

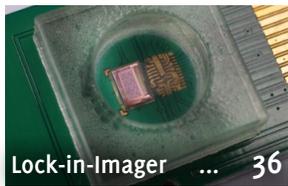


**IMMS**

JAHRESBERICHT

2020

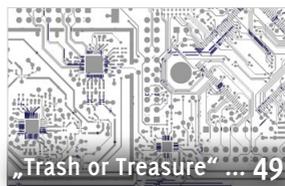




Lock-in-Imager ... 36



Maschinelles Lernen ... 43



„Trash or Treasure“ ... 49



Testen Überholspur ... 55



Sensorplattform ... 72



Nano-Hubmodule ... 84

## Inhalt

- 3 Vorwort
- 5 Strategische Schwerpunkte
- 7 Kooperation mit der TU Ilmenau
- 9 Nachwuchsförderung am IMMS
- 10 Stimmen aus dem IMMS
- 17 Stimmen aus der Industrie
- 24 Integrierte Sensorsysteme**
  - 26 Highlights 2020 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme
  - 36 Lock-In-Imager für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium
  - 43 Maschinelles Lernen zur automatisierten Modellierung im Chip-Entwurf
  - 49 „Trash or Treasure“ – Intelligente Layoutverarbeitung
  - 55 Testen auf der Überholspur – Machine Learning beschleunigt Messdaten-Analyse für ASICs um ein Vielfaches
- 61 Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme**
  - 63 Highlights 2020 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme
  - 72 Skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform für die Optimierung der Energieeffizienz
- 78 Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision**
  - 79 Highlights 2020 im Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe
  - 84 Nanometergenaue Hubmodule für die Präzisionsantriebstechnik
- 90 Zahlen, Strukturen und Belege**
  - 91 Das IMMS in Zahlen
  - 93 Organisation
  - 95 Lehrangebot und Veranstaltungen
  - 97 Publikationen
  - 101 \* Förderung
  - 104 Abkürzungen
  - 105 Impressum, Datenschutz

Mehr Jahres-  
berichte auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

## Vorwort



- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt und Prof. Dr. Ralf Sommer in einem der Labore, in denen am IMMS integrierte Sensorsysteme charakterisiert und getestet werden. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

auch für uns am IMMS brachte das Jahr 2020 neue Herausforderungen mit sich. Trotz Home-Office und strenger Corona-Regeln ist es uns gelungen, alle Projekte weitgehend wie geplant zu bearbeiten, um mit unseren Partnern international erfolgreiche Innovationen auf den Weg zu bringen und somit gerade in dieser Zeit deren Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Die kleinen und mittleren Betriebe der Region haben wir zudem mit unserem Engagement in der Cross-Cluster-Initiative Thüringen unterstützt. Dort haben wir gemeinsam mit 19 Thüringer Branchennetzwerken und Clustern alle nötigen unternehmensspezifischen Corona-Informationen zentral über eine Plattform angeboten, um die Handlungsfähigkeit der KMU zu stärken.

Wir haben 2020 auch dazu genutzt, um unsere **Strategie** weiter zu schärfen. Auf dieser Grundlage konnten wir 2020 für den Know-how-Ausbau wichtige Forschungsprojekte akquirieren, mit denen wir Anwendungsentwicklungen weiter vorantreiben und die Region stärken wollen. Bereits erreichte Meilensteine umreißt dieser Bericht:

Im **Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme** haben wir einen neuartigen Lock-In-Imager-Chip für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung entwickelt und in eine Beispielapplikation für das quantitative Auslesen von Streifentests integriert. Der Chip ermöglicht Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik, für die Konzentrationen schnell nachzuweisen sind. Für hochkomplexe und sichere integrierte Sensorsysteme forschen wir zudem daran, deren Entwurf und Test mit KI-Algorithmen und ma-

*Mehr Jahresberichte auf [www.imms.de](http://www.imms.de).*

Jahresbericht

© IMMS 2020

schinellem Lernen zu automatisieren. Die hierfür in der Forschergruppe IntelligEnt 2020 erreichten Ergebnisse erstrecken sich u.a. auf die automatisierte Modellierung im Chip-Entwurf, die intelligente Layoutverarbeitung und die beschleunigte Messdaten-Analyse.

Im **Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme** haben wir 2020 mit Industriepartnern die Entwicklung einer vernetzten skalierbaren Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform für die Optimierung der Energieeffizienz abgeschlossen. Das System wird derzeit für die Markteinführung 2022 vorbereitet.

Im **Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision** arbeiten wir im DFG-Graduiertenkolleg NanoFab seit 2017 an Lösungen für ein hochdynamisches Antriebssystem zur mehrachsigen Bearbeitung von Objekten mit Nanometer-Präzision. 2020 wurden die Arbeiten zu nanometergenauen Hubmodulen wesentlich vorangebracht.

Für all diese und weitere Lösungen, für ihr Expertenwissen, ihre persönlichen Kompetenzen und für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit möchten wir uns bei unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bedanken. Sie sind es, die Wettbewerbsvorteile für Partner erschließen, Nachwuchskräfte fördern und sich in Verbänden, Clustern und Gremien engagieren.

Wir bedanken uns auch beim Freistaat Thüringen für die institutionelle Förderung und bei unseren Gremien für Ihre Impulse und Anregungen zu unserer Strategie, mit der wir als Transferinstitution Thüringen stärken. Wir danken allen Forschungspartnern für die Inspirationen zu unserer Forschung und Entwicklung, die wir in anwendungsnahe Lösungen für die Wirtschaft überführen konnten.

Allen F&E-Partnern, Förderern und Freunden, die uns bestärken und mit uns die Zukunft gestalten wollen, danken wir herzlich für ihr Vertrauen, ihr Engagement – und ihre Anwendungsideen. Was aus einigen dieser Ideen geworden ist, erfahren Sie in diesem Bericht. Weitere Ideen möchten wir gerne mit Ihnen entwickeln. Wir freuen uns auf die Zusammenarbeit und wünschen Ihnen viel Freude und Gewinn beim Lesen.



