



IMMS

JAHRESBERICHT

2019

Inhalt

- 3 Vorwort
- 6 Martin Eberhardt, neuer kaufmännischer Geschäftsführer am IMMS
- 7 Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau
- 9 Nachwuchsförderung am IMMS verbindet Theorie und Praxis
- 20 Stimmen aus Industrie und Forschung

- 25 **Forschungsthema Hochpräzisionsantriebe**
- 27 **INPOS** – Integrierter 6D-Direktantrieb bewegt Objekte nanometergenau im Raum
- 34 **Forschungsthema Integrierte Sensorsysteme für Bioanalytik und Medizintechnik**
- 36 Highlights 2019: Integrierte Sensorsysteme für Bioanalytik und Medizintechnik
- 39 **INSPECT** – Quantitativer PSA-Nachweis mit Immunassay auf CMOS-Biochip zur Vor-Ort-Diagnostik von Prostatakrebs
- 48 **ADMONT** – RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren für diagnostische und analytische Anwendungen
- 55 **Forschungsthema Energieeffiziente & energieautarke cyber-physische Systeme**
- 56 Highlights 2019 im Bereich CPS
- 70 **Ko²SiBus** – Kontinuierliche und kostengünstige Signalanalyse für Ethernet-basierte Bus-Systeme
- 78 **AgAVE** – Industrie-4.0-Kommunikation für ein ML-basiertes Assistenzsystem zur automatischen Analyse modularer Anlagen
- 86 **Digital Engineering** für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren – Bauwerk-Monitoring mit Sensorik
- 94 **Forschungsthema Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)**
- 97 **IRIS** – Verfahren zur In-Line-Inspektion gekapselter MEMS-Siliziumbauelemente

- 105 **Zahlen, Strukturen und Belege**
- 106 Das IMMS in Zahlen
- 108 Organisation
- 110 Lehrangebot, Veranstaltungen
- 112 Publikationen
- 123 * Förderung (Förderangaben für alle im Text mit * gekennzeichneten Projekte)
- 126 Abkürzungen
- 127 Impressum, Datenschutz (Hinweise zur anonymisierten Analyse verlinkter Inhalte)

Titelfoto: RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren, den das IMMS in ADMONT entwickelt hat. Der Chip ist als RFID-Inlay auf einem flexiblen Substrat von SMARTRAC (an Avery Dennison Company) eingebettet. Fotos und Montage: IMMS.

- > **INPOS**
- > **INSPECT**
- > **ADMONT**
- > **Ko²SiBus**
- > **AgAVE**
- > **Dig. Engineering**
- > **IRIS**
- > **Inhalt**
- * **Förderung**

▲ *Hier können Sie in der PDF navigieren.*

◀ *Das Inhaltsverzeichnis ist verlinkt.*

Hier können Sie zusätzliche Infos abrufen. ▼

Mehr Jahresberichte auf www.imms.de.



Prof. Dr. Ralf Sommer und Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt mit dem 2019 vom TÜV Süd ausgezeichneten SONAPHONE. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

2019 haben wir gemeinsam mit unserem Partner SONOTEC den dritten Platz beim TÜV Süd **Innovationspreis** für die Entwicklung des SONAPHONE erhalten. Dieser deutschlandweit ausgeschriebene Preis ehrt kleine und mittlere Unternehmen, die mit einer Universität oder Forschungseinrichtung besonders innovative Lösungen entwickelt und am Markt etabliert haben.

Dieser Preis macht uns sehr stolz, denn er würdigt genau das, wofür wir als IMMS stehen: Wir stärken KMU als strategischer Partner mit anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung in der Mikroelektronik, Mechatronik und Systemtechnik und transferieren wissenschaftliche Forschungsergebnisse in Anwendungen.

Dieser Preis ist zugleich Ansporn für künftige Innovationen, mit denen wir Thüringen voranbringen wollen. Da zwischen wissenschaftlichen Forschungsergebnissen an Universitäten und marktreifen Produkten oft eine Lücke von fünf bis zehn Jahren klafft und Produktentwicklungszyklen immer dynamischer werden, haben wir in unserer **Strategie** die Arbeit in internen Forschungsgruppen verankert. In diesen schaffen wir die Basis für zukunftsorientierte Anwendungen in den Feldern, in denen wir besonders hohes Innovationspotential sehen und mit unseren Kompetenzen Wettbewerbsvorteile für Partner erschließen können. Die beiden vom Freistaat Thüringen finanzierten internen Forschungsgruppen befassen sich mit Hochpräzisionsantrieben und mit integrierten Systemlösungen für Life-Science-Anwendungen.

Die Forschungsgruppen geben wertvolle Impulse für viele unserer künftigen Herausforderungen und profitieren gleichzeitig von Ergebnissen und Erfahrungen aus aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten am IMMS.

Unter anderen haben wir im 2019 abgeschlossenen Projekt **INSPECT** ein System entwickelt, um zur Diagnostik von Prostatakrebs das spezifische Antigen quantitativ nachweisen zu können. Der Thüringer F&E-Partner hat die für den Nachweis notwendigen, sehr geringen Antigen-Konzentrationen von etwa einem Nanogramm pro Milliliter mit Proben direkt auf dem Chip messen können. Im Projekt **ADMONT** haben wir einen RFID-Transponder-Chip zum flexiblen und batterielosen Betrieb von Biosensoren entwickelt. Messdaten werden berührungsfrei an eine NFC-fähige RFID-Ausleseinheit gesendet, wie z.B. ein NFC-fähiges Smartphone.

Darüber hinaus haben wir in verschiedenen Forschungsfeldern Lösungen für die industrielle Fertigung erarbeitet. Im Projekt **INPOS** haben wir mit Thüringer Partnern einen integrierten Direktantrieb entwickelt, der Objekte in sechs Dimensionen mit Nanometer-Präzision bewegt. Damit lassen sich in der Halbleiterfertigung Wafer-Schichten prozessieren, die nur wenige Nanometer dünn sind. Im Projekt **IRIS** haben wir neue Messmethoden entwickelt, die Qualitätsprüfungen für verkapselte mikroelektromechanische Systeme (MEMS) während der Fertigung ermöglichen. Schwerpunkte lagen auf der parallelen Vermessung von Sensoren und auf der dynamischen Anregung passiver MEMS. Im Projekt **Ko²SiBus** haben wir gemeinsam mit Partnern Lösungen entwickelt, mit denen sich die Ethernet-basierten Kommunikationsleitungen für die Vernetzung von Industrieanlagen bei laufendem Betrieb kostengünstig überwachen lassen. Im Projekt **AgAVE** haben wir an der Industrie-4.0-Konformität für ein Assistenzsystem zur automatischen Analyse von komplexen vernetzten Anlagen gearbeitet. Ziel war es, eine Zustandsüberwachung von Maschinen durch eine herstellerübergreifende Kommunikation zu unterstützen.

Darüber hinaus haben wir Lösungen für drahtlose Sensornetze in die Forschergruppe **Digital Engineering** der Bauhaus-Universität Weimar eingebracht. Ziel war es, flächendeckend und langfristig bauphysikalische Messgrößen in und an Gebäuden zu überwachen, um bauliche Maßnahmen zu simulieren und Auswirkungen auf Gebäudeklima und Energieeffizienz abzuschätzen.

Um Ergebnisse aus unseren F&E-Projekten in die Wirtschaft in **Thüringen** zu transferieren, engagieren wir uns in Netzwerken, bieten im Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Ilmenau Veranstaltungen für KMU an und treten in den Dialog mit Thüringer Akteuren, wie z.B. zu Events wie der InnoCON Thüringen. Die dort präsentierte und

Mehr zur Forschungsgruppe für integrierte Sensorsysteme

Mehr Jahresberichte auf www.imms.de.

2019 gestartete Forschungsgruppe IntelligEnt zu KI-Methoden im Mikroelektronikentwurf basiert auf Ergebnissen, die wir 2019 zum Thüringer Forschungspreis eingereicht haben.

In unsere Forschung und Entwicklung binden wir möglichst frühzeitig wissenschaftlichen **Nachwuchs** ein in studentischen Fachpraktika sowie bei Bachelor- und Masterarbeiten und streben eine wissenschaftliche Mitarbeit an. Daher freut es uns ganz besonders, dass Maximilian Wiener, der diesen Weg mit uns gegangen ist, auf der internationalen Konferenz für Doktoranden im Bereich Mikroelektronik „PRIME 2019“ mit dem Silver Leaf Award ausgezeichnet wurde.

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 im Namen des IMMS-Teams unseren **Dank** aussprechen.

Wir danken den Mitgliedern unseres Aufsichtsrats und des Wissenschaftlichen Beirats für Ihr Engagement! Mit Ihnen reflektieren wir unsere Ideen und die Strategie sowie deren Umsetzung, um unserem Anspruch als Transferinstitution gerecht zu werden.

Der TU Ilmenau und allen Forschungspartnern danken wir für den hervorragenden Austausch, der uns Inspiration für unsere Forschungsarbeiten liefert und uns Lösungen für die Herausforderungen aus der Wirtschaft finden hilft.

Unser Dank gilt nicht zuletzt allen Förderern, Freunden, F&E-Partnern und Menschen, die uns in unserem Tun bestärken und die gemeinsam mit uns die Zukunft gestalten. Ohne Ihre Impulse und Ihr Vertrauen wären viele Lösungen so nicht möglich.

Möglich machen diese aber vor allem unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ihrem Expertenwissen und ihren persönlichen Kompetenzen. Wir bedanken uns für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit und für Ihr Engagement in unsere gemeinsame Zukunft.

An den nächsten Ideen für die Zukunft möchten wir als IMMS-Team gerne gemeinsam mit Ihnen arbeiten – einige davon finden Sie in den Ergebnissen in diesem Bericht. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen.



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



Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

Mehr zum
Silver Leaf
Award

Mehr Jahres-
berichte auf
www.imms.de.

Martin Eberhardt, neuer kaufmännischer Geschäftsführer am IMMS



6

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Martin
Eberhardt auf
www.imms.de

„Ich freue mich darauf, zusammen mit meinem Kollegen Ralf Sommer und dem IMMS-Team das Institut weiterzuentwickeln, um auch in Zukunft wichtige Innovationen in die Unternehmen transferieren zu können. Mein Dank gilt Hans-Joachim Kelm, der zusammen mit Ralf Sommer die IMMS GmbH in den vergangenen Jahren gut positioniert hat.“

Seit dem 1. Februar 2019 ist Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt (55 Jahre) Geschäftsführer des IMMS mit Zuständigkeit für die kaufmännischen Belange des Instituts.

Martin Eberhardt hat an der Georg-August-Universität Göttingen Betriebswirtschaftslehre studiert. Sein beruflicher Weg führte ihn über die Wirtschaftsprüfung und Leitungsfunktionen in der Stahl-, Maschinenbau- und Pharmaindustrie in das Forschungsmanagement, zuletzt als Geschäftsführer der Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC).

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. Auch im Jahr 2019 hat das IMMS mit zahlreichen Fachgebieten in den Bereichen Elektro- und Informationstechnik, Maschinenbau, Informatik und Automatisierung sowie Mathematik wissenschaftliche Projekte und Fragestellungen bearbeitet. Gleichzeitig ist das IMMS 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 liefern für die Forschungstätigkeit des Instituts und der TU Ilmenau wertvolle Praxisimpulse.

Ausgewählte gemeinsame Projekte

Forscherguppe IntelligEnt*: Künstliche Intelligenz und Machine Learning für den Entwurf und die Verifikation komplexer Systeme

In der Forschergruppe „IntelligEnt“ arbeiten IMMS und das Fachgebiet Softwaretechnik für sicherheitskritische Systeme (SECSY) der TU Ilmenau seit 2019 an anwendungsorientierten Konzepten für Machine Learning im Mikroelektronik-Entwurf, die an vorhandene Methoden und Werkzeuge angebunden werden sollen. Ziel ist es, das immense Potential des maschinellen Lernens für fachliche und wissenschaftliche Weiterentwicklungen zu Assistenzsystemen für Chip-Designer zu nutzen und damit signifikante Kosten- und Risikoreduktionen im Entwurf integrierter Analog/Mixed-Signal-Systeme zu erreichen.

Mehr zu

IntelligEnt auf

www.imms.de.

Forscherguppe MagSens*: MEMS-Sensoren zur Detektion schwächster Magnetfelder

Die von der TU Ilmenau geleitete Forschergruppe MagSens untersucht bis 2020 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.

Bis 2022 arbeiten 13 Doktoranden, darunter einer am IMMS, in dem von der DFG 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 TU 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.

- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

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 Sensorik 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 NanoFab auf www.imms.de.*
- Mehr zu Mittelstand 4.0 auf www.imms.de.*

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 Studentinnen und Studenten durch seine praktischen und industrienahen Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika, Besichtigungstouren und Veranstaltungen.

- Zum Themenangebot auf www.imms.de.*

TU Ilmenau, Fraunhofer IDMT und IMMS machen zudem im ersten Open Roberta Coding Hub Mitteldeutschlands seit 2019 regelmäßige und standortunabhängige Programmier-Angebote für Kinder und Jugendliche.

- Mehr zum Open Roberta Coding Hub*

Das IMMS hat sich dem jüngeren Nachwuchs auch zur Kinder- und Jugenduni an der TU Ilmenau gewidmet. In einer Vorlesung mit dem Titel „Bilder, Töne, Zahlen: Wie entsteht ein Film?“ demonstrierte Prof. Sommer über 600 Schülerinnen und Schülern der fünften und sechsten Klassen an vielen (Bei-)Spielen und Experimenten zum Mithören, Mitsehen und Mitmachen, wie Melodien, Monster und deren Stimmen erzeugt und zu einem aufregenden Film verarbeitet werden.

- Jahresbericht*



Besuch am Mikroelektronikstandort Erfurt-Südost zum Studententag im Februar 2019, mit dem das IMMS bereits zum zweiten Mal im Institutsteil Erfurt gemeinsam mit X-FAB und Melexis ein abwechslungsreiches Programm mit Vorträgen und Führungen auf die Beine gestellt hatte, um Studentinnen und Studenten für eine Laufbahn in der Mikroelektronik zu begeistern. Foto: IMMS.

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 Firmenbeschäftigungen an.

Es sind pro Jahr bis zu 40 Personen bei Praktika oder als studentische Hilfskräfte am IMMS tätig oder schreiben hier ihre Abschlussarbeiten. 2019 wurden 27 Studentinnen und Studenten am IMMS betreut. Darüber hinaus arbeiteten acht Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter an ihrer Promotion. Ein hoher Anteil der hochmotivierten Studentinnen und Studenten mit hervorragenden Leistungen am IMMS kommt von der TU Ilmenau. Das zeigt, dass das intensive Engagement des IMMS in der Grundlagenausbildung Früchte trägt. Auch Schülerinnen und Schüler erhalten bei Events und Praktika Einblicke in die Arbeiten des IMMS oder werden bei ihren Facharbeiten betreut.

Zum Themen-
angebot 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 daher unsere Studentinnen und Studenten 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 sie 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 nach dem Abschluss zu einer wissenschaftlichen Mitarbeit am IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.

Nachwuchsevents 2019

Lange Nächte in Ilmenau und Erfurt: Vorträge, Mitmachexponate und Angebote für studentische Arbeiten am IMMS

Am 11. Mai 2019 besuchten insgesamt etwa 600 Gäste vom Grundschul- bis zum Rentenalter sowie Laien und Experten das IMMS zur Langen Nacht der Technik in Ilmenau und am 8. November 2019 zur Langen Nacht der Wissenschaften in Erfurt.



Zu den Langen Nächten in Ilmenau und Erfurt gab es Mitmachexponate und Demonstratoren aus F&E-Projekten und Programmierangebote für Kinder.

Eindrücke gibt es in zwei Videos.

Hier im Bild: RFID-Lösungen für den batterielosen Betrieb von Sensoren.

Foto: IMMS.

Videos der
Langen Nächte:
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

Das IMMS hatte Mitmachexponate und Demonstratoren vorbereitet, mit denen für Besucherinnen und Besucher ab sechs Jahren aktuelle F&E-Arbeiten und mit Partnerunternehmen entwickelte Lösungen greifbar gemacht wurden.

Darunter war das SONAPHONE, ein Ultraschallprüfgerät, mit dem man Lecks in Druckluftleitungen finden konnte. Das Gerät wurde von SONOTEC und IMMS für die vorbeugende Instandhaltung und Prozessoptimierungen entwickelt und erhielt 2019 den 3. Platz beim TÜV SÜD Innovationspreis. Das IMMS präsentierte außerdem anhand von Funktionsmustern das Nachweisprinzip, mit dem man die Krebsdiagnostik mithilfe von Mikroelektronik unterstützen kann. Ausprobieren konnte man auch RFID-Sensor-Lösungen, die ohne Batterie betrieben werden. Den Strom erzeugt ein RFID-Lesegerät, wie z.B. ein NFC-fähiges Smartphone, das Daten des Sensor-Chips berührungsfrei erfasst und verarbeitet. Gezeigt wurde darüber hinaus eine über induktives Energy Harvesting betriebene Funksensorik, die sich selbst mit der Energie aus ihrem Umfeld über die Wandlung von Vibrationen versorgt.

Zudem gab es passend zu den Vorträgen bzw. Laborführungen über die Charakterisierung und den Test von Mikroelektronik einen mobilen Testaufbau für Chips, die bei 300°C hochgenau arbeiten und Industrieprozesse effizienter machen.

Schließlich konnten sich Kinder in den in Ilmenau und Erfurt betreuten Programmierstationen spielerisch ausprobieren und zeilenbasiert oder über grafische Programmieroberflächen z.B. LED-Schrift zum Laufen bringen, Licht durch Bewegung einschalten, Töne erzeugen oder Comic-Figuren am Bildschirm dirigieren. Neben dem geplanten Programm gab es „Die singende Teslaspule“ zu sehen, die wegen des Regens vom TU-Campus in Ilmenau kurzerhand auf die Empore im IMMS-Foyer umgezogen war.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung



Zu den Langen Nächten in Ilmenau und Erfurt gab es Mitmachexponate und Demonstratoren aus F&E-Projekten und Programmierangebote für Kinder. Im Bild: SONAPHONE – Ultraschallprüfgerät für die Instandhaltung 4.0.

Videos der
Langen Nächte:
www.imms.de.

Eindrücke gibt es in
zwei Videos.

Foto: IMMS.

Jahresbericht

© IMMS 2019

Vorträge und Führungen zu Chip-Entwurf und Test

In den Vorträgen „Wie entwirft man einen Chip?“ gab es Live-Vorführungen von am IMMS genutzten Entwurfswerkzeugen und realisierte Prototypen zu sehen. Die Vorträge zu „Hitzetest für Mikroelektronik“ in Ilmenau und die Führungen im Erfurter Reinraum-Labor lieferten Einblicke in die Arbeiten zu Charakterisierung und Test, die nach der Chip-Produktion losgehen. Wie im Chip-Entwurf gibt es meist auch hier keine Standardlösung, um die Funktionen eines Chips zu überprüfen – beispielsweise, wenn für Hochtemperatur ausgelegte Mikroelektronik bei 300°C geprüft werden muss, wo Standard-Testausrüstung längst weggeschmolzen ist.

Einladung zu studentischen Arbeiten am IMMS

Der Hitzetest-Aufbau ist außerdem das Ergebnis einer am IMMS betreuten Bachelorarbeit und wurde eigens durch den Absolventen, der mittlerweile am IMMS als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig ist, und seinen Betreuer vorgestellt. Es wurden auch weitere Exponate von studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern präsentiert. Auf das Betreuungsangebot des IMMS und auf studentische Arbeitsergebnisse wurde an den Abenden an vielen Stellen verwiesen. Darüber hinaus konnten mehrere Kollegen von ihrem Einstieg am IMMS über ihre studentische Mitarbeit berichten.

Erster Open Roberta Coding Hub in Mitteldeutschland gegründet

TU Ilmenau, Fraunhofer IDMT und IMMS machen Programmierwelten für Kinder spielerisch erlebbar

Mit dem Start des ersten Open Roberta Coding Hubs in Mitteldeutschland am 2.12.2019 in Ilmenau gibt es nun ein neues, digitales Workshop-Angebot für Schülerinnen und Schüler, aber auch für Lehrkräfte. In diesen außerschulischen Begegnungsstätten leiten Roberta-Teacher Kinder in kostenlosen Workshops an, Roboter und Mini-Computer spielerisch zum Leben zu erwecken. Initiiert wurde das Ilmenauer Coding Hub durch das Schülerforschungszentrum der TU Ilmenau, das Fraunhofer IDMT und das IMMS. Es bündelt die Aktivitäten, die die Partner seit Jahren in der Nachwuchsförderung vor Ort leisten, zu einem flexiblen und standortunabhängigen Angebot, um Schülerinnen und Schüler für naturwissenschaftliche und technische Berufe und Studiengänge zu begeistern.



Eröffnung des Open Roberta Coding Hubs am 2.12.2019: Jugendliche aus der Assisi-Schule Ilmenau, wo Sven Engelhardt (IMMS) u.a. die Informatik AG betreut.

Foto: IMMS.

13

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Open Roberta Coding Hub – mobile Ausstattung ermöglicht flexible Nutzung

Mit der am Fraunhofer IAIS entwickelten Programmierplattform „Open Roberta“ werden in den Coding-Workshops gemeinsam mit Roberta-Teachers und mit moderner Technik Roboter angesteuert. Kinder und Jugendliche, aber auch Lehrerinnen und Lehrer bekommen dadurch einen intuitiven Zugang und können dann unter Anleitung Programmieren lernen. Open Roberta ist frei im Internet verfügbar und kann über jeden gängigen Internetbrowser aufgerufen werden. Üblicherweise haben die Coding Hubs eine feste Adresse. Das Ilmenauer Coding Hub ist jedoch überwiegend mobil konzipiert. Roberta-Teacher und Ausstattung kommen überall dahin, wo es Interesse an einem Programmierworkshop gibt. Ausgestattet ist das mobile Labor mit Laptops, LEGO®-Mindstorms®-Baukästen und Mikrocontrollern. Zusätzlich zum mobilen Angebot werden die Ilmenauer Coding-Hub-Initiatoren verschiedene Workshops in ihrem Haus unter der Open-Roberta-Flagge anbieten.

Engagement der Initiatoren

Das IMMS betreut pro Jahr bis zu 40 Studentinnen und Studenten bei Praktika und Abschlussarbeiten und zeigt dabei Perspektiven in innovativen Thüringer Unternehmen auf. Doch die Begeisterung für technische Fragen muss man schon viel früher wecken. Dafür engagiert sich Sven Engelhardt, wissenschaftlicher Mitarbeiter des IMMS, in der Informatik AG, die er bereits seit 2014 an der Freien Reformschule „Franz von Assisi“ in Ilmenau betreut. Dort werden Kinder an verschiedene, frei verfügbare Programmierumgebungen herangeführt, mit denen sie unterschiedliche Hardware steuern und so auch ingenieurtechnisches Wissen zu Schaltungstechnik und Sensorik aufbauen.

Zum Themenangebot auf www.imms.de.

Mit „Roberta – Lernen mit Robotern“ unterstützt das **Fraunhofer IAIS** seit 2002 Bildungsprojekte in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT) mit der Programmierplattform „Open Roberta“. In Kooperation mit regionalen Partnern richtet das Fraunhofer IAIS, unterstützt durch die Google-Zukunftswerkstatt, bundesweit Coding Hubs ein und bildet Roberta-Teacher für die regionalen Zentren aus – so wie jetzt in Ilmenau.

Die **Technische Universität Ilmenau** ist mit dem **Schülerforschungszentrum** seit 2008 Teil des Bildungsprogramms „Roberta Initiative“ des Fraunhofer IAIS. Mit dem Coding Hub in Ilmenau wird die bestehende Kooperation fortgeführt, wo seit 2010 auch ein RobertaRegioZentrum besteht.

Dank der Kooperation von TU Ilmenau, Fraunhofer IDMT und IMMS wurden jetzt personelle und technische Ressourcen gebündelt, um Kindern und Jugendlichen mit dem mobilen Coding Hub regelmäßige und standortunabhängigen Angebote zu machen. Auf der Webseite www.tu-ilmenau.de/roberta sind die aktuellen Termine und Informationen zum Open Roberta Coding Hub Ilmenau zu finden.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr unter:
www.tu-ilmenau.de/roberta

Silver Leaf Award auf der PRIME 2019

Zur der internationalen Konferenz für Nachwuchsforscher in der Mikroelektronik, der Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronic (PRIME 2019) in Lausanne, Schweiz, wurde Maximilian Wiener am 18.07.2019 für seinen Beitrag „Design of a Capacitive Humidity Sensor Frontend with an Adaptive Resolution for Energy Autonomous Applications“ mit dem Silver Leaf Award ausgezeichnet. Herr Wiener ist bereits seit 2015 am IMMS und wurde seitdem als studentische Hilfskraft, während seines Fachpraktikums und seiner beiden Abschlussarbeiten hier betreut.



Maximilian Wiener wurde auf der internationalen Konferenz für Nachwuchsforscher in der Mikroelektronik PRIME 2019 mit dem Silver Leaf Award ausgezeichnet für seine im IMMS betreute Arbeit zu energieautarken Messungen mit einem energieeffizienten Sensor-Frontend. Foto: PRIME 2019.

Direkt nach seiner Masterarbeit 2018 nahm er seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS auf und befasst sich mit Schaltungsdesign für analoge integrierte Schaltungen. Sein prämiertes Beitrag geht auf seine Masterarbeit zurück und zeigt Lösungen auf, um für landwirtschaftliche Anwendungen energieautarke parallele Messungen von Boden- und Luftfeuchtesensoren mit einem energieeffizienten Sensor-Frontend zu ermöglichen. Das Frontend enthält alle nötigen Komponenten, um Sensoren an einen RFID-I²C-Master-Chip via I²C anzukoppeln. Durch die geringe Leistungsaufnahme ist der Betrieb ohne zusätzliche Energieversorgung möglich.

- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Das Sensor-Frontend hatte Herr Wiener um zusätzliche Schaltungskomponenten erweitert, die das Einstellen des Dynamikbereichs im Bereich von 51,55 pF bis 824,82 pF ermöglichen. Dadurch lassen sich verschiedengroße kapazitive Sensoren mit einem einzigen, konfigurierbaren Sensor-Frontend auslesen, in diesem Fall kapazitive Sensoren für Luft- und Bodenfeuchtigkeit. Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, den statischen Anteil einer Sensorkapazität eliminieren zu können, welcher keine Informationen zum Messwert beinhaltet. Dadurch wird die wertvolle Sensorauflösung nicht für den statischen Anteil und damit eine immer gleiche Messinformation verschwendet. So lässt sich die volle Auflösung des Wandlers für den dynamischen Anteil der Sensorkapazität nutzen, welche zur Feuchtigkeit proportional ist.



Dr.-Ing. Silvia Krug arbeitet als Software Architect Embedded Systems am IMMS und betreut darüber hinaus Studentinnen und Studenten sowie Kolleginnen und Kollegen, die ihre wissenschaftliche Mitarbeit am IMMS starten.

Foto: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Stimmen aus dem IMMS

Dr.-Ing. Silvia Krug, Software Architect Embedded Systems am IMMS

„Ich arbeite mit Unterbrechungen seit fast 10 Jahren am IMMS. Damals habe ich als Studentin ein Praktikum und ein Thema für meine Bachelorarbeit gesucht und bin beim Bereich System Design fündig geworden. Dieses erste Projekt war spannend und herausfordernd und hat mich dazu bewogen, mein Studium in Ilmenau fortzusetzen. Während des Masterstudiums war ich fast durchgängig Hiwi beim System Design mit unterschiedlichen Aufgaben im Bereich drahtlose Sensornetze und habe u.a. Hardware entwickelt sowie Treiber und Protokolle in Embedded Linux und TinyOS implementiert.

Nach dem Master hatte ich das Angebot, direkt als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS einzusteigen. Aufgrund der Herausforderungen am DFG Graduiertenkolleg 1487 ‚Selbstorganisierende Mobilkommunikationssysteme für Katastrophenszenarien‘ der TU Ilmenau habe ich mich zunächst für eine Promotion am Fachgebiet Kommunikationsnetze der TU Ilmenau entschieden und eine Rückkehr ans IMMS nie aus dem Blick verloren. Thematisch habe ich für meine Promotion speziell zur robusten Kommunikation für Rettungskräfte mittels hybridem Routing in heterogenen, unterbrechungstoleranten Ad-Hoc-Netzen geforscht und konnte dabei auch Kenntnisse und Erfahrungen aus der Zeit am IMMS nutzen und ausbauen. Während der Promotion habe ich die Zusammenarbeit mit dem Bereich System Design auch weiter gepflegt, um u.a. Projektideen auf den Weg zu bringen.

Durch den weiter bestehenden Kontakt insbesondere zu Dr. Hutschenreuther und den Austausch zu Forschungs- und Entwicklungsthemen am IMMS zog ich eine Stelle

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.

am IMMS in Betracht, als sich die Promotionszeit langsam dem Ende zuneigte. Als erfahrenere Wissenschaftlerin war es mir dabei wichtig, eigene Ideen einbringen zu können und auch weiterhin an Forschungsprojekten zu arbeiten, mit denen die Basis für Anwendungsprojekte am IMMS geschaffen wird.

Heute bin ich deshalb wieder am IMMS und habe Spaß an vielseitigen Aufgaben. Diese umfassen unterschiedliche Aspekte von der Entwicklung bis zur Realisierung innovativer praxisrelevanter Lösungen aktuell im Bereich von Laborsensorik und Umweltmonitoring sowie Projektmanagement, aber auch eigene Forschungsarbeiten im Bereich der Analyse von verteilten IoT-Systemen. Wichtig ist mir dabei immer, mein Wissen auch weiterzugeben und Studenten so zu betreuen, dass auch sie später als Kollegen bei uns weitermachen können und möchten. So kann ich etwas von dem zurückzugeben, was mir damals als Studentin am IMMS sehr geholfen hat. Außerdem macht es mir Spaß, meine Erfahrungen am IMMS und aus dem Graduiertenkolleg in die weitere Betreuung jener Kollegen einzubringen, die nach ihrem Abschluss eine wissenschaftliche Mitarbeit bei uns beginnen.

Darüber hinaus bietet mir meine jetzige Position immer wieder verschiedene Möglichkeiten zur eigenen Weiterentwicklung. Unter dem Motto ‚lebenslanges Lernen‘ kann ich so vielfältige Interessen kombinieren. Ein mögliches Ziel ist deshalb eine Habilitation im Bereich IoT.“

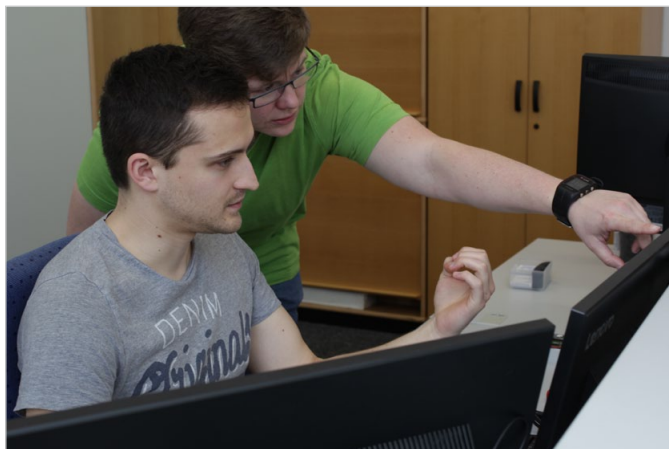
Sebastian Mieth, M.Sc., Embedded Software Engineer am IMMS

„Bereits während meines Bachelorstudiums an der TU Ilmenau und vor allem im Masterstudium der Elektro- und Informationstechnik habe ich mich vorrangig mit Kommunikationstechnik beschäftigt. Sie ist in der heutigen Zeit durch Mobilfunk, vernetzte Sensorsysteme und der Digitalisierung fast jeden Sektors allgegenwärtig und somit wichtiger denn je. Es sind viele spannende Forschungsfragen zu beantworten, weshalb ich in diesem Gebiet meine Abschlussarbeit verfassen wollte. Durch die Forschung und Entwicklung im Bereich der drahtlosen Sensornetze am IMMS wurden mir hier interessante Themen zum Verfassen einer Masterarbeit angeboten. Das Institut war mir durch seine Nähe zur Universität sowie durch eine Vorstellung von Professor Sommer im Rahmen einer seiner Vorlesungen bereits bekannt.

Das IMMS fördert schon immer Studenten mit praxisnahen Themen und Methoden, die man an Unis so nicht vermittelt bekommt. Hier arbeiten viele Studenten der TU an ihren Abschlussarbeiten oder als HiWi und die Betreuungsverhältnisse sind am

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr Stimmen
aus dem IMMS:
www.imms.de.



Dr.-Ing. Silvia Krug
und Sebastian
Mieth, M.Sc.,
Embedded Software
Engineer am IMMS.

Foto: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

IMMS sehr gut. Das und das technische Know-how halfen mir bei der Bearbeitung meiner Masterarbeit mit dem Titel ‚Evaluation der Interoperabilität unterschiedlicher Protokollimplementierungen für drahtlose Sensornetze‘, die von Silvia Krug betreut wurde. Von ihr bekam ich Rückkopplungen und Denkanstöße, die mir halfen, den richtigen Fokus zu setzen. Nach der erfolgreichen Verteidigung dieser Arbeit begann ich direkt am IMMS als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich System Design zu arbeiten. Betreut werde ich nach wie vor sehr gut, jetzt geht es an erste eigene Veröffentlichungen.

Zum Themen-
angebot auf
www.imms.de.

Aktuell beschäftige ich mich im Projekt EXPRESS mit dem Technikeinsatz in der Landwirtschaft, beispielsweise mit der Verwendung von drahtlosen Sensornetzwerken im Wein- und Obstbau zum Erfassen von mikroklimatischen Parametern zur Frühwarnung vor Pilzbefall oder dem Monitoring des Bodenwassergehalts für ein effizientes Bewässerungsmanagement in Trockenperioden. Innerhalb des Projektes können wir verschiedene dieser Techniken auf Experimentierfeldern erproben, welche gleichzeitig als Schaufenster für Landwirte dienen sollen, um ihnen die neuen Techniken nahezubringen. Der landwirtschaftliche Hintergrund verleiht dem Projekt praktische Einsatzszenarien, die interdisziplinäres Denken und Handeln erfordern. Der Kontakt zu anderen Projektpartnern sowie der Austausch mit den Landwirten über deren Sichtweisen und Probleme schaffen dabei viele interessante Einblicke in für mich neue Themen, die EXPRESS zu einem spannenden Projekt machen.“

EXPRESS auf
www.imms.de

Mehr Stimmen
aus dem IMMS:
www.imms.de.



Tom Reinhold, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS, hier bei Arbeiten zur Integration von KI-Algorithmen in messtechnische Abläufe, um deren Effizienz zu steigern.

Foto: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Tom Reinhold, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Durch die Wahl meines Studiums der Richtung ‚Elektro- und Informationstechnik‘ an der TU Ilmenau kam ich durch das Studienfach Grundlagen der Analogenschaltungstechnik (GaST) über Professor Sommer bereits recht früh mit dem IMMS in Kontakt.

Im Themenbereich Industrielle Elektronik und Messtechnik (IEM) hatte ich, beginnend mit dem Grundpraktikum und später im Nebenjob, die Möglichkeit, Einblicke in das praktische Ingenieursleben zu bekommen. Fachliche, offene Gespräche dienten nicht nur, gestellte Aufgaben zu lösen, sondern sie halfen mir auch, theoretisch gelerntes Wissen in der Praxis anzuwenden.

Bei meiner Bachelorarbeit am IMMS hatte ich viel Freude daran, im Projekt HotSens einen Demonstrator für Hochtemperatur-Schaltkreise zu konzipieren und zu realisieren, welcher in der Lage ist, Schaltkreise noch bei 300°C zu betreiben und zu testen. Neben elektrotechnischen Aufgaben galt es dabei auch, thermische, mechanische sowie informationstechnische Herausforderungen zu lösen. Diese abwechslungsreiche und dennoch sehr spezifische Aufgabe hat bereits damals mein Interesse gestärkt, diese Fachrichtung weiter beizubehalten.

