.
- Herr Prof. Dr. Ulf SCHLICHTMANN, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Entwurfsautomatisierung
- Herr Prof. Dr. Ansgar TRÄCHTLER, Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik; Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Institutsleiter und Direktor Forschungsbereich Scientific Automation
- Herr Jörg WENDE, Consultant Hybrid-Integration und Industrie 4.0, IBM Deutschland GmbH, Dresden

Prof. Dr. Ralf Sommer, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme:

- Grundlagen der analogen Schaltungstechnik, Vorlesung & Übung, B.Sc. 3. Sem.
- Rechnergestützte Schaltungssimulation und deren Algorithmen (EDA), Vorlesung & Übung, B.Sc., M.Sc.
- Modellierung und Simulation analoger Systeme, Vorlesung & Übung, B.Sc.

Prof. Dr. Hannes Töpfer, TU Ilmenau, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik:

- Theoretische Elektrotechnik I und II, Vorlesung, B.Sc. 4./5. Sem.
- Schaltungen der Quanteninformationsverarbeitung, Vorlesung, M.Sc., 2. Sem.
- Elektromagnetische Sensorik, Vorlesung, M.Sc., 2. Sem.
- Technische Elektrodynamik, Vorlesung, M.Sc., 2. Sem.
- Supraleitung in der Informationstechnik, Vorlesung, M.Sc., 1. Sem.
- Projektseminar ATET, Seminar, M.Sc., 2. Sem.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

Veranstaltungen

Workshop-Angebote/IMMS als Gastgeber/Veranstalter/ Mitinitiator

4. **M4.0-Stammtisch Sensorik 4.0** „Produktionsdatenerfassung“, 22.02.2018, IBYKUS AG Erfurt (Vortrag, Organisation, Moderation)

4. **M4.0-Workshop Sensorik 4.0** „Linux-basierte echtzeitfähige Sensorsysteme“, 08.03.2018, IMMS Ilmenau (Vorträge, Organisation, Moderation)

DT-Workshop des Meetup New Work Thüringen: “Design Thinking – das neue Denken!”, 09.04.2018, Erfurt (Workshop)

M4.0-Stammtisch Kollaboration „Das digitale Büro“, 09.05.2018, IHK Erfurt (Organisation, Moderation)

TFTF 2018 14. Thüringer Forschungs- und Technologieforum, 15.05.2018, TU Ilmenau (Führung am IMMS mit Demonstratoren, Mitaussteller)

M4.0-Workshop mit dem IRP e.V. „Unterstützungsbedarfe kleiner und mittlerer Fertigungsunternehmen zu Digitalisierungsthemen“, 24.05.2018, Ilmenau (Vortrag/Workshop, Moderation)

5. **M4.0-Stammtisch Sensorik 4.0:** „Vorrausschauende Wartung“, 31.05.2018, IL Metronic Ilmenau (Vortrag, Organisation, Moderation)

Aktuelle
Termine:
www.imms.de

Jahresbericht

Besuch Tankred Schipanski, 12.07.2018, IMMS Ilmenau (2 Vorträge, Führung, Demonstratoren)

Besuch Bodo Ramelow, 16.07.2018, IMMS Ilmenau (2 Vorträge, Führung, Demonstratoren)

TEAG-Ausbilderworkshop, 02.08.2018, IMMS Ilmenau (Vortrag, Führung, Demonstratoren)

Besuch TMASGFF: Besuch von Vertretern vom Thüringer Ministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit, Frauen und Familie, 15.08.2018, IMMS Ilmenau (Vortrag und Demonstratoren)

6. M4.o-Workshop Sensorik 4.0 „Ein Schritt in Richtung Industrie 4.0 – Industrie-4.0-konforme Kommunikation mit OPC-UA“, 30.08.2018, IMMS Ilmenau (Organisation, Vorträge, Moderation)

M4.o-Workshop „Design Thinking“, 06.09.2018 und 11.09.2018, Berufsschule Pößneck, (Organisation, Workshop)

6. M4.o-Stammtisch Sensorik 4.0: „Datenrecht, Datenhoheit – Wem gehören die Sensordaten und wer darf wie und wann damit etwas tun?“, 13.09.2018, FALCOM GmbH Langewiesen (Organisation, Moderation)

Mittelstand 4.0: Regionalkonferenz „Arbeit 4.0 konkret“, 18.09.2018, Erfurt (Workshop)

M4.o-Infotag „Informationstag an den Modellfabriken Vernetzung und Migration“, 23.10.2018, IMMS Ilmenau und Newtonbau (Vortrag, Führungen, Demonstratoren)

7. M4.o-Workshop Sensorik 4.0: „Industrielle Kommunikation mit OPC-UA“, 25.10.2018, IMMS Ilmenau (Organisation, Moderation)

Workshop „Neue Sensorlösungen für Biologie und Medizin“ von IMMS/CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH/CiS e.V., 23.10.2018, Erfurt (Organisation, 2 Vorträge, Moderation)

7. M4.o-Stammtisch Sensorik 4.0 „Ressourceneffizienz durch Sensorik 4.0“, 08.11.2018, solvimus GmbH Ilmenau, (Vortrag, Organisation, Moderation)