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



Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt  
Kaufmännischer Geschäftsführer

# Leitbild und strategische Schwerpunkte

## Mission

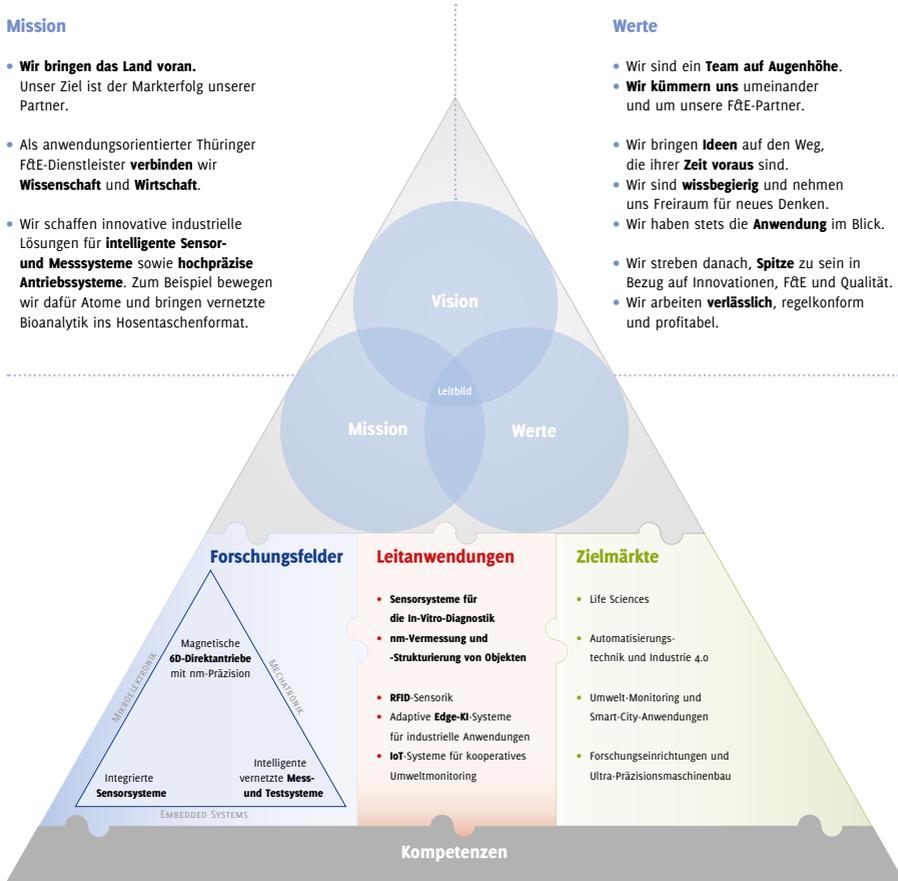
- **Wir bringen das Land voran.** Unser Ziel ist der Markterfolg unserer Partner.
- Als anwendungsorientierter Thüringer F&E-Dienstleister **verbinden** wir **Wissenschaft** und **Wirtschaft**.
- Wir schaffen innovative industrielle Lösungen für **intelligente Sensor- und Messsysteme** sowie **hochpräzise Antriebssysteme**. Zum Beispiel bewegen wir dafür Atome und bringen vernetzte Bioanalytik ins Hosentaschenformat.

## Vision

Wir sind **innovative Forscher** aus **Thüringen**, die **Wissenschaft** in die **Anwendung** bringen. Wir sind führender Partner für die Umsetzung von Ideen in Produkte.

## Werte

- Wir sind ein **Team auf Augenhöhe**.
- **Wir kümmern uns** umeinander und um unsere F&E-Partner.
- Wir bringen **Ideen** auf den Weg, die ihrer **Zeit voraus** sind.
- Wir sind **wissbegierig** und nehmen uns Freiraum für neues Denken.
- Wir haben stets die **Anwendung** im Blick.
- Wir streben danach, **Spitze** zu sein in Bezug auf Innovationen, F&E und Qualität.
- Wir arbeiten **verlässlich**, regelkonform und profitabel.



Als langjährig weiterentwickeltes Forschungsinstitut haben wir am IMMS in vielfältigen Projekten und Themenstellungen ein breites Erfahrungswissen aufgebaut. Auf dieser Grundlage haben wir unsere **Zielmärkte** neu justiert und dafür unsere **Forschungsfelder** geschärft. Das verbindende Glied sind unsere **Leitanwendungen**, die somit die Brücke zwischen Forschung und Anwendung bzw. Markt bilden: So forschen wir daran, zukunftsweisende Ergebnisse aus der Wissenschaft durch anwendungsnahe Entwicklungen für die Wirtschaft zu erschließen, um deren Wettbewerbsfähigkeit mit Innovationen zu stärken. Entwicklungen mit der Industrie zeigen wiederum den Bedarf und die Herausforderungen für neuartige Ansätze auf, die wir in unseren Forschungsfeldern bearbeiten.

Unsere Forschungsaktivitäten haben wir in den drei Forschungsfeldern **Integrierte Sensorsysteme**, **Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme** sowie **Magnetische 6D-Direktantriebe mit nm-Präzision** gebündelt. Darunter ordnen sich jeweils weitere Kernthemen ein. Die Themen sind untereinander vernetzt und interdisziplinär, wovon auch die Kooperation mit Forschungspartnern wie der TU Ilmenau sowie regionalen und überregionalen Forschungseinrichtungen, Technologieanbietern und der Industrie geprägt ist.

### Kernthemen

In unseren Kernthemen erforschen wir spezifische Schwerpunkte innerhalb eines Forschungsfeldes. Im **Forschungsfeld „Integrierte Sensorsysteme“** entwickeln wir in Halbleitertechnologien gefertigte miniaturisierte Systeme aus mikroelektronischen und/oder mikroelektromechanischen Komponenten für sensorische Anwendungen. Beispielsweise erforschen wir hierfür im Kernthema **CMOS-basierte Biosensoren** CMOS-integrierte Transducer und deren Interaktion mit biologischen Rezeptoren. Für solche und andere hochkomplexen integrierten Systeme forschen wir im Kernthema **KI-basierte Entwurfs- und Testautomatisierung** daran, deren Entwurf und Test deutlich effizienter und sicherer zu machen. Im **Forschungsfeld „Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme“** vertiefen wir beispielsweise das Kernthema **Verteilte IoT-Systeme**, um energie- und ressourcenoptimierte eingebettete Systeme z.B. für das „Internet der Dinge“ oder autarke Sensornetzwerke für das Umweltmonitoring und für Smart-City-Anwendungen zu realisieren.