Bis heute bin ich dem IMMS treu geblieben und arbeite nun seit meinem erfolgreichem Masterabschluss mit dem Thema ‚Bewertung von RFID-Systemparametern und Untersuchungen von Realisierungsmöglichkeiten für RFID-Sensorschaltungen‘ als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich IEM an interessanten und brandaktuellen Projekten. In einem dieser Projekte beschäftige ich mich aktuell mit der Integration von KI-Algorithmen in messtechnische Abläufe, um deren Effizienz zu steigern. Die Möglichkeit, eigene Ideen zu verwirklichen, ist einer der Gründe, warum mir die Arbeit hier viel Spaß macht.“

Zum Themenangebot auf www.imms.de.

Mehr Stimmen aus dem IMMS: www.imms.de.



Dr. Denis Dontsov, Geschäftsführer der SIOS Meßtechnik GmbH. Foto: SIOS Meßtechnik GmbH.

Dr. Denis Dontsov, SIOS Meßtechnik GmbH

„Mit der Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1 verfügt die SIOS Meßtechnik GmbH über ein System, welches Objekte in 3D mit einer Messauflösung von 0,1 nm in einem Messbereich von 25 x 25 x 5 mm³ vermessen kann. Verschiedene Betriebsarten erlauben eine dynamische Objektpositionierung oder Messungen mit kontinuierlichem Scan- oder Schrittmodus. Ausgestattet mit verschiedenen Antastsystemen können vielfältige anspruchsvolle kundenspezifische Aufgaben bearbeitet werden. Dies sind z.B. die Messung von Präzisionsteilen wie

Mikrolinsen, Membranen oder Härteindringkörper, die Positionierung, Manipulation, Bearbeitung und Messung von Objekten der Mikroelektronik, Mikromechanik, Optik, Molekularbiologie und Mikrosystemtechnik.

Für künftige Anwendungen, die deutlich größere Arbeitsbereiche erfordern, haben wir im Projekt INPOS auf die Expertise des IMMS im Bereich der Nanoantriebe gesetzt und konnten dort an eine mehr als zehnjährige sehr gute Zusammenarbeit anknüpfen. Gemeinsam mit der TU Ilmenau haben wir einen neuartigen luftgeführten sechsdimensionalen Direktantrieb entwickelt, der Objekte im Raum in einem lateralen Verfahrbereich von 100 mm Durchmesser über eine Höhe von bis zu 10 mm mit Nanometer-Präzision bewegen kann. Das IMMS hat hierfür das Planarmotorsystem mit den Hub- und Antriebseinheiten sowie die Steuerung und Regelung entwickelt. Zudem haben wir Hand in Hand an der Systemarchitektur und dem Gesamtkonzept sowie an der konstruktiven Integration, dem Aufbau, der Inbetriebnahme und Charakterisierung gearbeitet. Mit dem Ergebnis sind wir äußerst zufrieden: Die erreichten Positionierresultate zeigen ein hohes Potential für unsere künftigen kundenspezifischen Problemstellungen und auch für neuartige Nanopositioniersysteme von SIOS mit deutlich vergrößertem Messbereich. Einen wesentlichen Vorteil gegenüber marktüblichen Lösungen sehen wir im konsequenten Einsatz von quasi reibungsfreien Führungen für alle Bewegungsachsen bei gleichzeitiger Integration einer pneumatischen Gewichtskraftkompensation, durch welche die entstehende Verlustleistung zum Tragen des Messobjektes stets nahe Null geregelt wird.

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Mehr zu INPOS

in diesem

Bericht.

Die fachlichen Kompetenzen am IMMS, ein äußerst hoher Qualitätsanspruch und die Ergebnisse sprechen für sich. Wir schätzen aber auch die systematische und zielorientierte Arbeitsweise der IMMS-Kollegen und nicht zuletzt die sehr kommunikative und unkomplizierte Art der Kooperation. Wir möchten auch künftig eng zusammenarbeiten, um Lösungsansätze in Produkte der SIOS GmbH einfließen zu lassen.“

www.sios.de

Friedrich Becker, TURCK Electronics GmbH

„Turck zählt zu den global führenden Unternehmensgruppen in der Industrieautomation. Wir bieten als Spezialist für Sensor-, Feldbus-, Anschluss- und Interfacetechnik, RFID und Human Machine Interfaces die Entwicklung und Fertigung von Elektronik auf höchstem Niveau für Automationslösungen und -produkte, die die Verfügbarkeit und die Effizienz von Maschinen und Anlagen verschiedener Branchen erhöhen. Um optimale Lösungen für Automatisierungsaufgaben unserer Kunden zu finden, stehen wir regelmäßig in intensivem Dialog.“

Viele unserer Kunden wünschen eine vorausschauende Fehlererkennung bei Ethernet-Kabeln. Diese Kommunikationsleitungen zur Vernetzung von Anlagen werden in der Fertigung zum Teil stark mechanisch bis hin zum Kabelbruch beansprucht. Um darin bislang schwer auffindbare Störungen und Fehler zu finden und zu beheben, vergehen oft Stunden mit Fertigungsstillstand.

Als Obmann des projektbegleitenden Ausschusses des Projekts Ko²SiBus hatte ich die Gelegenheit, die Entwicklungsarbeiten an Lösungen mit Rat und Tat zu begleiten, mit denen sich derartige Fehler im Vorhinein erkennen lassen und so Stillstand vermieden wird. In dem Projekt haben das IMMS, die Hochschule Offenburg die TU Chemnitz Lösungen zur kontinuierlichen und kostengünstigen Signalüberwachung für industrielle Bussysteme erarbeitet.

Das IMMS hat mit seinen Erfahrungen in der Entwicklung von Signalverarbeitungs-, Kommunikations- und Systemintegrationslösungen für Industrieanwendungen im Projekt wesentlich dazu beigetragen, dass die wissenschaftlichen Ergebnisse der Chemnitzer und Offenburger Partner zur theoretischen Basis der Kabeldiagnose

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung



Friedrich Becker, Leiter Kompetenzfeld Software & Kommunikation, TURCK Electronics GmbH. Foto: TURCK Electronics GmbH.

Mehr zu

Ko²SiBus in

diesem Bericht.

und zu Kommunikationsschnittstellen in praktikable Lösungen für die Industrie münden. Das IMMS hat ein eingebettetes System entwickelt und dafür passende Schaltungskonzepte erarbeitet. Ergebnis ist ein System, das physikalische Signalparameter in den Ethernet-Leitungen mit integrierten analogen und digitalen Bauteilen verfolgt und Abweichungen an eine Überwachungszentrale meldet. Dieses System wurde mit einem Demonstrator erprobt, den das IMMS gemeinsam mit den Partnern aufgebaut hat.

Die Ergebnisse sind aus meiner Sicht sehr vielversprechend und ich werde auch die nächsten Schritte begleiten, bei denen das System in Industrieanlagen integriert und evaluiert wird. Ich sehe großes Potential darin, die Konzepte direkt in Ethernet-basierte Feldbus-Geräte zu integrieren. Großes Potential sehe ich genauso in der Arbeitsweise des IMMS. Die Entwickler durchdenken die ganze Kette von der wissenschaftlichen Dimension bis zum Industrieinsatz und liefern überzeugende Lösungen. Das macht das IMMS zu einem wertvollen Innovationspartner, auch über die aktuelle Ethernet-Lösung hinaus. Ich werde – auch im Rahmen der DFAM – weitere Projekte mit dem IMMS angehen.“

www.turck.de

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Dr. Michael Neubert, Baker Hughes Inteq GmbH

„Wir sind ein Energietechnologieunternehmen, das Lösungen für Energie- und Industriekunden weltweit anbietet. Aufbauend auf einem Jahrhundert Erfahrung und mit Niederlassungen in über 120 Ländern bringen unsere innovativen Technologien und Dienstleistungen die Energiegewinnung voran – und machen sie sicherer, sauberer und effizienter für die Menschen und den Planeten. Wir sind angetreten, um die Öl- und Gasindustrie radikal umzuwandeln und unseren Kunden eine beispiellose Verbesserung der industriellen Erträge zu ermöglichen. Dafür setzen wir auf die digitale Transformation und entwickeln für unsere Produkte Lösungen u.a. für vorausschauende Wartung, Zuverlässigkeit, Produktions- und Ertragsoptimierungen.

Um die hohen Anforderungen an Funktionalität und Zuverlässigkeit unserer Werkzeuge bei gleichzeitig hoher Schaltungskomplexität zu erfüllen, realisieren wir in zunehmendem Maße unsere elektronischen Module mit Hilfe integrierter Schaltungstechnik.

Bei diesem umfangreichen Vorhaben haben wir das IMMS um fachkundige Unterstützung gebeten und dabei die Expertise und Zielstrebigkeit der IMMS-Kollegen sehr zu schätzen gelernt.



Für ASIC-Entwicklungen wie die der Baker Hughes INTEQ GmbH bietet das IMMS alle Phasen im Paket oder auch als Teilleistungen an von der Machbarkeitsstudie, Entwicklung von Spezifikationen und virtuellen Prototypen, Schaltungs- und Layoutentwurf, Charakterisierung und Test bis zur Qualifizierung und Fertigungsüberleitung. Foto: IMMS.

- 23**
- > **INPOS**
 - > **INSPECT**
 - > **ADMONT**
 - > **Ko²SiBus**
 - > **AgAVE**
 - > **Dig. Engineering**
 - > **IRIS**
 - > **Inhalt**
 - * **Förderung**

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich für die zuverlässige, flexible und kollegiale Zusammenarbeit mit dem IMMS bedanken und freue mich auf weitere gemeinsame Projekte in der Zukunft.“

Dr.-Ing. Michael Neubert, Drilling Services, Oil Field Services, Baker Hughes INTEQ GmbH, Celle.
www.bakerhughes.com

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

Dr. Alexander Maier, Fraunhofer IOSB-INA

„Wir am Fraunhofer IOSB-INA in Lemgo bieten Anwendungswissen für die industrielle Automation. Die intelligente Vernetzung, die Analyse und Überwachung sowie die benutzergerechte Gestaltung technischer Systeme sind unsere Kernkompetenzen. Wir bieten unseren Partnern für die Unterstützung bei der digitalen Transformation Reallabore in der SmartFactoryOWL und mit Lemgo Digital. Dort hatten wir bereits 2012 mit dem IMMS zusammengearbeitet. Damals hatte es ein drahtloses Sensornetzwerk entwickelt, das für effizientere Prozesse zeitsynchron Energieverbräuche in Industrieanlagen erfasst und unsere Arbeiten zur Erkennung und Vermeidung suboptimaler Energiebilanzen in der Produktion unterstützt.“



Dr. rer. nat. Alexander Maier, Gruppenleiter Maschinelles Lernen, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Institutsteil Industrielle Automation. Foto: Fraunhofer IOSB-INA.

Aufgrund unserer sehr guten Erfahrungen sind wir in Kontakt geblieben und haben gemeinsam die Projektidee zu AgAVE entwickelt. Auch dort haben wir uns perfekt ergänzt und ein Assistenzsystem zur automatischen Analyse komplexer vernetzter Anlagen entwickelt, um die Fehlersuche zu verkürzen und somit die Kosten zu senken. Unser Part waren Verfahren zum maschinellen Lernen, um lokal auf Maschinenebene Zusammenhänge zu untersuchen und auf globaler Ebene vom Menschen interpretierbare Ergebnisse und Anweisungen für den gesamten Maschinenpark zu erzeugen. Das IMMS hat Lösungen für die Industrie-4.0-konforme Kommunikation zwischen diesen Ebenen und deren automatisierte Einbindung in industrielle Kommunikationslandschaften entwickelt und uns bis zur Realisierung eines anwendungsnahen Demonstrators inklusive Sensoranbindung unterstützt. So konnten wir an einer Anlage zeigen, wie das Assistenzsystem Entscheidungsregeln erlernt, kausale Zusammenhänge in der verteilten Anlage und potentielle Fehlerursachen entdeckt.

Wir schätzen am IMMS neben dem fundierten und anwendungsbereiten Wissen der Kollegen im Bereich I4.0-konformer Protokolle und Systeme den persönlichen Kontakt und die konstruktive Zusammenarbeit. Daher freuen wir uns, wenn wir gemeinsam die nächsten Themen angehen können.“

www.iosb-ina.fraunhofer.de

Details im

Fachartikel zu

AgAVE

Mehr Kunden-

meinungen:

www.imms.de



FORSCHUNGSTHEMA
**HOCHPRÄZISIONS-
ANTRIEBE**

Das IMMS arbeitet im Graduiertenkolleg 2182* „NanoFab“ an Lösungen für ein hochdynamisches Antriebssystem zur mehrachsigen Bearbeitung von Objekten mit Nanometer-Präzision. Ein Schwerpunkt sind dabei vertikale Antriebe, die auf Erkenntnissen aus Entwicklungen zu Vertikaltrieben wie dem abgebildeten aufbauen.
Foto: IMMS.

Die fortschreitende Miniaturisierung technischer Produkte führt in vielen Industriebereichen zu einem wachsenden Bedarf an Präzisionsmaschinen, mit denen kleinste Strukturen und Objekte hochgenau vermessen und bearbeitet werden können. Viele solcher Objekte besitzen räumliche Ausdehnungen im Millimeter- bis Zentimeterbereich, während Oberflächenmerkmale und Funktionselemente nur wenige Mikro- oder Nanometer groß sind und im Produktionsablauf bis auf weniger als einen Nanometer genau positioniert werden müssen.

Um die Fertigung makroskopischer High-Tech-Produkte mit mikroskopischer Präzision zu ermöglichen, forscht das IMMS an wissenschaftlichen Grundlagen und technischen Lösungen zur Realisierung von Nanopositioniersystemen für große Bewegungsbereiche. Mit den hochdynamischen Mehrkoordinaten-Direktantriebssystemen des IMMS können Objekte in Arbeitsbereichen von mehreren hundert Millimetern in kürzester Zeit mit Nanometer-Präzision positioniert werden. Die Lösungen eignen sich für den Einsatz im Vakuum, in Reinräumen und an Orten mit besonderen Anforderungen hinsichtlich thermischer Isolation und Entkopplung von Vibrationen.

- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Projekte zu Antrieben unter www.imms.de.

Beispiel: Hochpräzisionsantrieb für Laser-Dicing in der Halbleiterfertigung im Einsatz

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit des IMMS an einem planaren Antriebssystem ist in Anlagen eingeflossen, mit denen weltweit in der Halbleiterfertigung dünne 300-mm-Halbleiter-Wafer per Lasertrennen (Laser-Dicing) zu Mikroelektronik-Chips vereinzelt werden. Damit werden im Vergleich zum mechanischen Sägen Produktivitätssteigerungen um bis zu 500 Prozent erreicht – verbunden mit der Einsparung von Wafer-Fläche durch wesentlich engere Schneidpfade. Das Laser-Dicing-System wird vom Partner ASM Laser Separation International (ALSI) in Serie produziert.

Details & Video zum Antrieb: www.imms.de.

Interne Forschungsgruppe für Hochpräzisionsantriebe

Hochpräzisionsantriebe erforschen und entwickeln wir seit der Gründung des IMMS. Für immer genauere Antriebe werden wir uns nach wie vor engagieren. In einer internen Forschungsgruppe arbeiten wir an neuen Lösungen für hochpräzise Direktantriebe, um Wege für neue Anwendungen zu ebnen. Möglich wird das z.B. durch streufeldarme Planarmotorstrukturen, die echtzeitfähige Vernetzung von planaren Direktantrieben und KI-basierte Methoden für neuartige Lösungsansätze zur Steuerung und Regelung solcher Antriebe.



INPOS –

Integrierter 6D-Direktantrieb bewegt Objekte nanometergenau im Raum

Arbeiten am 6D-Direktantrieb, der Objekte frei im Raum in einem Verfahrbereich von \varnothing 100 mm in der Ebene und einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm aktiv geregelt mit Nanometer-Präzision bewegt. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Direktantriebe können Objekte nicht nanometergenau über große Flächen anheben

Direktantriebe positionieren Objekte ohne zwischengeschaltete Getriebe oder Kuppelungen direkt, spielfrei, hochpräzise und schnell. Sie werden unter anderem in der Halbleiterfertigung verwendet, um beispielsweise Belichtungsmasken zu bewegen. Mess- und Strukturierungsanlagen für Substrate, Wafer, Belichtungsmasken etc. verfügen in der Regel über einen Positioniertisch. Dessen Läufer bewegt Objekte hochpräzise innerhalb einer Ebene. Die Ebenheit einer Führungsfläche kann nicht beliebig genau gefertigt werden. Schon allein dieser Umstand führt zu Höhenschwankungen und Verkippungen des Läufers beim Gleiten über die Führungsfläche. Zudem sind Höhen von Maskenhaltern, Wafer- und Maskendicken nicht immer identisch. Darüber hinaus verteilen sich Fertigungsprozesse auf verschiedene Ebenen, z.B. bei der Vermessung von Bildstapeln hinter einer Belichtungsmaske oder bei der Strukturierung von Wafer-Schichten. Diese sind zum Teil nur wenige Nanometer dünn, ein ganzer Wafer zwischen 0,7 und 0,9 mm dick.

INPOS auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

In der Fertigung Nutzlasten anzuheben, präzise und sicher zu positionieren ist bisher nur sehr schwer und mit Kompromissen zu lösen. Da sie sich gut steuern lassen, werden für Vertikalbewegungen elektrodynamische Antriebselemente bevorzugt. Wenn diese jedoch den Läufer und das Objekt darauf tragen sollen, müssen enorme Kräfte aufgebracht werden. Diese ziehen sehr hohe Verlustleistungen nach sich, die Wärme erzeugen. Temperaturerhöhungen von nur 0,01 Kelvin verursachen aber durch Materialausdehnung einer Maske zur Waferbelichtung bereits einen Messfehler, der zum Ausfall der damit produzierten integrierten Schaltkreise führen würde.

Derzeit verfügbare Systeme zur Vermessung von Wafern erreichen die heute vielfach geforderten geringen Messunsicherheiten nur innerhalb eines kleinen Messbereichs von wenigen Millimetern im Quadrat. Über die Fläche gesamter Wafer mit Durchmessern von 150 bis 300 mm liegen derzeit erzielte Messunsicherheiten typischerweise nur im Bereich von $\pm 0,5$ bis ± 1 Mikrometer.

Lösung: Nanometergenauer integrierter 6D-Direktantrieb mit pneumatischer Gewichtskraftkompensation für den vertikalen Hub

Das IMMS hat gemeinsam mit der Firma SIOS Meßtechnik GmbH und der Technischen Universität Ilmenau einen luftgeführten sechsdimensionalen Direktantrieb entwickelt, der Objekte in den drei Raumachsen und der jeweiligen Rotation um diese Achsen frei im Raum in einem für die Anwendung geeigneten Verfahrbereich von 100 mm Durchmesser in der Ebene und einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm aktiv geregelt mit Nanometer-Präzision bewegt. Das wird über eine pneumatische Gewichtskraftkompensation erreicht, mit der die zu leistende Kraft der elektromagnetischen Vertikaltriebe stets nahe Null geregelt wird. Damit fließt praktisch kein Strom in den Aktorspulen und somit entsteht keine unerwünschte Wärmequelle im Messraum, die die notwendigen hochpräzisen Messungen verhindern würde.

Mit dem neuen Antrieb ist es möglich, Objekte wesentlich genauer als bisher im Antast- bzw. Bearbeitungspunkt, im sog. Abbe-Punkt, berührungslos, reibungsfrei und ohne Stick-slip-Effekte mit einem Läuferelement zu positionieren. Das Antriebskonzept stellt einen vollkommen neuartigen Ansatz für ein sechsdimensionales Direktantriebssystem dar, der so bisher in keinem bekannten System umgesetzt wurde. Eine Skalierbarkeit des Konzepts für andere Anwendungen wurde bis zu einem Arbeitsbereich von 200 mm Durchmesser untersucht.

*Einschätzung
von SIOS zum
Direktantrieb*

*Mehr zu An-
triebssystemen:
www.imms.de.*

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Gesamtaufbau

Die Besonderheit des neuen Antriebskonzepts ist, dass die Kräfte für die Steuerung aller sechs Freiheitsgrade, das heißt der drei Translationsbewegungen in x-, y- und z-Richtung sowie der drei Rotationen um diese Achsen (r_x - r_y - r_z), berührungslos und reibungsfrei auf nur ein zu bewegendes Läuferelement eingeleitet werden.

Die Positionsdaten werden wie bei vielen Präzisionsantrieben aus drei um den Läufer verteilten Laserinterferometern gewonnen. An den Spiegelflächen der mit dem Läufer bewegten Spiegelecke werden die Laserstrahlen reflektiert und zur Abstandsmessung genutzt. Das Objekt befindet sich innerhalb der Spiegelecke und alle virtuell verlängerten Messstrahlen der Koordinaten x, y und z der Interferometer treffen sich im Antast- bzw. Bearbeitungspunkt (Abbe-Punkt). Somit sind Spiegelecke sowie Objekt je nach Dicke und Oberflächenprofil anzuheben oder abzusenken, um den Antastpunkt auf der Objektoberfläche in den Abbe-Punkt zu bringen.

Alle Partner haben gemeinsam ein Gerätegrundkonzept erarbeitet, welches der Konfiguration nach Abbildung 1 entspricht. Damit bleibt der Bauraum oberhalb des Läufers für ein Kundentool zur Messung und Fertigung frei.

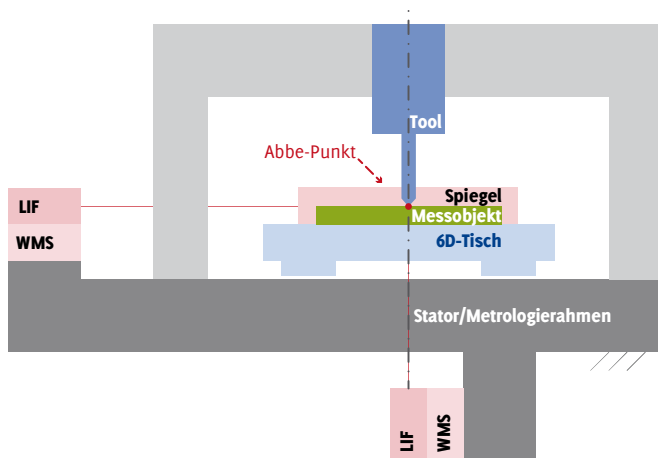
Systemarchitektur und Gesamtkonzept sowie konstruktive Integration, Aufbau, Inbetriebnahme und Charakterisierung wurden unter der Federführung von SIOS realisiert. Die TU Ilmenau war für die Entwicklung und Implementierung des hochpräzisen Mehrkanal-Interferometer-Systems verantwortlich. Das IMMS hat das Planarmotor-system mit den Hub- und Antriebseinheiten sowie die Steuerung und Regelung erarbeitet.

Abbildung 1:

Gerätegrundkonzept

LIF = Laserinterferometer

WMS = Winkelmesssystem



Grafik: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

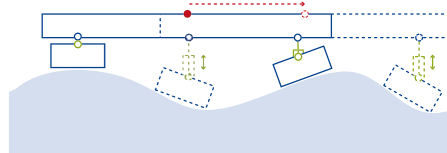
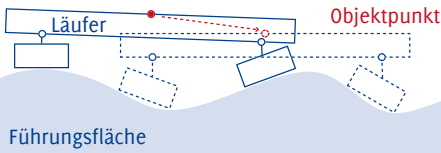


Abbildung 2: Bereits Unebenheiten der Führungsfläche rufen bei herkömmlichen 3D-Antrieben (links) Höhenschwankungen und Verkippungen des Läufers beim Gleiten über die Führungsfläche hervor. Mit Vertikalaktoren in einem 6D-Antrieb (rechts) kann der Höhenunterschied ausgeglichen und der Läufer in der richtigen Höhe positioniert werden. Grafik: IMMS.

Lösung des IMMS – Erweiterung von 3 auf 6 Dimensionen

Den Ausgangspunkt für das Planarmotorkonzept bildeten zwei am IMMS entwickelte Lösungen – die integrierten planaren 3D-Direktantriebe sowie ein Vertikaltrieb. Von diesem wurden drei als Aktor- und Führungselemente in einen planaren 3D-Antrieb integriert, um Unebenheiten in der Führungsfläche auszugleichen und den Läufer in der richtigen Höhe zu positionieren, vgl. Abbildung 2. Ziel war es, damit ein echtes 6D-Direktantriebssystem mit den oben genannten Eigenschaften aufzubauen, eine 6D-Regelung dafür zu entwerfen und erste Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des konzeptionell neuartigen Ansatzes durchzuführen.

Integrierte planare 3D-Direktantriebe des IMMS als erster Ausgangspunkt

Der grundlegende Ansatz beruht auf den hervorragenden Positioniereigenschaften eines integrierten planaren elektrodynamischen Direktantriebsprinzips, vgl. Abbildung 3. Bislang hatte das IMMS solche aerostatischen Direktantriebe für drei Freiheitsgrade entwickelt: Ein planarer luftgeführter Läufer, welcher an seiner Unterseite Magnetbrücken trägt, konnte über statorfixe Spulenpaare in den beiden horizontalen Achsen x und y sowie um seine Drehachse r_z bewegt werden. Die sehr steif ausgeführten Läuferelemente können mit hoher Geschwindigkeit und sehr hoher Genauigkeit eine Sollbahn abfahren. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist, dass der Läufer passiv ist, d.h. vollkommen ohne störende Schleppkabel für Aktorik und Sensorik auskommt. Schädliche Wärmequellen können so sehr gut vom zu bewegenden Objekt ferngehalten werden. Diese am IMMS entwickelten Antriebe sind bereits gut am Markt etabliert.¹

Mehr zu Planarantrieben:
www.imms.de

Vertikaltrieb des IMMS als Aktor- und Führungselemente als zweiter Ausgangspunkt

Das IMMS hatte mit der AeroLas GmbH bereits eine Lösung für einen Vertikalaktor entwickelt, vgl. Abbildung 3. Dieser nimmt nun im neuen 6D-Direktantrieb als Aktor- und

Mehr zum Vertikaltrieb auf
www.imms.de

¹ <https://alsi.asmpt.com/active-mounts/>

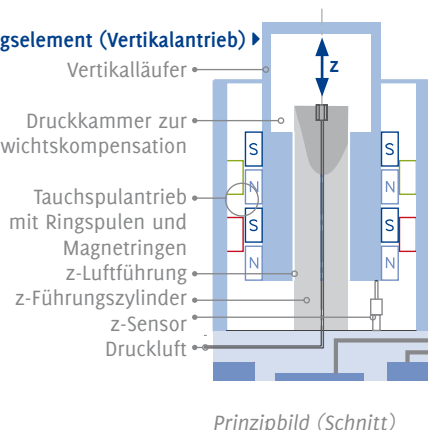
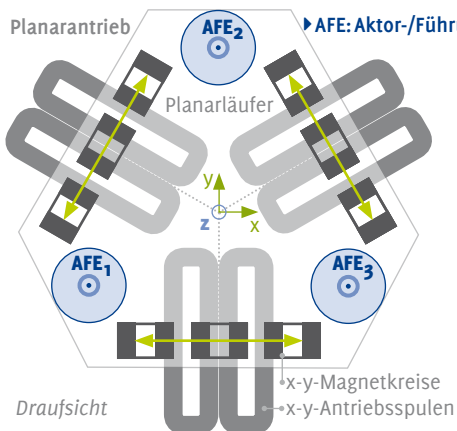


Abbildung 3: Schema eines planaren Antriebssystems mit 3 Spulenpaaren (links). Für den 6D-Antrieb wurden anstelle der drei sonst verwendeten Luftlager drei Vertikaltriebe (rechts) als Aktor-Führungselemente (AFE) integriert. Grafik: IMMS.

Führungselement jeweils anstelle der drei Luftlager die Gewichtskraft des Läufers mit einer sehr feinfühlig geregelten pneumatischen Druckkammer auf. Die verbleibende und mittels Tauchspulantrieb gelöste feinfühlig vertikale Positionierung des Läufers benötigt dann nur noch wenige Millinewton. Folglich generiert der Antrieb nahezu vernachlässigbare parasitäre Wärmeströme innerhalb der Maschine. Das ermöglicht ein quasi leistungsloses Anheben des Läufers einschließlich des zu vermessenden Objektes und gestattet gleichzeitig eine Positionsauflösung im Nanometerbereich.

Entwicklung des 6D-Planarmotorsystems

Das IMMS hat für die o.g. Grundanordnung die Kernkomponenten für den planaren Antrieb und die Führung dimensioniert. Im Fokus stand dabei das Schwingungsverhalten des mechanischen Systems. Mittels FEM-Simulationen wurden die Antriebe und die Mechanik-Bauteile so gestaltet, dass die bewegte Masse möglichst gering gehalten, gleichzeitig jedoch eine hohe Struktursteifigkeit erzielt wird und die Eigenfrequenzen somit ausreichend hoch sind, um die hohen Anforderungen an die Positionierdynamik zu erreichen. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer FEM-Modalanalyse des finalen Läuferentwurfs mit einer ersten Eigenfrequenz von 291 Hz.

In gleicher Weise hat das IMMS auch die gestellfesten Antriebskomponenten, d.h. die Flachspulen mit Halterung bzw. Gehäuse modelliert, um die Antriebskraft und die damit verbundene thermische Belastung des Systems per Simulation abzuschätzen und damit die Spulengeometrie zu optimieren. Darüber hinaus wurden Lösungen für die Ankopplung der Magnetbrücken an den Quarzläufer und für eine Temperiereinhausung der Planarspulen erarbeitet.

B: Modalanalyse
Abbildung
Typ: Gesamtverformung
Frequenz: 291,41 Hz
Einheit: mm

11,701 Max
11,413
11,126
10,838
10,55
10,263
9,9752
9,6875
9,3999
9,1122 Min

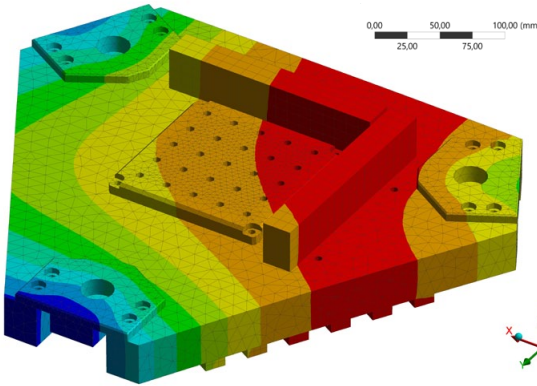


Abbildung 4:

Eine der FEM-Simulationen des Schwingungsverhaltens des Läufers mit einer exemplarischen hinreichenden Eigenfrequenz von 291 Hz.

Grafik: IMMS.

- 32**
- > INPOS
 - > INSPECT
 - > ADMONT
 - > Ko²SiBus
 - > AgAVE
 - > Dig. Engineering
 - > IRIS
 - > Inhalt
 - * Förderung

Das IMMS hat die drei Vertikaltriebe mechanisch und pneumatisch in das Planarmotorsystem integriert und passgenaue Lösungen für die Einbindung in die elektronische Steuerungsarchitektur des Systems entwickelt. Schläuche und Kabel sitzen direkt am Läufer und bieten einen flexiblen Übergang vom Läufer zum Stator, um Bewegungen im Arbeitsbereich zu ermöglichen und lediglich geringe und gleichzeitig möglichst symmetrische Störkräfte bei der Bewegung des Läufers hervorzurufen.

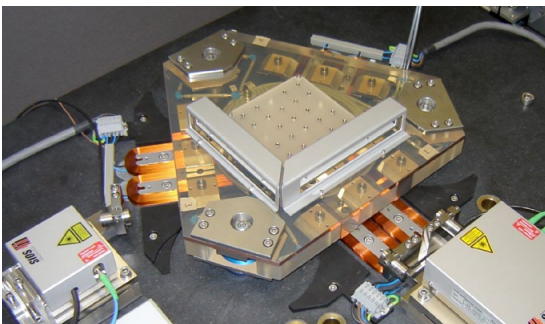
Lösung des IMMS – Regelung des Systems in 6 Freiheitsgraden

Das in Abbildung 5 dargestellte Antriebssystem wurde schrittweise in Betrieb genommen und dabei die simulationsbasiert entworfene 6D-Positionsregelung schrittweise erprobt und anhand der ermittelten Streckeneigenparameter weiter optimiert und verfeinert. Das IMMS hat die dazu benötigten physikalischen Parameter wie Motor konstanten, Massenverhältnisse, Übertragungseigenschaften der verschiedenen Teilsysteme innerhalb der Regelstrecke sowie Eigenfrequenzen zunächst modellbasiert ermittelt und durch experimentelle Untersuchungen am Antrieb verifiziert und zum Teil nachgeführt. Der Fokus lag dabei auf frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften. So wurde eine Feinabstimmung zwischen der geringdynamischen pneu-

*Steuerung und
Regelung auf
www.imms.de.*

Abbildung 5:

Realisiertes 6D-Positioniersystem (links) mit integrierten Vertikalaktoren (rechts). Fotos: IMMS.



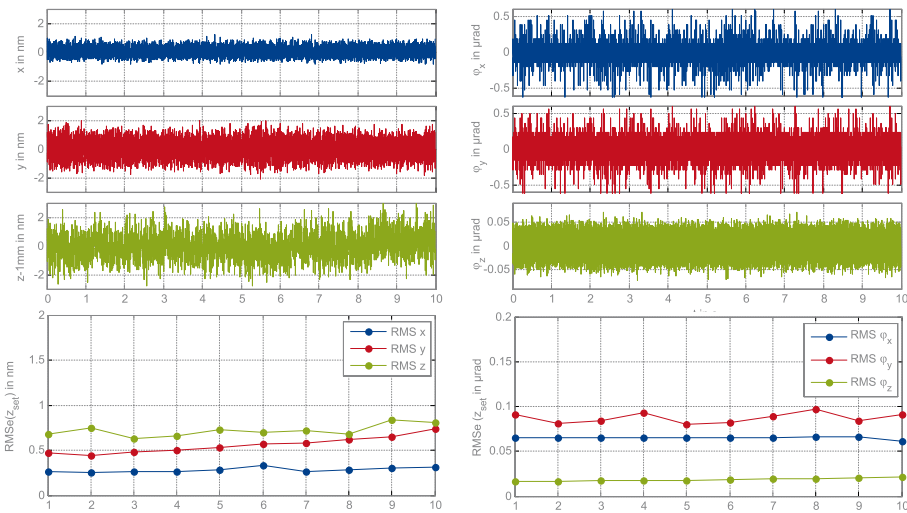


Abbildung 6: Zeitsignale der sechs Koordinaten im geregelten Betrieb (oben); RMS-Regelabweichung in Abhängigkeit von der Flughöhe z_{set} (unten). Grafiken: IMMS.

matischen Gewichtsentlastung im Vertikaltrieb und der hochdynamischen Aktorik des Läufers vorgenommen, um bestmögliche Positionierungsergebnisse zu erzielen. Das IMMS hat die komplexen 6D-Regelungsalgorithmen entwickelt, in Matlab/Simulink programmiert und auf der dSpace-Hardware im Steuerungsrack für alle Teilsysteme implementiert.