8. M4.o-Workshop Sensorik 4.0 „Sensordatenverarbeitung in der Cloud“, 06.12.2018, IMMS Ilmenau (Organisation, Vortrag, Moderation)

Messen/Ausstellungen

11. Gewerbeausstellung Steinbach-Hallenberg, 07.-08.04.2018, (IMMS als Mitaussteller des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau auf dem Gemeinschaftsstand des FerMeTh – Cluster für Fertigungstechnik und Metallbearbeitung in Thüringen)

IDTechExShow Internationale Technologie-Messe mit 9 Konferenzen, 11. – 12.04.2018, Berlin (Vortrag)

3. Thüringer IT-Leistungsschau, 12.04.2018, Erfurt (IMMS als Aussteller auf dem Stand des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau, Demonstratoren, Vortrag)

Hannover Messe 2018, 23. – 27.04.2018, Hannover (IMMS als Mitaussteller des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau auf dem Gemeinschaftsstand der LEG Thüringen; Demonstratoren)

MEDICA 2018, 12. – 15.11.2018, Messe Düsseldorf (IMMS als Mitaussteller, Gemeinschaftsstand Diagnostik-Netzwerk Berlin-Brandenburg)

Publikationen

Überblick zu Konferenzen/Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

Jenaer Technologietag, „Digitale Arbeitswelten – Auf in die Neue (Arbeits-) Welt“, 31.01.2018, Ernst-Abbe-Hochschule (Angebot von zwei Workshop-Sessions, Vortrag)

9. GMM-Workshop der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik „Energieautonome Sensorsysteme“, 28.02. – 01.03. 2018, Dresden (Vortrag)

TuZ 2018 30. GI/GMM/ITG-Workshop – Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, 04. – 06.03.2018, Freiburg im Breisgau (Vortrag und Fachposter)

GeMiC 2018 German Microwave Conference, 12. – 14.03.2018, Freiburg (Vortrag)

DATE 2018 Conference on Design, Automation and Test in Europe, 19. – 23.03.2018, Dresden (zwei Fachposter, ein Demonstrator)

IEEE SSD 2018 The 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2018 19. – 22.03.2018, Hammamet, Tunesien (Vortrag)

IEEE RFID 2018 The 12th Annual International Conference on RFID, 10. – 12.04.2018, Orlando, Florida, USA (Vortrag)

CDNLive EMEA 2018 Cadence User Conference, 07. – 9.05.2018, München (Vortrag)

edaWorkshop 18 Workshop Elektronische Design-Automation, 16. – 17.05.2018, Hannover, (Vortrag, EDA Achievement Award 2018)

Workshop „Cross-Clustern ist heute“ der LEG Thüringen, 23.05.2018, ComCenter Erfurt (Vortrag/Moderation zum Ideengenerator)

Thüringer Maschinenbautag 2018, 07.06.2018, Erfurt (Fachposter, Demonstrator)

Neuarbeiten Extended „Industrie 4.0 und Neuarbeiten“, Vortrags- und Workshop-Event der B-S-S Business Software Solutions GmbH, 20.06.2018, Erfurt (Eröffnungsvortrag)

22. Magdeburger Logistiktage „Logistik neu denken und gestalten“ im Rahmen der IFF-Wissenschaftstage, 20. – 21.06.2018, Magdeburg (Vortrag)

ATIoT 2018 International Summer School on Advanced Technologies based on Internet of Things (ATIoT), 21.06.2018, Chemnitz (Tutorial, 3 Vorträge)

SMACD 2018, 15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, 02.– 05.07.2018, Prag, Tschechische Republik (Vortrag)

OMTS I4.0 Netzwerkveranstaltung des Innovationsnetzwerks Optische Messtechnik und Sensorik für Industrie 4.0, 03.07.2018, Deggendorf (Vortrag)

OPTIMIZE I4.0 Netzwerkveranstaltung des Innovationsnetzwerks für Optische Technologien und Photonik für Industrie 4.0, 16.07.2018, Jena (Vortrag)

ISPS 2018 14th International Seminar on Power Semiconductors, 29.08.2018, Prag, Tschechische Republik (Vortrag)

FDL 2018 Forum on specification & Design Languages, 10. – 12.09.2018, München (Vortrag)

Analog 2018 16. GMM/ITG-Fachtagung (VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik/Informationstechnische Gesellschaft im VDE), 12. – 14.09.2018, München-Neubiberg (Vortrag, Poster)

19. Heiligenstädter Kolloquium „Technische Systeme für die Lebenswissenschaften“ des iba Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., 24. – 26.09.2018, Heilbad Heiligenstadt (2 Vorträge)

Smart Sensors 2018 Conference on Smart Sensors – mechanistic and data driven modelling des DECHEMA e.V., 01. – 2.10.2018, Frankfurt/M. (Fachposter)

Technologietag 2018 „Akustische Verfahren zur Qualitätsprüfung – Berührungslos, zerstörungsfrei & sicher integriert“ des Fraunhofer-Instituts für Digitale Medientechnologie IDMT, 09.10.2018, Erfurt (Vortrag)