### Leitanwendungen – die Brücke zwischen Forschungsfeldern und Zielmärkten

Auf der Basis unserer Forschungsarbeiten entwickeln wir beispielsweise **Sensorsysteme für die In-vitro-Diagnostik**, die ein individuelles, dezentrales Gesundheitsmonitoring für alle mit elektronischen Schnelltests ermöglichen.

Energieeffiziente Lösungen für **RFID-Sensorik** und für **IoT-Systeme** erforschen wir, um neue Anwendungen für ein **kooperatives Umweltmonitoring** zu erschließen und Prozesse in der **Industrie** ressourcenschonender zu machen.

Wir forschen an Lösungen für **adaptive Edge-KI-Systeme**, um KI auf verbrauchsarmen eingebetteten Systemen in der **Industrie** möglich zu machen und um diese in Echtzeit zu vernetzen. Um die immer höhere Komplexität dieser integrierten Systeme auf immer kleineren Halbleiterflächen fertigen zu können, forschen wir an immer präziseren **Antrieben zur Nanometer-Vermessung und -Strukturierung von Objekten**.

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 2020 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. Zur Entwicklung international erfolgreicher Innovationen für Gesundheit, Umwelt und Industrie 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“ haben das IMMS und der Lehrstuhl datenintensive Systeme und Visualisierung der TU Ilmenau anwendungsorientierte Konzepte für Machine Learning im Mikroelektronik-Entwurf erarbeitet und an vorhandene Methoden und Werkzeuge angebunden. Ziel war 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. Ergebnisse werden in diesem Bericht im Kapitel Integrierte Sensorsysteme vorgestellt.

Mehr zu

IntelligEnt auf

[www.imms.de](http://www.imms.de).

Zum Kapitel

springen.

#### Forscherguppe MagSens\*: MEMS-Sensoren zur Detektion schwächster Magnetfelder

Die von der TU Ilmenau geleitete Forschergruppe MagSens hat bis 2020 magneto-elektrische MEMS als Sensoren zur Messung schwächster Magnetfelder u.a. für Anwendungen in der Medizin untersucht. Herkömmliche ultrasensitive Magnetfeld-Sensoren erfordern aufwändige Kühlungen auf mindestens  $-196\text{ °C}$ . Das in MagSens erforschte Sensorprinzip basiert auf magnetostriktiv-piezoelektrischen Mehrschichtsystemen und wird diese Messungen ohne Kühlung ermöglichen. Das IMMS brachte sich u.a. in die Finite-Elemente-Modellierung und Simulation des Sensorprinzips ein.

Mehr zu

MagSens auf

[www.imms.de](http://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.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> 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](http://www.imms.de).  
Mehr zu Mittel-  
stand 4.0 auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

## Wachstumskern HIPS\* – High-Performance-Sensorsysteme für harsche Umgebungen

Im Wachstumskern HIPS arbeiten IMMS und TU Ilmenau sowie 5 weitere Forschungseinrichtungen und 12 Thüringer Industrieunternehmen bis 2022 daran, eine Technologieplattform rund um die von TU Ilmenau und Fraunhofer IKTS erforschte SiCer-Technologie aufzubauen. Sie verbindet Siliziumtechnologie (Si) mit keramischer Mehrlagentechnik (Cer) und ermöglicht neuartige, robuste, hochintegrierte SiCer-Hochleistungssensoren für Flüssigkeits- und Gassensorik. Das IMMS erarbeitet neuartige funktionelle Strukturen sensorischer und aktorischer mikromechanischer Elemente und entwickelt miniaturisierte Auswerteschaltungen für die SiCer-Sensoren.

Mehr zu  
HIPS auf  
[www.imms.de](http://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 engagieren sich Prof. Sommer und Prof. Töpfer mit Lehrveranstaltungen in der Grundlagenausbildung und im Masterstudium. Das IMMS fördert die Motivation und Ausbildung der Studentinnen und Studenten durch seine praktischen und industrienahe Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika.

Jahresbericht  
© IMMS 2020

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

2020 wurden 29 Studentinnen und Studenten am IMMS bei ihren Praktika oder Abschlussarbeiten betreut oder als studentische Hilfskräfte am IMMS tätig. 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.

### Studienbegleitendes, langfristiges Praxistraining für anspruchsvolle Forschungsthemen

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.

Zum Themen-  
angebot auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

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.

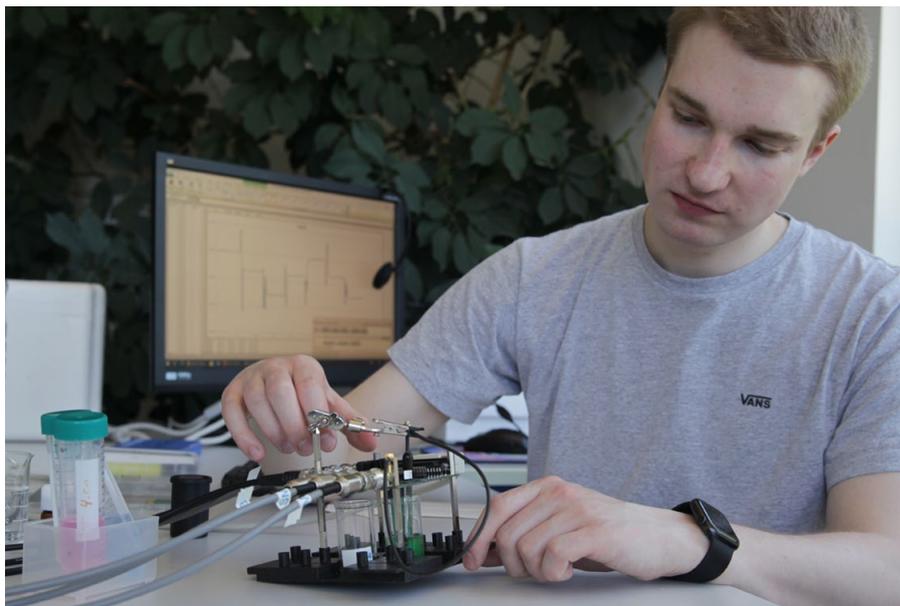
## Florian Kögler, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Ich bin seit 2017 am IMMS, seit 2020 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich Mikroelektronik. Angefangen habe ich mit einem Fachpraktikum und meiner Bachelorarbeit, die sich um die Modellierung von Fluoreszenz-basierten optischen Messsystemen drehten. In meinem Studium der Elektrotechnik & Informationstechnik an der TU Ilmenau habe ich mich in der Vertiefungsrichtung Schaltungstechnik spezialisiert. In meiner Zeit am IMMS lernte ich neue Herausforderungen kennen, die über die Studieninhalte hinausgingen. So erforderte es das Thema meiner Bachelorarbeit, die wissenschaftlichen Felder Opto-Physik, Chemie und Elektrotechnik zu verbinden.