Ergebnisse und Ausblick

Im Ergebnis wurden die angestrebten Regelabweichungen im Nanometerbereich erzielt. Abbildung 6 verdeutlicht die erreichte Regelgüte anhand der Zeitsignale für den geregelten Betrieb in allen sechs Freiheitsgraden bei einer Flughöhe von 1 mm. In x , y und z werden Regelabweichungen (RMS) von weniger als einem Nanometer erreicht. Systematisch wurde weiterhin die höhenabhängige Veränderung der Regelabweichungen untersucht und so der Nachweis erbracht, dass das 6D-Positioniersystem über den vollen z -Hub von 10 mm eine nanometergenaue Positionierung des Läufers ermöglicht. Die Ergebnisse bilden die Basis für künftig zu entwerfende kundenspezifische 6D-Antriebssysteme im Hochpräzisionsbereich.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



ZIM
Zentrales
Innovationsprogramm
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt INPOS wurde unter dem Kennzeichen ZF408707LT7 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Steuerung und
Regelung auf
www.imms.de.

Mehr zu An-
triebsystemen:
www.imms.de.

INPOS auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

FORSCHUNGSTHEMA

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME FÜR DIE BIOANALYTIK UND MEDIZINTECHNIK

Im Projekt SensoMem wird seit 2019 ein System entwickelt, mit dem sich biochemische Proben im Labormaßstab mit Hilfe von Sensoren während der Reaktion überwachen und so Ergebnisse von Reaktionen verbessern lassen. Prozesswiederholungen sollen somit vermieden werden. Das IMMS entwickelt eine kleine kompakte Funksensor-Plattform für eine wiederverwendbare Sensoreinheit zum Überwachen der Reaktionen. Das Bild zeigt Voruntersuchungen am IMMS mit großer Standard-Funksensorik und Dialyse-Reaktoren vom Projektpartner scienova GmbH aus Jena. Foto: IMMS.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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, wie z.B. zur Krebsdiagnostik, schnell, zuverlässig, kosteneffizient und automatisiert durchzuführen.

Interne Forschungsgruppe

zu integrierten Systemlösungen für Life-Sciences-Anwendungen

In integrierte Systemlösungen für Life-Sciences-Anwendungen bringen wir Know-how ein, das wir seit dem Bestehen des IMMS ausgebaut haben – die Erforschung und Entwicklung von anwendungsspezifischen integrierten elektronischen Schaltkreisen (ASICs) und Sensorsystemen, Signalverarbeitung, Kommunikation und Systemintegration. In der internen Forschungsgruppe konzentrieren wir uns darauf, neue sensorische Prinzipien zur Detektion biologischer und chemischer Eigenschaften aus der Wissenschaft auf die Prozesse der Thüringer Halbleiterhersteller zu transferieren und eine modulare Hardware/Software-Plattform zu realisieren. Mit dieser Plattform werden Funktionalität und Leistungsfähigkeit neu entwickelter bioanalytischer ASICs erprobt und das schnelle Prototyping von anwendungsorientierten Systemlösungen erleichtert.

Projekte zur

Biosensorik:

www.imms.de

Mehr zu

Life Sciences:

www.imms.de

Start von SensoMem*: Kompaktes Funksensorsystem zur Online-Überwachung biochemischer Reaktionen im Labor

Online-Monitoring biochemischer Proben für effizientere Arbeit

Biochemische Reaktionen im Labor, wie Dialyse, Proteinsynthese oder die Kultivierung von Zellen, sind für verschiedene Therapieansätze notwendig. Ob durch die Reaktion die gewünschten Ergebnisse produziert wurden, kann derzeit nur im Nachhinein durch eine Analyse der Proben überprüft werden. Das führt zu Verzögerungen in der Herstellung, wenn Reaktionen nicht wie erwartet verlaufen sind und deshalb wiederholt werden müssen. Im Projekt SensoMem wird daher seit 2019 ein System entwickelt, mit dem sich die Proben im Labormaßstab mit Hilfe von Sensoren während der Reaktion überwachen und so Ergebnisse der Reaktionen verbessern lassen. Prozesswiederholungen sollen somit vermieden werden.

IMMS erarbeitet kompakte und energieeffiziente Funksensor-Plattform

Das IMMS entwickelt eine kleine kompakte Funksensor-Plattform für eine wiederverwendbare Sensoreinheit zum Überwachen der Reaktionen. Dabei stellt die Kombination von geringem Bauraum mit der erforderlichen langen Messdauer von bis zu mehreren Wochen sowie der Anbindung und dem Auslesen verschiedener spezieller Sensoren die besondere Herausforderung dar. Für die Systemintegration sind daher Lösungen notwendig, die die Energieversorgung und den Platzbedarf für Hardware und Batterien minimieren. Hierfür müssen verbrauchsarme Komponenten und Energiemanagement für lange Messzeiträume ausgelegt werden. Darüber hinaus muss das System unter unterschiedlichen Laborbedingungen zuverlässig arbeiten und z.B. auch mit wenig Energiebedarf aus Metall-Brutschränken funken können.

*SensoMem auf
www.imms.de*

Verfahren und Lösungen der Life-Science-Partner

Der Partner scienova GmbH ist für die Auswahl der Sensoren, die Versuchsanordnung und die Datenauswertung zuständig. Das Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI untersucht die biologischen Reaktionen im Hinblick auf biologische Kompatibilität und Anwendungen in der Proteinsynthese sowie Zellkultur und stellt dabei sicher, dass Sensoren und Elektronik dank biokompatibler Materialien die Reaktionen nicht verändern.



Das IMMS zeigte zur MEDICA 2019, wie es mit F&E zu elektronischen Komponenten und Systemen Partner in ihren Anwendungen unterstützt und von der Machbarkeitsstudie bis zur Serienreife begleitet.

Foto: IMMS.

Forschung und Entwicklung des IMMS für die Bioanalytik auf der MEDICA 2019

Das IMMS hat auf der MEDICA 2019 in Düsseldorf auf dem vom medways e.V. organisierten Thüringer Gemeinschaftsstand aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse für die Bioanalytik vorgestellt. Die präsentierten Lösungen reichten von einem RFID-Transponder-Chip zum flexiblen und batterielosen Betrieb von Biosensoren über ein mikroelektronisches Kontakt-Bildsensoren für die In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs hin zu einem kompakten mobilen Ultraschallprüfgerät mit Smartphone-ähnlicher Benutzerschnittstelle. Anhand dieser und anderer Beispiele zeigte das IMMS das Potential von Kooperationen auf, in denen das IMMS Anwendungen von Partnern durch die Erforschung und Entwicklung elektronischer Komponenten und Systeme voranbringt und eine Begleitung von der Machbarkeitsstudie bis zur Serienreife bietet.

Beispielentwicklung: RFID-Transponder-Chip zum batterielosen Betrieb von Biosensoren

Am IMMS wurde ein RFID-Transponder-Chip entwickelt, der Messdaten über angeschlossene Einzelsensoren mit Standardschnittstellen erfasst und berührungsfrei an eine NFC-fähige RFID-Ausleseinheit sendet, wie z.B. ein NFC-fähiges Smartphone. Der Chip versorgt die Sensoren mit Energie vom Lesegerät, sodass Batterien auf der Transponder-Seite nicht notwendig sind. Zum Auslesen der Messdaten hat das IMMS eine App für Android-Smartphones entwickelt. Für Demonstrationszwecke wurde ein Sensortransponder zum Auslesen von Umgebungstemperatur, -feuchte und -druck implementiert. Neben bioanalytischen sind vielfältige andere Sensor-Anwendungsszenarien möglich.

Kompetenzen
des IMMS auf
www.imms.de

Details im
Fachartikel zu
ADMONT.



Das zur MEDICA 2019 präsentierte optoelektronische System nutzt der Partner Oncompass Medicine Hungary Ltd. für Untersuchungen zu Analyseverfahren für die In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs.

Das Vorgehen veranschaulicht das Video von Oncompass Medicine Hungary Ltd.

Foto: IMMS.

38

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Beispielentwicklung: Mikroelektronisches Kontakt-Bildsensorysystem für die In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs

Um Typen und Stadien von Brustkrebs für zielgenaue Therapien zu differenzieren, wird bislang bei nicht eindeutigen Befunden eine weitere Analyse vorgenommen, was Zeitverzögerung und hohe Kosten verursacht. Mit dem vom IMMS entwickelten optoelektronischen Testsystem untersucht der Partner Oncompass Medicine Hungary Ltd. Zellproben, um künftig Brustkrebs bereits mit einem einstufigen Verfahren genau klassifizieren zu können.

Mehr zum optoelektronischen Testsystem auf www.imms.de

Beispielentwicklung: Kompaktes mobiles Ultraschallprüfgerät mit Smartphone-ähnlicher Benutzerschnittstelle

Nicht nur in der Medizin, auch in der Industrie wird Ultraschall zu Diagnosezwecken eingesetzt. Mit der SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH hat das IMMS ein neuartiges Ultraschallprüfgerät auf digitaler Basis für Industrieanwendungen entwickelt. Das tragbare Handgerät mit Fünf-Zoll-Touchscreen verbindet neuartige Messtechnik, die Ultraschallwellen in einem breiten Frequenzbereich von 20 bis 100 kHz erfasst, innovative Luft- und Körperschallsensorik sowie intelligente und intuitiv bedienbare Apps. Das IMMS hat die digitalen Komponenten der Hardware entwickelt sowie Algorithmen, um Messwerte hörbar zu machen, das Android-Betriebssystem angepasst und SONOTEC bei der Überführung des Gerätes in die Serienfertigung unterstützt. Auf der MEDICA zeigte dieses mobile System auf, wie sich auch bioanalytische Anwendungen gemeinsam mit Partnern als Komplettlösung ausgestalten lassen.

Mehr zum SONAPHONE auf www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019



INSPECT

Quantitativer PSA-Nachweis mit Immunassay auf CMOS-Biochip zur Vor-Ort-Diagnostik von Prostatakrebs

Senova und IMMS ist es erstmals gelungen, mit einem PSA-Immunassay direkt auf einem opto-elektronischen CMOS-Biochip das prostataspezifische Antigen (PSA) durch Lichtabsorptionsmessungen quantitativ nachzuweisen und dabei die Vorgaben der Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen Rili-BÄK einzuhalten. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Ziel: Quantitative Schnelltests für die Diagnostik von Prostatakrebs

Zur Diagnostik von Prostatakrebs wird für die Früherkennung¹, für Abklärungsuntersuchungen, das Monitoring von Therapien und in der Nachsorge unter anderem die Konzentration des prostataspezifischen Antigens (PSA) bestimmt. Wenige Nanogramm pro Milliliter (ng/ml) PSA geben Hinweise darauf, ob und wie weitere Untersuchungen und Behandlungen erfolgen sollten. Erhöhte PSA-Werte können auf Krebs bzw. auf dessen erneutes Auftreten hindeuten.² Für einen PSA-Test wird beim Arzt Blut abgenommen und ins Labor geschickt. Meist liegt erst einige Tage später

¹ Perspektivisch könnten PSA-Messungen in die risikoadaptierte PSA-Früherkennung einfließen, die derzeit erforscht wird und individuelle, von einem Basis-PSA-Wert ausgehende regelmäßige Messungen vorsieht, vgl. <https://www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/prostatakrebs/psa-test-frueherkennung.php> (letzter Aufruf: 27.04.2020). Eine generelle PSA-Früherkennung wird derzeit nicht empfohlen, vgl. https://www.leitlinienprogramm-onkologie.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Leitlinien/Prostata_5_o/LL_Prostatakarzinom_Kurzversion_5_1.pdf (letzter Aufruf: 27.04.2020).

² Vgl. zu aktuellen Empfehlungen und Richtwerten für PSA-Konzentrationen https://www.leitlinienprogramm-onkologie.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Patientenleitlinien/Patientenleitlinie_Prostatakrebs_1_v01-2020.pdf (letzter Aufruf: 27.04.2020).

die PSA-Konzentration als Ergebnis vor.³ Um zeit- sowie kostenaufwändige Laboruntersuchungen mit großen und komplexen Geräten zu vermeiden und die häufig auch psychisch belastenden Wartezeiten für Patienten zu minimieren, wird nicht nur für PSA-Messungen an immer neuen kompakten sowie preiswerten Point-of-Care-Lösungen (PoC) gearbeitet.

Diese basieren in vielen Fällen auf Streifen-tests, mit denen Ärzte direkt in ihrer Praxis aus mehr oder weniger intensiven und durch biochemische Reaktionen hervorgerufenen Farbumschlägen Konzentrationen ableiten können. In den letzten Jahren haben sich für die Messung dieser Konzentrationen PoC-Geräte etabliert, die dafür z.B. Helligkeitssensoren oder eine Kamera nutzen.

Diese Geräte haben allerdings noch den Nachteil, dass sie ungenau im Vergleich zu Laboruntersuchungen sind. Im Fall von PSA-Messungen sehen die Vorgaben der Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen Rili-BÄK neben einer Nachweisgrenze von 0,2 ng/ml auch einen Messbereich bis zu 50 ng/ml vor sowie für sichere Aussagen einen Variationskoeffizienten von maximal 15,5 %.⁴ Mit Messungen an im Projekt für Referenzzwecke entwickelten PSA-Streifen-tests mit einem PoC-Lesegerät konnten diese Vorgaben allerdings nicht erreicht werden.

Mikroelektronik-basierter Demonstrator misst weniger als ein Nanogramm pro Milliliter PSA

Das IMMS hat im Projekt INSPECT ein Photometer in Form eines mobilen Lesegeräts mit einem auswechselbaren opto-elektronischen CMOS-Biochip erarbeitet und als Demonstrator aufgebaut. Statt der bislang in einigen PoC-Geräten genutzten Teststreifen mit Kamera-basierter Auswertung wird eine Probe direkt auf den Mikroelektronik-Chip gegeben und die biochemische Reaktion ohne Abstände zwischen Probe und Lichtdetektor gemessen. Der Projektpartner Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH hat die biochemische Funktionalisierung der Chip-Oberflächen mit immobilisierten Antikörpern für PSA vorgenommen und Messungen mit Proben unterschiedlicher PSA-Konzentrationen mit dem Prototyp durchgeführt. Liegt PSA in der Probe vor, wird es mit biochemischen Reaktionen nachgewiesen, die je nach Konzentration die Probe unterschiedlich stark einfärben und als Helligkeitsunterschiede opto-elektronisch gemessen werden.

³ <https://www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/prostatakrebs/psa-test-frueherkennung.php> (letzter Aufruf: 27.04.2020)

⁴ www.bundesaerztekammer.de/rilibaek2019 (letzter Aufruf: 27.04.2020)

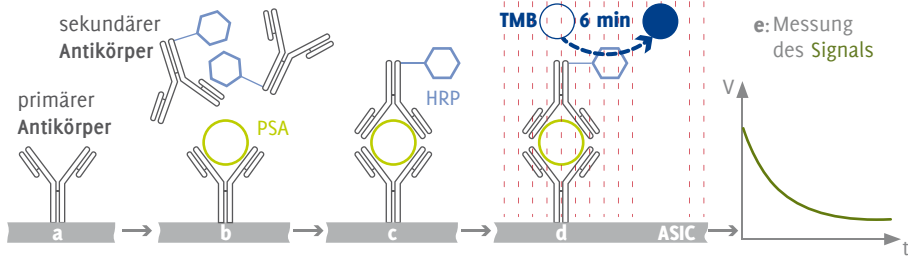


Abbildung 1: Grundprinzip für den quantitativen Nachweis des Analyten PSA mithilfe von immobilisierten primären Antikörpern, mit HRP (Meerrettich-Peroxidase-Enzym) markierten sekundären Antikörpern und Tetramethylbenzidin-Substrat-Lösung (TMB): die HRP-TMB-Reaktion verändert durch einen Farbumschlag die Lichtintensität, die mit dem Chip gemessen wird. Grafik: Senova/IMMS.

Senova und IMMS ist es damit erstmals gelungen, PSA auf einem CMOS-Biochip mit einer Detektionsgrenze von 0,1 ng/ml quantitativ nachzuweisen. Die Messungen erfüllen die für klinische PSA-Tests gemäß Rili-BÄK erforderlichen Vorgaben. Der Test mit dem CMOS-Biochip-System benötigt insgesamt 14 Minuten, die Ergebnisse werden digital bereitgestellt und können direkt über ein an das Gerät angeschlossenen PC weiterverarbeitet werden.

Lösung im Detail

Messprinzip: PSA-Immunoassay auf Mikroelektronik-Chip

Das biotechnologische Prinzip des neuen Testsystems ist vergleichbar mit dem von Lateral-Flow-Tests, also von gängigen Teststreifen: Mit einer Antikörper-Antigen-Wechselwirkung werden gezielt Analyten in einer Probe nachgewiesen, d.h. bei Prostatakrebs das PSA. Für den Mikroelektronik-basierten Nachweis werden primäre Antikörper für PSA (anti-human PSA antibody), die sonst als Fängermoleküle auf Teststreifen aufgebracht werden, auf der Chip-Oberfläche aufrecht fixiert, vgl. Abbildung 1 (a). Sie fangen PSA ein, sofern es in einer Probe enthalten ist, die auf den Chip gegeben wird. Für den Nachweis werden auch sekundäre Antikörper für PSA auf den Chip gegeben, die mit dem Meerrettich-Peroxidase-Enzym (HRP) markiert sind (b), und ebenfalls am PSA andocken. Dieses Sandwich aus primären Antikörpern, PSA, sekundären Antikörpern und HRP ist noch unsichtbar. Die markierten sekundären Antikörper, die nicht an die Oberfläche gebunden sind, werden mit einer Waschlösung weggespült (c). Im nächsten Schritt wird farblose Tetramethylbenzidin-

Substrat-Lösung (TMB) hinzugefügt, die mit dem HRP reagiert und die unsichtbaren Antikörper-Antigen-Komplexe nach sechs Minuten durch einen blauen Farbumschlag sichtbar macht (d). Das verändert die optische Dichte, die mit dem Chip detektiert und ausgewertet wird (e). Hierfür wird zuerst die Lichtintensität vor der Reaktion gemessen und danach, wie stark das Licht durch die Farbmenge gedämpft wird.

Prototypischer Aufbau eines mobilen Photometers

Für die optische Anregung und die Auswertung der Signale des Mikroelektronik-Chips hat das IMMS ein kompaktes, mobiles, lichtdicht verschlossenes Lesegerät entwickelt, das per USB-Kabel an einen PC 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 direkt auf den Chip gegeben, der auf einer kleinen Platine als Steckmodul (Cartridge) aufgebaut ist. Die Cartridge wird in das Gerät unter die Beleuchtungseinheit eingesteckt. Eine LED erzeugt in einem festen Abstand zum Chip homogenes Licht, das mit konstanter Intensität während Reaktion die Probe ausleuchtet.

Das Lesegerät wurde zunächst mit einem bereits vorliegenden Chip betrieben, um Anforderungen und Randbedingungen für das Gesamtsystem und eine neu zu entwickelnde applikationsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) abzuleiten. Der vorliegende Chip war ursprünglich für den Nachweis von Infektionskrankheiten und damit für andere Anwendungen entwickelt worden. Er beinhaltet eine Matrix aus 6 x 7 Photodioden, vgl. Abbildung 2 (links) und ist damit für Forschungszwecke relativ groß gehalten. Er war einst realisiert worden, um parallel verschiedene Krankheits-erreger durch die Messung von Lichtunterschieden zu detektieren.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

Mehr zu Sensor-systemen auf
www.imms.de

Mehr zu diesem
Forschungschip:
www.imms.de



Abbildung 2: Der opto-elektronische CMOS-Biochip (links) lässt sich dank der Cartridge-Lösung (Mitte) auswechseln und im Photometeraufbau (rechts) für Messungen nutzen. Fotos: IMMS.

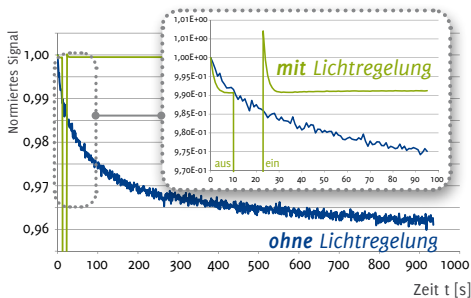


Abbildung 3:

Vergleich des Systemverhaltens anhand des normierten Photostroms über 15 Minuten ohne (blau) und mit Lichtregelung über eine Referenz-Photodiode im Linsentubus (grün): Wenige Sekunden nach dem Ab-/Anschalten ist die Lichtquelle stabilisiert.

Grafik: IMMS.

Untersuchungen zur Optimierung des Photometers für die PSA-Messungen

Das IMMS hat für die Entwicklung des Photometers mehrere Messaufbauten und Testsysteme mit dem Chip realisiert, um die Lichtabsorption von Proben sowie Linearität, Empfindlichkeit und Auflösungsgrenze des Photometers zu bestimmen und Einflussfaktoren wie die Erwärmung von Elektronik und Lichtquelle, konstante Beleuchtungsbedingungen, Verdunstungseffekte und Streulicht zu untersuchen.

Auf dieser Basis hat das IMMS beispielsweise eine Lichtregelung in das Lesegerät integriert. Durch diese konnte die Einschwingzeit des Gesamtsystems von mehr als 15 min auf unter eine Minute erheblich verkürzt werden, vgl. Abbildung 3. Damit lassen sich systematische Messfehler verringern und die eigentlichen biochemischen Reaktionen sicherer nachweisen. Ursachen für die systematischen Messfehler liegen z.B. in der Erwärmung der Elektronik und der LED sowie in der Verdunstung von Flüssigkeiten bei sehr hohen Lichtintensitäten.

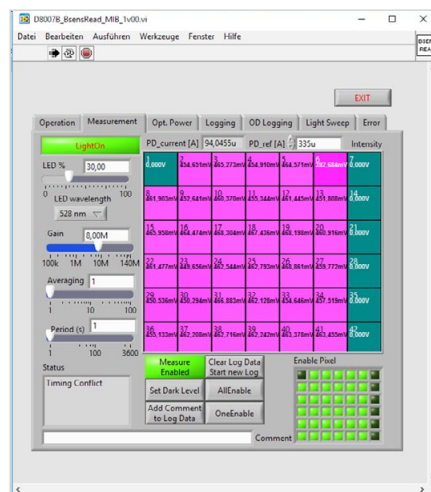
Die LED lässt sich vom angeschlossenen Rechner mit der grafischen Nutzeroberfläche (GUI) einstellen genauso wie die ASIC-Verstärkung, die Auswahl von Sensoren, Mittelwertbildung, Messwert-pro-Zeiteinheit und Messdatenspeicherung. Über die GUI werden verschiedene Graphen bereitgestellt zur Auswertung der Regelung und der Messergebnisse, vgl. Abbildung 4.

Mehr zu System-
integration auf
www.imms.de

Abbildung 4:

Am IMMS erstellte grafische Nutzeroberfläche für die Regelung und Messung am Photometer, das per USB-Kabel an einen Rechner oder Laptop angeschlossen wird. Der Screenshot zeigt die Messwerte von Sensoren in Matrixformat.

Grafik: IMMS.



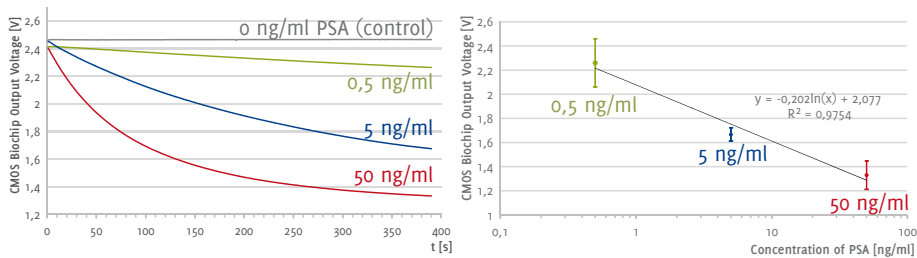


Abbildung 5: Links: Abnehmende und gemittelte Ausgangssignale (V) von fünf CMOS-Biochips pro PSA-Konzentration während der Messungen, die nach der Zugabe von Substrat zum Immunassay beginnen. Rechts: Logarithmisch angepasste Kalibrierungskurve des PSA-Immunassays mit verschiedenen PSA-Konzentrationen, die nach 6 Minuten gemessen wurden. Grafiken: IMMS.

PSA-Messung mit optimiertem Photometer

Das optimierte Photometer wurde mit Cartridge-Aufbauten, vgl. Abbildung 2, an Senova übergeben, um das Messsystem mit dem prostataspezifischen Antigen (PSA) zu validieren. Senova hat die biochemische Funktionalisierung der Chip-Oberflächen mit immobilisierten Antikörpern für PSA vorgenommen, den PSA-Assay optimiert und Messungen mit Proben unterschiedlicher PSA-Konzentrationen durchgeführt.

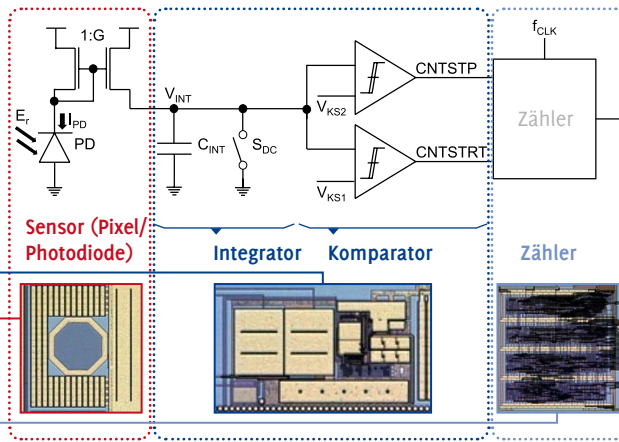
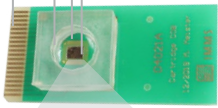
Wie in Abbildung 5 dargestellt, führt die steigende PSA-Konzentration in der Probe zu abnehmenden Signalen bei optischen Messungen mit dem CMOS-Biochip. Die Experimente wurden fünfmal mit verschiedenen CMOS-Biochip-Cartridges mit ähnlichen Ergebnissen wiederholt. PSA wurde dabei mit einer Detektionsgrenze von 0,1 ng/ml nachgewiesen. Es wurden Variationskoeffizienten über die Experimente von 8,8%, 3,2% und 8,9% für 0,5 ng/ml, 5 ng/ml und 50 ng/ml PSA erreicht. Das Nachweissystem erfüllt damit die Vorgaben für die klinische Prüfung gemäß Rili-BÄK.

Entwicklung eines opto-elektronischen CMOS-Biochips D4021A auf Basis der Untersuchungen

Das IMMS hat auf der Basis von Untersuchungen mit dem Testsystem den speziell auf die Anwendung ausgerichteten ASIC D4021A entwickelt, der 2018 in die Fertigung übergeben wurde. Dieser Chip ist kleiner und kostengünstiger als jener für die Voruntersuchungen und hat eine Architektur, mit der genauere und rauschärmere Messungen möglich sind. Der D4021A 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.

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de.

CMOS-Biochip-Aufbau:
PCB mit 20 Kontakten
Offene Kavität (200 μ l)
Biokompatibler Verguss
CMOS-Biochip



CMOS-Biochip mit
5x5-Sensormatrix

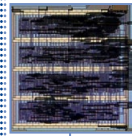
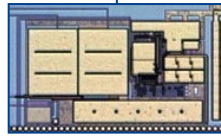
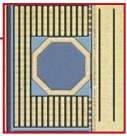


Abbildung 6: CMOS-Biochip-Aufbau, Chipfoto und Blockschaltbild des CMOS-Biochips D4021A. Fotos/ Grafik: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Großer Dynamikbereich und rauscharme Signalverarbeitung inklusive Digitalisierung

Der CMOS-Biochip D4021A besteht aus einer Sensormatrix aus 5x5 Photodioden, vgl. Abbildung 6. Einfallendes Licht wird durch die Photodiode in einen definierten Photostrom I_{PD} umgewandelt und in einem Stromspiegel verstärkt. Dieser wird auf der Kapazität C_{INT} integriert, wodurch die Integrationsspannung V_{INT} ansteigt. Das Signal wird dann mithilfe von zwei Komparatoren und einem Zähler digitalisiert. Zwei festgelegte Schwellreferenzspannungen V_{KS1} und V_{KS2} sorgen dafür, dass die Komparatoren den Zähler starten bzw. stoppen, sobald die Integrationsspannung V_{INT} den jeweiligen Schwellwert erreicht hat, vgl. Abbildung 6 mit den Start- bzw. Stoppsignalen CNTSTRT und CNTSTP.

Der Zählwert ist umgekehrt proportional zu der vom Sensor empfangenen Lichtintensität. Werden wenige Taktzyklen gezählt, also der zweite Schwellwert schnell erreicht, liegt eine entsprechend hohe Lichtintensität vor, vgl. Abbildung 7. Mit diesem Signalverarbeitungskonzept ist es möglich, vom eintreffenden Licht generierte Photoströme über einen großen Signal- bzw. Dynamikbereich rauscharm zu verarbeiten und ein sehr gutes Signal-zu-Rauschverhältnis zu erhalten.

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de.

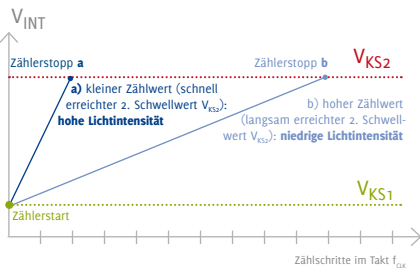


Abbildung 7:

Illustration des Zählerprinzips am Beispiel hoher (a) und niedriger (b) Lichtintensitäten: In einem Takt der festgelegten Frequenz f_{CLK} wird solange gezählt, bis die Integrationsspannung V_{INT} den zweiten Schwellwert erreicht hat und der Zähler somit gestoppt wird. V_{KS} steht für Komparatorschwellwert/-referenzspannung 1 und 2. Grafik: IMMS.

Erste Messungen und Charakterisierungen

Zehn Wafer mit jeweils ca. 600 D4021A-Schaltungen sind im Wafertest auf Grundfunktionalitäten wie Kontaktierbarkeit, Betriebsstrom, Testspannungen, Signalverarbeitung und spezielle Funktionen überprüft worden. Weiterhin wurden Muster für biokompatible Cartridges mit dem neuen ASIC entwickelt und aufgebaut, vgl. Abbildung 8.

Der aufgebaute ASIC erreichte bei ersten Charakterisierungsmessungen mit rotem Licht der Wellenlänge von 617 nm einen Dynamikbereich von 114 dB. Er erlaubt damit eine um 2,5 Größenordnungen höhere Signalbereichsabdeckung optischer Dichten von 2,8 – 0,0004 als der bislang für die Voruntersuchungen verwendete Chip. Die Detektionsgrenze ist damit um den Faktor 25 besser. Einstellungsmöglichkeiten am neuen ASIC sowie am optischen System bieten diesbezüglich zudem noch weiteres Optimierungspotential.

Zusammenfassung und Ausblick

Senova und IMMS ist es erstmals gelungen, mit einem PSA-Immunassaydirekt auf einem opto-elektronischen CMOS-Biochip das prostataspezifische Antigen (PSA) durch Lichtabsorptionsmessungen quantitativ mit einem mobilen Lesegerät in einer für klinische Tests erforderlichen Qualität nachzuweisen. Das IMMS hat zudem die Entwicklung eines wesentlich genaueren, kleineren und damit rauschärmeren CMOS-Biochips abgeschlossen und diesen auf Wafer-Ebene getestet sowie Steckmodule mit dem neuen ASIC für dieses Lesegerät entwickelt und aufgebaut. Darüber hinaus hat das IMMS in INSPECT das Gerät überarbeitet, das nun deutlich kompakter ist und eine überarbeitete LED-Regelung für ein signifikant verbessertes Rausch- und Regelverhalten der Beleuchtungseinheit beinhaltet. Der

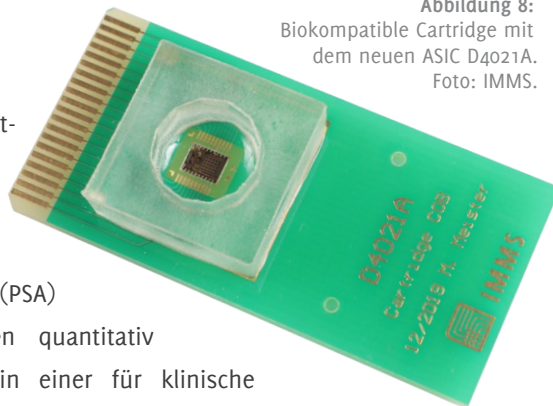


Abbildung 8:
Biokompatible Cartridge mit dem neuen ASIC D4021A.
Foto: IMMS.

Mehr zu Test
und Charakterisierung auf
www.imms.de.

Aufbau und der Test mit der verbesserten Hardware werden in der IMMS-internen Forschungsgruppe zu integrierten Systemlösungen für Life-Sciences-Anwendungen vorgenommen.

PSA konnte dank der direkt auf der Mikroelektronik stattfindenden biochemischen Reaktionen ohne Abstände zwischen Probe und Lichtdetektor gemessen werden. Die CMOS-Biochips erlaubten in diesem Fall genauere und zuverlässigere Ergebnisse als Streifen-tests. Es ist davon auszugehen, dass sich mit dem anhand von PSA entwickelten und erfolgreich erprobten Prinzip auch die Sensitivität anderer Nachweise verbessern lässt. Das IMMS strebt an, die Projektergebnisse als Grundlage für die Entwicklung neuer PoC-Lösungen zu nutzen und damit weitere Anwendungen in der Bioanalytik zu bedienen und zu erschließen.



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

Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben INSPECT wurde 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. Projektpartner des IMMS sind die Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, die CDA GmbH, das Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V. und die X-FAB Semiconductor Foundries GmbH.

Mehr zu

Life-Sciences:

www.imms.de.

Mehr zu

INSPECT auf

www.imms.de.



ADMONT –

RFID-Chip

zum batterielessen Betrieb kommerzieller Sensoren für diagnostische und analytische Anwendungen

Das IMMS hat einen RFID-Sensor-Transponder-IC als Brücke zwischen NFC und 1^2C entwickelt, mit dem sich kommerzielle Sensoren für diagnostische und analytische Anwendungen anschließen und batterieless betreiben lassen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Drahtlose Sensoren für die Point-of-Care-Diagnostik der Zukunft

Sensoren jeglicher Art werden zunehmend in den Bereichen der personalisierten Medizin und diagnostischen Analytik eingesetzt. So gibt es zum Beispiel implantierbare Sensoren, die direkt unter der Haut sitzen und die Glukosekonzentration messen. Neben Blutzuckermessgeräten ermöglichen Teststreifen, wie z.B. für Schwangerschafts-, Ovulations- und Allergietests, die schnelle Analytik direkt zu Hause mit einer einfachen Ja/Nein-Aussage. In Zukunft werden digitale Sensoren die heutigen Teststreifen ergänzen, um u.a. quantitative Aussagen zu ermöglichen. Das Portfolio der Teststreifen kann damit erweitert werden, um zum Beispiel Patienten mit behandelten Herzleiden zu monitoren, Sportlern die Überwachung ihrer Laktatwerte zu ermöglichen oder Haustiere auf Krankheiten zu testen. Mit modernen, drahtlosen Kommunikations- und Energieversorgungstechnologien wie RFID können diese Sensoren von jedem Smartphone ausgelesen und die gewonnenen Informationen direkt an den Hausarzt gesendet oder durch eine App mit wertschöpfenden Diensten verknüpft werden. Solche drahtlosen Point-of-Care-Sensoren haben den Charakter voll-

*Mehr zu
Life-Sciences:
www.imms.de*

*Mehr zu
ADMONT auf
www.imms.de*

*Jahresbericht
© IMMS 2019*

wertiger IoT-Komponenten, die im Zusammenhang mit Big Data und Cloud-basierter Anwendungssoftware die wichtigste Basis für neue datengetriebene Geschäftsmodelle darstellen. Aufgrund des batterielosen Betriebs und dem daraus folgenden ressourcenschonenden Aufbau können RFID-Sensoren als eine der wichtigsten Zukunftstechnologien für die Point-of-Care-Diagnostik angesehen werden.