DASIP 2018 Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing, Demo-Night, 10. – 12.10.2018, Porto, Portugal (Demonstrator, Poster)

elmug&future 2018 Technologiekonferenz „Smart Sensors & Related Applications“ der Elektronischen Mess- und Gerätetechnik Thüringen eG (ELMUG), 16. – 17.10.2018, Erfurt (2 Vorträge, Mitaussteller)

IUS 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, 22. – 25.10.2018, Kobe, Japan (Co-Autor Fachposter)

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung

Aktuelle

Termine:

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2018

ASPE 2018 33rd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering
04. – 9.11.2018, Las Vegas, Nevada, USA (*Vortrag*)

PowerMEMS 2018 Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, 04. – 7.12.2018, Daytona Beach, Florida, USA (*Demonstrator, 2 Fachposter*)

Begutachtete Veröffentlichungen

Hybrid scheme to enable DTN routing protocols to efficiently exploit stable MANET

contacts, Silvia KRUG¹. Matthias AUMÜLLER². Jochen SEITZ². *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, October 2018, Volume 2018, DOI: doi.org/10.1186/s13638-018-1248-5*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Communication Networks Group, Technische Universität Ilmenau, PF 100565, 98684 Ilmenau, Germany.

Towards alternative 3D nanofabrication in macroscopic working volumes, M.

KÜHNEL¹. T. FRÖHLICH¹. R. FÜßL¹. M. HOFFMANN⁶. E. MANSKE¹. I. W. RANGELOW². J. REGER³. C. SCHÄFFEL⁵. S. SINZINGER⁴. J.-P. ZÖLLNER³. *Meas. Sci. Technol. 29 (2018) 114002, DOI: doi.org/10.1088/1361-6501/aadb57*. ¹Institute for Process Measurement and Sensor Technology, Technische Universität Ilmenau, D-98684 Ilmenau, PO Box 100565. ²Institute for Microelectronics and Nanoelectronics, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau, PO Box 100565, Germany. ³Institute for Automation and Systems Engineering, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau, PO Box 100565, Germany. ⁴Optical Engineering Department, Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau, PO Box 100565, Germany. ⁵IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ⁶Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik, Universitätsstraße 150, ID 05 / 441, 44801 Bochum, Germany.

Modeling Pitch Perception With an Active Auditory Model Extended by Octopus

Cells, Tamas HARCZOS^{1,2,3}. Frank Markus KLEFENZ¹. *Front. Neurosci., 25 September 2018, DOI: doi.org/10.3389/fnins.2018.00660*. ¹Fraunhofer Institute for Digital Media Technology, Ilmenau, Germany. ²Auditory Neuroscience and Optogenetics Laboratory, German Primate Center, Göttingen, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Design of Quasi-synchronous Finite State Machines Using a Local On-demand

Clocking Approach, Athanasios GATZASTRAS¹. Dominik WRANA¹. Tobias WOLFER¹. Georg GLÄSER². Benjamin SAFT². Eric SCHÄFER². Eckhard HENNIG¹. *Analog 2018, 16. GMM/ITG-Fachtagung, München-Neubiberg, 12-14 September 2018, Proceedings: https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/454754003.html*. ¹Hochschule Reutlingen, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

From Low-Power to No-Power: Adaptive Clocking for Event-Driven Systems, Georg

GLÄSER¹. Benjamin SAFT¹. Dominik WRANA². Arthanasios GATZASTRAS². Eckhard HENNIG². *2018 Forum on Specification & Design Languages (FDL), Garching, 10-12 September 2018, pp. 5-16. DOI: doi.org/10.1109/FDL.2018.8524131.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Reutlingen University Reutlingen, Germany.

A Distributed Sensor Network for Monitoring Noise Level and Noise Sources in Urban Environments, Jakob ABEßER¹. Robert GRÄFE¹. Christian KÜHN¹. Tobias CLAUß¹. Hanna LUKASHEVICH¹. Marco GÖTZE². Stephanie KÜHNLENZ³. *2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Barcelona, 6-8 August 2018, pp. 318-324. DOI: doi.org/10.1109/FiCloud.2018.00053.* ¹Fraunhofer Institute for Digital Media Technology (IDMT), Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Software-Service John GmbH, Ilmenau, Germany.

*Design and Performance of Power Amplifier Integration with BAW Filter on a Silicon-Ceramic Composite and Standard Epoxy/Glass Substrate, Vikrant CHAUHAN¹. L. W. WANDJI¹. X. PENG¹. V. Silva CORTES¹. Astrid FRANK³. Marinus FISCHER². Uwe STEHR². Robert WEIGEL¹. Amelie HAGELAUER¹. *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Ann Arbor, MI, 2018, 16-18 July, pp. 1-3. DOI: doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457140.* ¹Institute for Electronics Engineering, Friedrich Alexander University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany. ²Institute for Micro and Nanotechnology, Technical University of Ilmenau, Ilmenau, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.*

Design and Performance of Power Amplifier Integration with BAW Filter on a Silicon-Ceramic Composite and Standard Epoxy/Glass Substrate, Vikrant CHAUHAN¹. L. W. WANDJI¹. X. PENG¹. V. Silva CORTES¹. Astrid FRANK³. Marinus FISCHER². Uwe STEHR². Robert WEIGEL¹. Amelie HAGELAUER¹. *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Ann Arbor, MI, 2018, 16-18 July, pp. 1-3. DOI: doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457140.* ¹Institute for Electronics Engineering, Friedrich Alexander University Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany. ²Institute for Micro and Nanotechnology, Technical University of Ilmenau, Ilmenau, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