Schön finde ich, dass viele Themen für studentische Arbeiten sich in laufende Projekte eingliedern und ihre Ergebnisse dort einfließen. Gleichzeitig wird ausreichend Zeit und Unterstützung für das Verfassen der wissenschaftlichen Arbeit geboten. Dies und nicht zuletzt das nette kollegiale Umfeld bewogen mich, auch meine Masterarbeit am IMMS durchzuführen.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

Zum Themenangebot auf [www.imms.de](http://www.imms.de).



Florian Kögler an einem Testaufbau für die Entwicklung von ionensensitiven Feldeffekttransistoren (kurz ISFETs) für Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik. Foto: IMMS.

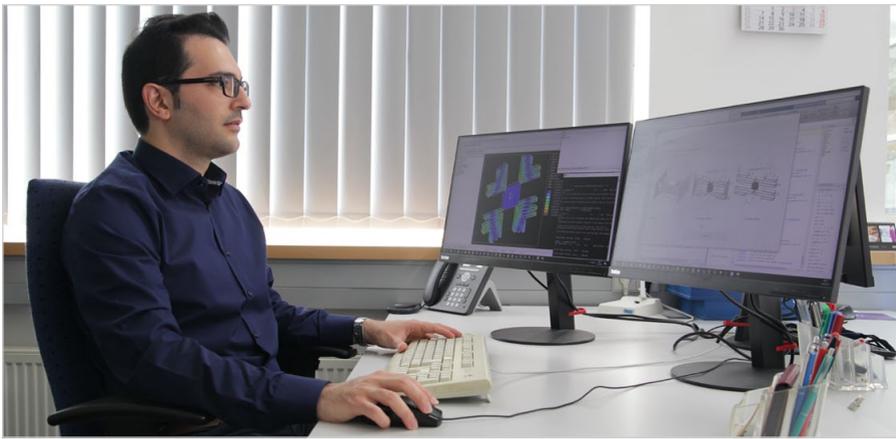
Sie beinhaltet die Entwicklung von ionensensitiven Feldeffekttransistoren (kurz ISFETs), die u.a. in der Lage sind, den pH-Wert von Flüssigkeiten zu bestimmen. Die ISFETs sollten in einem Standard-CMOS-Prozess umgesetzt werden, um die kostengünstige Fertigung ohne aufwendige Zusatzprozesse sowie die Integration in Sensor-Systeme zu ermöglichen. Dabei können vielfältige Probleme auftreten, die den Einsatz im Vergleich zu herkömmlichen pH-Glaselektroden erschweren. Im Vorfeld führten wir in unserer internen Forschungsgruppe zu integrierten Systemlösungen für Life-Sciences-Anwendungen daher eine breite Recherche durch, um die Probleme zu identifizieren, zu bewerten und Lösungsansätze zu finden. In der Masterarbeit beschäftigte ich mich dann mit den unterschiedlichen Schritten des Halbleiter-Entwurfsprozesses, angefangen bei der Anforderungsdefinition über Schaltungsdesign bis hin zum Layout, das bei ISFETs besondere Aufmerksamkeit verlangt. Dabei entstand eine Teststruktur mit verschiedenen Transistorelementen und Oberflächen, aus denen die besten ausgesucht werden sollten.

Das Thema der ISFET-Sensoren begleitet mich auch nach meinem Studium bis heute noch. Zusammen mit einem Team aus den Themengebieten Mikroelektronik und Messtechnik gelang uns die erfolgreiche Inbetriebnahme der Teststruktur. Bei ihrer Charakterisierung treten immer wieder interessante Erkenntnisse zu Tage, aber auch neue Fragen und Hürden, die zu meistern sind. Basierend auf den ersten Ergebnissen der Teststruktur entstand im Projekt SenpH außerdem ein Sensor-Chip mit digitaler Schnittstelle. Daneben untersuche ich innerhalb des Projekts VE-ARIS den Einsatz von Machine-Learning-Ansätzen, um die Produktpiraterie von Schaltkreisen zu erschweren.

Das Arbeitsklima am IMMS empfinde ich dabei als sehr angenehm. Die Arbeit in den Forschungsprojekten bietet die Möglichkeit, eigene Ideen einzubringen und zu verfolgen. Gut gefällt mir der institutsweite Wissensaustausch über Abteilungen hinweg, der sowohl in den regelmäßigen Institutskolloquien, aber auch durch Gespräche in der Mittagspause zustande kommt. Ich freue mich darauf, auch weiterhin spannenden Themen am IMMS zu begegnen.“

Projekte zu  
 integrierten  
 Sensorsystemen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Mehr Stimmen  
 aus dem IMMS:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)



Alireza Nikpourian bei der ANSYS-Simulation von MEMS-Strukturen für den Entwurf neuartiger Multisensor-Anwendungen. Foto: IMMS.