Flexibler RFID-Sensor-Transponder-Chip des IMMS als Brücke zwischen NFC und I²C-Sensoren

Das IMMS hat einen passiven NFC-fähigen RFID-Transponder-Chip entwickelt, der als flexible Brückenschnittstelle verschiedene Arten handelsüblicher digitaler I²C-Sensoren mit unterschiedlichem Leistungsbedarf unterstützt, siehe Abbildung 1. Er kann eine geregelte Spannung für externe Sensoren bis zu 2,2 V bei einem maximalen Strom von 10 mA liefern. Er sorgt für einen niedrigen Stromverbrauch des Gesamtsystems und minimiert die Anzahl an externen Komponenten, die für den Aufbau eines RFID-Sensor-Transponders benötigt werden. Mit dem RFID-Chip des IMMS können Life-Science-Anwendungen schneller und kostengünstiger werden.

Lösung im Detail

RFID-Sensor-Transponder erfassen und übertragen auch Sensordaten

RFID-Technologie

Die RFID-Technologie (Radio Frequency Identification) ist eine etablierte drahtlose Technologie für die Rückverfolgung und Zugangskontrolle. Ein typisches RFID-System besteht aus mindestens einem Lesegerät und einem oder mehreren Transpondern.

Das Lesegerät kommuniziert über ein hochfrequentes (RF-) Feld mit den umgebenden Tags, und die

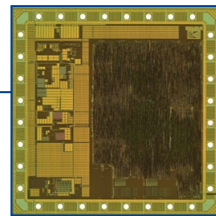


Abbildung 1:

links: RFID-Sensor-Transponder, hier mit Temperatur-, Luftfeuchte- und Drucksensorik; rechts: RFID-Transponder-Chip. Foto: IMMS.

- 49
- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Chip-
Entwicklungen:
www.imms.de

Tags antworten mit ihren eindeutigen Identifikationsnummern. Die Verbindung von RFID mit Sensoren zu RFID-Sensoren ist eine Weiterentwicklung der RFID-Technologie. Deren Kernelement ist ein RFID-Sensor-Transponder-IC – eine integrierte Schaltung, die Umweltveränderungen, wie z.B. die Umgebungstemperatur, misst und diese Informationen an das Lesegerät überträgt.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Nahfeldkommunikation (NFC)

Nahfeldkommunikation (NFC) ist ein auf RFID basierender Standard zur Übertragung von Energie und Daten über kurze Distanzen, der sich mit Smartphones (Device to Device Communication) stark verbreitet hat. Bisher wird diese Technik vor allem für kontaktlose Geldzahlungen eingesetzt, jedoch eignet sie sich sehr gut für verschiedene Sensorik- und Monitoring-Anwendungen für die persönliche Gesundheitsüberwachung. Die NFC-Technologie nutzt die gleichen ISO-Protokolle für die Kommunikation mit den Transpondern wie HF-RFID bei 13,56 MHz. Jedes NFC-fähige Smartphone funktioniert somit als RFID-Lesegerät, das den Sensortransponder mit Energie versorgt, so dass dieser dann die Sensordaten ohne eine zusätzliche Batterie auf der Tag-Seite auslesen und übertragen kann. NFC kann somit künftig als Basistechnologie Anwendungen für Privatanwender (B2C) erschließen.

Anpassungsfähige und energieeffiziente Transponder-Architekturen fehlen

Stand der Technik sind dedizierte RFID-Sensor-Transponder-ICs, bei denen die Sensoren direkt im RFID-Chip integriert sind, so dass Energieeffizienz, Funktionalität und Sensorgenauigkeit innerhalb des ICs optimiert werden können [1]. Solche ICs werden jedoch für spezifische Anwendungen ausgelegt und sind deshalb für den breiten Einsatz in mehreren Anwendungsszenarien nicht flexibel genug. Viele kommerzielle RFID-Sensoren kombinieren daher RFID-Transponder-ICs, Mikrocontroller (MCU) und Stand-Alone-Sensoren, vgl. Abbildung 2.

Die Sensoroperationen werden in solchen Fällen jedoch von der MCU gesteuert, d.h. mit der MCU als Master und RFID-IC sowie Sensoren als Slave. Der Großteil der verfügbaren Energie wird bei solchen Systemen von der MCU mit etwa 100 µA/MHz verbraucht. Deshalb können diese nicht mit energiehungrigen Sensoren gekoppelt werden, wie bei auf Photodioden und LEDs basierender optischer Sensorik, die in der Diagnostik häufig eingesetzt wird. Eine LED benötigt etwa 3 – 5 mA, um betrieben zu werden.

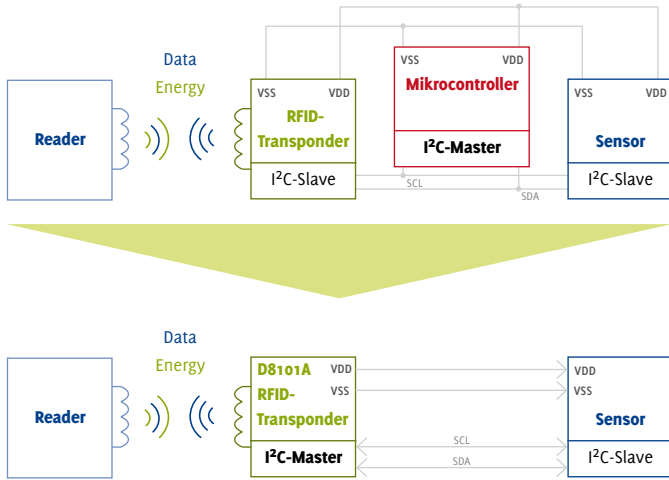


Abbildung 2:

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 D8101A mit integriertem (on-chip) Master ist kein Mikrocontroller mehr notwendig. Grafik: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Flexibler RFID-Sensor-Transponder-IC als Brücke zwischen NFC und I2C

Das IMMS hat daher einen NFC-kompatiblen HF-RFID-Transponder-IC entwickelt, der als flexible, drahtlose Brückenschnittstelle für handelsübliche digitale I2C-Sensoren dienen kann. Der Chip wird mit einem On-Chip-I2C-Master und einem konfigurierbaren Power-Management-Block geliefert und unterstützt damit verschiedene Arten von 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 [2]. Dank des On-Chip-I2C-Masterblocks ist eine MCU für die Durchführung simpler 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. Abbildung 3 zeigt die Chip-Architektur.

Mehr zu Chip-Entwicklungen: www.imms.de.

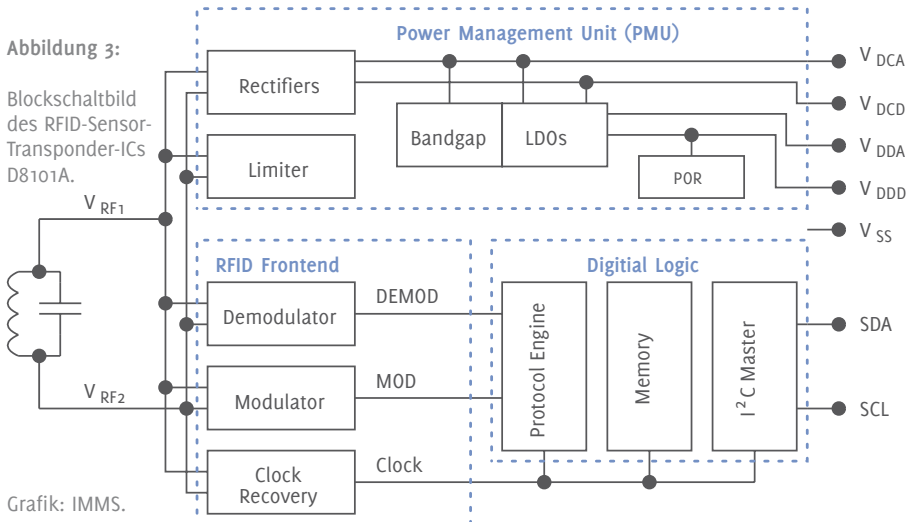


Abbildung 3:

Blockschaubild des RFID-Sensor-Transponder-ICs D8101A.

Grafik: IMMS.

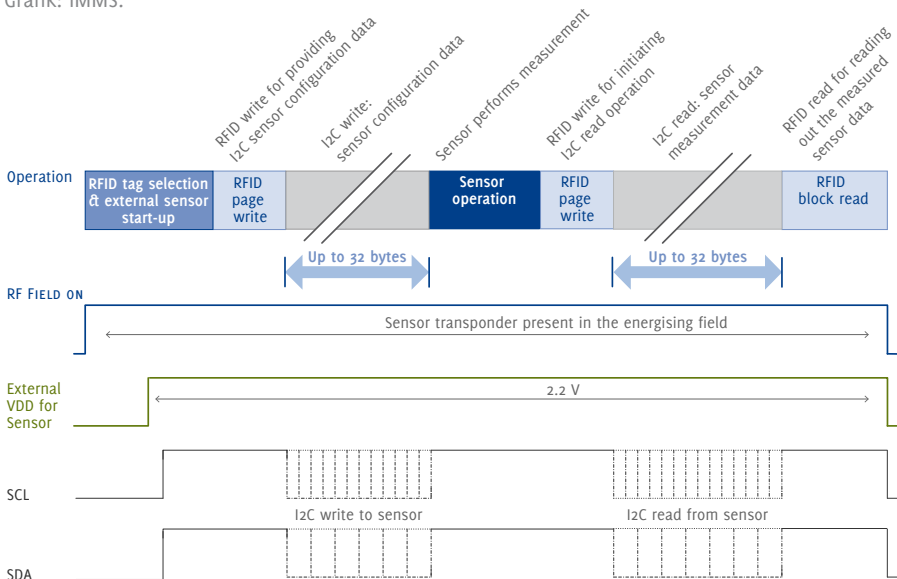
Bei der Kopplung eines I²C-Masters mit einem Slave-IC wird an jeder bidirektionalen Leitung (SDA, SCL) ein Pull-up-Widerstand benötigt. In einem konventionellen I²C-Bussystem sind die ohmschen Widerstände ungünstig für den Energieverbrauch. Um dieses Problem zu lösen, hat das IMMS auch einen Latch-basierten Ultra-Low-Power-Pull-Up-Emulator entwickelt, der vollständig I²C-Standard-kompatibel ist [3]. Der RFID-Sensor-Transponder-IC bildet mit dem Pull-Up-Emulator eine äußerst energieeffiziente Lösung für den Aufbau drahtloser personalisierter Health-Care-Anwendungen.

Powermanagement und Kommunikation mit I²C-Sensoren

Einzigartig am entwickelten Chip ist das flexible Powermanagement, mit dem eine stabile Kommunikation mit externen I²C-Sensoren erreicht wird. Der Chip nutzt einen externen Kondensator, der die Energie automatisch speichert, während sich der Transponder im Energiefeld des Lesegeräts befindet. Wenn die erforderliche Energie für den System- und Sensorbetrieb geladen wurde, wird ein internes Interrupt initiiert. Ab diesem Zeitpunkt kann der Betrieb der verbundenen I²C-Slave-Chips, wie z.B. Sensoren und auch externer Speicher, eingeleitet werden. Der Ladevorgang des externen Kondensators ist konfigurierbar, damit der unterschiedliche Stromverbrauch von kommerziellen Sensoren berücksichtigt wird. Die Konfigurationen können mit den standardmäßigen Schreibbefehlen nach ISO 14443 Typ A einfach auf den On-Chip-Speicher programmiert werden.

Abbildung 4:

Powermanagement und Energieverbrauchsfluss des RFID-Transponder-ICs mit externem I²C-Sensor. Grafik: IMMS.



- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Energieeffizienz auf www.imms.de.

Mehr Kommunikationslösungen: www.imms.de.

Die Kommunikation mit den externen I²C-Sensoren erfolgt durch Schreiben der I²C-Kommunikationsinformationen in die Befehlsregister im Transponderspeicher. Diese Informationen werden vom On-Chip-I²C-Master verwendet, um die I²C-Transaktionen mit den externen Sensoren zu initiieren. Der Chip bietet die folgende Flexibilität für einen externen I²C-Betrieb: mehrfacher Lese- und Schreibbetrieb; kombinierter Lese- und Schreibbetrieb (Schreibinformationen zum Starten des Sensorbetriebs und Lesen 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).

Überwachung diagnostischer Laboranwendungen

Der entwickelte Chip ist nicht nur für NFC-basierte Sensoranwendungen in Privathaushalten vorgesehen, sondern kann auch für diagnostische Laboranwendungen eingesetzt werden, die auch ein permanentes Monitoring von Umgebungsparametern wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck erfordern. Da der Chip vollständig zum ISO-14443-Typ-A-Protokoll kompatibel ist, kann er mit jedem kommerziell erhältlichen HF-RFID-Lesegerät verwendet werden.

Mehr zu
Life-Sciences:
www.imms.de

Ausblick: Digitale Wertschöpfung dank NFC

Ein wesentlicher Vorteil der NFC-basierten Auswertung von Sensoren im Vergleich zu konventionellen Ansätzen liegt in der Kompaktheit und Flexibilität: Mit NFC kann der Anwender die Sensoren über eine Smartphone-App konfigurieren und auslesen, die auf einfachem Weg komplexe Parameterkombinationen, Auswertungsalgorithmen und die Anbindung an das Internet ermöglicht. Anstatt auf dem Sensor LEDs oder ein Display installieren zu müssen, kann der größere Bildschirm eines Smartphones oder Tablets genutzt werden.

Dies erhöht die Nutzerfreundlichkeit und senkt gleichzeitig die Systemkosten.

Im Vergleich zu anderen Technologien wie Bluetooth oder WiFi werden für NFC-

Mehr Kommuni-
kationslösungen:
www.imms.de



Abbildung 5: Am IMMS entwickelte Smartphone-App zum Auslesen der RFID-Sensoren. Foto: IMMS.

basierte Sensoren keine Batterien oder Akkus benötigt, was insbesondere gegenüber heute verfügbaren elektronischen Wegwerftests einen erheblichen Vorteil darstellt. Der vorgestellte RFID-Chip zum Anschluss kommerzieller Sensoren bietet daher für eine Vielzahl von Point-of-Care-Anwendungen erstmals eine technologische Basis, um Sensordaten für neue Wertschöpfungsmodelle, z.B. mit individualisierten Produktempfehlungen, ressourcenschonend zu sammeln und damit den Weg für neue datengetriebene Geschäftsmodelle in unserer digitalen Welt zu ebnet.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

Kontakt:

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



Die Arbeiten im Verbundprojekt ADMONT wurden 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.

Mehr zu
ADMONT auf
www.imms.de

Eigene Veröffentlichungen:

- [1] J. TAN, M. SATHYAMURTHY, A. ROLAPP, J. GAMEZ, E. HENNIG, E. SCHÄFER, and R. SOMMER, “A Fully Passive RFID Temperature Sensor SoC with an Accuracy of $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ (3σ) from 0°C to 125°C ,” in *IEEE Journal of Radio Frequency Identification (JRFID)*, vol. 3, no. 1, pp. 35-45, Mar. 2019. DOI: 10.1109/JRFID.2019.2896145
- [2] J. TAN, M. SATHYAMURTHY, A. ROLAPP, J. GAMEZ, M. ELKHARASHI, B. SAFT, S. JÄGER, and R. SOMMER, “An RFID to I2C Bridge IC with Supply Interference Reduction for Flexible RFID Sensor Applications,” in *IEEE International Conference on RFID 2019, Phoenix (AZ), USA, Apr. 2019*. DOI: 10.1109/RFID.2019.8719257
- [3] B. SAFT und G. GLÄSER, „Schaltungsanordnung zur Bereitstellung der Ladeenergie für einen Pegelwechsel auf einem Signalbus, Verfahren zur Kalibrierung und Signalübertragungssystem“, *Offengelegte Patentanmeldung DE 10 2016 119 927 A1*.

FORSCHUNGSTHEMA CPS:

ENERGIEEFFIZIENTE UND ENERGIEAUTARKE CYBER-PHYSISCHE SYSTEME



TOP 3 FINALIST

TÜV SÜD
INNOVATIONSPREIS 2019

Für die Entwicklung des digitalen Ultraschallprüfgeräts SONAPHONE wurden SONOTEC und IMMS beim TÜV Süd Innovationspreis 2019 mit dem 3. Platz ausgezeichnet. Das mobile Prüfgerät vereint neuartige Sensorik und intuitiv bedienbare Software für die Instandhaltung 4.0. Das IMMS hat die digitalen Komponenten der Hardware und die FPGA-Firmware entwickelt. Foto: IMMS.

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.

Highlights 2019 im Bereich energieeffiziente und energieautarke cyber-physische Systeme (CPS)

SONOTEC und IMMS belegen Platz 3 beim

TÜV SÜD Innovationspreis 2019

Für die Entwicklung des digitalen Ultraschallprüfgeräts SONAPHONE wurden SONOTEC und IMMS beim TÜV Süd Innovationspreis 2019 mit dem 3. Platz ausgezeichnet. Das mobile Prüfgerät vereint neuartige Sensorik und intuitiv bedienbare Software für die Instandhaltung 4.0.

„Wir freuen uns außerordentlich über diese Auszeichnung. Sie ist ein weiterer wichtiger Baustein in der Erfolgsgeschichte unserer Ultraschallprüfgeräte für die Instandhaltung. Der Preis würdigt die erbrachte Teamleistung und trägt dazu bei, die



Mehr zu

Industrie 4.0:

www.imms.de.

Projekte im

Bereich CPS auf

www.imms.de.

Mehr zum

SONAPHONE auf

www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019



Leckageortung mit dem digitalen Ultraschallprüfgerät SONAPHONE für die Instandhaltung 4.0.

Das Gerät wird in einem Video des TÜV Süd von den Preisträgern vorgestellt.

Foto: SONOTEC GmbH.

Weiterentwicklung unserer SONAPHONE-Technologie voranzubringen“, sagte Michael Münch, Geschäftsführer der SONOTEC GmbH.

Auszeichnung

für digitales und mobiles Ultraschallprüfgerät SONAPHONE zur Instandhaltung 4.0

Die Hallenser Ultraschallspezialisten entwickeln und vertreiben bereits seit über 25 Jahren Ultraschallprüfgeräte für die Instandhaltung. Diese werden von Instandhaltern unter anderem für die Lecksuche an Druckluftanlagen, Condition-Monitoring-Aufgaben oder die Inspektion von elektrischen Anlagen eingesetzt. Mit dem neuen digitalen Ultraschallprüfgerät SONAPHONE revolutioniert SONOTEC nun die Instandhaltung mit Ultraschall und bringt das erste Android-basierte Ultraschallprüfgerät auf den Markt. Die innovative Technik beruht auf einem modularen technologischen Konzept, welches neue breitbandige Sensoren, elektronische Komponenten, mathematische Algorithmen, neue Messtechnologien und Softwareanwendungen umfasst. Der Vorteil: Schäden, beispielsweise an Wälz- und Kugellagern, können mit dem mobilen Handgerät bereits vor ihrer Entstehung erkannt und die entsprechenden Komponenten ausgetauscht werden. Weiterhin wird mit dem mobilen Prüfgerät erstmals die automatische Bewertung von Druckluftleckagen möglich. Die speziell für die Instandhaltung entwickelten Apps begleiten den Prüfer während des gesamten Prüfungsvorganges und garantieren vergleichbare Berichte. Fehleranfällige Papieraufzeichnungen können durch Einsatz der Gerätetechnik vermieden werden.

SONOTEC und IMMS entwickelten SONAPHONE Hand in Hand

„Den hohen Innovationsgrad unserer SONAPHONE-Technologie konnten wir nur durch die enge Zusammenarbeit mit dem IMMS sicherstellen“, so Michael Münch. Realisierte das IMMS beispielsweise die digitalen Komponenten der Hardware sowie die FPGA-Firmware, konnte SONOTEC parallel an der Entwicklung der breitbandigen Luft- und Körperschallsensoren und am Design arbeiten sowie die Apps für das Gerät ent-

Publikationen und Videos zum SONAPHONE:
www.imms.de

Technische Daten und Produktinfos zum SONAPHONE:
www.sonotec.de

wickeln. „Das SONAPHONE ist der Beweis, dass die Zusammenarbeit zwischen KMU und wissenschaftlichen Einrichtungen ein hervorragender Motor für Innovationen ist“, so Prof. Dr. Ralf Sommer, wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS.

Über den TÜV Süd Innovationspreis

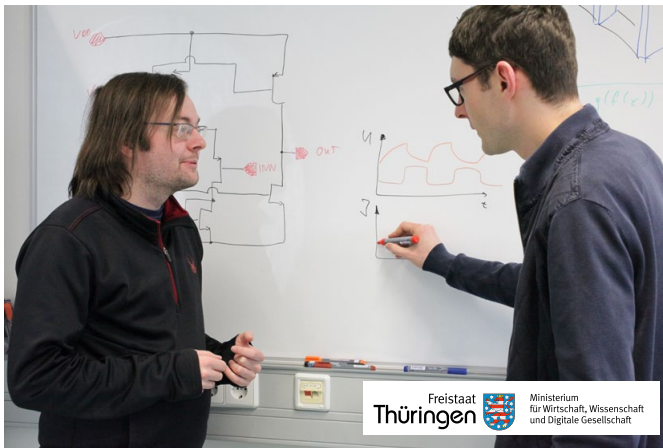
Bereits zum dritten Mal wurden mit dem TÜV Süd Innovationspreis Kooperationen zwischen Unternehmen und der Wissenschaft prämiert. Der Innovationspreis ist für alle Quer- und Um-die-Ecke-Denker in den KMU in Deutschland gedacht, die gemeinsam mit einer Universität, (Fach-) Hochschule oder Forschungseinrichtung eine besonders innovative Idee, ein Produkt, eine Verfahrensinnovation oder eine technologieorientierte Dienstleistung entwickelt haben. Der Preis ist mit insgesamt 50.000 Euro für die Finalisten dotiert.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Forscherguppe „IntelligEnt“* gestartet: Künstliche Intelligenz und Machine Learning für den Entwurf von Mikroelektronik

Das IMMS und das Fachgebiet Softwaretechnik für sicherheitskritische Systeme der Fakultät für Informatik und Automatisierung an der TU Ilmenau arbeiten seit Januar 2019 gemeinsam in der zweijährigen Thüringer Forschergruppe „IntelligEnt – Künstliche Intelligenz und Machine Learning für den Entwurf und die Verifikation komplexer Systeme“ an Assistenzsystemen für Chip-Designer, um Entwurfsmethoden integrierter Analog/Mixed-Signal-Systeme zu verbessern. Das Projekt wird begleitet durch einen Beirat mit Vertretern aus X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Melexis GmbH, Micro-Sensys GmbH, Ilmsens GmbH und CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH.

Mehr zu
IntelligEnt auf
www.imms.de.



IMMS und TU Ilmenau arbeiten seit Januar 2019 in der Thüringer Forschergruppe „IntelligEnt“ mit Methoden künstlicher Intelligenz und aus dem Machine Learning an Assistenzsystemen für den Entwurf von Mikroelektronik.

Foto: IMMS.

Das Erfahrungswissen von Design-Ingenieuren prägt in weiten Teilen den Entwurf und die Verifikation von mikroelektronischen und mikroelektromechanischen Systemen (MEMS). Die Entwicklung solcher Systeme wird seit jeher wissenschaftlich bearbeitet und durch immer anspruchsvollere und automatisierte Entwurfsmethoden optimiert. Erfahrungswissen lässt sich allerdings oft nicht formal abbilden und damit für ein automatisiertes Entwerfen nutzen, wie das z.B. für rein digitale Systeme möglich ist. Das führt dazu, dass in komplexen, analogen oder gemischt analog/digitalen Systemen suboptimale Lösungen oder Unstimmigkeiten, wie ungünstige Anordnungen im Layout oder falsche Testlimits, erst spät erkannt werden – oft erst im Zusammenspiel der Komponenten. Die Folgen sind zusätzlicher Aufwand und hohe Kosten im Entwurf und in der Validierung der Systeme nach der Fertigung.

Ziel sind signifikante Kosten- und Risikoreduktionen im Systementwurf durch maschinelles Lernen

In der Forschergruppe „IntelligEnt“ arbeiten daher IMMS und TU Ilmenau an anwendungsorientierten Konzepten für Machine Learning im Mikroelektronik-Entwurf, die an vorhandene Methoden und Werkzeuge angebunden werden sollen. Ziel ist es, das immense Potential des maschinellen Lernens für fachliche und wissenschaftliche Weiterentwicklungen zu nutzen und damit signifikante Kosten- und Risikoreduktionen im Systementwurf zu erreichen.

Möglich wird das, indem die genannten Unstimmigkeiten zeitnah erkannt und optimiert werden. In vielen Bereichen konnten Methoden des maschinellen Lernens den Menschen übertreffen, wie z.B. in der Mustererkennung. Integriert in einen automatisierten Entwurfs- und Charakterisierungsprozess kann sie Strukturen erkennen und damit Daten reduzieren, Anomalien aufspüren und bestehende Lösungen optimieren. Dabei werden in IntelligEnt die Algorithmen des maschinellen Lernens als Werkzeug verstanden und eingesetzt, wie z.B. Regression und Klassifikation mit Deep-Learning-Methoden oder Ausreißer-Detektion mit Self- und Semisupervised Learning.

Die Arbeiten in IntelligEnt setzen an kritischen Schritten im Systementwurf an

Modellierung – Modelle für Verhaltensprognosen erstellen: Die Erstellung von Modellen für Systemkomponenten bzw. IP ist entscheidend für die Entwurfsqualität. Die

Mehr zu
IntelligEnt auf
www.imms.de.

Jahresbericht

Integration von Eigenschaften, wie z.B. Stromaufnahme und Operationsregionen, in System-Level-Modelle soll mittels eines lernenden Systems automatisiert werden.

Entwurf von Analog-/Mixed-Signal-Schaltungen – Funktionen realisieren: Die Struktur bzw. Topologie bestimmt die Performance einer gemischt analog/digitalen Schaltung. Um diese rechnergestützt zu optimieren, wird ein Verfahren zur Strukturerkennung und -anpassung entwickelt.

Layout von Analog-/Mixed-Signal-Schaltungen – den Bauplan für den Chiphersteller entwerfen: Formal korrekte Layouts können Unstimmigkeiten enthalten, wie z.B. Substratkopplung, Feldtransistoren und Mismatch. Ausgehend von bestehenden Entwürfen soll ein lernendes System neue Layouts bewerten und potentielle Fehler erkennen.

Simulation und Verifikation – vor der Fertigung alle Schritte und Funktionen prüfen: Auf allen genannten Stufen wird das System schrittweise in immer größeren Funktionsgruppen geprüft, bevor der Chip gefertigt wird. Für die dafür durchgeführten Simulationen werden die mit den Methoden zum Machine Learning erweiterten Modelle genutzt.

Test und Charakterisierung – gefertigte Chips auf Herz und Nieren prüfen: Die Optimierung des Testablaufes und die Auswahl der kritischen Tests für Mixed-Signal-Systeme und MEMS ist bisher Handarbeit. Das führt u.a. dazu, dass redundante Tests ausgeführt werden. Machine-Learning-Algorithmen sind in der Lage, Abhängigkeiten sichtbar und damit nutzbar zu machen. Das Ziel ist eine Plattform für die Adaption des Testplans und die Extraktion von definierten Fehlerbildern.

*Mehr zu
IntelligEnt auf
www.imms.de*

Ergebnisse des StadtLärm*-Projekts Teil der MDR-Wissen-Lärmstudie – IMMS stellt Sensoren und Datendrehscheibe bereit

Im Juni 2019 hatte MDR Wissen Menschen in Mitteldeutschland dazu aufgerufen, Lärmquellen für die MDR-Wissen-Lärmstudie zu melden. Auf dieser Basis ging der MDR den Lärm-Problemen mit wissenschaftlicher Unterstützung auf den Grund und suchte nach Lösungen. Auch die Forscher des 2018 abgeschlossenen Projekts StadtLärm trugen mit dem entwickelten Lärm-Monitoring-System zur Studie bei. Denn vor allem Stadtbewohner sind zahlreichen, stark schwankenden Lärmbelastungen durch Groß- und Sportveranstaltungen, Baumaßnahmen oder einzelne Verkehrsteilnehmer ausgesetzt.

*StadtLärm auf
www.imms.de*

Erster Feldtest in Jena

Im Projekt „StadtLärm“ wurde ein System entwickelt und seit dem Frühjahr 2018 in der Stadt Jena in einem Feldtest erprobt. Mit dem System lassen sich schallbezogene, [Jahresbericht](#) © IMMS 2019

Jahresbericht

© IMMS 2019



Arbeiten am IMMS an Komponenten zur Erfassung von Lärm, die auch für die Lärmstudie von MDR Wissen genutzt wurden. Foto: IMMS.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

61

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

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. Die Messdaten können zu einem bestimmten Ereignis, wie z.B. zu einem angemeldeten Konzert in der Innenstadt, zugeordnet werden.

Lärmstudie in Mitteldeutschland

Ziel der MDR-Lärmstudie ist es, eine Lärmkarte für Mitteldeutschland zu erstellen. Der MDR hat sich bereits einiger der von Betroffenen gemeldeten Lärmquellen in Mitteldeutschland für Untersuchungen angenommen, darunter die B244 in Wernigerode und der Sachsenring in Hohenstein-Ernstthal. An den Orten wurden die in StadtLärm entwickelten Monitoring-Systeme installiert, Messungen über jeweils mehrere Wochen vorgenommen und die Ergebnisse untersucht mit der Hilfe des Fraunhofer IDMT, das das StadtLärm-Projekt einst initiiert und das IMMS für die Konzeptionierung der Systemarchitektur und zur Realisierung der grundlegenden Software der Lärm-Sensoren ins Boot geholt hatte. Das IMMS hat für die Lärmstudie in Mitteldeutschland die Hardware für die verschiedenen Installationsorte bereitgestellt, Einweisungen vorgenommen, die Auf- und Abbauten unterstützt sowie Betrieb und Datenerfassung sichergestellt.

*Dokumentation
in der MDR-
Mediathek*

Die StadtLärm-Lösung für neuartiges Lärm-Monitoring

Städtische Behörden können mit dem System 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 rückbli-

*StadtLärm auf
www.imms.de*

Jahresbericht

© IMMS 2019

ckend 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 realisiert. Datenlieferant für das System ist eine Plattform mit Lärm-Sensoren, die die Bischoff Elektronik GmbH entwickelt hat, und mit einer zentralen „Datendreh-scheibe“ in Gestalt eines sog. MQTT-Brokers. Dieser bildet die Schnittstelle zu algorithmischen Auswertungen des Fraunhofer IDMT und zur StadtLärm-Anwendung, die der Partner Software-Service John erarbeitet hat.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

Beitrag des IMMS – die Datendreh-scheibe

Das IMMS hat die Software-Basisplattform der Lärm-Sensoren inkl. Audiodatenerfas-sung realisiert und die Audiodatenvorverarbeitung des Fraunhofer IDMT integriert. Das IMMS hat die Kommunikation über den Broker gelöst und die Kommunikations-architektur insgesamt gestaltet; d.h. die Kommunikationsstrukturen und Nachrich-ten definiert, den Broker konfiguriert und betreut sowie eine zentrale Administrati-onskomponente für das Gesamtsystem geschaffen. Darüber hat das IMMS variable Umweltsensorik integriert, um den Nutzen der Plattform zu erhöhen.

Mehr zu
Kommunika-
tionslösungen:
www.imms.de.

Automatisierte KSS-Kontrolle* zum Nachrüsten

Kühlschmierstoffe (KSS) werden in zahlreichen Fertigungsprozessen in der Metall-bearbeitung eingesetzt. Neben dem Kühlen unterstützen diese Emulsionen den Prozess durch verminderte Reibung, durch Korrosionsschutz und einen Beitrag zu höherer Maßgenauigkeit sowie Oberflächenqualität. KSS sind jedoch durch Pilz- oder Bakterienbefall biologisch anfällig und müssen daher kontinuierlich überwacht und durch Zugabe von Additiven aufrechterhalten werden. Sie wirken sich maßgeblich auf den Umwelt- und Gesundheitsschutz in Unternehmen aus und unterliegen strengen gesetzlichen Regularien.

KSS-Kontrolle auf
www.imms.de

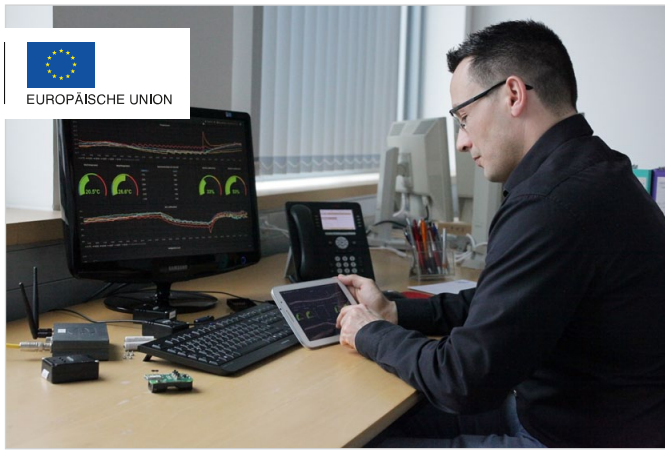
Nachrüstbare Lösung automatisiert vorgegebene KSS-Kontrollen und bietet neue Funktionen

Im Verbundprojekt KSS-Kontrolle wird seit 2019 ein System entwickelt, das vollauto-matisch und kontinuierlich Prozess- und Umweltdaten in der Zerspanung erfasst. Es ermöglicht, Korrelationen zwischen dem Zustand des eingesetzten Kühlschmierstof-fes und der gefertigten Bauteilqualität einerseits sowie mit Umgebungsbedingungen andererseits zu untersuchen. Mit dem neuen System lassen sich KSS auch durch kleine und mittlere Unternehmen, die meist dezentrale und maschinengebundene

Jahresbericht
© IMMS 2019

Das IMMS trägt zu einem Nachrüst-System für das automatisierte Monitoring von Kühlschmierstoffen Sensorik, Kommunikationslösungen und eine projektierbare Software-Infrastruktur bei.

Foto: IMMS.



KSS-Einzerversorgungen nutzen, in einer Qualität überwachen, wie sie bisher nur Großbetriebe mit KSS-Zentralanlagen wirtschaftlich realisieren können. Personal- und zeitintensive KSS-Kontrollen von Hand werden automatisiert und liefern in kürzeren Messintervallen digitale Daten. Diese tragen dazu bei, die Prozessstabilität zu erhöhen, den Einsatz der KSS-Additive in der Fertigung zu reduzieren und die Einhaltung gesetzlicher Richtlinien zum Gesundheits- und Umweltschutz zu erleichtern.

IMMS trägt Sensorik für Klimadaten, Übertragung, Verarbeitung, Cloud und Visualisierung bei

Das IMMS wird drahtlose Umweltsensorik in das System integrieren, um damit einen unmittelbaren Einflussfaktor auf Bauteilqualitäten zu erfassen und zudem klimabedingte Hinweise zur Verschlechterung der KSS liefern zu können. Darüber hinaus aggregiert das IMMS die Daten aller Sensorsysteme vor Ort durch einen Industrie-PC und überträgt sie in eine Cloud-Plattform. Diese wird mit zentraler Datenhaltung und Auswertung mittels Industrie-4.0-konformer Technologien umgesetzt. Für Datenhaltung, -verarbeitung und -visualisierung werden möglichst verfügbare Open-Source-Lösungen zum Einsatz kommen. Um das Gesamtsystem projektierbar zu machen, konzipiert und realisiert das IMMS auch einen Ansatz, mit dem die gesamte Software-Infrastruktur für weitere Installationen ausgerollt und dabei manuelle Konfigurationsaufwände minimiert werden können.

KSS-Kontrolle auf
www.imms.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Voruntersuchungen
mit verschiedenen
Bodenfeuchte-Sensoren
für die Messung des
Mikroklimas sowie die
Datenerhebung zum
Monitoring von Dürre-
stress. Foto: IMMS.