*Impact Rating of Layout Parasitics in Mixed-Signal Circuits: Finding a Needle in a Haystack, Georg GLÄSER¹. Martin GRABMANN¹. Dirk NUERNBERGK². *2018 15th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Prague, 2-5 July 2018, pp. 149-152. DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2018.8434844.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Melexis GmbH, Erfurt, Germany.*

*Monolithic Integrated CMOS Ambient Light Sensor, Michael MEISTER¹. Ulrich LIEBOLD¹. André JÄGER¹. Sebastian THIELE². R. WEIRAUCH². D. GÄBLER². Konrad BACH². (2018). In Olfa Kanoun, Nabil Derbel, Faouzi Derbel (Eds.), *Sensors, Circuits & Instrumentation Systems: Extended Papers 2017* (pp. 217-226). Berlin, Boston: De Gruyter. DOI: doi.org/10.1515/9783110448375-014, Book DOI: doi.org/10.1515/9783110448375, Online ISBN: 9783110448375. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries AG, 99097 Erfurt, Germany.*

*Monolithic Integrated CMOS Ambient Light Sensor, Michael MEISTER¹. Ulrich LIEBOLD¹. André JÄGER¹. Sebastian THIELE². R. WEIRAUCH². D. GÄBLER². Konrad BACH². (2018). In Olfa Kanoun, Nabil Derbel, Faouzi Derbel (Eds.), *Sensors, Circuits & Instrumentation Systems: Extended Papers 2017* (pp. 217-226). Berlin, Boston: De Gruyter. DOI: doi.org/10.1515/9783110448375-014, Book DOI: doi.org/10.1515/9783110448375, Online ISBN: 9783110448375. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries AG, 99097 Erfurt, Germany.*

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2018

An Extensible Platform for Smart Home Services, Marco GÖTZE¹. Wolfram KATTANEK¹. Rolf PEUKERT¹. In *Faouzi Derbel, Nabil Derbel, Olfa Kanoun (Eds.), Communication and Signal Processing: Extended Papers (pp. 61–80)*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2018, DOI: doi.org/10.1515/9783110470383-005, Book DOI: doi.org/10.1515/9783110470383, Online ISBN: 9783110470383. ¹IMMS Institut für

Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

There is a limit to everything: Automated AMS Operating condition check Generation on System Level, Georg GLÄSER¹. Martin GRABMANN¹. Gerrit KROPP¹. Andreas FÜRTIG². *Integration, Volume 63, 2018, Pages 383–391*, ISSN 0167-9260, DOI: doi.org/10.1016/j.vlsi.2018.02.016.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige

GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Institute for Computer Science, Goethe Universität Frankfurt a. M., Germany.

A Fully Passive RFID Temperature Sensor SoC With An Accuracy Of ± 0.4 °C (3σ) From 0 °C To 125 °C, Jun TAN¹. Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. Alexander ROLAPP¹. Jonathan GAMEZ¹. Eckhard HENNIG². Ralf SOMMER¹. *2018 IEEE International Conference on RFID (RFID), Orlando, FL, 10–12 April 2018, pp. 1–8*. DOI: doi.org/10.1109/RFID.2018.8376198.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693

Ilmenau, Germany. ²Reutlingen University, Reutlingen, Germany.

An Integrated CMOS Photodiode Array for Highly Sensitive Photometric Diagnostics, Alexander HOFMANN¹. Michael MEISTER¹. Susette GERMER¹. Friedrich SCHOLZ². *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Yasmine Hammamet, Tunisia, 19–22 March 2018, pp. 1465–1470*. DOI: doi.org/10.1109/SSD.2018.8570541.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693

Ilmenau. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany.

Thermal Modeling and Measurement of a Power Amplifier Module for a Silicon-Ceramic Substrate, Astrid FRANK¹. V. Silva CORTES². Steffen MICHAEL¹. Amelie HAGELAUER². Georg FISCHER². *2018 11th German Microwave Conference (GeMiC), Freiburg, 12–14 March 2018, pp. 79–82*. DOI: doi.org/10.23919/GEMIC.2018.8335033.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Lehrstuhl für techni-

sche Elektrotechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, Germany.

High Voltage RF-Multiplexer for medical Applications – Development of a Test Environment up to 100 V and 100 MHz, Bjoern BIESKE¹. Dagmar KIRSTEN². *tm – Technisches Messen*, ISSN (Online) 2196-7113, ISSN (Print) 0171-8096, DOI: doi.org/10.1515/tme-2017-0117.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693

Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2018

High-Precision Mixed-Signal Sensor Interface for a Wide Temperature Range [0° – 300°C], Georg GLÄSER¹. Dagmar KIRSTEN². André RICHTER¹. Marco REINHARD¹. Gerrit KROPP¹. Dirk M. NUERNBERGK³. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, January 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 1-8, DOI: doi.org/10.4071/imaps.523847. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany. ³Melexis GmbH, Germany.