## Alireza Nikpourian, PhD, MEMS-Entwicklungsingenieur

„Meine erste Begegnung mit mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) geht auf das Jahr 2013 zurück, als ich meine Karriere als Doktorand im Iran begann. Damals wurde mir angeboten, eine Dissertation über die numerische Modellierung der nicht-linearen Dynamik eines MEMS-Resonators zu bearbeiten. Als ich meine Forschung auf diesem Gebiet begann, war ich fasziniert von der Funktionalität dieser winzigen Systeme, ihren außergewöhnlichen Anwendungen und davon, wie praktisch sie in unserem täglichen Leben sind. Nach fünf Jahren Doktorarbeit und einem Jahr Forschung und Entwicklung in einem Industrieunternehmen entschied ich mich, meine Erfahrungen durch die Arbeit im internationalen Umfeld zu erweitern. Ich beschloss, nach Deutschland zu gehen, um mein selbstgestecktes Ziel zu erreichen. Auf der Suche nach einem Job stieß ich auf eine attraktive Stellenausschreibung auf der IMMS-Website. Ich bewarb mich darauf und wurde nach einiger Zeit zu einem Vorstellungsgespräch eingeladen. Alles lief zum Glück gut und ich bekam die Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der MEMS-Gruppe, die zum Bereich ‚Mechatronik‘ gehört. Am Anfang war ich im MagSens\*-Projekt, das in Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau bearbeitet wurde. In diesem Projekt forschten wir an einem mehrschichtigen Mikrobalkenresonator, der aus einer piezoelektrischen und einer magnetostriktiven Schicht besteht und als kleiner Magnetfeldsensor eingesetzt werden kann. Wird der piezoelektrisch angesteuerte Balken einem Magnetfeld ausgesetzt, zeigt die magnetostriktive Schicht eine Änderung ihres E-Moduls, den sogenannten Delta-E-Effekt, der wiederum eine Änderung der Eigenfrequenz der ge-

*Mehr zu  
MEMS auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).*

*Mehr zu  
MagSens auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).*

samen Struktur bewirkt. Die daraus resultierende Frequenzverschiebung ermöglicht die Messung des Magnetfeldes. Neben den Forschungsprojekten stehen wir auch in enger Verbindung mit Industriepartnern und der X-FAB MEMS Foundry. Dank unserer selbstentwickelten MEMS-Bibliothek entwerfen wir auch empfindliche MEMS-Beschleunigungssensoren für unsere internationalen Kunden.

Durch den Zugang zu den industriellen Softwareprodukten und der modernen Laborausstattung bietet das IMMS die Infrastruktur, um an führenden multidisziplinären Forschungsthemen zu arbeiten und Ideen in die Praxis zu bringen.

Es ist mir eine Freude, in einem so aktiven und dynamischen Forschungsinstitut zu arbeiten. Die Leute hier sind mit Leidenschaft bei der Sache und, was am wichtigsten ist, sie sind bereit, sich gegenseitig zu unterstützen. Wann immer im Laufe eines Projekts ein Problem auftritt, egal wie groß es ist, ist immer jemand da, der hilft und Tipps gibt, um es zu lösen und das Projekt voranzutreiben. Die Arbeit mit inspirierten und talentierten Kollegen an herausfordernden Projekten hilft mir, meine Fähigkeiten zu entwickeln und gleichzeitig zur weiteren Entwicklung des IMMS beizutragen.“

### Markus Ismer, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Während meines Bachelor-Studiums ‚Elektrotechnik und Informationstechnik‘ an der TU Ilmenau konnte ich durch die Praktika verschiedene Labore der universitären



Markus Ismer mit seinem Demonstrator zum energieautarken Auslesen von LFA-Teststreifen per NFC. Foto: IMMS.

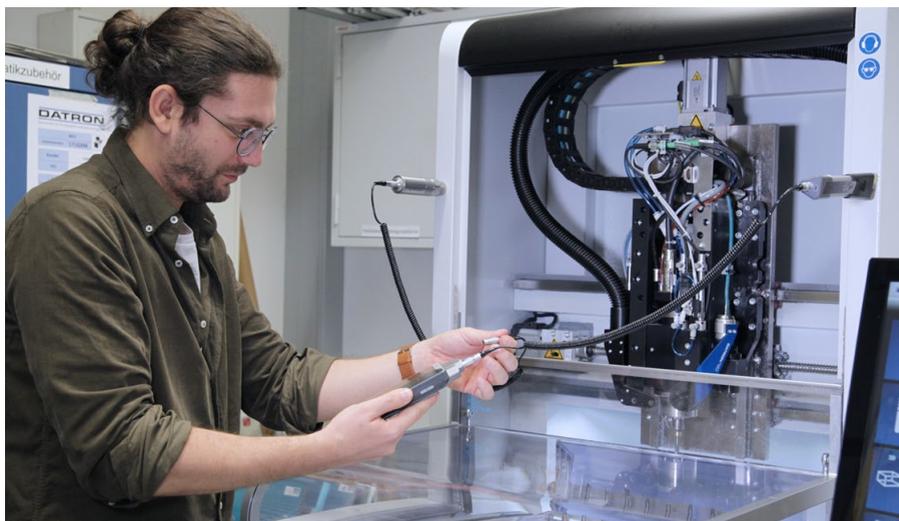
Institute kennenlernen. Sehr schön fand ich die Möglichkeit, durch Prof. Sommer ein An-Institut der TU Ilmenau, nämlich das IMMS, zu besuchen. Und ein Semester später nutzte ich die Möglichkeit, auch den Erfurter Institutsteil des IMMS zu besichtigen. Diese Einladung kam von Prof. Sommer sowie Eric Schäfer und ermöglichte auch die Führung durch Produktion und Labore der IMMS-Industriepartner X-FAB und Melexis. Durch diesen Studententag 2018, der im Zeichen der Mikroelektronik stand, konnte ich viele interessante Einblicke gewinnen und spannenden Fachvorträgen zuhören. Ich gewann den Eindruck, dass es vor allem am IMMS eine sehr angenehme Atmosphäre gibt, und habe mich dazu entschieden, während meines Studiums als Hiwi dort tätig zu sein. Ich hatte mich mit dem angenehmen Arbeitsumfeld nicht geirrt und half im Themenbereich von Michael Meister „Industrielle Elektronik und Messtechnik“ beim Aufbau eines Hochtemperatur-Transistortestsystems.