Start von EXPRESS* – Experimentierfeld zur Digitalisierung in der Landwirtschaft

Digitalisierung wird auch in der Landwirtschaft immer wichtiger, beispielsweise um die Bewässerung von Nutzpflanzen in langen Trockenperioden zu optimieren. Vielen Betrieben fehlen jedoch die Voraussetzungen, um für sie geeignete und bezahlbare Systeme zu identifizieren, deren Möglichkeiten zu erfassen und einen Nutzen zu generieren.

EXPRESS auf
www.imms.de

Regionales Experimentierfeld EXPRESS

Im 2019 gestarteten mitteldeutschen Experimentierfeld EXPRESS soll daher in landwirtschaftlichen Betrieben die Grundlage für das Zusammenspiel bestehender technischer Infrastrukturen mit neuen Technologien und Methoden erprobt und bewertet werden.

EXPRESS richtet sich vor allem an den Pflanzenbau mit besonderem Fokus auf Sonderkulturen. Digitale Technologien sollen dort die Ressourceneffizienz steigern, eine umweltschonende Produktion unterstützen und die Biodiversität langfristig bewahren. Innovative Technologien wie Sensorik, Blockchain, Virtual Reality, Feldroboter und 5G-Anwendungen sollen neue Wertschöpfungsketten mitgestalten und Produktionsprozesse optimieren.

In EXPRESS wird in Zusammenarbeit mit Landwirten anhand von fünf Schwerpunkten potentiell geeignete Technik erprobt und der Branche vorgestellt:

- skalenübergreifendes Wasserstress-Monitoring zur Bewässerungsoptimierung
- automatische Überwachung von abiotischen Schlüsselparametern, z.B. durch die Messung des Mikroklimas im Bestand
- Food Tracing via Blockchain

- Augmented/Virtual/Mixed Reality in der Landwirtschaft
- Datenintegration und Management stark heterogener Datenquellen aus diversen Sensorsystemen

IMMS unterstützt Monitoring von Mikroklima und Trockenstress

Das IMMS verantwortet die Datenerhebung und kümmert sich um die Bestimmung des Mikroklimas sowie weiterer Parameter für das Monitoring von Trockenstress. Dabei sollen Agrarbetrieben unterschiedliche Systemlösungskonzepte für diese zwei Anwendungsfälle vorgestellt werden. Dazu erprobt das IMMS verschiedene am Markt verfügbare Sensorsysteme auf ihre Eignung für die beiden Schwerpunkte. Dazu gehört auch eine Evaluation von RFID-Sensorik. Darüber hinaus stattet das IMMS die Experimentierfelder mit geeigneter Sensorik aus, überwacht deren Betrieb und die Übertragung der Daten per 5G an die S2DES-Cloud.

IMMS entwickelt kostengünstige autarke Sensorsysteme für die Praxis

Im Fokus der IMMS-Entwicklungen stehen dabei praxistaugliche autarke Sensorsysteme. Diese sind möglichst modular aufgebaut, um sie an die jeweiligen Randbedingungen in einem landwirtschaftlichen Betrieb anpassen und dort für weitere Analysen und Optimierungen nutzen zu können. Kostengünstige Systeme zu entwickeln, die alle erforderlichen Größen hinreichend genau erfassen und gleichzeitig mit möglichst wenigen Messpunkten verwertbare Aussagen mit einem hohen praktischen Nutzwert ermöglichen, ist dabei die Herausforderung.

EXPRESS auf
www.imms.de

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

Aufbau von Demonstratoren für den Know-how-Transfer

Das IMMS zeigt in seiner Rolle als „Modellfabrik Migration“ im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“ (M4.0) kleinen und mittleren Unternehmen anhand von Demonstratoren und Umsetzungsprojekten, wie sie schrittweise Digitalisierungslösungen einführen können.

Details zu
Mittelstand 4.0:
www.imms.de

2019 hat das IMMS dazu im M4.0-Umsetzungsprojekt „Retrofit“ mit der Firma Batix einen Demonstrator realisiert. Er veranschaulicht, wie einfach sich eine herkömmliche Bohrmaschine mit verschiedenen Sensoren nachrüsten lässt. Der Demonstrator zeigt exemplarisch, wie Bestandsmaschinen für die Digitalisierung fit gemacht werden können. Dabei kommen KI-Methoden zum Einsatz, die die beim Bohrvorgang aufgenommenen Daten verarbeiten und auswerten. Im Ergebnis kön-

Jahresbericht
© IMMS 2019

nen die Daten just-in-time visualisiert werden. Mit einer solchen Nachrüstung kann eine Maschine in die vorhandenen IT-Systeme integriert werden.

Im M4.0-Umsetzungsprojekt „**Sensorik-Koffer 2**“ wurde 2019 ein weiterer mobiler Demonstrator fertiggestellt. Er beinhaltet Sensoren mit kommerziell erhältlichen SmartMesh®-IP-Modulen, die für industrielle Einsatzzwecke geeignet sind. Diese Systeme können automatisch ein vollvernetztes drahtloses Sensornetz mit routingfähigen Knoten ausbilden. Der Koffer ist derzeit mit Umwelt- und Schwingungssensoren ausgerüstet, um z.B. Nachrüstlösungen an Maschinen und Anlagen sowie in Werkhallen zu demonstrieren. Das System ist jederzeit mit anderer Sensorik erweiterbar. Der Sensorik-Koffer 2 steht für Demonstrationen im Haus, auf Messen und Veranstaltungen sowie für Testinstallationen bei interessierten Unternehmen zur Verfügung.

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

2019 haben Experten des IMMS in ihrer Rolle als „Modellfabrik Migration“ des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau (M4.0) vier Workshops, 13 Stammtische und Infotage sowie sechs Vorträge auf Veranstaltungen Dritter realisiert. Mit diesen vom BMWi geförderten kostenfreien Angeboten für KMU wurden rund 540 Unternehmensvertreter aus der Region und weitere Interessenten erreicht. Über das ganze Jahr hat das IMMS außerdem 29 Informationsgespräche mit KMU geführt, aus denen einige Vorhaben zur Zusammenarbeit mit dem Institut und mit anderen Unternehmen entstanden.

Mittelstand-4.0-
Termine auf
www.imms.de

2019 wurde auch zu den M4.0-Stammtischen das Thema **Künstliche Intelligenz** verstärkt in den Vordergrund gerückt. In den Veranstaltungen gaben verschiedene externe Referenten aus Forschung und Industrie Einblicke zum Einsatz künstlicher Intelligenz im Unternehmen, im Bereich der Akustik oder zu KI bei der Maschinenüberwachung. Es ist geplant, das Format „KI-Trainer für Mittelstand 4.0“ auch in Ilmenau und am IMMS anzubieten. Der Schwerpunkt wird dabei auf digital vernetzte Produktions- und Arbeitsprozesse in Regionen mit kleinteiliger Wirtschaftsstruktur gelegt.

Die bereits 2017 am IMMS etablierte M4.0-**Workshop-Reihe „Sensorik 4.0“** wurde 2019 mit Themen zu Linux-basierten, echtzeitfähigen Sensorsystemen und zum Thema OPC UA fortgesetzt. 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



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.

lassen. In Vorträgen mit Praxisbeispielen wird aufgezeigt, wie sich Maschinen und Anlagen durch 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 Teilnehmerinnen und 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.

Mit dem Workshop-Angebot „**Industrie-4.0-konforme Kommunikation mit OPC UA**“ bot das IMMS auch 2019 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 „RFID in der Produktion“, „Testautomation und Digitaler Zwilling“ sowie „Digitale Tools für die effektive Arbeitsorganisation“, zu denen zahlreiche externe Referenten Fachbeiträge präsentierten und mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern diskutierten.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mittelstand-
Digital

67

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Mittelstand-4.0-

Termine auf

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019



Dr. Tino Hutschenreuther (r) stellt Reinhard Bütikofer Demonstratoren am IMMS vor.

Foto: „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“.

Reinhard Bütikofer zu Besuch am IMMS im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“*

Am 13.12.2019 besuchten Reinhard Bütikofer, Mitglied der Grünen im Europäischen Parlament, und Stella Versimer, Mitarbeiterin seines im August gegründeten Thüringer Regionalbüros Erfurt, die beiden Ilmenauer Akteure im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“, die TU Ilmenau und das IMMS, um sich zu Thüringer Themen und Kooperationsstrukturen aus Sicht des Kompetenzzentrums zu informieren.

Kompetenzzentrum unterstützt KMU in Thüringen bei Digitalisierung und Vernetzung

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Kompetenzzentrum unter der Konsortialführung der TU Ilmenau liefert mit fünf als sogenannten Modellfabriken agierenden Partnern in praxisnahen Demonstrations- und Umsetzungsprojekten Digitalisierung zum Anfassen. Der Besuch gewährte Einblicke in die praktische Arbeit des Kompetenzzentrums anhand erfolgreicher Umsetzungsprojekte und Beispielaufbauten, die Wettbewerbsvorteile durch die Einführung von Digitalisierungs- und Industrie-4.0-Lösungen sowie die Flexibilisierung und Optimierung aller Wertschöpfungs- und Geschäftsprozesse von der Produktentwicklung bis zur Fertigung in Wertschöpfungsnetzwerken aufzeigen.

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

Praktische Beispiele am IMMS zur digitalen Transformation und für Energie- und Ressourceneffizienz

Die am IMMS präsentierten Demonstratoren zum automatisierten und energieeffizienten Produktionsanlauf nach Stillstandzeiten und ressourcenschonende Lösungen wie die Wasser-Desinfektionsanlage mit UV-Sensorik kommentierte Bütikofer: „Die Unternehmen müssen künftig viel stärker als bisher Umweltthemen als wichtigen

Faktor in puncto Wettbewerbsfähigkeit in den Fokus rücken. Die hier erarbeiteten digitalen Technologien weisen den Weg, wie man durch eingesparte Ressourcen die Umwelt schont und gleichzeitig Kosten einspart.“

Oberbürgermeister Dr. Daniel Schultheiß und Bürgermeisterin Beate Misch zu Besuch am IMMS

Am 2. Mai 2019 kamen Ilmenaus Oberbürgermeister Dr. Daniel Schultheiß und die Ilmenauer Bürgermeisterin Beate Misch gemeinsam mit Sebastian Poppner, dem Beauftragten für Wirtschaftsförderung, zu Besuch ans IMMS in Ilmenau.

Führungen durch verschiedene Labore machten anhand der gezeigten Prototypen und der mit unterschiedlichen Partnern realisierten Anwendungen deutlich, wie das IMMS kleine und mittlere Unternehmen der Region als Forschungs- und Entwicklungspartner unterstützt und dabei die analoge Welt durch Digitalisierungslösungen mit der IT verbindet.

Die Gäste konnten Prototypen für datenintensive industrielle Echtzeitanwendungen besichtigen, die derzeit im Labor für Time Sensitive Networking (TSN) untersucht werden. Außerdem wurden verschiedene Lösungen zu Sensorik mit Cloud-Anbindung, zur Industrieautomation und zu drahtlosen Sensornetzwerken für die Verkehrstechnik präsentiert.

In einem der Halbleiter-Testlabore gab es Einblicke in messtechnische Arbeiten, die für Entwicklungen von mikroelektronischen und mikromechanischen Chips notwendig sind. Zum Schluss ging es ins Labor für Hochpräzisionsantriebe. Dort wurde Antriebstechnik gezeigt, die das IMMS für Positioniersysteme entwickelt hat, mit denen sich Halbleiter- u. Life-Science-Produkte nanometergenau herstellen lassen.



Dr. Daniel Schultheiß, Sebastian Poppner, Beate Misch und Prof. Dr. Ralf Sommer, wiss. Geschäftsführer des IMMS, (v.l.n.r.) in einem der Testlabore für die am IMMS entwickelten mikroelektronischen und mikroelektromechanischen Systeme. Foto: IMMS.



Ko²SiBus – Kontinuierliche und kostengünstige Signalanalyse für Ethernet-basierte Bus-Systeme

Das IMMS hat Lösungen erarbeitet, mit denen sich Datenleitungen in laufenden Industrieanlagen kostengünstig überwachen lassen. Ein Demonstrator bildet das gesamte System mit der kompletten Analyseketten ab: Ethernet-Signale lassen sich damit gezielt manipulieren, um künstlich Kabelstörungen zu erzeugen und deren Einflüsse am Demonstrator zu zeigen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

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. Was dabei aber mangels geeigneter Verfahren noch nicht kontinuierlich überwacht wird, sind die drahtgebundenen Ethernet-basierten Kommunikationsleitungen für den schnellen und sicheren Datenaustausch und für die Vernetzung dieser Industrieanlagen. Diese physischen Verbindungen werden nur während der Inbetriebnahme oder eines Wartungszyklus überprüft, wenn die Maschine dafür außer Betrieb genommen wird. Kabel in Produktionsbereichen können aber durch Wechselbiegungen stark beansprucht werden, wenn sie z.B. über Schleppbrücken geführt werden. Das kann Übertragungseigenschaften schleichend verschlechtern und bis zum Kabelbruch führen. Solche Veränderungen der Kabeleigenschaften werden mit aktuellen Methoden bisher noch nicht überwacht. Damit werden die Kabel zu einer zusätzlichen Schwachstelle im System.

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

*Mehr zu
Ko²SiBus auf
www.imms.de*

Jahresbericht

© IMMS 2019

Lösung zum kontinuierlichen Monitoring von Kommunikationsleitungen für eine störungsfreie Produktion

Um die damit verbundenen Ausfallzeiten und Wartungsaufwände zu minimieren, wurden im Projekt Ko²SiBus Lösungen konzipiert, entwickelt und evaluiert, mit denen künftig die Signalqualität der Ethernet-Kabel einer Anlage während des regulären Betriebs kontinuierlich und kostengünstig überprüft werden kann, ohne in die eigentliche Kommunikation einzugreifen. Die Methoden wurden in Form eines Prototyps implementiert und die Tauglichkeit in Laborversuchen nachgewiesen.

Damit sollen sich nicht nur Wartungen besser planen lassen. Mit dem neuen Konzept werden die Monitoring-Daten auch über eine einheitliche und offene Schnittstelle weitergegeben, so dass eine Integration in kundenspezifische Monitoring-Lösungen einfach möglich ist, z.B. als Erweiterung für Switches oder als Feature direkt in das Endgerät.

IMMS realisierte Schaltungskonzepte und baute einen Demonstrator auf

Das IMMS hat für die Lösung zum kontinuierlichen Monitoring von Kommunikationsleitungen ein eingebettetes System entworfen, hierfür passende Schaltungskonzepte erarbeitet und ein System realisiert, das physikalische Signalparameter mittels integrierter analoger und digitaler Bauteile verfolgt und Abweichungen an eine Überwachungszentrale meldet. Die Funktionalität wurde anhand eines Demonstrators erprobt, in dessen Aufbau sich das IMMS maßgeblich eingebracht hat. Er bildet das gesamte System mit der kompletten Analyseketten von der Messung der Signale bis zur Darstellung der Analyse und Integrationsmöglichkeit ab. Ethernet-Signale lassen sich damit auch gezielt manipulieren, beispielsweise um künstlich Kabelstörungen zu simulieren bzw. deren Einflüsse am Demonstrator zu zeigen.

Lösung im Detail

Vorarbeiten für den Schaltungsentwurf des IMMS

Das IMMS hat mit den Partnern mögliche Prüfverfahren für verschiedene Ethernet-Standards verglichen und analysiert. Dabei wurde der 100BASE-TX-Standard für einen Großteil der heute installierten Anwendungen identifiziert, vgl. Abbildung 1, und für die weiteren Arbeiten in den Fokus gerückt, um zunächst Lösungen für die meistverwendeten Ethernet-Installationen anbieten zu können. Die Hochschule Offenburg lieferte Ergebnisse zu erforderlichen Kommunikationsschnittstellen, über die die Analysedaten an höhere Systeme weitergegeben werden, optimierte und implemen-

Mehr zu Signalverarbeitung:

www.imms.de

Einschätzung der TURCK Electronics GmbH zum Projekt.

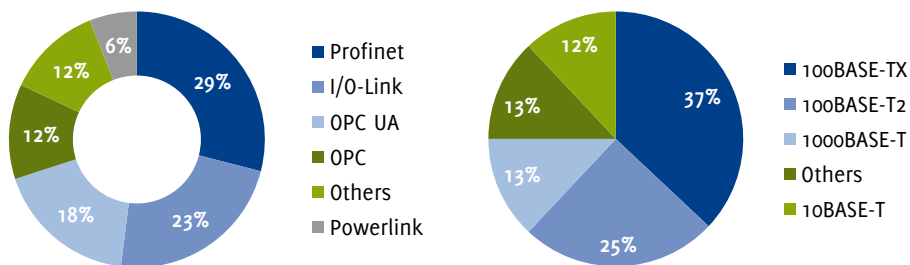


Abbildung 1: Genutzte Protokolle und Ethernet-Modi im Industriebereich. Quelle: Umfrage FH Offenburg.

tierte Standardprotokolle für kleine, leistungsarme Mikrocontroller und setzte die entsprechenden Steuerungen der Analysefunktionen um. Für das in Ko²SiBus entwickelte System wurde das Simple Network Management Protocol (SNMP) sowie das OPC Unified Architecture Protocol (OPC UA) genutzt.

Schaltung des IMMS für Messmethoden auf Basis von Unterabtastung

Ersatzschaltungen für kurze Leitungen in Reihe bilden die Schaltung für ein Kabel

Betrachtet man ein kurzes Leitungsstück, bildet die Leitung eine Induktivität L , die in Serie zum ohmschen Widerstand R liegt. Die nebeneinanderliegenden Leiter und der Rückleiter bilden eine Kapazität C . Schließlich gibt es zwischen beiden Leitern noch einen sehr hohen Isolationswiderstand G . Das kurze Leitungsstück lässt sich näherungsweise durch eine Ersatzschaltung aus diesen vier Elementen beschreiben. Ein Modell für ein Kabel setzt sich dann aus vielen dieser kleinen Schaltungen zusammen, die hintereinandergeschaltet sind. Aus dem diskretisiertem Ersatzschaltbild wird deutlich, dass es sich bei einem Kabel um Kettenschaltungen von Tiefpässen zweiter Ordnung handelt.

Verschiedene Ethernet-Kategorien – verschiedene Übertragungseigenschaften

Im Standard ISO/IEC 11801 sind die Kategorien (Cat) von paarweise verdrehten Kabeln definiert. Die einzelnen Kategorien spezifizieren bestimmte Übertragungseigenschaften der Datenkabel, wie z.B. die Impedanz, die Bandbreite und die Dämpfung, die sich aus den primären Leitungsparametern (L , R , C , G) ergeben. Die charakteristische Impedanz im 100BASE-TX-Standard ist für alle Kabel auf 100Ω festgelegt. Kabel nach Kategorie Cat5, bzw. Cat5e müssen eine Übertragungsbandbreite von 100 MHz, Cat6-Kabel 250 MHz aufweisen.

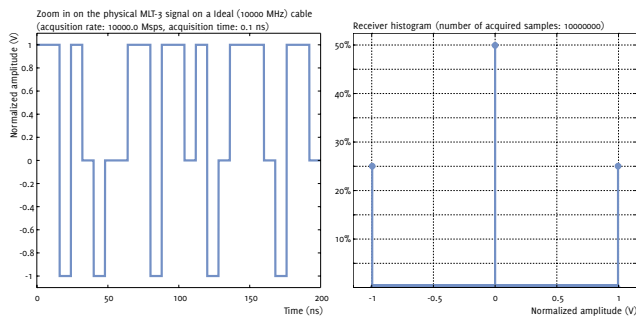


Abbildung 2: Ideales MLT3-Signal und Histogramm. Die linke Abbildung zeigt einen Signalverlauf eines idealen MLT3-Signals. Das daraus resultierende Histogramm in der rechten Abbildung spiegelt die Verteilung der Symbole wider, die sich nur über die 3 verfügbaren Symbole erstreckt. Quelle: IMMS.

Im Fast-Ethernet 100BASE-TX-Standard sind eine Reihe von Codierungsstufen vorgesehen, die einer starken Signalabstrahlung und einem Baseline Wander, also einer Drift des Gleichspannungspegels, entgegenwirken sowie eine Takt-Rückgewinnung ermöglichen sollen. Der mehrstufige Codierungsprozess enthält eine 4-Bit-zu-5-Bit-Codierung (4B5B), einen Scrambler sowie Non-Return-to-Zero-Inverted- (NRZI) und Multi-Level-Translation-(MLT-3)-Codierung. Letztendlich wird das elektrische Signal mit drei Pegeln (-1 V, 0 V, 1 V) auf der Leitung differentiell mit einer Symbolrate von 125 MBaud innerhalb einer Bandbreite von 31,25 MHz übertragen.

Bei einem zufällig durchmischten (scrambled) Ethernet-Datenstrom sind die Signale im Mittel zu 25% bei -1 V, zu 50% bei 0 V und zu 25% bei 1 V verteilt. Eine ideale Verteilung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Einfluss eines Cat5-Kabels auf die Signalform und Häufigkeitsverteilung ist aus Abbildung 3 ersichtlich.

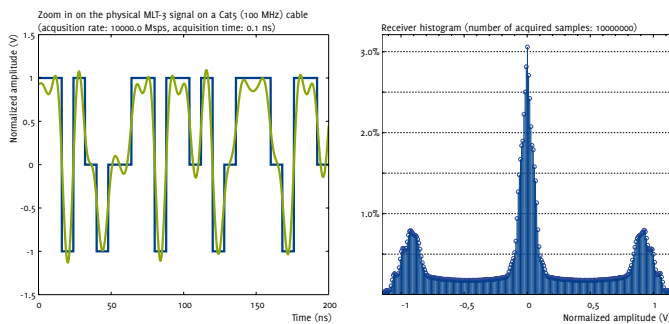
Mehr zu Signalverarbeitung:
www.imms.de

Auswertung von Häufigkeitsverteilungen veränderter Eigenschaften deckt Störungen auf

Gibt es Veränderungen am Kabel z.B. durch eine beschädigte Isolation, verändern sich auch die o.g. primären Kabelkenngrößen (R, L, C, G). Damit lassen sich Abweichungen bei den Übertragungseigenschaften ermitteln, wie z.B. eine geringere

Abbildung 3:

Reales MLT3-Signal und Histogramm. Bei einem realen MLT3-Signal sind die Symbole leicht verteilt, jedoch lässt sich eine eindeutige Zuordnung feststellen.



Quelle: IMMS.

Bandbreite. Dies führt unweigerlich zu einer anderen Häufigkeitsverteilung der übertragenen Signale. Somit lassen sich durch die Ermittlung und Auswertung der Häufigkeitsverteilung der übertragenen Symbole bzw. Spannungspegel Aussagen über Veränderungen am Kabel treffen und Warnungen ausgeben, bevor die Verbindung unterbrochen wird.

Um die Häufigkeitsverteilung der übertragenen Symbole zu ermitteln, müsste das Signal mit mindestens der doppelten Signalfrequenz, also mindestens 250 MHz abgetastet werden, was wiederum den Einsatz kostenintensiver Hardwarekomponenten (ADC, FPGA) erforderlich macht. Daher wurde für eine kostengünstige Lösung die Unterabtastung als anderer Ansatz für die Schaltung gewählt, so dass das Signal mit einer geringeren Frequenz abgetastet wird.

Analyse und Auswertung per Unterabtastung und mit vier Parametern

Die übertragenen Informationen können aufgrund der Unterabtastung zwar nicht wiederhergestellt, aber es kann die statistische Verteilung ermittelt werden. Bei der Auswertung der unterabgetasteten Ethernet-Signale ergibt sich eine multimodale Verteilung (drei Moden) um die drei Werte 1, -1 und 0.

Um die **Kabelqualität** zu bestimmen, wurden die vier folgenden Parameter definiert: Clarity, Amplitude, Asymmetry, Activity. Mit diesen Parametern lässt sich die Verteilung der Signale gut beschreiben. Für die Berechnung der Verteilung werden die ADC-Werte in 32 Spannungsbereiche, die Linien im Histogramm, unterteilt und jeweils 1000 Werte ausgewertet.

Der Parameter **Clarity** enthält eine Schätzung, wie deutlich die Pegel (-1, 0, +1) voneinander unterschieden werden können. Zur Berechnung des Clarity-Wertes wird die Summe der zugeordneten Werte gebildet. Dazu werden die Linien im Histogramm mit den meisten Werten ermittelt und die benachbarten Werte mit einbezogen. Eine gute Übertragung hat eine hohe Clarity, d.h. nur wenige Samples liegen zwischen den drei Moden. Ein zu niedriger Wert deutet auf einen hohen Rauschanteil oder zu hohe Kapazitätswerte des Kabels hin.

Der **Amplitude**-Parameter ergibt sich aus dem Abstand des positivsten zum negativsten Wert im Histogramm. Der **Asymmetry**-Wert gibt die Abweichung von der idealen Verteilung an. Der Parameter **Activity** zeigt an, ob eine aktive Kommunikation auf dem zu überwachenden Kabel stattfindet. Dazu wird die Anzahl der Werte in der Mode mit den meisten Werten ermittelt, und dieser anschließend von 1000 subtrahiert.

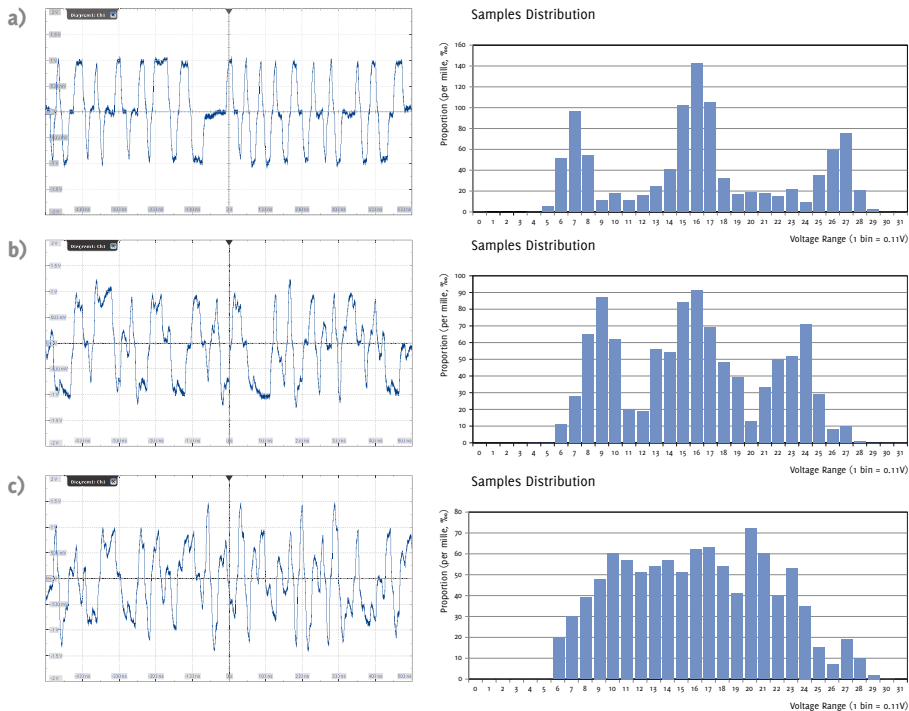


Abbildung 4: Vergleich des Ethernet-Signals und zugehöriger Verteilung bei der Belastung mit parasitären Kapazitäten gezeigt unter (a) normalen Bedingungen (Clarity=531, Asymmetry=53), (b) belastet durch eine Kapazität von 47 pF (Clarity=450, Asymmetry=129) und (c) belastet durch eine Kapazität von 100 pF (Clarity=362, Asymmetry=151). Quelle: IMMS.

In Abbildung 4 sind gemessene Ethernet-Signale und deren zugehörige Verteilung sowie die ermittelten Qualitätsparameter dargestellt. In der oberen Zeile sind die Signale bei einer normalen Kommunikation aufgenommen worden. In den darauffolgenden Messungen wurde eine zusätzliche Kapazität von 47 pF bzw. 100 pF zugeschaltet. In beiden Fällen konnte trotz der Beeinflussung die Kommunikation zwischen den Endpunkten aufrechterhalten werden.

Systemintegration und Prototyp

Im Projekt wurde ein Gesamtsystem aus mehreren Teilen konzipiert und entwickelt. Die Basis bildet das vom IMMS realisierte analoge Frontend, das mit einer speziell angepassten Sample-and-Hold-Schaltung die Signale der Ethernet-Leitungen unterabtastet. Ziel ist hier immer der Empfangspfad, auf dem Sendepfad werden keine Analysen durchgeführt. Dennoch müssen bei der Abtastung beide Kanäle beobachtet werden, da durch die gegebene Auto-MDIX-Funktion RX- und TX-Leitungen wechseln können. Die abgetasteten Werte werden als analoge Signale an eine vom IMMS im-

Mehr zu Signal-
verarbeitung:
www.imms.de.

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

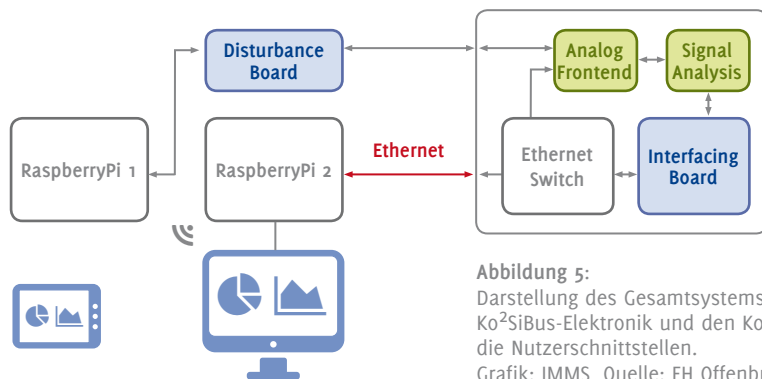


Abbildung 5:
Darstellung des Gesamtsystems mit der Ko²SiBus-Elektronik und den Komponenten für die Nutzerschnittstellen.
Grafik: IMMS, Quelle: FH Offenburg.

plementierte Analyseeinheit übergeben. Dort finden letztendlich die Signalanalysen sowie die Aufbereitung der entsprechenden Werte statt. Gesteuert wird die Analyseeinheit mittels eines fest definierten Registersatzes. Dort können sowohl Steuer- und Konfigurationsparameter abgelegt, als auch die Analyseergebnisse abgefragt werden. Erreichbar ist dieser Registersatz über standardisierte Schnittstellen, wie SPI, I²C oder sogar MDIO, die standardmäßig zur Ansteuerung von Ethernet PHYs genutzt wird, was auch eine mögliche Integration der Analysefunktionen vereinfacht.

Die von der FH Offenburg entwickelte Schnittstelleneinheit bedient und konfiguriert die Analyseeinheit und greift von ihr die Analysewerte ab, bereitet sie auf und stellt sie über die zwei standardisierten und in der Industrie und Netzwerktechnik stark genutzten Protokolle SNMP und OPC UA bereit. Der SNMP-Agent kann zusammen mit der entsprechenden MIB-Beschreibung (Management Information Base) in bestehende SNMP-Manager integriert und somit überwacht werden. Parallel hierzu wird auf der Schnittstelleneinheit ein eingebetteter OPC-UA-Server betrieben, der ebenfalls Zugriff auf die Analyse- und Konfigurationswerte bereitstellt.

Demonstrator

Das IMMS war an der Entwicklung des Demonstrators beteiligt, der das gesamte System mit der kompletten Analyseketten von der Messung der Signale bis zur Darstellung der Analyse und Integrationsmöglichkeit abbildet, siehe Abbildung 5. Der Prototyp wurde hierzu um weitere technische Elemente für die gezielte Manipulation der Ethernet-Signale, die Darstellung der Messwerte und die Interaktion mit dem Nutzer erweitert.

Neben dem Ko²SiBus-System besteht der Demonstrator zusätzlich aus zwei Mini-Computern. Diese kommunizieren kontinuierlich miteinander, um Traffic zu generieren. Einer der beiden Mini-Computer implementiert zudem die Nutzerschnittstelle.

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



Abbildung 6:

Grafana-Dashboard des Ko²SiBus Systems. Dargestellt werden aktuelle Messwerte, der chronologische Verlauf der Messungen sowie Konfigurationsparameter.

Quelle: FH Offenburg.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Die über OPC UA bzw. SNMP abgegriffenen Daten werden über einen Node-Red Flow in eine Influx-DB-Datenbank geschrieben. Von dort kann mittels eines Grafana-Dashboards, siehe Abbildung 6, auf die Werte zugegriffen werden. Um hier möglichst einfach per Tablet oder Smartphone zugreifen zu können, fungiert der Mini-Computer auch als WLAN Access Point. Ein zusätzliches, am IMMS entwickeltes Disturbance Board wird zwischen die zu messende Ethernet-Leitung gesetzt und ermöglicht eine gezielte Manipulation des Ethernet-Signals, deren Auswirkungen direkt im Dashboard beobachtet werden können.

Fazit und Ausblick

Die entwickelten Methoden erlauben das Monitoring von Ethernet-Leitungen im Betrieb, ohne in die eigentliche Kommunikation einzugreifen. Dies wurde in Form eines Prototyps implementiert und dessen Tauglichkeit in Laborversuchen nachgewiesen. In den nächsten Schritten wird das System in reale Industrielandschaften integriert und dort evaluiert. Es wird angestrebt, die Konzepte direkt in Ethernet-basierte Feldbus-Geräte zu integrieren.

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de

Mehr zu
Ko²SiBus auf
www.imms.de

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Projekt Ko²SiBus wurde 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. Die Ergebnisse wurden erarbeitet vom Institut für verlässliche Embedded Systems und Kommunikationselektronik (ivESK) an der Hochschule Offenburg, dem Team der Professur für Mess- und Sensortechnik an der Technischen Universität Chemnitz sowie dem IMMS.



AgAVE –

Industrie-4.0-Kommunikation für ein ML-basiertes Assistenzsystem zur automatischen Analyse modularer Anlagen



Versuchsaufbau am IMMS für die Integration lokaler Industrie-4.0-konformer Assistenzsysteme in Fertigungsanlagen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Problem: Fehler treten oft woanders auf als dort, wo sie verursacht werden

Industrielle Produktionsanlagen sind auf einen kontinuierlichen Betrieb und hohen Durchsatz ausgelegt. Maschinenstillstände und -ausfälle führen zu hohen finanziellen Schäden. Die Kosten für die Wartung und Instandsetzung von Maschinen und Anlagen werden auf 15% bis 40% der indirekten Kosten in Industrieunternehmen geschätzt.

Das ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass moderne Produktionsanlagen immer komplexer werden und aus einer Vielzahl von Modulen oder Einzelmaschinen aufgebaut werden. Diese Struktur der Anlage erschwert die Fehleranalyse, weil der Ort der Fehlererkennung nicht mit dem der Ursache übereinstimmen muss. Deshalb ist weiterhin viel manueller Aufwand und somit auch viel Zeit erforderlich, um Fehlerursachen zu lokalisieren und anschließend zu beheben. Intelligente Assistenzsysteme können hier helfen, um die Fehlersuche zu verkürzen und somit die Kosten zu senken.

AgAVE auf
www.imms.de

Das Fraunhofer IOSB-INA und das IMMS haben ein Assistenzsystem für Produktionsanlagen entwickelt. Es erkennt automatisch mögliche Fehlerquellen, Anomalien oder Risiken, wie zum Beispiel Verschleißerscheinungen oder Sensorausfälle, und teilt sie dem Betreiber frühzeitig mit. Neben der beobachteten Anomalie wird dem Anlagenbediener zusätzlich eine Einschätzung der Fehlerursache mitgeteilt. Dafür ist ein System mit mehreren Ebenen notwendig, weil jede einzelne Maschine in der Anlage nur eigene Daten sammeln kann. Um Fehlerursachen zu bestimmen, müssen aber auch die anderen Maschinen in der Verarbeitungskette betrachtet werden.

Vom Fraunhofer IOSB-INA wurden deshalb Verfahren zum maschinellen Lernen (ML) erarbeitet, um lokal die jeweilige Maschine zu überwachen und auf globaler Ebene vom Menschen interpretierbare Ergebnisse und Zusammenhänge für die gesamte Anlage abzuleiten.