- 123 ○
- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Fachartikel in Zeitschriften

Wie Mikroelektronik dabei hilft, Krebs im Frühstadium zu erkennen, Alexander HOFMANN¹. Michael MEISTER¹. Friedrich SCHOLZ². Balázs NÉMETH¹. Susette GERMER¹. Hendrik HÄRTER³. *Elektronikpraxis, Fachwissen für Elektronik Professionals*, Nr. 1, 11. Januar 2018, S. 46 – 48, online: www.elektronikpraxis.vogel.de/wie-mikroelektronik-dabei-hilft-krebs-im-fruehstadium-zu-erkennen-a-673280/. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany. ³Elektronikpraxis, Redakteur.

Vorträge und Posterpräsentationen

Industry 4.0-type wireless sensor application powered by a semiautomatically designed mini-scale electromagnetic energy harvester, Bianca LEISTRITZ¹. Frank SENF¹. Elena CHERVAKOVA¹. Sven ENGELHARDT¹. Wolfram KATTANEK¹. *18th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS 2018, 4-7 December, 2018, Daytona Beach, Florida, USA*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Systematic comparison of basic structures for electromagnetic energy harvesters using an automated design methodology, Bianca LEISTRITZ¹. Wolfram KATTANEK¹. *18th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS 2018, 4-7 December, 2018, Daytona Beach, Florida, USA*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Green-ISAS – Grundlagentechnologien für autonome Industrie-4.0-konforme Sensor/Aktorsysteme, Wolfram KATTANEK¹. *InnoCON Thüringen, RIS3 Jahresveranstaltung, 27. November 2018, Erfurt*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

Echtzeit-Antriebsregelung über eine niedriglatente Funkkommunikation, Sebastian UZIEL¹. Benjamin EICHHORN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Thomas ELSTE¹. Maximilian MATTHE². Philipp SCHULZ². *9. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KomMA 2018)*, 21. November 2018, Lemgo. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Vodafone Chair Mobile Communication Systems, TU Dresden, Dresden, Germany.

Design and Modeling Approach for a Lifting and Actuating Unit for the Application in Nano-Precision Machines, Stephan GORGES¹. Steffen HESSE¹. *33rd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering (ASPE)*, 2018, 4-9 November 2018, Las Vegas, Nevada, USA. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Investigation of thermal and non-linear effects on the performance of the power amplifier – BAW filter-chain in a LTE transmitter, Uwe STEHR¹. J. STEGNER¹. V. CHAUHAN². V. SILVA². R. WEIGEL². A. HAGELAUER². Astrid FRANK³. Steffen MICHAEL³. M. A. HEIN¹. *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS 2018, 22-25 October, 2018, Kobe, Japan*. ¹RF and Microwave Research Group, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, Germany, ²Institute for Electronics Engineering, University of Erlangen-Nuremberg, 91058 Erlangen, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Entwurf, Aufbau und Test eines photometrischen Messsystems auf Basis eines CMOS-Sensorarrays für die schnelle und zuverlässige Vorort-Diagnostik von Prostatakrebs, Friedrich SCHOLZ¹. Alexander HOFMANN². *Workshop „Neue Sensorlösungen für Biologie und Medizin“*, 23. Oktober, 2018, Anwendungszentrum Mikrosystemtechnik Erfurt. ¹Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Mikroelektronisches Sensor-System und Verfahren für die schnelle, zuverlässige und frühzeitige Diagnostik von Gebärmutterhalskrebs, Kristin EICHELKRAUT¹. Alexander HOFMANN². *Workshop „Neue Sensorlösungen für Biologie und Medizin“*, 23. Oktober 2018, Anwendungszentrum Mikrosystemtechnik Erfurt. ¹oncgnostics GmbH. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Einblicke in Digitalisierungslösungen, Jörg WEBER¹. *elmug4future, Technologiekonferenz*, 16.-17. Oktober 2018, Erfurt. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Energieautarke Industrie-4.0-konforme Funksensorsysteme, Wolfram KATTANEK¹. *elmug4future, Technologiekonferenz*, 16.-17. Oktober 2018, Erfurt. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

Low latency wireless closed loop control of an inverted pendulum, Sebastian UZIEL¹. Thomas ELSTE¹. Benjamin EICHHORN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Philipp SCHULZ². *Conference on Design & Architectures for Signal & Image Processing, DASIP 2018, Demo Night, 10-12 October, Porto, Portugal.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Vodafone Chair Mobile Communication Systems, TU Dresden, Dresden, Germany.

Ein Blick in die Zukunft: Der Weg zur integrierten Systemlösung, Tino HUTSCHEN-REUTHER¹. *Technologietag 2018 des Fraunhofer IDMT, „Akustische Verfahren zur Qualitätsprüfung – Berührungslos, zerstörungsfrei & sicher integriert“, 9. Oktober 2018, comcenter Brühl, Erfurt.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Towards rapid on-site measurement of Staphylococcus aureus contamination by aptasensors implemented with microelectronics, Peggy REICH^{1,*}. Dieter FRENSE². Uwe PLIQUETT². Dieter BECKMANN². *Smart Sensors 2018, Smart Sensors – mechanistic and data driven modelling, 1-2 October 2018, DECHEMA-Haus, Frankfurt/Main.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²iba Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt, Germany. *former iba member, the presented works were created at the iba.