Dabei wusste ich besonders die gute fachliche Betreuung zu schätzen. Die Entscheidung, mein Fachpraktikum im siebten Semester am IMMS zu absolvieren, fiel mir daher nicht schwer. Mir war es dadurch möglich, meine theoretisch erlernten Grundlagen auf praktische Problemstellungen anzuwenden. Und in meiner daran anschließenden Bachelorarbeit entwickelte ich einen Demonstrator zum energieautarken Auslesen eines LFA-Teststreifens mittels NFC. Ich konnte dabei meine Kreativität weit ausschöpfen und produktive Fachgespräche mit meinen späteren Kollegen sowie eine gute technische Ausstattung, wie beispielsweise ein extra RFID-Messplatz, halfen mir, meine Arbeit erfolgreich zu beenden. Ich freute mich sehr über die Option, neben meinem anschließenden Masterstudium als wissenschaftlicher Mitarbeiter halbtags am IMMS tätig zu sein. Durch die Nähe zur Uni und besonders den flexiblen Arbeitszeiten ist es mir möglich, neben dem Studium umfangreiche, anwendungsnahe Erfahrungen zu sammeln und meine Fähigkeiten weiterzuentwickeln. Zurzeit arbeite ich im BMBF-Projekt „KI-EDA“ an einem modularen Mixed-Signal-Testsystem für ASICs. Da mir die Arbeit am IMMS und das kollegiale Umfeld sehr gefällt, werde ich auch meine anstehende Masterarbeit hier schreiben. Das Thema wird sich an meine bisherigen Arbeiten am IMMS anschließen.“

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

Leistungen für  
Charakterisie-  
rung und Test:  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

Mehr zu  
KI-EDA auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).



Umut Onus mit einem Ultraschallprüfgerät, das für die mehrkanalige Signalverarbeitung und Datenübertragung in Echtzeit als Edge-KI-System ausgebaut werden soll. Foto: IMMS.

### Umut Onus, Embedded Software Engineer am IMMS

„Seitdem ich mich mit Elektrotechnik beschäftige, habe ich großes Interesse an Signalverarbeitung und Telekommunikation. Während meiner Bachelorarbeit habe ich an einem Testbed für Antennen-Arrays mit Mikrocontrollern gearbeitet. Das war meine Motivation, den Schritt ins Studium an der TU Ilmenau für den Masterstudiengang Kommunikation und Signalverarbeitung zu wagen.“

Meine Masterarbeit befasste sich mit dem Thema der automatisierten Funk-signalcharakterisierung für tieffliegende Drohnen-Mobilfunkkanäle mit Hilfe von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI). Dieses Thema weckte mein Interesse aufgrund des Einsatzes von Drohnen und Mobiltelefonen bei Rettungseinsätzen nach Katastrophenszenarien. Im Laufe der Zeit entwickelte ich Interesse an KI und deren Anwendung im Bereich der Signalverarbeitung. Mit den Fortschritten im Bereich des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz können wir arbeitsintensive Aufgaben mithilfe mathematischer Modelle automatisieren, was einen großen Einfluss auf zukünftige industrielle Technologien haben wird.

Während meines Masters an der TU Ilmenau nutzte ich die Chance, als Hiwi an einem Signalverarbeitungsprojekt mit dem System-Design-Team am IMMS zu arbeiten, und ich konnte mehr zu eingebetteten Systemen in der Elektrotechnik erfahren. Das IMMS bot mir damit die großartige Gelegenheit, die Verschmelzung von Signalverarbeitung und KI auf eingebetteten Systemen zu erforschen.

Ich arbeite nun als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Signalverarbeitung und KI für deren optimalen Einsatz auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Geräten. Aktuell arbeite ich an dem Ziel, mit KI Industrie-4.0-Anwendungen zu unterstützen, wie z.B. den Zustand von Maschinen abzuschätzen oder deren Restlebensdauer vorherzusagen. Meine Forschungsinteressen umfassen die Repräsentation von Maschinensignalen in einzigartiger und komprimierter Weise in Zeit-/Frequenz-/Raum-Domänen, das Ranking und die Auswahl von aufgebauten Signalmerkmalen für deren Optimierung auf eingebetteten Zielplattformen. Dafür arbeite ich mit daran, die erforderliche KI-Verarbeitungskette von der Signalerfassung bis zur Modellimplementierung zu untersuchen und optimale Lösungen für vorliegende industrielle Prozesse zu realisieren.

Mit dem Know-how des IMMS kann ich nicht nur KI-Modelle bauen, die die Zukunft der Instandhaltung und Prognose mitgestalten können, sondern auch dazu beitragen, dass solche Modelle für eingebettete Geräte optimal und verfügbar sind. Mit solchen optimalen eingebetteten Lösungen können wir den Zustand von Maschinen mit erschwinglichen eingebetteten Plattformen bei reduziertem Kohlenstoff-Fußabdruck diagnostizieren.

Dank der fachlich sehr kompetenten Kollegen ist es sehr angenehm, am IMMS an meinen Zielen zu arbeiten. Die professionelle Kommunikation ist unkompliziert und klar. Trotz langer Schließzeiten und Homeoffice ist es angenehm, mit anderen Kollegen über integrierte digitale Plattformen zu arbeiten. Ich kann meine Wertschätzung für alle, die zu diesem gesunden Arbeitsumfeld beigetragen haben, nicht genug betonen.“

› Integrierte  
Sensorsysteme  
› Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
› Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
› Inhalt  
\* Förderung

Mehr zum  
KIQ-Projekt auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Mehr Stimmen  
aus dem IMMS:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

### Dalibor Stojkovic, ams OSRAM



Dalibor Stojkovic, Senior Director of Engineering, Accessory and Wearable Solutions, BU AOS, ams OSRAM group, Managing Director ams Sensors Germany GmbH, Jena. Foto: privat.

„Neue Technologien erforschen und realisieren – das ist unser Antrieb bei ams OSRAM. Wir verbinden Licht mit Intelligenz und Innovation mit Leidenschaft und bereichern so das Leben der Menschen. Gemäß unserer Vision, der unangefochtene Marktführer für optische Lösungen zu werden, entwickeln wir unsere Technologien in den Bereichen Bio-, Spektral-Sensorik, Gesundheitsmonitoring und Visualisierung stetig weiter. Wir ermöglichen radikal neue Anwendungen, die das Leben der Menschen besser machen – von der sichereren Reise über die effektivere medizinische Diagnose bis hin zu mehr Komfort im Alltag. Ganz nach unserem Motto: Sensing is Life.“

Unsere Kollegen am IMMS sind dafür genau die richtigen Partner. In verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten arbeiten wir eng mit dem IMMS in den Bereichen IC- und Sensorentwicklung zusammen, um unseren Vorsprung am Markt weiter auszubauen. Das IMMS unterstützt uns insbesondere beim Entwurf und der Verifikation von integrierten Schaltungen (ICs) sowie bei deren Charakterisierung und der Entwicklung von speziellen Testaufbauten.