Einschätzung

des Fraunhofer

IOSB-INA zum

Projekt AgAVE.

Beitrag des IMMS: Industrie-4.0-Kommunikation für die Diagnoseassistenten

Beide Analyseebenen müssen Daten austauschen. Das IMMS hat dafür eine entsprechende Industrie-4.0-konforme Kommunikationslösung entwickelt. Diese ermöglicht eine zuverlässige Kommunikation zwischen lokalen Assistenten auf Maschinenebene und dem globalen Assistenten auf Analyseebene. Dafür hat das IMMS sowohl Strukturen definiert, mit denen Daten zu relevanten Informationen für Assistenzsysteme ausgetauscht werden, als auch Mechanismen für die automatische Einbindung zusätzlicher Anlagenteile. Ohne diese Kommunikation lässt sich der Produktionsprozess nicht analysieren. Die Industrie-4.0-konformen Protokolle stellen dabei sicher, dass das Prinzip in jeder Anlage eingesetzt werden kann, die diese Standards verwendet.

Das gesamte Assistenzsystem aus Kommunikations- und Analysekomponenten wurde in einem anwendungsnahen Demonstrator inklusive Sensoranbindung realisiert, den das IMMS mit aufgebaut hat: An einer Anlage zur Herstellung von Verpackungsmaterialien im Reallabor SmartFactoryOWL konnte so gezeigt werden, wie das neuartige ML-basierte Assistenzsystem Entscheidungsregeln erlernt, kausale Zusammenhänge in der verteilten Anlage erkennt und potentielle Fehlerursachen identifiziert.

Das IMMS hat damit gezeigt, dass durch Industrie-4.0-konforme Kommunikation neue Anwendungen in der Automation ermöglicht werden. Im konkreten Fall entfalten neue Methoden des maschinellen Lernens und entsprechender Algorithmen erst mithilfe angepasster Kommunikationslösungen das volle Potential für die Anlagenbetreiber.

Mehr zu

Kommunikations-

lösungen:

www.imms.de.

Jahresbericht

Maschinelles Lernen des Anlagenverhaltens

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Basis für die erfolgreiche Diagnose eines Fehlers ist die genaue Kenntnis über jeden einzelnen Zustand, den die gesamte Anlage annehmen kann. Im Bereich des maschinellen Lernens existiert eine Reihe von Verfahren, die das Verhalten oder die Zustände von Maschinen erlernen und in Modelle abbilden können.

Aufgrund der Modularität können viele Fehlerursachen aber nicht lokal an einer Maschine ermittelt werden. Dafür ist eine globale Sicht auf die Anlage notwendig. So setzt sich das AgAVE-Assistenzsystem aus lokalen und einem globalen Diagnoseassistenten zusammen, damit es die Aufgabe einer globalen Ursachenanalyse erfüllen kann. Die lokalen Assistenten sind direkt an den Modulen oder Maschinen verortet, während der globale Assistent an übergeordneter Stelle platziert wird.

Die Maschinendaten als unterste Ebene werden zunächst an die entsprechenden lokalen Module übergeben, die die Daten auf lokale Zusammenhänge untersuchen. An dieser Stelle setzt das Fraunhofer IOSB-INA verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens ein, wie Support Vector Machines und Neuronale Netze. Die Ausgaben dieser Module werden dann an die globale, höherliegende Schicht weitergegeben, die aus diesen Ausgaben eine vom Menschen interpretierbare Struktur erzeugt. Hier werden regelbasierte Methoden verwendet, wie z.B. Case-based Reasoning.

Die Aufteilung der Diagnoseassistenten in Ebenen des lokalen Low-Level- und des übergeordneten High-Level-Learnings entspricht auch der typischen Struktur einer Produktionsanlage. So sind die Low-Level-Diagnoseassistenten räumlich den zu überprüfenden Anlagenmodulen bzw. Maschinen zugeordnet, während der übergeordnete High-Level-Diagnoseassistent einen Überblick über die gesamte Anlage hat und somit die kausalen Zusammenhänge zwischen einzelnen Anlagenteilen erkennt. Für individuelle Analyseaufgaben müssen den genannten maschinellen Lernmethoden die Anlagen- bzw. Analysedaten je nach Einsatzzweck zugeführt werden. Dafür werden den lokalen Assistenzsystemen die Anlagen- bzw. Maschinendaten zur Verfügung gestellt und dem globalen Assistenzsystem die Analyseergebnisse der lokalen Assistenzsysteme.

Für die Kommunikation zwischen den lokalen und globalen Assistenten und deren automatisierte Einbindung in industrielle Kommunikationslandschaften wurden verschiedene Optionen für Umgebungen und Schnittstellen für die Analyseassistenten untersucht. Dabei hat das IMMS den Fokus auf Industrie-4.0-konforme Kommunikation gelegt, um das Assistenzsystem zukunftssicher anzubinden.

- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Verwaltungsschale mit RAMI 4.0, OPC UA und Discovery-Service für den Datenaustausch

Die lokalen Assistenten verarbeiten direkt die numerischen Ausgaben der verschiedenen Produktionsmodule bzw. einzelner Maschinen. Diese werden von den globalen Assistenten gesammelt, um mit Entscheidungsregeln Informationen über das Verhalten der Anlage abzuleiten. Diese algorithmische Struktur erfordert eine sorgfältige Verwaltung der Maschinendaten. Für den Datenaustausch zwischen lokalen und globalen Assistenten werden daher Protokolle und Konzepte nach dem „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) eingesetzt und implementiert. Das bedeutet, dass die Daten und Informationen für die einzelnen Diagnoseassistenten in einer Verwaltungsschale entsprechend der von der Plattform Industrie 4.0 definierten Struktur organisiert werden. Die Diagnoseassistenten kommunizieren mittels OPC UA, einem Industrie-4.0-konformem industriellen Protokoll für die Kommunikation zwischen Maschinen, nach dem Client/Server-Prinzip. Zusätzlich zu diesen grundlegenden Techniken wurde ein Discovery-Service integriert. Er macht die Informationen der einzelnen Analyseassistenten auffindbar und damit möglich, diese anhand der Beschreibung automatisiert in das übergeordnete System zu integrieren. Dadurch ist eine flexible Konfiguration des Assistenzsystems möglich.

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

Verwaltungsschale macht Diagnoseassistenten zu Industrie-4.0-Komponenten

Durch die Industrie-4.0-Techniken lassen sich nicht nur die zu analysierenden Daten zwischen den Assistenzsystemen austauschen, sondern über eine entsprechende OPC-UA-Semantik auch Metadaten, wie z. B. Informationen zu den eingesetzten Algorithmen, Datentypen oder physikalischen Einheiten der übertragenen Daten. Dank der Verwaltungsschale werden die Diagnoseassistenten außerdem zu Industrie-4.0-Komponenten. Die Struktur der Verwaltungsschale ist mit den Ergebnissen des Open-Source-Projekts „openAAS“ und den Anforderungen der Plattform Industrie 4.0 abgeglichen. Somit ist die Kompatibilität zu Systemen sichergestellt, die nach diesem Schema eine Verwaltungsschale verwenden.

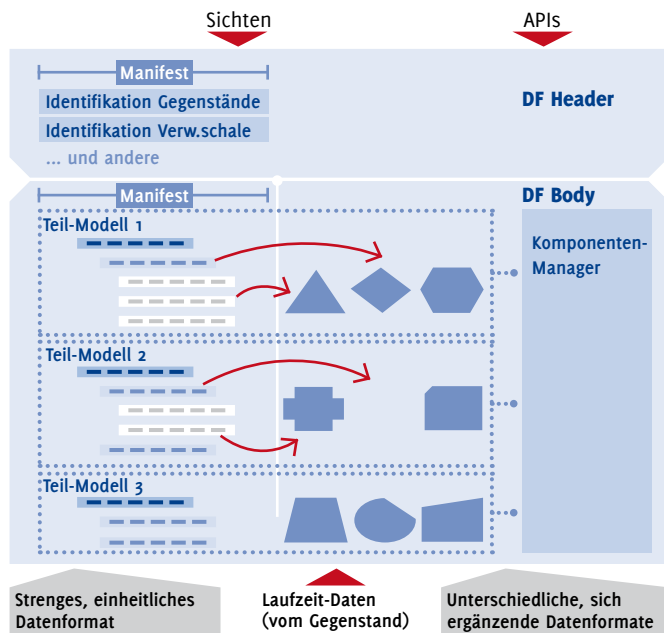


Abbildung 1:

Aufbau der Verwaltungsschale.

Grafik: IMMS, Quelle: Fraunhofer IOSB-INA.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Struktur der Industrie-4.0-Verwaltungsschale für Diagnoseassistenten

Die grundlegende Struktur einer Industrie-4.0-Verwaltungsschale ist in Abbildung 1 verdeutlicht. Sie setzt sich aus einem Header und einem Body zusammen. Im Header werden alle organisierenden Merkmale zur Verwaltungsschale und zum jeweiligen Asset gehalten, also zum physischen oder logischen Gegenstand, der einen Wert für die Organisation hat. Somit verfügt die Verwaltungsschale jederzeit über weiterführende Informationen zum verbundenen Asset. Als Beispiel können neben Informationen zur Identifikation der Verwaltungsschale selbst auch Informationen zum Asset verfügbar sein, wie z.B. eine Behältergröße für die Teilezufuhr. Die Verwaltungsschale für Diagnoseassistenten baut auf dieser Struktur auf.

Das IMMS hat sie jedoch für die Anforderungen der lokalen und globalen Analyseassistenten adaptiert. Ergebnis ist eine Verwaltungsschale, in der eine OPC UA Companion Specification für Diagnoseassistenten implementiert ist. Das grundlegende Modell ist hierbei mit Parametern erweitert, die nicht nur für alle Assistenten in AgAVE, sondern generell für Assistenten relevant sind. Um die Erzeugung der jeweiligen Verwaltungsschale zu vereinfachen, wird deren Struktur als OPC-UA-Typ definiert. Dies erlaubt eine einfache Instanziierung und damit eine flexible und einfache Implementierung in verschiedenen Assistenzsystemen.

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

Struktur

Abbildung 2 zeigt die Verwaltungsschale, die das IMMS in AgAVE implementiert hat. Wie vorgesehen sind alle organisierenden Merkmale im Header hinterlegt. Dieser besitzt die strukturierenden Elemente: „AAS-ID“, „Asset (Asset-ID und Asset-Description)“, „Manufacturer-ID“ und „Serialnumber“. Die „AAS-ID“ ist dabei die Identifikationsmöglichkeit der Verwaltungsschale selbst. Sie wird durch das Objekt „Asset“ einem Gegenstand von Wert, dem Asset, zugeordnet. Somit ist die Verwaltungsschale mit dem Asset verbunden. Die „Asset-ID“, die „Asset-Description“ als auch die „Manufacturer-ID“ und die „Serialnumber“ sind Elemente, die das Asset genauer beschreiben.

Die Informationen, die für die Analyse in den einzelnen Diagnoseassistenten benötigt werden, sind im Body hinterlegt. Er ist durch die Elemente „Algorithm“, „Inputs“ und „Outputs“ strukturiert. Unter „Algorithm“ finden sich Elemente, die den eingesetzten Algorithmus für die Datenanalyse näher beschreiben. Das Objekt „Inputs“ strukturiert dabei alle Eingangsvariablen. Hier werden die zu analysierenden Parameter, wie Anlagen- bzw. Maschinendaten, platziert. Das Objekt „Outputs“ strukturiert die Analyseergebnisse der jeweiligen Lernschicht, die für weitere Verarbeitungsschritte auf einer anderen Ebene bereitgestellt werden können.

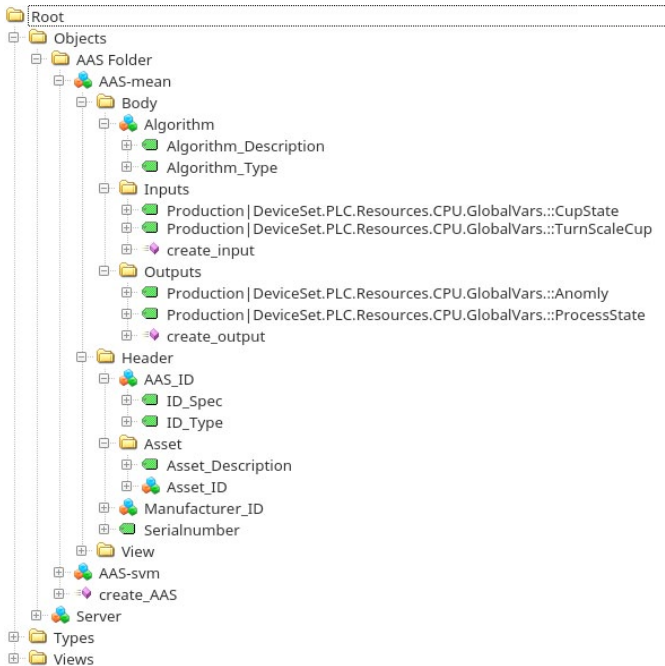


Abbildung 2:
Struktur der Verwaltungsschale eines Diagnoseassistenten.

Die Kommunikation zwischen den Ebenen und zwischen den lokalen Analyseassistenten und den von ihnen überwachten Modulen erfolgt nach dem Client/Server-Prinzip und folgt einem Request/Response-Schema. Das bedeutet, dass jeder lokale Assistent eine Client-Komponente zur Kommunikation mit dem Server auf dem entsprechenden Modul und eine Server-Komponente zur Kommunikation mit dem Client des globalen Assistenten aufweist. Der Server auf dem entsprechenden Modul agiert dabei als Fieldgateway, das die Sensordaten der Maschine als OPC-UA-Variable speichert. Diese Struktur ermöglicht eine gezielte Abfrage der Werte durch den Client, der sich im Netzwerk, jedoch nicht in unmittelbarer Nähe des überwachten Moduls befinden muss.

Integration

Um eine komplette Anlage mit mehreren Modulen oder Maschinen abzudecken, muss jedes Modul in das Assistenzsystem integriert werden. Um den Integrationsaufwand zu reduzieren, wurde ein Local Discovery Server (LDS) verwendet. Die lokalen Assistenten registrieren sich bei diesem Server und sind anschließend über ihn erreichbar. Lediglich die Endpoint-Adresse des Servers muss den Clients bekannt sein. Das erleichtert zum einen die Integration weiterer Module, erlaubt aber gleichzeitig das gezielte Abfragen verfügbarer Module und deren Eigenschaften.

Ausblick

In der Industrie-4.0-Modellfabrik des Fraunhofer IOSB-INA in Lemgo SmartFactoryOWL wurden an einer Anlage die Assistenten installiert und getestet. Für die lokalen Assistenten dienten Raspberry Pis als Hardwarebasis, auf der das IMMS die Verwaltungsschale implementiert hatte und die Algorithmen ausgeführt wurden. Die Kommunikation erfolgte über das lokale Netz per OPC UA. Experimentelle Untersuchungen an dieser Anlage zeigten, wie das Assistenzsystem Entscheidungsregeln erlernt, kausale Zusammenhänge in der verteilten Anlage entdeckt und damit bei auftretenden Fehlern eine Auswahl potentieller Fehlerursachen ermöglicht.¹

Die Verfahren sind allerdings aktuell nur für „Offline-Analysen“ geeignet. Sie können die Anlagendaten parallel zum Produktionsprozess analysieren, Anomalien erkennen und Lösungsvorschläge zur Fehlerbehebung oder -vermeidung geben. Sie greifen jedoch (noch) nicht aktiv in die Prozesse ein, um die Anlage entsprechend zu steuern oder zu konfigurieren.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de.

AgAVE auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

¹ vgl. <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-540915.html>

Weiterhin sind die Analysemethoden zwar schon auf lokale und globale Assistenzen verteilt, doch die Sensordaten müssen zum Teil noch über weite Strecken entlang des Netzwerkes zu den lokalen Assistenzsystemen übertragen werden, was zu Verzögerungen führen kann. Interaktive Analysen, bedarfsgerechte Konfigurationen sowie echtzeitfähige Kommunikationsverfahren sind Gegenstand künftiger Arbeiten.

Kontakt: Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



AgAVE wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie als Vorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) unter dem Kennzeichen 19341BG gefördert.

- 85
- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung



Digital Engineering für Planungs- und Revitalisierungs- prozesse von Stadtquartieren – Bauwerk-Monitoring mit Sensorik

In der Forschergruppe Digital Engineering wurden drahtlose Sensornetze für das Monitoring bauphysikalischer Messgrößen an einem Schulgebäude in Weimar untersucht. Foto: Marco Götze, IMMS.

Motivation und Überblick

Zug in Städte erfordert innovative computergestützte Verfahren für Bau und Sanierung

Durch den anhaltenden massiven Zuzug von Menschen in die Städte werden Gebäude höher und dichter aneinander gebaut sowie Gewerbe- und Wohnflächen unter bestimmten Voraussetzungen stärker vermischt. Um hierfür komplexe Wohnungsbau- und Sanierungsmaßnahmen in Städten künftig schnell und hocheffizient planen und ausführen zu können, arbeitete die Forschergruppe „Digital Engineering für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren“ an innovativen computergestützten Verfahren und Methoden. Mit diesen sollen Daten von Bauwerken, Quartieren und Geländen digitalisiert sowie automatisiert erfasst, verarbeitet, gespeichert, visualisiert und validiert werden. Die entwickelten Ansätze dienen dazu, Planungsgrundlagen konsistent zu erheben, den Zustand von Bauwerken und Auswirkungen von Baumaßnahmen zu bewerten. Die Forschergruppe unter der Leitung der Bauhaus-Universität Weimar setzte dabei auf Technologien verschiedener Fachgebiete.

*Mehr zu Digital
Engineering auf
www.imms.de.*

Jahresbericht

© IMMS 2019

So wurden unter anderem Geometrie- und Thermografiedaten von Bestandsbauten drohnengestützt erfasst und dabei innovative Verfahren der automatischen Bildanalyse angewandt, um Bauwerkschäden zu erkennen und dreidimensionale Gebäude-, Quartier- und Geländemodelle, Kartierungen identifizierter Schäden sowie energetische Auswertungen zu generieren.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

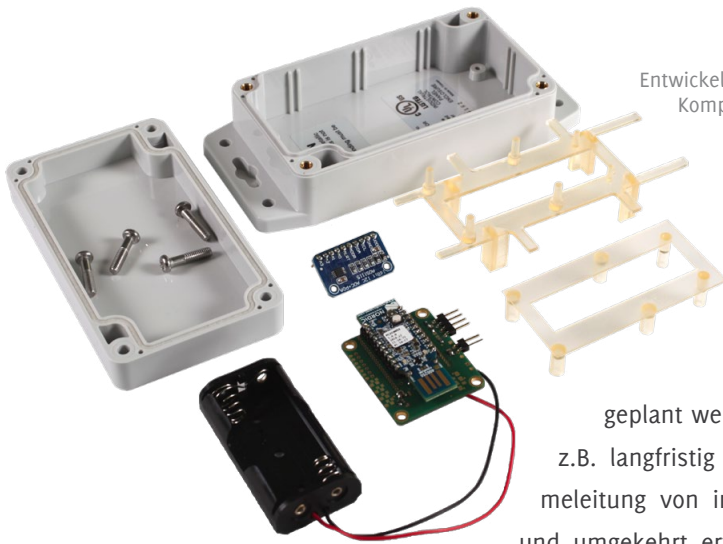
Arbeit des IMMS an drahtlosen Sensornetzwerken zum Monitoring bauphysikalischer Messgrößen

Das IMMS brachte sein Know-how im Bereich drahtloser Sensornetze ein, um in und an Gebäuden oder in Stadtquartieren flächendeckend bauphysikalische Messgrößen zu erfassen und langfristig zu überwachen, wie z.B. Oberflächentemperaturen, Wärmeströme und Windanströmungen. Damit können Gebäude oder auch Bauwerk-klassen beurteilt sowie bauliche Maßnahmen simuliert und deren Auswirkungen wie z.B. auf das Gebäudeklima oder die Energieeffizienz abgeschätzt werden. Für das Monitoring mit drahtloser Multisensorik stellten verschiedene Gebäude- und Geländestrukturen sowie Ausdehnungen besondere Herausforderungen an die Netzwerkarchitektur dar.

Mehr zu
Kommunika-
tionslösungen:
www.imms.de

Das IMMS hat unter anderem untersucht, inwieweit sich herkömmliche und meist teure bauphysikalische Messtechnik, mit der üblicherweise eine Fachkraft nur punktuell und über begrenzte Zeiträume Messdaten aufzeichnen kann, durch vermaschte Netzwerke ergänzen lässt. Diese bestehen aus preiswerten, selbstvernetzenden Sensorknoten, die kompakt und batteriebetrieben sind und sich daher ohne infrastrukturelle Abhängigkeiten theoretisch an beliebigen Stellen aus- und anbringen lassen. Dank ihrer Kommunikation „von Fassade zu Fassade“ kann ein ganzer Gebäudekomplex erfasst und so ein Schritt zur Überwachung ganzer Quartiere getan werden. Durch viele verteilte Messpunkte und langfristiges Monitoring wird auch eine umfangreiche Datenbasis für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt, um beispielsweise interessante Gebäudeteile zu identifizieren und mit weiterer Messtechnik näher zu betrachten.

Das IMMS hat Sensornetzwerke an Gebäuden getestet, preiswert herstellbare, wetterfeste und infrastrukturunabhängige Hardware-Lösungen, Abbildung 1, sowie Software-Lösungen erarbeitet. Die erhobenen Messdaten wurden bereits für thermisch-energetische Gebäudesimulationen innerhalb der Bauphysik und für mehrere Drohnenbefliegungen mit Thermografieaufnahmen genutzt sowie mit Metadaten in Bauwerkdatenmodellierungen (BIM) integriert. Eigenschaften von Gebäuden bzw. der Bausubstanz können somit überwacht und verschiedene Bau- und



Entwickelte Funksensorknoten:
Komponenten und Gesamt-
aufbau. Foto: IMMS.

Sanierungsmaß-
nahmen besser
gegeneinander
abgewogen und

geplant werden. So lässt sich
z.B. langfristig die effektive Wär-
meleitung von innen nach außen
und umgekehrt erfassen, um damit

modellbasiert Entscheidungen treffen zu können, wie z.B. lediglich Heizregimes zu
ändern oder Fassadendämmungen ganzer Straßenzüge vorzunehmen.

Darüber hinaus stehen für künftige Forschungsvorhaben 30 Sensorknoten mit
Temperatursensor, vier Basisknoten für die Anbindung an Gateways, implementierte
Software und Konfigurationen für Gateway- und Serversysteme zur Verfügung.

Lösung im Detail

Anforderungen an drahtlose Sensornetzwerke bei der Erhebung bauphysikalischer Messwerte

Für drahtlose Sensornetze an und in Gebäuden besteht die Schwierigkeit in bau-
werkbedingten und damit schwer vorhersehbaren konkreten Einschränkungen der
Funkkommunikation, beispielsweise durch Stahlbeton, Metallarmierungen und Mo-
biliar. Verschiedene Funktechnologien schneiden dabei durchaus selbst dann un-
terschiedlich ab, wenn sie im selben Frequenzband arbeiten. Dies resultiert aus
technologieabhängigen Sendeleistungen, Empfangsempfindlichkeiten sowie Modu-
lations- und Routingverfahren.

In der Forschergruppe wurde frühzeitig ein einheitliches Referenzobjekt für ver-
schiedene Untersuchungen und Technologie-Evaluierungen aller beteiligten Fachbe-
reiche ausgewählt: die Schule an der Hart in Weimar, ein sanierungsbedürftiger Bau
aus Stahlbetonplatten mit ungünstiger Bauphysik.

Das IMMS hat an dieser Schule zunächst ein drahtloses Sensornetzwerk instal-
liert, das in verschiedenen Vorprojekten für andere Anwendungen erarbeitet und

- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

*Mehr zu
Kommunika-
tionslösungen:
www.imms.de*

weiterentwickelt worden war. Mit diesem wurden zum einen an über das Gebäude verteilten Messpunkten und langfristig erste Daten für die Untersuchungen der Partner erhoben und zum anderen konkrete Anforderungen für die Funkkommunikation beim Monitoring von Bauwerken evaluiert. Diese sind in einem zweiten Schritt in die Erarbeitung einer für die Anwendung ausgelegten Sensornetz-Plattform eingeflossen.

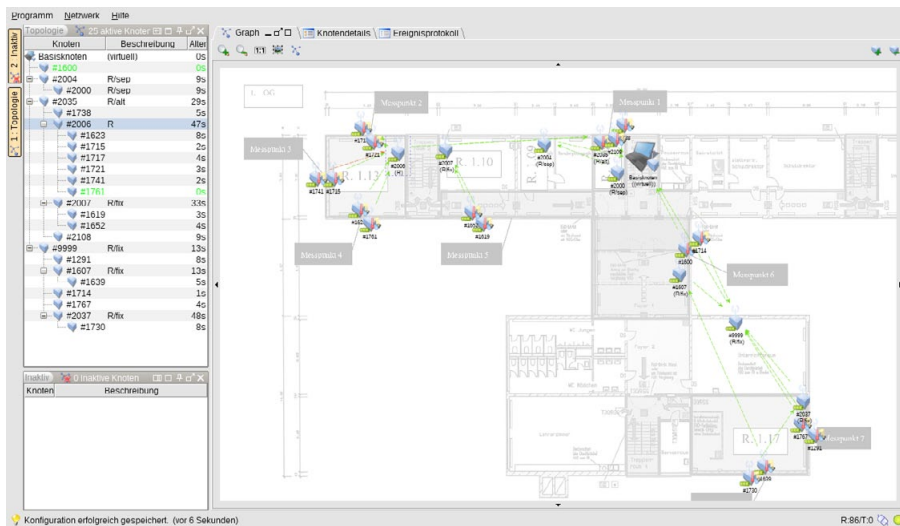
Datenerhebung und Evaluierung mit vorhandenem, anwendungsfremdem Sensornetz

Erste Komponenten und erste Messungen

Das IMMS hat ab Anfang 2018 die am IMMS entwickelte energieautarke Sensornetzlösung BASE-Net mit 2,4 GHz, proprietärem Anwendungsprotokoll ConSAS und dem Betriebssystem TinyOS als drahtloses Sensornetz auf einer Etage des Schulgebäudes ausgebracht. Mit insgesamt acht Messpunkten mit jeweils zwei gegenüberliegend innen und außen an der Fassade angebrachten Sensoren wurde der bauphysikalisch interessante Temperaturgradient an Außenwänden erfasst. Mehrere Router-Knoten leiteten die Daten weiter, erhöhten die Reichweite und steigerten die Robustheit der Funkkommunikation bei schwierigen Bedingungen. Bei der verwendeten Technologie konnten diese Router nicht wie die Sensorknoten autark arbeiten, sondern wurden mit Netzstrom versorgt, da sie kontinuierlich Daten empfangen müssen.

Erfasst wurden Oberflächen- und ambiante Temperaturen innen und außen sowie innen zusätzlich relative Luftfeuchte und Beleuchtungsstärke in zwei Spektralbe-

Abbildung 2: Messpunkte am Referenzobjekt und WSN-Topologie. Grafik: IMMS.



- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu
Sensorsystemen
www.imms.de.

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de.

reichen. Das IMMS hat in Abstimmung mit der Professur Bauphysik der Bauhaus-Universität Weimar zudem einen hochgenauen Temperatursensor (Texas Instruments TMP116) in die vorhandene Sensorlösung integriert.

Die Daten wurden mit dem Standard-Übertragungsprotokoll IEEE 802.15.4 über das drahtlose Sensornetz zu einem zentralen Gateway transportiert, welches die Daten einsammelte und in eine Datenbank am IMMS übertrug. Das Gateway wurde ebenfalls auf Basis vorhandener Hard- und Software bereitgestellt. Mangels vor Ort verfügbarer Netzwerkinfrastruktur wurde die Remote-Anbindung über Mobilfunk realisiert.

Evaluierung des vorhandenen Sensornetzes

Im Langzeitbetrieb erwies sich das Referenzobjekt als schwierig für die eingesetzte Technologie. Zeitweise brach die Kommunikation innerhalb des Sensornetzes wie auch auf der Mobilfunkstrecke des Gateways ab, was die Stabilität der Datenerfassung einschränkte. Im Gateway wurde dem mit Softwareanpassungen wie Datenpufferung, Nachübertragung und weiteren Maßnahmen zur Steigerung der Robustheit begegnet. Zusätzliche Router-Knoten konnten die dem Stahlbeton geschuldeten Übertragungsprobleme nicht in allen Fällen lösen, da die für die Router notwendigen Steckdosen im Gebäude kaum ausreichend und selten an geeigneten Stellen verfügbar waren. Wesentliche Ziele für eine anwendungsspezifische Lösung waren daher eine höhere Flexibilität und Robustheit durch batteriebetriebene und damit frei platzierbare Router.

Zudem entstand mit Blick auf die heterogene Datenerfassung mit verschiedenen Lösungen und Technologien der Anreiz, die im vorhandenen System realisierte proprietäre Datenbereitstellung durch standardisierte Lösungen zu ersetzen. Standardisierte Protokolle und Formate erleichtern die Integrierbarkeit in übergeordnete Systeme

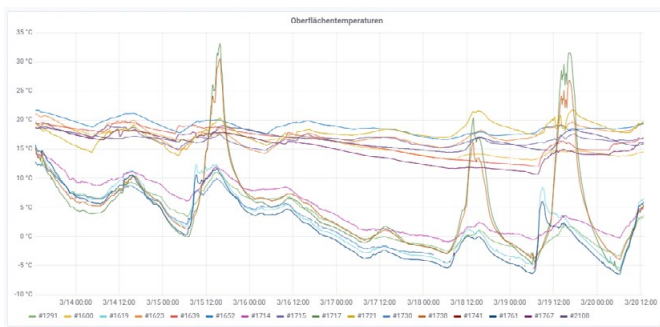


Abbildung 3:

Beispielhafter Messwertverlauf der Oberflächentemperaturen am Referenzobjekt über eine Woche im März 2018.

Grafik: IMMS.

und mit anderen Systemen. Eine vereinheitlichte, semantikbehaftete Datenhaltung erlaubt einen einheitlichen Zugriff auf aus verschiedenen Quellen erhobene Daten.

Erarbeitung einer neuen, auf die Anwendung ausgelegten Plattform

Die erarbeitete Sensornetz-Plattform baut auf einer neueren und preiswerten Hardwareplattform mit robusterer Kommunikation und höherer Energieeffizienz auf und setzt konsequent auf Standards in der Kommunikation und Datenbereitstellung. Hardware-seitig basiert die Lösung auf dem System-on-Chip Nordic Semiconductor nRF52840 mit Multi-Protokoll-Transceiver und dem quelloffenen Sensornetz-Betriebssystem OpenWSN, das auf die Plattform portiert wurde. An diese Plattform wurden ein abgesetzter Temperatursensor sowie eine Wärmestrommessplatte angebunden.

In der netzinternen Kommunikation kommt 6LoWPAN (IPv6 für Nahbereichsfunknetze) als Protokoll auf der Transport- und CoAP auf der Anwendungsschicht zum Einsatz. Ein Gateway sammelt die Daten im Sensornetz ein und liefert diese bei einem SensorThings-API-Server ab, über den die Mess- und Metadaten wie gemessene Größen, Positionen und Verweise auf Informationen zu den verwendeten Sensorelementen abrufbar sind. Der SensorThings-API-Standard zielt darauf ab, einen offenen und einheitlichen Rahmen zur Verbindung von Sensorik, Daten und Anwendungen über das Internet bereitzustellen. Er adressiert dabei gezielt die Interoperabilität von Syntax und Semantik, das heißt von Datenformaten und Dateninhalten sowie deren Bedeutung. Auf dem Server können damit auch Daten anderer Systeme aggregiert und in gleicher Weise bereitgestellt und generische Lösungen von Drittanbietern für die Datenvisualisierung und -verarbeitung genutzt werden.

Mehr zu

Sensorsystemen

www.imms.de.

Mehr zu

Kommunikationslösungen:

www.imms.de.

Entwicklung einer Anwendungssoftware für die Sensorknoten

OpenWSN setzt das Zeitslot-basierte Medienzugriffsverfahren IEEE 802.15.4e TSCH um, was energetische Vorteile hat und batteriebetriebene Router ermöglicht. Darauf aufbauend hat das IMMS eine Anwendungssoftware entwickelt, die wesentliche Umfänge des für das Internet der Dinge etablierten IoT-Protokolls CoAP (Constrained Application Protocol RFC 7252) und von dessen Erweiterungen Observing Resources (RFC 7641) und CoRE Resource Directory (Draft) umsetzt. Damit können mit geringem Kommunikationsaufwand Sensoren gezielt abgefragt und Messwerte mit konfigurierbarem Messintervall durch das Gateway abonniert werden. Außerdem kann das Gateway Sensorknoten und ihre Ressourcen automatisch registrieren. Für die Abschätzung von Energieverbrauch, Laufzeit und Kommunikation wurden simulative Verfahren eingesetzt.

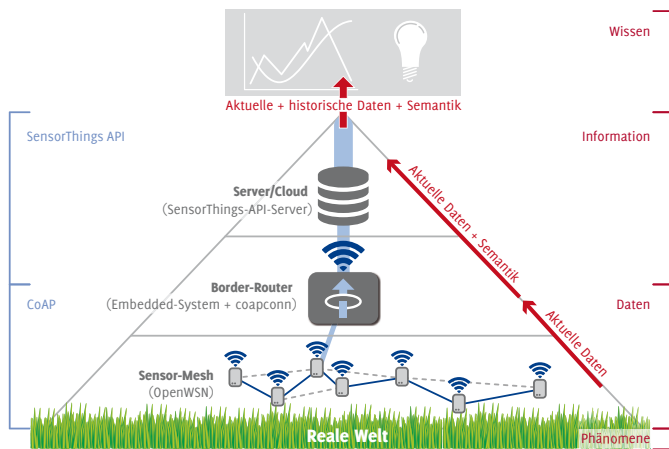


Abbildung 4:

Gesamtsystemaufbau
(logisch).

Grafik: IMMS.

Entwicklung einer Anwendungssoftware für die Gateways

Für das mit der MICA-Hardware von HARTING realisierte Gateway hat das IMMS die Anwendungssoftware coapconn entwickelt. Damit wird das Sensornetz per CoAP eingebunden und „nach oben“ über ein weiteres standardisiertes Protokoll aus dem Bereich des IoT, das OGC SensorThings API, an einen SensorThings-API-Server angebunden. Dieser bildet ein Repositorium auf Basis eines umfangreichen semantischen Datenmodells für IoT-„Dinge“, also Sensoren, Daten und Metadaten zu Sensorbauelementen, physikalischen Größen, Einheiten usw., das den einheitlichen Zugriff auf verschiedenartige Lösungen ermöglicht, vgl. Abbildung 4. Als Server wurde die quelloffene Lösung FROST-Server des Fraunhofer IOSB genutzt. Darauf aufbauend lassen sich Daten z.B. mit der Open-Source-Lösung Grafana visualisieren. Coapconn setzt darüber hinaus verschiedene Mechanismen zur Erhöhung der Robustheit um, wie Timeouts in der Kommunikation mit den Sensorknoten oder eine Pufferung der Interaktionen mit dem Server.

Tests und Anpassungen der auf die Anwendung ausgelegten Plattform

Erste Tests mit der neuen Plattform offenbarten eine eingeschränkte Stabilität bei größeren Netzen, insbesondere bei schlechten Kommunikationsverbindungen. Das erforderte ein aufwändiges iteratives Debugging auf der Ebene des Betriebssystems und Tests am IMMS. Bis zum Projektende wurde am IMMS in Ilmenau ein Testnetz in einer zur Schule in Weimar vergleichbaren Konstellation von Sensorknoten installiert und über zwei Monate bis zum Projektende betrieben. Hierbei wurde mit batteriebetriebenen Routern auch eine Kommunikation zwischen zwei Hausfassaden erprobt und damit die Plausibilität gebäudeübergreifender Netze als Schritt hin zu einer quartierübergreifenden Datenerfassung demonstriert.