Warum sind Mikroelektroniker noch nicht biokompatibel? Herausforderungen und Potentiale von mikroelektronischen Chips in Life Science Anwendungen, Georg GLÄSER¹. Alexander HOFMANN¹. *19. Heiligenstädter Kolloquium, 24.-26. September 2018.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

NFC Compatible Passive HF RFID Transponder for Wireless Bio-Sensing Applications, Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. Sylvio JÄGER². *19. Heiligenstädter Kolloquium, 24.-26. September 2018.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Micro-Sensys GmbH, Erfurt, Germany.

Mittels neuer Denk- und Arbeitsweise neue Produkte, Dienste und Geschäftsmodelle entwickeln, Jörg WEBER¹. *Mittelstand 4.0-Regionalkonferenz, „Arbeit 4.0 konkret – Wie verändert die Digitalisierung unsere Arbeitswelt?“, Workshop „Design Thinking – eine praktische Einführung, 18. September 2018, Augustinerkloster, Erfurt.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Effizientes Design und Layout von 3D Beschleunigungssensoren mittels automatisierter Synthese, Steffen MICHAEL¹. Maria KELLNER¹. Ralf SOMMER¹. *Analogue 2018, 16. GMM/ITG-Fachtagung, 12.-14. September 2018, München-Neubiberg.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> RoMulus: RFID
> Green-ISAS: Test
> Green-ISAS: EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus: MEMS
> Inhalt
* Förderung

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

Thick Copper Re-Distribution Layer for Integrated High Voltage Transistors, Ralf

LERNER¹. Klaus HEINRICH¹. Marco ERSTLING¹. Peter KORNETZKY². *14th International Seminar on Power Semiconductors (ISPS), 29-31 August 2018, Prague, Czech Republic.* ¹X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

What are suitable energy management strategies for power-autonomous wireless sensor systems?, Elena CHERVAKOVA¹. *International Summer School on Advanced Technologies based on Internet of Things (ATIoT), Tutorial: Benefits and Challenges of Energy Self-Sufficient Wireless Sensor Systems for Industry-4.0 Applications, 21-28 June 2018, Chemnitz.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

What is Industry-4.0-compliant communication and how can it be realized in an energy-aware manner?, Frank SENF¹. *International Summer School on Advanced Technologies based on Internet of Things (ATIoT), Tutorial: Benefits and Challenges of Energy Self-Sufficient Wireless Sensor Systems for Industry-4.0 Applications, 21-28 June 2018, Chemnitz.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

What needs to be considered when designing efficient electromagnetic harvesters?, Bianca LEISTRITZ¹. *International Summer School on Advanced Technologies based on Internet of Things (ATIoT), Tutorial: Benefits and Challenges of Energy Self-Sufficient Wireless Sensor Systems for Industry-4.0 Applications, 21-28 June 2018, Chemnitz.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Energieautarke Sensorsysteme für das IoT, Bianca LEISTRITZ¹. Tino HUTSCHEN-REUTHER¹. *22. Magdeburger Logistiktage, „Logistik neu denken und gestalten“, 20.-21. Juni 2018, Magdeburg.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

TSN – ein neuer Vernetzungsstandard für Industrie 4.0, Thomas ELSTE¹. Ralf SOMMER¹. *edaWorkshop 2018, 16.-17. Mai 2018, Hannover.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

System-Level Operating Condition Checks: Automated Augmentation of VerilogAMS Models, Georg GLÄSER¹. Martin GRABMANN¹. Gerrit KROPP¹. Andreas FÜRTIG². *CDNLive EMEA 2018, 7-9 May 2018, München.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Institute for Computer Science, Goethe Universität Frankfurt a. M., Germany.

Wireless sensor system with electromagnetic vibration energy harvester for Industrie 4.0 applications, Bianca LEISTRITZ¹. *IDTechExShow, 11-12 April 2018, Berlin.* ¹IMMS

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Wireless Sensor System with Electromagnetic Energy Harvester for Industry 4.0 Applications, Bianca LEISTRITZ¹. Elena CHERVAKOVA¹. Sven ENGELHARDT¹. Axl SCHREIBER¹. Wolfram KATTANEK¹. *DATE 2018, 19-23 March 2018, Dresden, Germany.* ¹IMMS

Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

System-Level Operating Condition Checks: Automated Augmentation of VerilogAMS Models, Georg GLÄSER¹. Martin GRABMANN¹. Gerrit KROPP¹. Andreas FÜRTIG². *DATE 2018, 19-23 March 2018, Dresden, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-

Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Institute for Computer Science, Goethe Universität Frankfurt a. M., Germany.

Test von HF-Frontends für Navigationsanwendungen – Evaluierung von mehrkanaligen GNSS-Empfängern mit realen Satellitensignalen, Bjoern BIESKE¹. Kurt BLAU². *30. GI/GMM/ITG-Workshop, Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2018), 4.-6. März 2018, Freiburg im Breisgau, Germany.* ¹IMMS Institut für

Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²TU Ilmenau, Germany.