Wir schätzen sowohl die fachliche Expertise des IMMS als auch das hohe Engagement in unseren gemeinsamen Projekten. Die proaktive und agile Arbeitsweise der Kollegen des IMMS ist ein wesentlicher Baustein für unseren gemeinsamen Erfolg. Wir sind mit dem IMMS überaus zufrieden und bedanken uns herzlich für die sehr gute Zusammenarbeit.“



Christian Paintz, IP Portfolio Development Manager, Melexis GmbH. Foto: Melexis.

„An unserem Standort in Erfurt entwickeln und produzieren wir hochintegrierte Schaltkreise hauptsächlich für die Automobilindustrie, zum Beispiel Ansteuerschaltkreise für Ambient Light LEDs, Motor-Kontroller, aber auch Sensorik-Anwendungen.

Dabei stehen unsere Chips immer wieder vor den Herausforderungen, einerseits sicher und robust zu sein und gleichzeitig immer mehr Funktionen zu integrieren. Zum einen ist es notwendig, die Schaltkreise umfassend zu analysieren und zu testen. Dabei fallen erhebliche Datenmengen an, die detailliert ausgewertet werden müssen. Zum anderen werden durch die kleineren Silizium-Strukturen und die damit verbundene höhere Integrationsdichte ungewünschte Störungen durch zum Beispiel Übersprechen zwischen im Layout benachbarten Zellen kritischer und müssen identifiziert und auf ein tolerierbares Maß reduziert werden.

Die Forschergruppe IntelligEnt, deren Sprecher ich sein durfte, begegnet dem mit dem Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens schon im Entwurfs- und Charakterisierungsprozess. Dieser Ansatz verspricht, Erfahrungswissen in neue Methoden zu integrieren und so unsere Chips durch elegante Strukturen und Verfahren besser zu machen.

Insbesondere bei der Auswertung von Messdaten hat das IMMS eindrucksvoll demonstriert, dass ein lernender Algorithmus der manuellen Auswertung ebenbürtig ist – bei gleichzeitig großer Zeitersparnis. Auch die Methoden zur Schaltungs- und Layoutanalyse verfolgen wir weiter, da wir auch hier ein großes Forschungs- und Anwendungspotential sehen. In näherer Zukunft werden uns ebenfalls die Methoden zur automatischen Abbildung des Stromverbrauchs unserer Chips helfen, die Energieeffizienz zu steigern.“

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

Mehr zu

IntelligEnt in

diesem Bericht.

„Die Ilmsens GmbH wurde 2016 aus der Technischen Universität Ilmenau heraus gegründet und entwickelt modernste Ultrabreitbandsensoren nach höchsten Qualitätsstandards. Unsere Sensoren finden international Anwendung in der Flüssigkeitsanalyse und in der Nahbereichssensorik, um Zusammensetzungen komplexer Stoffgemische sowie kleinste Bewegungen zu detektieren. Wir entwickeln und fertigen unsere Ultrabreitbandsensoren, Antennen und anwendungsspezifische Messsysteme in Ilmenau.



Hans-Christian Fritsch, Managing Director, Ilmsens GmbH, Ilmenau.  
Foto: Christoph Gorke.

Das IMMS ist für uns ein wichtiger regionaler F&E-Partner, der uns dabei unterstützt, unsere Technologie weiter zu miniaturisieren und kostengünstiger zu gestalten. Wir haben mit dem IMMS eine wichtige Komponente unserer Hochleistungssensoren von einem FPGA in einen dedizierten ASIC transferiert. Neben der methodischen Unterstützung kam uns auch die Möglichkeit entgegen, bereits vom IMMS entwickelte IP-Blöcke einsetzen zu können, wodurch wir den Entwicklungsprozess nochmals beschleunigen konnten. Auch die Kompetenzen des IMMS zur Integration von Hardware-Simulation und -Test mit Signalverarbeitungsalgorithmen hat uns geholfen, noch vor der Chipfertigung das Gesamtsystem zu optimieren.

Ilmsens ist regional stark verbunden und engagiert. Uns hat es daher besonders gefreut, dass wir als Thüringer Startup mit dem IMMS als Thüringer Forschungsinstitut eine innovative hochtechnologische Lösung mit dem Thüringer Halbleiterhersteller X-FAB realisieren zu konnten. Wir schätzen die hohe Expertise und Flexibilität sowie die kundenorientierte und die zielgerichtete Arbeitsweise der Kollegen am IMMS. Wir bedanken uns auf diesem Wege ganz herzlich für die sehr erfolgreiche Zusammenarbeit und freuen uns auf die weitere Kooperation.“

„Wir haben uns mit unseren Konstruktionen auf den teuersten Energieträger Druckluft spezialisiert. Unseren Kunden bieten wir ein Allround-Angebot rund um die energieeffiziente Anwendung von Druckluft in der Industrie. Das geht von der Effizienzberatung über maßgeschneiderte Produktentwicklungen von Mess- und Sensortechnik bis hin zum professionellen Support. Damit ermöglichen wir bereits Betriebskostensenkungen bei der Druckluftherzeugung um bis zu 60 %. Allerdings entweichen noch immer bis zu 30% der teuer erzeugten Druckluft durch Lecks in den Leitungen.



Peter Otto, Postberg+Co. GmbH.  
Foto: Postberg+Co. GmbH.

- > Integrierte Sensordaten
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

Wir arbeiten kontinuierlich daran, neue Lösungen zu entwickeln. Durch die Kooperation mit SONOTEC entstand die Idee, deren mit dem IMMS entwickelte mobile Systeme zur Leckage-Ortung mit unserer Messtechnik zu kombinieren. Unsere Systeme werden stationär in großen Versorgungsanlagen mit weitverzweigten Leitungssystemen installiert und messen Verbrauch und Durchfluss von Druckluft, Stickstoff, Sauerstoff, Helium und CO<sub>2</sub>. Wir haben unser Know-how vereint und gemeinsam ein ganzheitliches Monitoring-System für Druckluftsysteme entwickelt. Es besteht aus drahtlos vernetzten und fest installierbaren Ultraschallsensoren von SONOTEC und unseren Volumenstromsensoren, mit denen sich die Energieeffizienz der Druckluftsysteme überwachen und bewerten lässt.