Mehr zu
Kommunikationslösungen:
www.imms.de

Die durch das Sensornetzwerk aufgezeichneten Messwerte zu Solarstrahlung, Innenraumtemperatur, ambiente Lufttemperatur sowie Innen- und Außenoberflächentemperatur nutzt die Bauhaus-Universität Weimar für Validierungen und Kalibrierungen. Das Sensornetzwerk bietet hierbei den Vorteil der relativ großen räumlichen Abdeckung und nahezu frei wählbaren Positionierung der Sensoren innerhalb des Referenzgebäudes. Zum einen werden damit numerische Modelle der thermischen Simulation des Referenzgebäudes anhand der Innenraumtemperatur validiert. Räumlich hochaufgelöste Simulationen auf Basis von Mehrzonen-Modellen lassen sich somit validieren und bei Bedarf zielsicher modifizieren. Zum anderen werden mit den Messdaten des Sensornetzwerks zu Außenoberflächentemperaturen die bei den Drohnenflügen erfassten quantitativen Thermogramme kalibriert. Sensornetzdaten zu ambientser Lufttemperatur sowie Solarstrahlung dienen hierbei als Indikatoren möglicher Umwelteinflüsse, die sich negativ auf die Genauigkeit der Thermogramme auswirken und somit Fehler hervorrufen können.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sind eine der wesentlichen Grundlagen für die weiterführenden und sehr praxisorientierten Forschungsarbeiten für den im Juni 2019 gestarteten und vom BMBF geförderten Regionalen Wachstumskern „smood – smart neighborhood“, in dem spezialisierte Lösungen für Planung, Energieversorgung und Betrieb von Bestands-Wohnquartieren entwickelt werden.

Das IMMS nutzt die in der Forschergruppe entwickelte Sensorplattform, die aus energieeffizienter robuster Hardware und einer Kommunikationslösung mit standardisierten Protokollen und Formaten bis in die Cloud besteht, für weitere Arbeiten. Dort lässt sich die Plattform dank dieser Eigenschaften leicht in andere Systeme integrieren und es kann einheitlich auf Daten verschiedener Quellen zugegriffen werden. Beispielsweise wird eine angepasste Variante der Plattform im Projekt EXPRESS* auf Experimentierfeldern für die Landwirtschaft eingesetzt.

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

Gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds. Die Forschergruppe „Digital Engineering für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren“ wird unter dem Kennzeichen 2016 FGR 0026 gefördert.

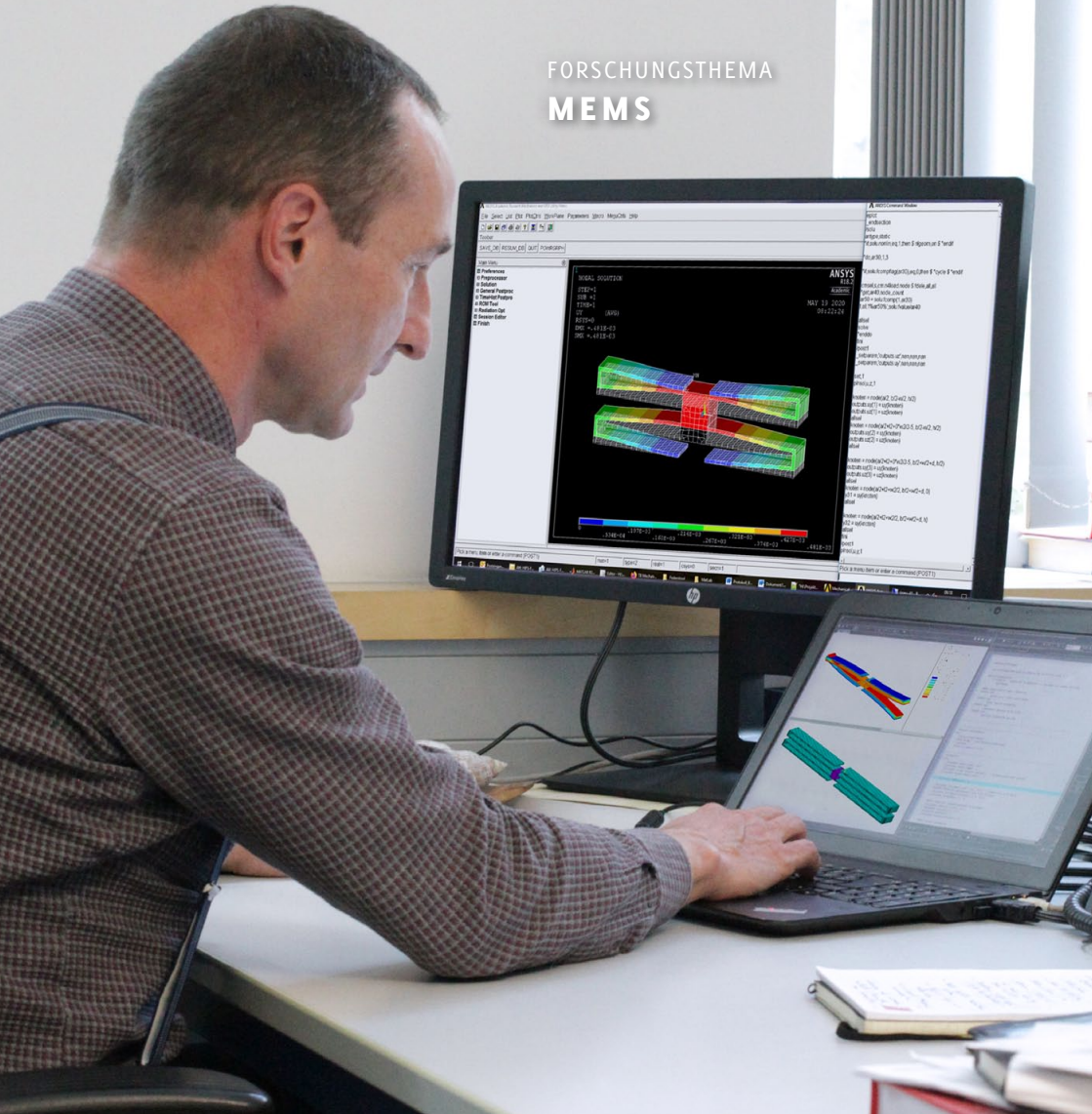
- > *INPOS*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *Ko²SiBus*
- > *AgAVE*
- > *Dig. Engineering*
- > *IRIS*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Mehr zu Kommunikationslösungen: www.imms.de.

EXPRESS auf www.imms.de.

Mehr zu Digital Engineering auf www.imms.de.

FORSCHUNGSTHEMA MEMS



Im Wachstumskern HIPS unterstützt das IMMS die Entwicklung neuartiger, robuster, hochintegrierter SiCer-Sensoren mit einem Vorgehensmodell für das SiCer-Sensorsystem-Design inklusive Aufbau einer Design-Bibliothek, mit Simulationen und der Entwicklung miniaturisierter Auswerteschaltungen für die SiCer-Sensoren. Foto: IMMS.

Das IMMS wird im Wachstumskern HIPS im Rahmen der Initiative „Unternehmen Region“ in den Verbundprojekten 1 und 2 unter den Förderkennzeichen 03WKDG01E und 03WKDG02H durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

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.

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 2019 im Bereich MEMS: Wachstumskern HIPS* zur Entwicklung neuartiger, robuster und kompakter SiCer-Sensoren gestartet

Um künftig neuartige und deutlich kompaktere Sensoren für mehrere physikalische und chemische Messgrößen entwickeln zu können, die sich langfristig in besonders aggressiven bzw. harschen Umgebungen einsetzen lassen, haben die TU Ilmenau und das Fraunhofer IKTS sog. SiCer-Verbundsubstrate erforscht und entwickelt. Diese Technologie ermöglicht hybride Mikrosysteme, indem Silizium (Si) und Keramik (Cer) auf Wafer-Ebene verbunden werden. Dieses SiCer-Substrat vereint die Vorteile zweier erfolgreicher Technologien und kann in Fertigungslinien für mikroelektromechanische Systeme (MEMS) prozessiert werden.

HIPS auf

www.imms.de.

Im Wachstumskern HIPS arbeiten zwölf Thüringer Industrieunternehmen und sieben Forschungseinrichtungen seit 2019 gemeinsam daran, eine Technologieplattform rund um SiCer aufzubauen. Auf dieser Basis werden neuartige, robuste, hochinteg-

Jahresbericht

© IMMS 2019

rierte SiCer-Hochleistungssensoren für den Bereich der Flüssigkeits- und Gassensorik entwickelt, um sie perspektivisch gemeinsam zu vermarkten.

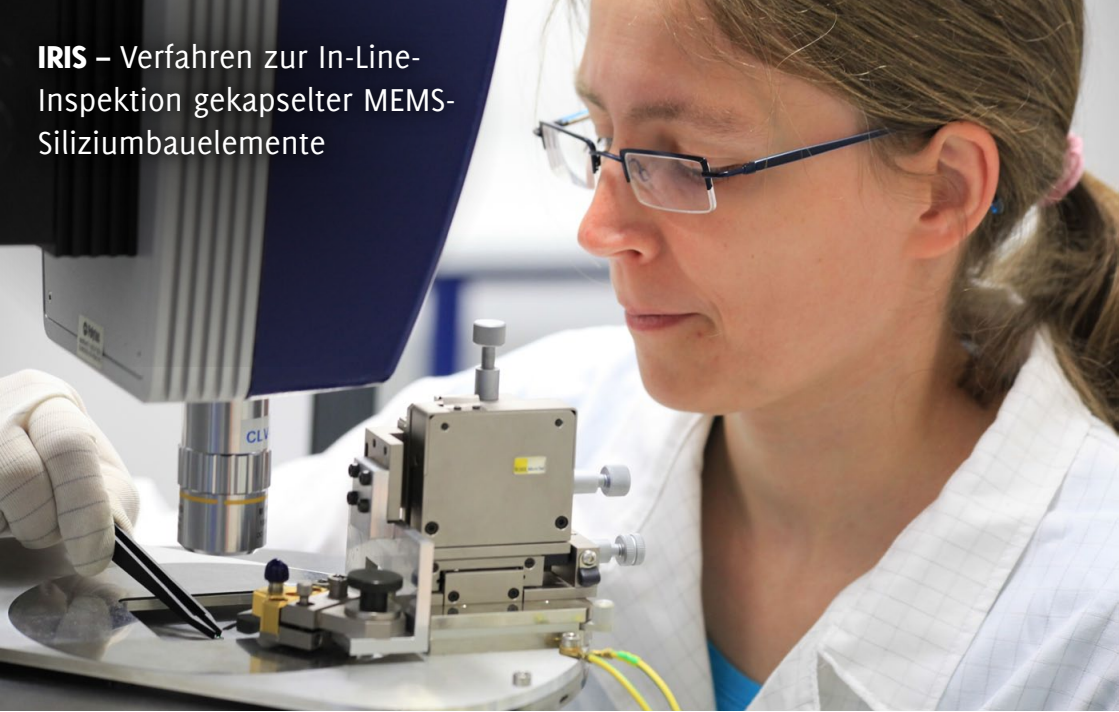
IMMS entwickelt Vorgehensmodell für SiCer-Sensorsystem-Design

Das IMMS erarbeitet neuartige funktionelle Strukturen sensorischer und aktorischer mikromechanischer Elemente mit dem Ziel, gemeinsam mit den Partnern ein systematisches Vorgehensmodell für das SiCer-Sensorsystem-Design einschließlich entsprechender Designrichtlinien zu entwickeln. Dafür werden für ausgewählte Struktur- und Demonstratorelemente die Komponenten- und Systemmodelle entwickelt, simuliert und in Demonstratoraufbauten der Partner erprobt. Die Design-Bibliothekselemente sind Bestandteil einer Modellbibliothek, die später dem Entwurf weiterer neuartiger Multisensor-Anwendungen dienen.

Auswerteschaltungen für kleine Sensorsignale und messtechnische Evaluierung

Ein weiterer Schwerpunkt am IMMS ist die Entwicklung miniaturisierter Auswerteschaltungen für die SiCer-Sensoren der Partner. Es handelt sich dabei um spezifische Elektroniken, die auf die verwendeten Technologien abgestimmt sind und die analoge Erfassung der z.T. sehr kleinen Sensorsignale ermöglichen. Neben Entwurf und Aufbau der Elektroniken gehören auch die messtechnische Evaluierung und Optimierung sowie die Felderprobung zum Aufgabenumfang des IMMS.

IRIS – Verfahren zur In-Line-Inspektion gekapselter MEMS-Siliziumbauelemente



Vibrometrische Untersuchungen an gekapselten MEMS-Strukturen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Optische Qualitätsprüfungen für verkapselte MEMS während der Fertigung bis dato nicht möglich

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) sind Innovationstreiber für zahlreiche neue Anwendungen und generieren weltweit Milliardenumsätze. Sie vereinen in einem einzigen Bauelement mikromechanische Sensoren und Aktoren sowie Steuerungselektronik auf einer Fläche von nur wenigen Quadratmillimetern. Im Automobil sorgen sie als Sensoren in Airbags und ESP für Sicherheit und machen als Lage- und Beschleunigungssensoren, Mikrofone, Hochfrequenzfilter, Drucksensoren und in der Kamerafokussierung das Smartphone erst smart.

Mikromechanische Strukturen lassen sich wie Mikroelektronik-Chips in Silizium fertigen, werden aber in der Regel bereits auf Wafer-Ebene vor diversen Einflüssen durch eine **Verkapselung** geschützt. Die so eingeschlossenen MEMS-Strukturen können allerdings während der Produktion bisher nicht unter den realen Bedingungen der Verkapselung mit gängigen Prüfmethoden optisch untersucht werden. Die unter Vakuum oder Schutzgaseinschluss vorgenommene Verkapselung auf Wafer-Ebene

kann aber zu Verspannungen im Material und damit zu Fehlern führen. Das frühzeitige Erkennen, Verstehen und schnelle Korrigieren von Abweichungen beim Fertigungsprozess auf Wafer-Ebene stellt einen wichtigen Wettbewerbsvorteil für die MEMS-Hersteller dar. Schließlich fallen ab der Zerteilung des Wafers in einzelne Mikrosysteme über die Aufbau- und Verbindungstechnik bis hin zum verkaufsfertigen System im Package bis zu 95% der Herstellkosten an.

Neue Messtechnik der Partner inspiziert MEMS durch die Verkapselung hindurch

Im Projekt „IRIS“ wurden daher von einem Konsortium aus MEMS- und Messgeräteherstellern sowie Forschungsinstituten Lösungen erarbeitet, mit denen verkapselte siliziumbasierte MEMS mit einer **neuartigen Infrarotmesstechnik** in der Fertigung optisch auf Wafer-Ebene analysiert werden können. Dank der vom Partner Polytec GmbH entwickelten Messtechnik lassen sich MEMS-Strukturen nun auch unter der Verkapselung und damit nach einem fehleranfälligen Prozessschritt analysieren. Eine optische Untersuchung wird durch die für die Messungen verwendete Infrarotstrahlung zwischen 1100 nm und 1700 nm Wellenlänge ermöglicht, bei der das Silizium transparent ist. Zudem hat die Polytec GmbH erstmals Laser-Doppler-Vibrometrie zur Schwingungsmessung mit optischer Laserpulsanregung in gekapselten Mikrosystemen ermöglicht.

Vibrometer sind für Qualitätsprüfungen von MEMS seit Jahren etabliert, allerdings bislang nur für freiliegende Strukturen. Mit den Vibrometern werden Frequenzen und Amplituden mechanischer Schwingungen mit einem Laser bestimmt, der auf die zu messende Oberfläche fokussiert wird. Materialeigenschaften, Verhalten und damit die Qualität von MEMS-Strukturen werden untersucht, indem sie in Schwingung versetzt und die dadurch verursachten, für jede MEMS-Struktur charakteristischen Frequenzen in ausgesendeten und reflektierten Laserstrahlen anhand des Doppler-Effekts analysiert werden.

Mit den neuentwickelten Messverfahren lassen sich nun Sensoreigenschaften verkapselter MEMS vibrometrisch in kurzer Zeit erfassen und damit deren Charakterisierung vornehmen.

IMMS entwickelte Verfahren für Messungen auf Wafer-Ebene und Bestimmung des Kavitätsinnendrucks von MEMS

Das IMMS hat mit dieser neuen Messtechnik neue Methoden zur dynamischen Schwingungsanregung verkapselter MEMS-Strukturen auf Wafer-Ebene untersucht, die für die zur Prozesskontrolle durchzuführende vibrometrische Messung notwen-

dig ist. Das IMMS hat indirekte Messverfahren erarbeitet, um im Wafer-Verbund den Druck innerhalb der Verkapselung, den Kavitätinnendruck, und damit ein für Hersteller wesentliches Qualitätskriterium und darüber hinaus die Materialspannung bestimmen und automatisch analysieren zu können. Das IMMS hat zudem Messabläufe für das In-Line-Prozessmonitoring entwickelt und ein Postprocessing-Tool implementiert, womit mehrere Sensoren im Wafer-Verbund sowie als vereinzelt Dies vermessen werden können.

Lösung des IMMS im Detail

Prüfung von MEMS über indirekte Parameteridentifikation mit Vibrometermessungen

Das IMMS hatte bereits vor Jahren ein Verfahren zur indirekten Fehler- und Parameteridentifikation von unverkapselten MEMS entwickelt und seitdem immer weiter verfeinert. Dieses indirekte Vorgehen nutzt Werte aus der vibrometrischen Messung der Eigenfrequenzen von MEMS. Mithilfe von Finite-Elemente-(FE)-Simulationen wird der funktionale Zusammenhang zwischen den gemessenen Frequenzantworten von MEMS-Strukturen und den interessierenden Parametern beschrieben, zum Beispiel von Materialspannungen von dünnen membranbasierten Sensoren oder Membrandicken von Drucksensoren. Dieses Verfahren hat das IMMS dank der neuen Messtechnik für die Charakterisierung verkappter MEMS erweitern können. Die Struktur der Parameteridentifikation zeigt Abbildung 1. Eingangsp Parameter des Identifikationstools sind zum einen Messdaten und zum anderen Simulationsdaten. Diese können für einfache Strukturen wie zum Beispiel Balken aus analytischen Gleichungen gewonnen werden. Im Regelfall wird dafür jedoch eine Finite-Elemente-Modellierung (FEM) genutzt. Die numerischen Daten werden im Identifikationstool polynomial approximiert, um mit Optimierungsfunktionen aus den Eigenfrequenzwerten die Sensorparameter zu bestimmen.

Mehr zu diesem Verfahren (PDF): www.imms.de

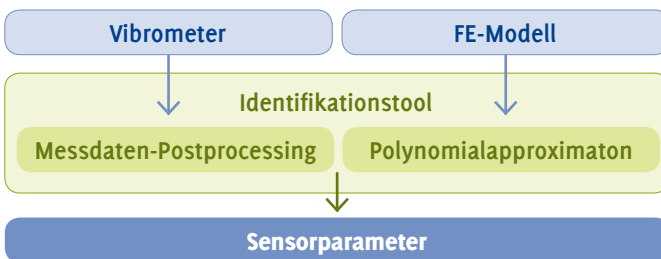


Abbildung 1:

Struktur der Parameteridentifikation zur Bestimmung des Kavitätinnendrucks.

Grafik: IMMS.

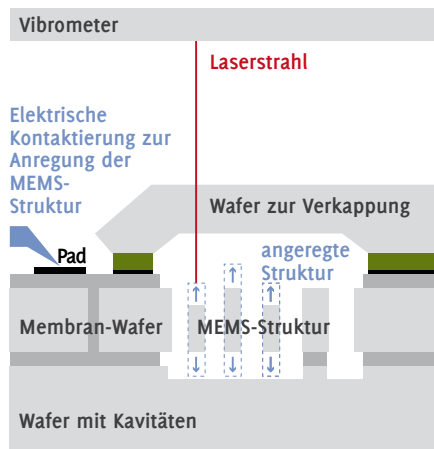


Abbildung 2:

Beispiel für eine verkapselte MEMS-Struktur auf Wafer-Ebene, hier ein Beschleunigungssensor in der XMB10-Technologie von X-FAB. Die Verkapselung wird mithilfe eines zusätzlichen Wafers erreicht, der auf den Wafer mit den MEMS-Strukturen gebondet wird.

Funktionselemente von aktiven MEMS-Strukturen lassen sich über elektrische Kontaktierung anregen. Die Schwingungen können somit für vibrometrische Messungen genutzt werden.

Grafik: IMMS, Basis: X-FAB-Darstellung.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Schwingungsanregung von MEMS

Unterschiedliche Anregung von aktiven und passiven MEMS

Um Frequenzantworten von MEMS mit vibrometrischen Messungen untersuchen zu können, müssen die Eigenfrequenzen der Strukturen angeregt werden. Bezüglich der Art der Anregung lassen sich MEMS dabei in aktive und passive unterscheiden. Bei MEMS mit aktiver Anregung, wie z.B. Inertialsensoren oder Resonatoren, können vorhandene Funktionselemente genutzt werden, um diese elektrisch in Schwingung zu versetzen, vgl. Abbildung 2. Dagegen besitzen z.B. membranbasierte MEMS wie Drucksensoren keine Funktionselemente zur Schwingungserzeugung. Hier werden bei unverkapselten MEMS die Schwingungen in den Strukturen elektrostatisch und damit passiv mithilfe einer ca. 20 Mikrometer (μm) entfernten und parallel über der Membranoberfläche befindlichen Elektrode angeregt.

Thermische Schwingungsanregung passiver verkapselter MEMS

Bei verkapselten MEMS ist die elektrostatische Anregung aufgrund der Verkapselung nicht möglich. Das IMMS hat daher untersucht, inwiefern sich Schwingungen passiver verkapselter MEMS mit messbaren Amplituden im Bereich einiger Pikometer (pm) durch integrierte Heizwiderstände thermisch anregen lassen. Mit ihnen lassen sich messbare Schwingungen generieren, diese sind jedoch von der Membrancharakteristik wie Dicke und Einspannung abhängig. Während bei Membranen mit einer weichen Einspannung, wie z.B. Infrarotsensoren, Schwingungsamplituden im pm-Bereich simulations- und messtechnisch nachgewiesen werden konnten, lassen sich we-

sentlich steifere Drucksensoren mit typischen Membrandicken im Bereich von 10 μm nicht durch Heizwiderstände zu Schwingungen im messbaren Bereich anregen.

Erweiterung der indirekten Parameteridentifikation von MEMS um Kavitätsinnendruck und Güte

Damit MEMS-Strukturen in einem gewünschten Umfang mechanisch arbeiten können, ist für eine bestimmte Güte ein anwendungsspezifischer Druck innerhalb einer Verkapselung, der Kavitätsinnendruck, notwendig. Das IMMS hat dank der neuen Messtechnik sein Verfahren zur indirekten Parameteridentifikation um die Bestimmung des Kavitätsinnendrucks und der Güte erweitert.

Die beiden Größen werden bei verkapselten MEMS mithilfe vibrometrischer Messungen optisch bestimmt. Sie werden aus der Halbwertsbreite, also der Breite der Kurve auf halber Höhe ihres Maximums, der gemessenen Frequenzpeaks einerseits und der FE-Simulation der Dämpfung andererseits im Identifikationstool berechnet. Hierfür wird die gemessene Frequenzantwort FRF (frequency response function) mit der modellbasiert errechneten theoretischen FRF abgeglichen, also mit einer Lorentz-Funktion, die in der Physik bei der Beschreibung von Resonanzen genutzt wird, siehe auch Abbildung 4. Die Modelle liefern somit theoretische Frequenzantworten, die bei einem definierten Kavitätsinnendruck bzw. Güte auftreten.

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Güte hängt dabei von der Höhe ebendieser ab. Je höher die Güte, durch umso weniger Frequenzlinien ist die Eigenfrequenz in der gemessenen FRF bestimmt, was wiederum eine höhere numerische Unsicherheit nach sich zieht. Zur Klassifizierung der Unsicherheit erfolgt im implementierten Verfahren eine links- und rechtsseitige Regression der Lorentz-Funktion an einen Frequenzpeak. Idealerweise sollten beide gewonnenen Gütewerte identisch sein, was in der Praxis gleichwohl nicht auftritt. Basierend auf der Auswertung der gemessenen Daten wurde als Kriterium für einen vibrometrisch bestimmbarer Kavitätsdruck eine Abweichung zwischen den beiden gewonnenen Gütewerten von 10% definiert. Der Kavitätsdruck verkapselter Sensoren kann so bis zu Güten von $Q = 10.000$, also für Systeme mit vergleichsweise niedriger Dämpfung, vibrometrisch indirekt bestimmt werden. Das wurde durch Messungen an Inertialsensoren mit Kavitätsinnendrücken zwischen 0,005 und 0,45 bar nachgewiesen.

Mehr zu FE-Modellierung:
www.imms.de

Mehr zu Testentwicklungen:
www.imms.de

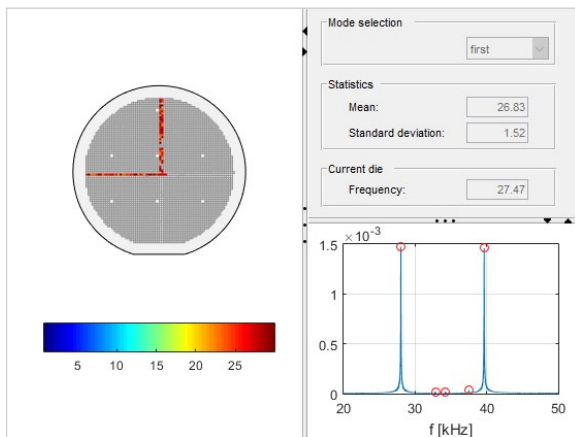


Abbildung 3:

GUI für das Messdaten-
Postprocessing.

Quelle: IMMS.

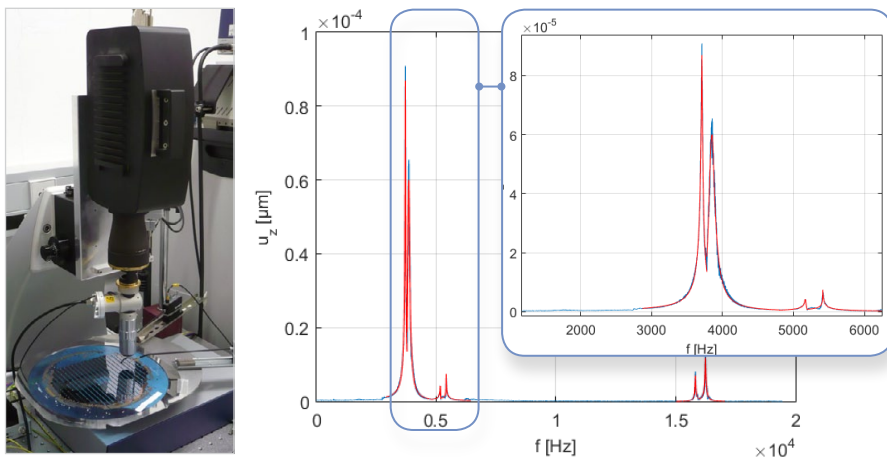
Entwicklung eines Postprocessing-Tools für den Test von MEMS-Strukturen auf Wafer-Ebene

Das IMMS hat ein Postprocessing-Tool entwickelt und klassenbasiert in Matlab implementiert. Es importiert die gewonnenen Messdaten von einem Waferprober-System und exportiert die Ergebnisse als Wafermap- oder Excel-Datei, vgl. Abbildung 3. Neben der automatischen Detektion von Frequenz-Peaks und Modi aus den gemessenen FRF bietet es Interfaces, um das Tool in vorhandene Software zur Charakterisierung bzw. Überwachung von Prozessparametern einzubinden.

Detektion von Frequenzpeaks

Für die Parameteridentifikation müssen aus den gemessenen FRF Frequenzpeaks detektiert werden. FRF von MEMS lassen sich hinsichtlich Rauschlevel, Amplituden-

Abbildung 4: Links: Messaufbau des neuartigen Vibrometers zur Messung verkappter MEMS-Strukturen; rechts: damit gemessene FRF mit Doppelpeaks und gefitteter Lorentz-Funktion Foto/Grafik: IMMS.



Mehr zu Test-
entwicklungen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019

Preprocessing

- Lokales Schätzen des **Rauschlevels**
- Bestimmen der **Hüllkurven**
- Iteratives Hinzufügen von **Peaks**, solange diese über dem Rauschlevel liegen

Parameterregression

Nichtlineares Minimale-Quadrate-Verfahren zur Bestimmung der Parameter der Lorentz-Funktion (Amplitude, Breite respektive Güte) basierend auf den Startwerten des Preprocessings

Abbildung 5:

Algorithmus zur Peakdetektion.

Grafik: IMMS.

103

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

verhältnis von größtem zu kleinsten Frequenzpeak (je nach Applikation und Art der Anregung bis zum Faktor 100) sowie dem Abstand eng benachbarter Peaks (Doppelpeaks) charakterisieren. Doppelpeaks treten beispielsweise bei nominell symmetrischen Sensorstrukturen wie quadratischen Membranen infolge prozessbedingter geometrischer Toleranzen oder asymmetrischer mechanischer Spannungen auf. Die Herausforderung bei der automatischen Detektion von Frequenzpeaks besteht darin, dass sich die FRF der verschiedenen Sensortypen hinsichtlich der drei Klassifizierungsmerkmale stark unterscheiden können. Absolute Kriterien, wie z.B. minimale Amplitudenwerte, lassen sich daher bei der Peakdetektion nicht verwenden.

Die Peakdetektion erfolgt in einem am IMMS entwickelten zweistufigen Algorithmus entsprechend Abbildung 5. Im ersten Schritt werden Startwerte für die sich anschließende nichtlineare Regression der Peakparameter der Lorentz-Funktion

$$L(x) = A \frac{1}{1 + \left(\frac{x - x_0}{x_h}\right)^c}$$

mit der Peakamplitude A , der Lage des Peaks x_0 , der Halbwertsbreite x_h und dem Regressionsexponenten c bestimmt. Im zweiten Schritt schließt sich eine nichtlineare Regression der Peakparameter an. Um die Dauer des Postprocessings einer gemessenen Frequenzantwort kleiner als die Messzeit von einer Sekunde zu halten, wurden zahlreiche zeitintensive Funktionen in C++ implementiert und in das Tool eingebunden.

Detektion von Frequenzmodi

Die Kenntnis der Eigenfrequenzwerte ist für die Identifikation von Parametern eine notwendige Bedingung, jedoch nicht in jedem Fall hinreichend. So können z.B. mechanische Spannungen die Reihenfolge der Frequenzmodi verschieben. Die Zuordnung von Schwingungsmoden zu den Frequenzwerten erfolgt typischerweise inner-

Mehr zu Test-
entwicklungen:

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019

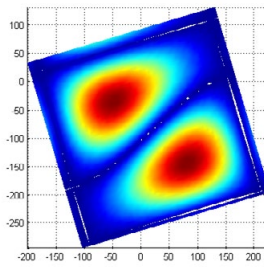
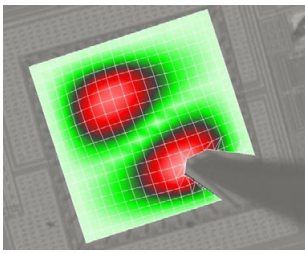


Abbildung 6:

Gemessener (links) und zugeordneter Schwingungsmode (rechts).

Quelle: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

halb der Charakterisierung, da hier die Messzeit im Gegensatz zum Produktionstest eine untergeordnete Rolle spielt. Die Definition eines Messrasters mit mehreren Messpunkten ermöglicht dabei die Auswertung der Schwingformen.

Das IMMS hat zwei unterschiedliche Algorithmen implementiert. Wenn keine Simulationsdaten vorliegen oder sich die simulierte Schwingform aufgrund ihrer Komplexität nur schlecht mit einer Ansatzfunktion beschreiben lässt, kann die Ordnung der Schwingform aufgrund einer Detektion der Schwingungsbäuche und -knoten detektiert werden. Bei einfachen geometrischen Strukturen wie z.B. Membranen lassen sich die gemessenen Modi über eine nichtlineare LSQ-Regression der Parameter der Ansatzfunktion beschreiben und den simulierten Modi zuordnen, siehe Abbildung 6.

Ausblick:

Gesamtergebnis des Projekts IRIS ist ein fertigungstaugliches Wafertestverfahren, mit dem verkapselte Sensoren mithilfe vibrometrischer Messungen von Out-of-plane-Schwingungen untersucht und Peaks in gemessenen Frequenzantworten automatisch detektiert und ausgewertet werden können. Das Verfahren ermöglicht so beispielsweise das In-line-Monitoring des Kavitätsdrucks von Inertialsensoren und die Detektion von mechanischen Verspannungen, die durch den Prozessschritt des Verkappens in die MEMS-Strukturen eingepreßt werden können. Beides stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber der bisher verfügbaren Messtechnik für die Fertigungsprozessüberwachung von MEMS dar. Die Projektpartner sind bereits mit MEMS-Herstellern im Austausch dazu, wie sich die neuen Lösungen konkret in die Fertigung integrieren lassen.

Mehr zu Test-entwicklungen:
www.imms.de

IRIS auf
www.imms.de

Mehr MEMS-Projekte auf
www.imms.de

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

GEFÖRDERT VOM



Das Projekt IRIS wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 13N13565 gefördert.

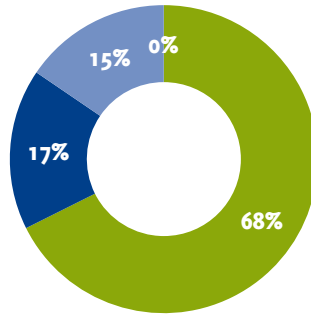


**ZAHLEN,
STRUKTUREN
UND BELEGE**

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

Zum Ende des Geschäftsjahres 2019 waren am IMMS 71 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter tätig.¹ Hiervon waren 48 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 11 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 83 % aller Beschäftigten.

Personalstruktur



Wissenschaft | Administration/Azubi
studentische Mitarbeit | sonstige Hilfskräfte

Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr 2019 am IMMS insgesamt 27 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 3 Bachelorarbeiten und 3 Masterarbeiten. 8 Beschäftigte waren zur Promotion an einer Universität eingeschrieben.

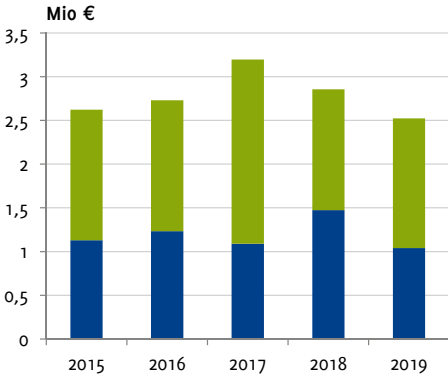
Unsere engagierten und hochqualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind die Grundlage für die weiterhin erfolgreiche Entwicklung des IMMS. In 2019 konnten wir weitere Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler für das IMMS gewinnen. Insgesamt waren in 2019 ohne Betrachtung studentischer Mitarbeit 8 Nationalitäten am IMMS vertreten, was den internationalen Austausch für die Forschung und Entwicklung am IMMS stärkt.

Das hohe Vorjahresniveau bei den Drittmittelträgen insgesamt konnte 2019 noch nicht wieder erreicht werden. Dies spiegelt sich insbesondere in der Entwicklung der Erträge aus Industrieprojekten wider, die an das hohe Niveau des Vorjahres nicht anknüpfen konnten. Hier wirkte sich die verschlechterte gesamtwirtschaftliche Entwicklung aus. Die Erträge im Bereich der öffentlichen Förderprojekte konnten dagegen weiter gesteigert werden.