Modulare Hochtemperatur-Testplattform bis 300 °C, Bjoern BIESKE¹. Tom REINHOLD¹. Marco REINHARD¹. *30. GI/GMM/ITG-Workshop, Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2018), 4.-6. März 2018, Freiburg im Breisgau, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau,

Germany.

Systematischer Entwurf Plug-and-Play-fähiger Funksensoren mit Vibrations-Energy-Harvestern, Bianca LEISTRITZ¹. Wolfram KATTANEK¹. Elena CHERVAKOVA¹. Silvia KRUG¹. Sven ENGELHARDT¹. Axl SCHREIBER¹. *9. GMM-Workshop „Energieautonome Sensorsysteme“, 28. Februar – 01. März 2018, Dresden.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Kommunikation – ist doch selbstverständlich, oder?, Franziska BUCHWALD¹. *Jenaer Technologietag, Digitale Arbeitswelten, Workshop zu Vernetzung, 31. Januar 2018, Ernst-Abbe-Hochschule, Jena.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige

GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Mehr Transparenz in der Produktion und in Prozessen durch nachrüstbare Sensorik, Jörg WEBER¹. *Jenaer Technologietag, Digitale Arbeitswelten, Workshop zu Technologie, 31. Januar 2018, Ernst-Abbe-Hochschule, Jena.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

DE 10 2016 119 927 A1 „Schaltungsanordnung zur Bereitstellung der Ladeenergie für einen Pegelwechsel auf einem Signalbus, Verfahren zur Kalibrierung und Signalübertragungssystem“. Benjamin SAFT. Georg GLÄSER.

DE 10 2016 113 283 A1 „Verfahren zum Bestimmen einer Widerstandsauslenkung einer Wheatstone-Brücke in einer Hochtemperaturumgebung“. Georg GLÄSER. André RICHTER. Dirk NUERNBERGK. Dagmar KIRSTEN.

DE 10 2016 120084 A1 „Schaltungsanordnung zur Bereitstellung einer trimmbaren Bandgap-Referenzspannung“. Jun TAN. Thanuchith VAKKALIGA-RAJU.

* Förderung

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



- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **ANCONA** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **16ES0210K** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **RoMulus** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **16ES0362** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.
- Das Projekt **sUSE** wird unter dem Kennzeichen **ZF4085709P08** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.
- Das Projekt **MEMS2015** wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **16M3093** im Förderprogramm IKT 2020 gefördert.



- Das Projekt **fast-wireless** wird als Teil des Cluster-Projekts **fast** im Rahmen der Fördermaßnahme „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **03ZZ0505J** gefördert.



- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zur
Förderung auf
www.imms.de.

- Das Projekt **StadtLärm** wurde unter dem Kennzeichen **ZF4085703LF6** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



- 129**
- > RoMulus: RFID
 - > Green-ISAS: Test
 - > Green-ISAS: EH
 - > StadtLärm
 - > fast wireless
 - > ADMONT
 - > RoMulus: MEMS
 - > Inhalt
 - * Förderung

- Das Projekt **Ko²SiBus** wird durch die DFAM (Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e.V.) über die AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen als IGF-Vorhaben unter dem Kennzeichen **19574 BG** durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



- Das „**Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Ilmenau**“ ist Teil der Förderinitiative „Mittelstand 4.0 – Digitale Produktions- und Arbeitsprozesse“, die im Rahmen des Förderschwerpunkts „Mittelstand-Digital – Strategien zur digitalen Transformation der Unternehmensprozesse“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Das IMMS wird unter dem Kennzeichen **01MF16005C** als Akteur des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau gefördert.

Gefördert durch:



- Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben **INSPECT** wird vom Freistaat Thüringen unter der Nummer **2015 FE 9159** gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.
- Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben **MEDIKIT** wird vom Freistaat Thüringen unter der Nummer **2017 FE 9044** gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



- Die Forschergruppe **Green-ISAS** wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen **2016 FGR 0055**.
- Die Forschergruppe **MagSens** wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen **2017 FGR 0060**.

Mehr zur Förderung auf www.imms.de.



Jahresbericht

© IMMS 2018

- Die im Vorhaben „**REMEDIA** – Erweiterung der Messtechnik für biomedizinische Applikationen“ angeschaffte Geräteinfrastruktur wurde vom Freistaat Thüringen im Förderprogramm Richtlinie zur Förderung der Forschung unter dem Kennzeichen **2018 FGI 0008** gefördert.
- Die im Vorhaben „**PraezEm** – Untersuchung von Einflussfaktoren auf Präzision und elektromagnetische Empfindlichkeit“ angeschaffte Geräteinfrastruktur wurde vom Freistaat Thüringen im Förderprogramm Richtlinie zur Förderung der Forschung unter dem Kennzeichen **2018 FGI 0007** gefördert.
- Das Vorhaben **TSN** „Forschungsplattform für Datenintensive Real-Time Cyber-physische Produktionssysteme“ wurde durch den Freistaat Thüringen unter dem Kennzeichen **2017 FGI 0006** gefördert.
- Das Infrastrukturprojekt **SensorLab** wurde gefördert vom Freistaat Thüringen unter dem Förderkennzeichen **13027-514**.

- Das IMMS wird als Mitglied der Forschergruppe **FOR 1522 MUSIK** der DFG im Teilprojekt 5 unter dem Förderkennzeichen **SCHA771/2-2** gefördert.
- Das **Graduiertenkolleg 2182** „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wird unter dem Förderkennzeichen **DFG GRK 2182** der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

Abkürzungen

5G Mobilfunkstandard der fünften Generation

ADC Analog-to-Digital-Converter, Analog-zu-Digital-Wandler

API Application Programming Interface, Programmierschnittstelle

ASIC Application-specific integrated circuit, Applikationsspezifische integrierte Schaltung

BMBF Bundesministerium f. Bildung u. Forschung

BMWi Bundesministerium f. Wirtschaft u. Energie

CDC Capacity-to-Digital-Converter, Wandler, der Kapazitäten in Spannungen konvertiert

CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor, Komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter

CP(P)S cyber-phisches (Produktions-) System

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

EDA Electronic Design Automation, rechnergestützte Entwurfsautomatisierung

EFRE Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

EMV Elektromagnetische Verträglichkeit

ESF Europäischer Sozialfonds

FEM Finite-Elemente-Methode

FISH Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung

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

FTE Full-time equivalent, Vollzeitäquivalent

HER2 human epidermal growth factor receptor, Wachstumsfaktorrezeptor

HF Hochfrequenz

IC Integrated Circuit, Integrierte Schaltung

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren (v.a. Elektrotechnik, Informationstechnik)

IHC Immunhistochemie

INA Instrumentationsverstärker

KMU kleine und mittlere Unternehmen

MCU Microcontroller Unit, Mikrocontroller-Einheit

MEMS Mikroelektromechanische Systeme

MQTT Message Queuing Telemetry Transport, im Internet der Dinge etabliertes Protokoll

NFC Near Field Communication, Standard zu Nahfeld-Datenübertragung auf RFID-Basis

OPC-UA Open Platform Communications Unified Architecture, industrielles Protokoll für die Kommunikation zwischen Maschinen

OPV Operationsverstärker

PGA Programmable Gain Amplifier, einstellbarer Signalverstärker

PMU Power Management Unit, Stromverwaltungseinheit

POCT Point-of-Care-Testsystem für die Vor-Ort Diagnostik

PSA prostataspezifisches Antigen

REST Representational State Transfer, Architekturmodell für verteilte Systeme wie Webservices

RFID Radio-frequency identification (Hochfrequenz-Identifikationsverfahren)

SQUIDS Superconductive Quantum Interference Devices, supraleitende Interferometer

TDC Time-to-Digital Converter, elektronische Baugruppe zur Messung kurzer Zeitintervalle und Wandlung in eine digitale Ausgabe

TSN Time-sensitive Networking, Standards für die Übertragung mit sehr geringer Übertragungslatenz und hoher Verfügbarkeit

TPMS tire-pressure monitoring systems, Reifendruck-Monitoring-Systeme

TU Technische Universität

ULP Ultra-Low-Power, extrem niedrige Leistungsaufnahme

WSN wireless sensor network, drahtloses Sensornetz

> RoMulus: RFID

> Green-ISAS: Test

> Green-ISAS: EH

> StadtLärm

> fast wireless

> ADMONT

> RoMulus: MEMS

> Inhalt

* Förderung

Herausgeber / Anbieterkennzeichnung

nach § 5 TMG, § 2 DLVO

IMMS Institut für Mikroelektronik-
und Mechatronik-Systeme
gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH)
Ehrenbergstraße 27
98693 Ilmenau, Deutschland
+49.3677.87493.00 *Telefon*
+49.3677.87493.15 *Fax*
imms@imms.de
www.imms.de
www.imms.de/impressumdisclaimer.html

Vertretungsberechtigt:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer,
wissenschaftlicher Geschäftsführer
Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt,
kaufmännischer Geschäftsführer

Rechtsform:

Gesellschaft mit beschränkter Haftung

Registergericht: Amtsgericht Jena

Registernummer: HRB 303807

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer

gem. § 27a UStG: DE 177 527 119

Analyse verlinkter Inhalte mit Matomo

Für die in der digitalen Version dieses Berichts mit www.imms.de verlinkten Inhalte nutzen wir Matomo (ehem. Piwik) für die anonymisierte Analyse und die Verbesserung unseres Jahresberichts. Die Open-Source-Software Matomo folgt den geltenden

Datenschutzbestimmungen und ist nach den Empfehlungen des Unabhängigen Landeszentrums für Datenschutz (ULD) konfiguriert. **Unsere Datenschutzerklärung finden Sie unter www.imms.de/datenschutzerklaerung.html.**

Externe Links

Die digitale Version des Jahresberichts enthält Verknüpfungen zu Webseiten Dritter („externe Links“). Das Setzen von externen Links bedeutet nicht, dass wir uns die hinter dem Verweis oder Link liegenden Inhalte zu Eigen machen. Für den Inhalt verlinkter Seiten haften ausschließlich deren Betreiber. Wir haben keinerlei Einfluss auf die aktuelle und zukünftige Gestaltung und auf die Inhalte der verknüpften Seiten.

Lektorat

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer
Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt
Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Übersetzung

Susan Kubitz Sprachdienst

Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Druck: www.BRANDTDRUCK.de

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