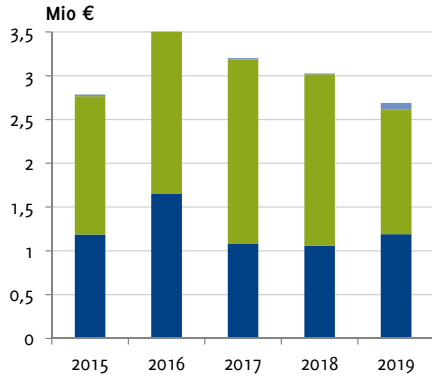
Die Entwicklung der Drittmittelträge zeigt sich auch bei den Projekteinnahmen, die um insgesamt rd. 11 % unter dem Vorjahreswert lagen. Gegenläufig zur Entwicklung der Erträge aus Industrieprojekten lagen die Einnahmen aus Industrieprojekten um

¹ Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2019 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit vorherigen Berichten ist daher nur bedingt möglich.

Industrieprojekte / Förderprojekte



Industrieprojekte / Förderprojekte / Sonstige

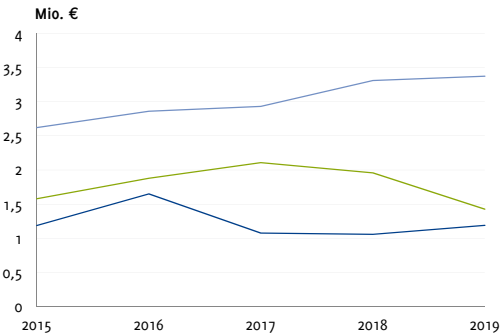


- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

rd. 12 % über dem Wert des Vorjahres. Hier wirkten sich insbesondere erst in 2019 eingehende Zahlungen aus zum Jahresende 2018 abgeschlossenen Projekten aus. Die Einnahmen aus öffentlichen Förderprojekten sind unter dem Vorjahresniveau geblieben. 8 Förderprojekte wurden in 2019 begonnen und 16 laufende Förderprojekte wurden fortgeführt.

Die institutionelle Förderung durch den Freistaat Thüringen stellt die wesentliche Finanzierungssäule des IMMS. Sie ist unverändert die Voraussetzung, um insbesondere kleine und mittlere Unternehmen Thüringens durch zukunftsgerichtete, anwendungsnahe Forschung zu unterstützen. Die geförderten internen Forschungsgruppen ermöglichen es dem IMMS, die Forschungsschwerpunkte intensiv zu bearbeiten – unabhängig von wechselnden öffentlichen Förderangeboten – und leisten somit einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg der Strategie und damit für die Zukunft des IMMS.

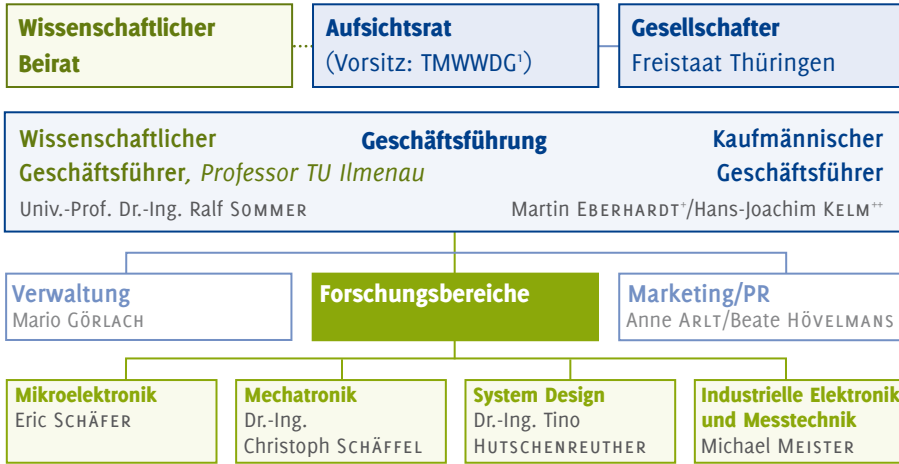
Finanzierungssäulen



Grundfinanzierung
(institutionelle Förderung)

Projektförderung
Industrieerträge

Mehr zur
Förderung auf
www.imms.de.



- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

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 (TMWWDG)
- Herr Dr. sc. Wolfgang HECKER, im Ruhestand
- Herr Dr. Jens KOSCH, Chief Technical Officer, X-FAB Global Services 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, Dresden
- **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, Jena
- 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 Global Services GmbH, Erfurt
- Herr Dr. Ralph KLÄSGES, Vice President Research & Development, Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
- Herr Dr. Peter MIETHE, Geschäftsführer, FZMB GmbH Forschungszentrum für Medizintechnik und Biotechnologie, Bad Langensalza
- 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

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

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.

Veranstaltungen

Workshop-Angebote/IMMS als Gastgeber/Veranstalter/Mitinitiator

10.01.2019 – **Stammtisch „Arbeitswelt 4.0“**, IMMS Ilmenau

15.02.2019 – **Informationsveranstaltung** für die Initiative SCHULEWIRTSCHAFT Thüringen, IMMS Ilmenau

21.02.2019 – **9. Workshop „Sensorik 4.0“**: Linux-basierte echtzeitfähige Sensoren-systeme, IMMS Ilmenau

26.02.2019 – **edaBarCamp**: may the 4th be with you!, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH Erfurt

28.02.2019 – **Workshop „Design Thinking“**, IMMS Ilmenau

14.03.2019 – **Stammtisch „Sensorik 4.0“**: RFID in der Produktion, microsensys GmbH Erfurt

04.04.2019 – **Stammtisch „Industrie 4.0“**: Testautomation und Digitaler Zwilling, IMMS Ilmenau

09.04.2019 – **User Group Meeting „Einsatz künstlicher Intelligenz in meinem Unternehmen“**, IMMS Ilmenau

09.04.2019 – **Informationsveranstaltung** für das Thüringer Ernährungsnetzwerk, IMMS Ilmenau

Aktuelle

Termine:

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019

- 08.05.2019 – **Informationsveranstaltung** für die Mittelstandsvereinigung pro Südthüringen e.V., IMMS Ilmenau
- 11.05.2019 – **Lange Nacht der Technik 2019**, IMMS Ilmenau
- 23.05.2019 – **Workshop „Hands On – Industrie-4.0-konforme Kommunikation – OPC UA“**, IMMS Ilmenau
- 28.05.2019 – **EMV-Seminar**, Veranstaltung am IMMS Ilmenau
- 02.07.2019 – **User Group Meeting „Wie geht es meiner Maschine?“**, TGZ Ilmenau
- 04.07.2019 – **Stammtisch „Arbeitswelten 4.0“**: Digitale Tools für die effektive Arbeitsorganisation, IBYKUS AG Erfurt
- 22.08.2019 – **Workshop „Design Thinking“**, IMMS Ilmenau
- 27.08.2019 – **User Group Meeting „Datensicherheit in der Cloud“**, IMMS Ilmenau
- 01.10.2019 – **Stammtisch „Unternehmen wachsen“**: Digitalisierung der Produktion für effizientes Wachstum, TGZ Ilmenau
- 05.11.2019 – **EMV-Seminar**, IMMS Ilmenau
- 08.11.2019 – **Lange Nacht der Wissenschaften**, IMMS Erfurt
- 03.12.2019 – **Informationsveranstaltung** für die Mittelstandsvereinigung pro Südthüringen e.V., IMMS Ilmenau
- 13.12.2019 – **Informationsveranstaltung** für Reinhard Bütikofer, IMMS Ilmenau

Messen/Ausstellungen

- 05.03.2019 – **VDMA-Infotag 2019**, *Messestand, Demonstrator*, Frankfurt am Main
- 28.03.2019 – **IT Leistungsschau 2019**, *Messestand*, Parksaal Arena Erfurt
- 01.04.2019 – **Hannover Messe 2019**, *Demonstrator*
- 10.09.2019 – **Saalfelder Technologiedialog 2019**, *Messestand, Demonstrator*, Bildungszentrum Saalfeld GmbH
- 24.09.2019 – **elmug4future 2019**, *Technologiekonferenz zu Condition, Health and Quality Monitoring – Sensors, Methods and Applications*, 2 *Vorträge*, 2 *Demonstratoren*, Erfurt
- 13.11.2019 – **InnoCON Thüringen 2019**, *Vortrag, Fachposter und Messestand*, Multifunktionsarena Erfurt
- 18.11.2019 – **MEDICA 2019**, *5 Demonstratoren, Thüringer Gemeinschaftsstand*, Messe Düsseldorf
- 27.11.2019 – **Transfertag an der TU Ilmenau**, *Vortrag, Messestand*, TU Ilmenau

Überblick zu Konferenzen/Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

- 23.01.2019 – **Science meets Industry in Silicon Saxony**, *Vortrag*, Fraunhofer IWU, Chemnitz
- 19.02.2019 – **Industrie-Innovations-Dialog**, *Vortrag*, IHI Arnstadt
- 19.02.2019 – **ICAART 2019**, 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, *Co-Autor Vortrag*, Prag, Tschechische Republik
- 24.02.2019 – **TuZ 2019**, 31. GI/GMM/ITG-Workshop – Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, Prien am Chiemsee
- 26.02.2019 – **embedded world 2019**, *Vortrag*, Nürnberg, Messezentrum
- 18.03.2019 – **DAGA 2019**, 45. Jahrestagung für Akustik, *Vortrag*, Stadthalle Rostock
- 20.03.2019 – **Wirtschaftsabend** Bad Kissingen, *Vortrag*
- 02.04.2019 – **IEEE RFID 2019**, 13th Annual IEEE International Conference on RFID “The premier conference for the latest discoveries in technical RFID research”, *Vortrag*, Phoenix, Arizona, USA
- 15.04.2019 – **IEEE WF-IoT 2019**, IEEE 5th World Forum on Internet of Things, *Vortrag*, Limerick, Ireland
- 24.04.2019 – **DDECS 2019**, IEEE Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems, *Vortrag*, Cluj-Napoca, Romania
- 07.05.2019 – **BioCHIP 2019**, Berlin International Forum on Biochips and Biochip Solutions, *Vortrag*, Berlin
- 24.05.2019 – **Thüringer Digitalfestival 2019: KI-Forum**, *Fachposter*, Erfurt
- 27.05.2019 – **WFCS 2019**, 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, *Vortrag*, Sundsvall, Sweden
- 19.06.2019 – **Workshop “Digitale Services als Grundlage neuer Geschäftsmodelle”** des Thüringer ClusterManagements, *Vortrag*, DAKO GmbH Jena
- 25.06.2019 – **20. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019**, *Vortrag*, Nürnberg
- 26.06.2019 – **Rudolstädter Kunststofftage**, Workshop „Erste Schritte in eine digitalisierte Wirtschaft“, *Vortrag*, TITK Rudolstadt
- 07.07.2019 – **ICSV26**, 26th International Congress on Sound and Vibration, *Fachposter*, Montréal, Canada
- 08.07.2019 – **HiTEN 2019**, International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics Network, *Vortrag*, St. Anne’s College in the University of Oxford, United Kingdom

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Aktuelle

Termine:

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019

15.07.2019 – **SMACD 2019**, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design, 5 *Vorträge*, Lausanne, Schweiz

> *INPOS*

> *INSPECT*

15.07.2019 – **PRIME 2019**, 15th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics; 1 *Vortrag (Silver Leaf Award)*, Lausanne, Schweiz

> *ADMONT*

> *Ko²SiBus*

20.08.2019 – **Unternehmerworkshop** der GFE “Optimieren sie ihre Prozesse”, *Vortrag*, Schmalkalden

> *AgAVE*

> *Dig. Engineering*

29.08.2019 – **ISEF 2019**, 19th edition of International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, *Vortrag*, Nancy, France

> *IRIS*

> *Inhalt*

04.09.2019 – **IFAC 2019**, The International Federation of Automatic Control, Invited Session “Precision scanning systems in metrology and manufacturing“, *Vortrag*, Wien

* *Förderung*

18.09.2019 – **IDAACS 2019**, 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, *Vortrag*, Metz, France

24.09.2019 – **elmug4future 2019**, Technologiekonferenz zu Condition, Health and Quality Monitoring – Sensors, Methods and Applications, 2 *Vorträge*, 2 *Demonstratoren*, Erfurt

09.10.2019 – **Vortragsveranstaltung** der Initiative “Zukunft.Coburg.Digital” zu Retrofit, *Vortrag*, Coburg

17.10.2019 – **Tech Biz Day with X-FAB** – From Innovation to Medical Electronics, *Vortrag*, Hotel NH Lyon Airport, France

25.10.2019 – **DCASE 2019**, Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events, *Co-Autor Vortrag*, New York City, USA

13.11.2019 – **InnoCON Thüringen 2019**, *Vortrag, Fachposter und Messestand*, Multifunktionsarena Erfurt

26.11.2019 – **TELFOR 2019**, 27th Telecommunications Forum TELFOR 2019, *Vortrag*, Sava Center, Belgrade, Serbia

26.11.2019 – **Vortragsveranstaltung** „Ressourceneffizienz vor Ort“, Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur (ThEGA), 2 *Vorträge*, IHK Südthüringen, Suhl

Aktuelle

Termine:

www.imms.de

27.11.2019 – **Transfertag an der TU Ilmenau**, *Vortrag, Messestand*

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Applying Event-Based Sending Intervals to Enable Low Energy OPC-UA on Sensor Nodes, Jurgen TROCI¹. Silvia KRUG^{1,2}. Tino HUTSCHENREUTHER¹. 2019 *27th Telecommunication Forum (TELFOR)*, 26 – 27 November 2019, Belgrade, Serbia, pp. 1-4. DOI: doi.org/10.1109/TELFOR48224.2019.8971257. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-

Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden.

Urban Noise Monitoring in the StadtLärm Project – a Field Report, Jakob ABEßER¹. Marco GÖTZE². Tobias CLAUß¹. Dominik ZAPF¹. Christian KÜHN¹. Hanna LUKASHEVICH¹. Stephanie KÜHNLENZ³. Stylianos MIMILAKIS¹. *Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE) 2019*, 25 – 26 October 2019, New York City, USA, DOI: doi.org/10.33682/s9w3-5341. 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.

Silicon-Ceramic Composite Substrate: A Promising RF Platform for Heterogeneous Integration, Michael FISCHER¹. Sebastian GROPP¹. Johannes STEGNER¹. Astrid FRANK². Martin HOFFMANN¹. Jens MUELLER¹. in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 10, pp. 28 – 43, Oct. 2019. DOI: doi.org/10.1109/MMM.2019.2928675. ¹IMN MacroNano,

Technische Universität Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Enhancing RF Bulk Acoustic Wave Devices: Multiphysical Modeling and Performance, Vikrant CHAUHAN¹. Christian HUCK². Astrid FRANK³. Wolfgang AKSTALLER¹. Robert WEIGEL¹. Amelie HAGELAUER¹. in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 10, pp. 56 – 70, Oct. 2019. DOI: doi.org/10.1109/MMM.2019.2928677. ¹Institute for Electronics Engineering,

University of Erlangen-Nuremberg, Germany. ²Institute of Physics, University of Augsburg, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

A Cost-Efficient and Continuous Ethernet Cable Diagnosis Technique based on Undersampling, Ahmed Yahia KALLEL¹. Sebastian UZIEL². Manuel SCHAPPACHER³. Axel SIKORA³. Thomas KEUTEL¹. Olfa KANOUN¹. *10th IEEE International Conference on*

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Metz, France, 18 – 21 September 2019, pp. 695 – 700. DOI:

doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924458. ¹Technische Universität Chemnitz, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Hochschule Offenburg, Germany.

Integrated Planar 6-DOF Nanopositioning System, Stephan GORGES¹. Steffen HESSE¹.

Christoph SCHÄFFEL¹. I. ORTLEPP². E. MANSKE². E. LANGLOTZ². D. DONTSOV³. *11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2019)*, 4 – 6 September 2019, Vienna, Austria, *IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 15, 2019, Pages 313 – 318, ISSN 2405-8963, DOI: doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.693*. ¹IMMS Institut für

Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, Germany. ³SIOS Meßtechnik GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Design of a Test Station for Magnetolectric Sensor Development, Maximilian KREY¹.

Hannes TOEPFER¹. Roman PARIS². Thomas FROEHLICH³. *19th edition of International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2019)*, 29 – 31 August 2019, Nancy, France, pp. 1 – 2, DOI: doi.org/10.1109/ISEF45929.2019.9097048.

¹Technische Universität Ilmenau, Advanced Electromagnetics Group, Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Universität Ilmenau, Process Measurement Technology Group, Ilmenau, Germany.

Modeling of Low-dropout Regulator to Optimize Power Supply Rejection in System-on-Chip Applications, Jun TAN¹. Ralf SOMMER².

16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lausanne, Switzerland, 15 – 18 July 2019, pp. 113 – 116.

DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795239. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Power to the Model: Generating Energy-Aware Mixed-Signal Models using Machine Learning, Martin GRABMANN¹. Frank FELDHOFF². Georg GLÄSER¹.

16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lausanne, Switzerland, 15 – 18 July 2019, pp. 5 – 8.

DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795295. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Department of Advanced Electromagnetics, Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany.

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

Will There be Light? – Simulative Prediction of Fluorescence Measurements, Florian KÖGLER¹. Alexander HOFMANN¹. Georg GLÄSER¹. *16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lausanne, Switzerland, 15 – 18 July 2019, pp. 157 – 160. DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795225.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

Efficient Design and Layout of Capacitive 3D Accelerometer, Steffen MICHAEL¹. Ralf SOMMER¹. *16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lausanne, Switzerland, 15 – 18 July 2019, pp. 225 – 228. DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795280.*

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

Analysis and Optimization of Power Supply Rejection for Power Management Unit Design in RFID Sensor applications, Jun TAN¹. Ralf SOMMER¹. *16th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Lausanne, Switzerland, 15 – 18 July 2019, pp. 181 – 184. DOI: doi.org/10.1109/SMACD.2019.8795258.*

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

Design of a Capacitive Humidity Sensor Frontend with an Adaptive Resolution for Energy Autonomous Applications, Maximilian WIENER¹. Benjamin SAFT¹. *15th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 15 – 18 July 2019, Lausanne, Switzerland, pp. 137 – 140, DOI: doi.org/10.1109/PRI-ME.2019.8787836.*

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

The sound of ultrasound, Nicki BADER¹. Peter HOLSTEIN¹. Hans-Joachim MÜNCH¹. Sebastian UZIEL². Tino HUTSCHENREUTHER². Steffen SEITZ¹. *26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), 7 – 11 July 2019, Montréal, Canada, ISBN: 9781510892699.*

¹SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 06112 Halle, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alle Publikationen auf www.imms.de.

A modular application specific active test environment for high-temperature wafer-test up to 300 °C, Michael MEISTER¹. Marco REINHARD¹. *International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics Network (HiTEN 2019)*, 8 – 10 July 2019, St. Anne's College in the University of Oxford, Oxford, United Kingdom, DOI: doi.org/10.4071/2380-4491.2019.HiTen.000122. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-

Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Modular Desktop Platform for High-Temperature Characterization and Test up to 300°C, Tom REINOLD¹. Björn BIESKE¹. Georg GLÄSER¹. Michael MEISTER¹. *International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics Network (HiTEN 2019)*, 8 – 10 July 2019, St. Anne's College in the University of Oxford, Oxford, United Kingdom, DOI: doi.org/10.4071/2380-4491.2019.HiTen.000117. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik-

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

Applying OPC-UA for Factory-Wide Industrial Assistance Systems, Björn BARIG¹. Kaja BALZEREIT². Tino HUTSCHENREUTHER¹. *15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, 27 – 29 May 2019, Sundsvall, Sweden, 2019, pp.

1 – 4. DOI: doi.org/10.1109/WFCS.2019.8757868. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Fraunhofer IOSB INA, Lemgo, Germany.

From Constraints to Tape-Out: Towards a Continuous AMS Design Flow, Andreas KRINKE¹. Tilman HORST¹. Georg GLÄSER². Martin GRABMANN². Tobias MARKUS³. Benjamin PRAUTSCH⁴. Uwe HATNIK⁴. Jens LIENIG¹. A. Krinke et al., *2019 IEEE 22nd International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*, Cluj-Napoca, Romania, 24 – 26 April 2019, pp. 1 – 10. DOI: doi.org/10.1109/DDECS.2019.8724669.

¹Technische Universität Dresden, Institute of Electromechanical and Electronic Design, Dresden, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Heidelberg University, ZITI, Computer Architecture Group, Heidelberg, Germany. ⁴Division Engineering of Adaptive Systems, Fraunhofer IIS/EAS, Institute for Integrated Circuits, Dresden, Germany.

A Case Study on Energy Overhead of Different IoT Network Stacks, Silvia KRUG^{1,2}.

Irida SHALLARI¹. Mattias O'NILS¹. *IEEE 5th World Forum on Internet of Things*, 15 – 17 April 2019, Limerick, Ireland, 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 528 – 529. DOI: doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767284. ¹Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme

gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

An RFID to I²C Bridge IC with Supply Interference Reduction for Flexible RFID Sensor Applications, Jun TAN¹. Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. Alexander ROLAPP¹. Jonathan GAMEZ¹. Moataz ELKHARASHI¹. Benjamin SAFT¹. Sylvo JÄGER². Ralf SOMMER¹. 2019 *IEEE International Conference on RFID (RFID), Phoenix, AZ, USA, 2 – 4 April 2019*, pp. 1 – 6, DOI: doi.org/10.1109/RFID.2019.8719257. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Microsensys GmbH, Erfurt, Germany.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

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. Eric SCHÄFER¹. Ralf SOMMER¹. in *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 3, no. 1, pp. 35 – 45, March 2019. DOI: doi.org/10.1109/JRFID.2019.2896145. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Reutlingen University, Reutlingen, Germany.

Data-driven Identification of Causal Dependencies in Cyber-Physical Production Systems, Kaja BALZEREIT¹. Alexander MAIER¹. Björn BARIG². Tino HUTSCHENREUTHER². Oliver NIGGEMANN¹. *11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2019. Proceedings. vol.2, pp. 592-601, 19 – 21 February, 2019, Prague, Czech Republic, SciTePress, 2019, ISBN: 978-989-758-350-6. <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/ProceedingLink.aspx?ID=1137>* ¹Fraunhofer IOSB-INA Institutsteil für industrielle Automation, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Vortrag und Posterpräsentation

Überwachung von Druckluftanlagen zum Einsparen von Ressourcen, Sebastian UZIEL¹. *Veranstaltungsreihe Ressourceneffizienz vor Ort – Digitalisierung & Ressourceneffizienz, 26. November 2019, Industrie- und Handelskammer Südthüringen, Suhl.*

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

Retrofit – alte Maschinen fit machen für Industrie 4.0 durch nachrüstbare Sensorik, Franziska BUCHWALD¹. *Veranstaltungsreihe Ressourceneffizienz vor Ort – Digitalisierung & Ressourceneffizienz, 26. November 2019, Industrie- und Handelskammer Südthüringen, Suhl.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Ilmenau, Germany.

Jahresbericht

Erschließung maschinellen Lernens und künstlicher Intelligenz für neue Anwendungsgebiete, Georg GLÄSER¹. *InnoCON Thüringen 2019, Intelligent.Digital.Vernetzt*, 13. November 2019, Multifunktionsarena, Erfurt. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

La petite puce – Customized Chip Design for optical and wireless Sensors, Peggy REICH¹. *Tech Biz Day – From Innovation to Medical Electronics*, 17 October 2019, Lyon, France. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Herausforderungen im Entwurf von Mixed-Signal Systemen, Georg GLÄSER¹. *VDE Vortragsreihe „Aktuelle Herausforderungen der Elektrischen Energietechnik“*, 14. Oktober, TU Ilmenau, Ilmenau. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alles Retro? – Sensoren machen alte Maschinen fit für Smart Factory und KI, Wolfram KATTANEK¹. *Retrofit: Wie Sensorik alte Maschinen fit für die Smart Factory macht, Zukunft.Coburg.Digital*, 9. Oktober 2019, Coworking Space, Coburg. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Intelligente Instandhaltung und Optimierung der Energieeffizienz für Druckluftanlagen, Sebastian UZIEL¹. *elmug4future, Technologiekonferenz*, 24. – 25. September 2019, Erfurt. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Forscherguppe Green-ISAS – Grundlagentechnologien für autonome Industrie-4.0-konforme Sensor/Aktor-Systeme, Wolfram KATTANEK¹. *Tagung industrienaher Forschergruppen*, 23. September 2019, Friedrich-Schiller-Universität Jena. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Fehlerursachenanalyse entlang verteilter Produktionsanlagen mit Hilfe lernender Assistenten, Kaja BALZEREIT¹. TIÑO HUTSCHENREUTHER². *Informationstag „Intelligente Produktionsprozesse: Forschung zu Machine Learning und Künstlicher Intelligenz“*, 12. September 2019, Frankfurt am Main. ¹Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Institutsteil Industrielle Automation, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> INPOS
> INSPECT
> ADMONT
> Ko²SiBus
> AgAVE
> Dig. Engineering
> IRIS
> Inhalt
* Förderung

Alle Publikationen auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

Alles Retro? – Sensoren machen alte Maschinen fit für Smart Factory und KI, Wolf-

ram KATTANEK¹. Optimieren Sie Ihre Prozesse – Praxisbeispiele aus der Initiative

Mittelstand-Digital, 20. August 2019, GFE Schmalkalden e.V., Schmalkalden. ¹IMMS

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

RFID-basierte Sensorlösungen für den industriellen Einsatz, Eric SCHÄFER¹. Erste

Schritte in eine digitalisierte Wirtschaft, Rudolstädter Kunststofftage, 26. Juni 2019,

Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V., Rudolstadt. ¹IMMS Insti-

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

Modulare Sensor-Testplattform für Hochtemperaturanwendungen bis 300 °C, Björn

BIESKE¹. Tom REINHOLD¹. Marco REINHARD¹. 20. GMA/ITG Fachtagung Sensoren

und Messsysteme 2019, 25. – 26. Juni 2019, Nürnberg. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

IntelligEnt – Künstliche Intelligenz und Machine Learning für den Entwurf und die

Verifikation komplexer Systeme, Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. Thüringer

Forum Künstliche Intelligenz, 24. Mai 2019, Erfurt, comcenter Brühl. ¹IMMS Institut für

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

Customer-specific integrated microelectronics for the application in life-sciences,

Peggy REICH¹. BIOCHIP – International Forum on Biochips and Biochip Solutions, 7

– 8 May 2019, Berlin. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693

Ilmenau, Germany.

Nutzung der Hörbarmachung von Ultraschallsignalen zur (werkstofflichen) Zu-

standsbewertung von Maschinen- und Bauteilen, Nicki BADER¹. Peter HOLSTEIN¹.

Andreas THARANDT¹. Sebastian UZIEL². Tino HUTSCHENREUTHER². DAGA 2019, 45.

Jahrestagung für Akustik, 18. – 21. März 2019, Rostock. ¹SONOTEC Ultraschallsensorik Halle

GmbH, 06112 Halle, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH,

98693 Ilmenau, Germany.

Modellierung und Simulationen zur Ermittlung geeigneter Magnetfeld-Sensor-

Geometrien, Jenny KLAUS¹. 3. Statusworkshop der Forschergruppe MagSens. 18.

März 2019, Technische Universität Ilmenau, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

120

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Alle Publi-

kationen auf

www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

Assistance Systems for Industrial 4.0 Environments, Björn BARIG¹. *embedded world Conference – Internet of Things – Platforms & Applications, Session 1.3: Internet of Things IV OPC UA 14.0, 26 – 28 February 2019, Nürnberg, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Messumgebung zur dynamischen Charakterisierung des Leistungsverbrauchs von Ultra-Low-Power-Schaltungen, Marco REINHARD¹. Alexander ROLAPP¹. Benjamin SAFT¹. Michael MEISTER¹. *31. GI/GMM/ITGWorkshop, Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2019), 24. – 26. Februar 2019, Prien am Chiemsee.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Messverfahren zur HF-Charakterisierung des Crosstalks verschiedener Halbleitertechnologien, Björn BIESKE¹. Dagmar KIRSTEN². Michael OTT³. Michael FREY³. *31. GI/GMM/ITG-Workshop, Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2019), 24. – 26. Februar 2019, Prien am Chiemsee.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany. ³Melexis GmbH, Germany.

Energieautarkes Industrie-4.0-konformes Funksensorsystem, Wolfram KATTANEK¹. *Science meets Industry, 23. Januar 2019, Chemnitz.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Fachartikel in Zeitschriften

Gesteigerte Wertschöpfung in modularen Systemen – Fehlerursachenanalyse für Produktionsanlagen, Kaja BALZEREIT¹. Björn BARIG². Alexander MAIER¹. *atp magazin, 8/2019, Vulkan-Verlag.* ¹Fraunhofer IOSB-INA Institutsteil für industrielle Automation, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Ein RFID-Chip betreibt batterieles energieintensive Sensoren, Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. Peggy REICH¹. Eric SCHÄFER¹. Hendrik HÄRTER². *Elektronikpraxis, Heft 14, 18. Juli 2019, S. 48 – 50, 2019, online: www.elektronikpraxis.vogel.de/ein-rfid-chip-betreibt-batterieles-energieintensive-sensoren-a-846415/.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Elektronikpraxis, Redakteur.

Offengelegte Patente

DE 10 2017 130 198 A1 „Analyseanordnung zur Durchführung biologischer und/oder chemischer Analysen von Substanzen sowie Verfahren zu seiner Herstellung“. Alexander HOFMANN. Holger PLEß. Balázs NÉMETH. André JÄGER. Michael MEISTER.

122

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Erteilte Patente

DE 10 2015 119 969 B4 „Anordnung zum Betrieb und/oder zur Messung der Erzeugerleistung eines kapazitiven Energie-Harvesters“. Björn BIESKE. Gerrit KROPP.

DE 10 2012 215 600 B4 „Kapazitiver Energiewandler und Verfahren zum Betreiben eines kapazitiven Energiewandlers“. Benjamin SAFT. Bianca LEISTRITZ. Stefan HAMPL. Eckhard HENNIG.

DE 10 2011 051 020 B4 „Gleichstromlinearantrieb mit einem einen permanentenerregten Magnetkreis umfassenden Stator und einem eine bewegliche Spule umfassenden Läufer“. Christoph SCHÄFFEL. Dominik KAROLEWSKI. Michael KATZSCHMANN. Jorge Amado GONZÁLEZ WHITTINHAM. Volker BORNMANN.

Alle Patente:

www.imms.de.

* Förderung

- Die Arbeiten im Verbundprojekt **ADMONT** wurden 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**.



123

- > **INPOS**
- > **INSPECT**
- > **ADMONT**
- > **Ko²SiBus**
- > **AgAVE**
- > **Dig. Engineering**
- > **IRIS**
- > **Inhalt**

* Förderung

- Das IMMS wird im **Wachstums Kern HIPS** im Rahmen der Initiative „Unternehmen Region“ in den Verbundprojekten 1 und 2 unter den Förderkennzeichen **03WKDG01E** und **03WKDG02H** durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



- Das Projekt **IRIS** wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **13N13565** gefördert.



- Das Projekt **INPOS** wurde unter dem Kennzeichen **ZF408707LT7** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



- Das Projekt **SensoMem** wird unter dem Förderkennzeichen **ZF4085711CR9** im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.
- Das Projekt **StadtLärm** wurde unter dem Kennzeichen **ZF4085703LF6** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

- Das Projekt **AgAVE** wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie als Vorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) unter dem Kennzeichen **19341BG** gefördert.



Mehr zur
Förderung auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019

- 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:



- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS

- 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:



- > Inhalt
- * Förderung

- Die Förderung des Vorhabens **EXPRESS** erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft mit dem Förderkennzeichen **FKZ 28DE102C18**.

Gefördert durch:



- Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben **INSPECT** wurde 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 **KSS-Kontrolle** wird vom Freistaat Thüringen unter der Nummer **2018 FE 9009** (Vorhaben-Nr. / Verbund 2018 VF 0004) gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.

Mehr zur Förderung auf www.imms.de.

- Die Forschergruppe **IntelligEnt** wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen **2018 FGR 0089**.
- Die Forschergruppe **MagSens** wird gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen **2017 FGR 0060**.
- Die Forschergruppe „**Digital Engineering** für Planungs- und Revitalisierungsprozesse von Stadtquartieren“ wurde durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen **2016 FGR 0026** gefördert.



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

- Das **Graduiertenkolleg 2182** „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wird unter dem Förderkennzeichen **DFG GRK 2182** der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.



**Mehr zur
Förderung auf
www.imms.de**

5G Mobilfunkstandard der fünften Generation	KSS Kühlschmierstoff	> INPOS
6LoWPAN IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network, Protokoll für Nahbereichsfunknetze	MCU Microcontroller Unit, Mikrocontroller-Einheit	> INSPECT
ADC Analog-to-Digital-Converter, AD-Wandler	MDI Medium Dependent Interface, Schnittstelle	> ADMONT
API Application Programming Interface, Anwendungsprogrammierschnittstelle	MDIO Management Data Input/Output, Schnittstelle	> Ko²SiBus
ASIC Application-specific Integrated Circuit, appli- kationsspezifische integrierte Schaltung	MEMS Mikroelektromechanische Systeme	> AgAVE
B2C Business-to-Consumer-Geschäftsbeziehung	MIB Management Information Base, Verwaltungs- informationsbasis	> Dig. Engineering
CMOS Complementary metal-oxide Semiconduc- tor, komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter	ML Maschinelles Lernen	> IRIS
CoAP Constrained Application Protocol, Web- Transfer-Protokoll für das IoT	MQTT Message Queuing Telemetry Transport, im Internet der Dinge etabliertes Protokoll	> Inhalt
CP(P)S Cyber-phisches (Produktions-) System	NFC Near Field Communication, Standard zur Nahfeld-Datenübertragung auf RFID-Basis	* Förderung
EDA Electronic Design Automation, rechnerge- stützte Entwurfsautomatisierung	OEM Original Equipment Manufacturer, Erstausrüster	
EMV Elektromagnetische Verträglichkeit	OPC UA Open Platform Communications Unified Architecture, industrielles Protokoll zur Kommu- nikation zwischen Maschinen	
FEM Finite-Elemente-Methode	PHY Physical Layer, physische Schnittstelle	
FPGA Field Programmable Gate Array, vor Ort programmierbare Logik-Gatter-Anordnung	POCT Point-of-Care-Testsystem zur Vor-Ort- Diagnostik	
FRF Frequency Response Function, frequenz- abhängige Übertragungsfunktion	PSA Prostataspezifisches Antigen	
GUI Graphical User Interface, grafische Benutzer- oberfläche	RFID Radio-Frequency Identification	
HF Hochfrequenz	RMS Root Mean Square, quadratischer Mittelwert	
HRP Horseradish peroxidase, Meerrettich-Peroxidase	S2DES Smart sensor-based Digital Ecosystem Services	
I²C Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus	SCL Serial Clock	
I4.0 Industrie 4.0	SDA Serial Data	
IC Integrated Circuit, integrierte Schaltung	SiCer Silizium-(Si)-Keramik-(Cer)-Verbundsubstrat	
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engi- neers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren	SNMP Simple Network Management Protocol	
IoT Internet of Things, Internet der Dinge	SPI Serial Peripheral Interface, Schnittstelle	
ISO Internationale Organisation für Normung	TMB Tetramethylbenzidin-Substrat-Lösung	
KI Künstliche Intelligenz	TSCH Time Synchronized Channel Hopping, Zeitslot-basiertes Medienzugriffsverfahren	
KMU Kleine und mittlere Unternehmen	TSN Time-sensitive Networking, Standards zur Ethernet-Datenübertragung	
	WSN Wireless Sensor Network, drahtloses Sen- sornetz	

Impressum, Datenschutz

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.

127

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Inhalt

* Förderung

Datenschutz-
erklärung auf
www.imms.de.

Impressum
und rechtliche
Hinweise auf
www.imms.de.

Ansprech-
partner und
Anfahrt auf
www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2019