Das IMMS hat dafür die modulare eingebettete Sensorplattform entwickelt. Dieses performante und skalierbare System übernimmt für jeden Messpunkt des Monitoring-Systems die digitale Verarbeitung der Sensordaten. Damit sich Sensoren flexibel für verschiedene Zwecke anpassen lassen, ohne dass man Änderungen an der Hardware vornehmen muss, hat das IMMS die Komponenten zur Signalverarbeitung mit einer modellbasierten Entwurfstechnologie entwickelt und die Anwendungsal-

gorithmen für die Integration in die elektronischen Komponenten konfiguriert. Die Plattform ist auch für künftige Anforderungen gerüstet und kann in Instandhaltungssysteme integriert werden, da durch das IMMS entsprechende Kommunikationsschnittstellen und -protokolle implementiert wurden.

Mit dem Ergebnis sind wir sehr zufrieden – die langjährigen Erfahrungen des IMMS im Entwurf von eingebetteten Systemen, mit Industrieprojekten und auch das Systemverständnis des IMMS aus den vorangegangenen Produktentwicklungen mit SONOTEC haben deutlich zum Erfolg beigetragen. Daneben hat uns die unkomplizierte und gleichzeitig professionelle Arbeitsweise sowie die angenehme und sachliche Kommunikation gut vorangebracht. Wir planen, das entwickelte System für unsere Messtechnik- und Dienstleistungsangebote zu nutzen und freuen uns auf die nächste Gelegenheit, für neue Entwicklungen mit dem IMMS zu kooperieren.“

21

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › Mag6D-nm-Direktantriebe
- › Inhalt
- \* Förderung



[www.postberg.com](http://www.postberg.com)

„STABL Energy hat eine Technologie entwickelt, die Batteriespeichersysteme grundlegend verbessert. Diese Speicher lassen sich vielseitig anwenden, z.B. für Solarstrom, für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung in Krankenhäusern oder um Lastspitzen in der Produktion zu vermeiden. Mit unseren modularen Wechselrichtern vereinfacht sich der Aufbau von Stromspeichern erheblich. Statt wie in konventionellen Systemen einen zentralen Wechselrichter statisch an Batteriemodule anzubinden, werden unsere STABL-Module mit ihren integrierten Umrichtern dynamisch miteinander verschaltet. Im Vergleich zu herkömmlichen Systemen werden Verluste um bis zu 70 % reduziert und dadurch Betriebskosten als auch CO<sub>2</sub>-Ausstoß um bis zu 40 % pro Jahr verringert. Damit das gelingt, müssen die Module hochsynchron miteinander kommunizieren. Gleichzeitig arbeiten wir permanent daran, unsere Technologie zu verbessern. Für erweiterte Funktionen sind immer neue Software-Lösungen für die Echtzeitkommunikation der Module notwendig.

Dafür arbeiten wir seit 2018 mit dem IMMS zusammen. Es hat uns dabei unterstützt, mögliche Software-Architekturen zu bewerten und es hat verschiedene Software-Bausteine für den zentralen STABL-Controller sowie für die Controller der Module entwickelt. Unter anderem hat das IMMS z.B. für den zentralen Controller die Modbus-Schnittstelle implementiert, das heißt den Stack des Kommunikationsprotokolls auf den Masterknoten portiert und an unsere Software angebunden. Mit dieser Kommu-



Arthur Singer, Gründer und CEO STABL Energy GmbH. Foto: Viktor Schwenk.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

nikationsschnittstelle lassen sich Systeme in übergeordnete Strukturen einbinden. Damit wird es jetzt möglich, unsere Technologie beispielsweise in Energiemanagementsysteme zu integrieren.

Das IMMS ist für uns auch über F&E-Projekte hinaus ein flexibler Partner, um schnell und effizient qualitativ hochwertige Lösungen zu erarbeiten. Das Selbstverständnis am Institut, sich in unsere Systeme hineinzudenken und proaktiv Lösungen zu liefern, hat uns sehr vorangebracht. Mit den Ergebnissen sind wir sehr zufrieden, ebenso mit der zielorientierten, konstruktiven und kollegialen Arbeitsweise. Wir haben das IMMS als sehr kompetenten Partner kennen und schätzen gelernt mit einer einfachen und schnellen Kommunikation und einer fast noch schnelleren Umsetzung unserer Anforderungen. Wir können das IMMS sehr empfehlen und freuen uns über eine weitere Zusammenarbeit.“

# STABL

[www.stabl.com](http://www.stabl.com)

FORSCHUNGSFELD

## INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Das IMMS hat diesen Lock-In-Imager-Chip für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium entwickelt. Der Bildsensor kann auf eine anwendungsspezifische Cartridge aufgebaut werden, die in den Demonstrator eingesteckt wird. Im Projekt MEDIKIT wurden dafür zwei Typen entwickelt – eine Cartridge mit Linse zum Auslesen von Streifen-tests und die hier abgebildete fluidische Cartridge mit Kavität und biokompatibel vergossenem Sensorchip für molekularbiologische Nachweise, die direkt auf der Chipoberfläche stattfinden. Foto: IMMS.



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

Im Forschungsfeld „Integrierte Sensorsysteme“ erforschen wir in Halbleitertechnologien gefertigte miniaturisierte Systeme aus mikroelektronischen und/oder mikroelektromechanischen Komponenten für sensorische Anwendungen sowie Methoden, um diese hochkomplexen Systeme effizient und sicher zu entwerfen.

### **Integrierte Sensorsysteme verbinden die analoge mit der digitalen Welt**

Mit diesen Silizium-Chips mit wenigen Millimetern Kantenlänge lassen sich elektrische, mechanische und optische Größen direkt erfassen, verstärken, digitalisieren und übertragen. Sie sind mobil, energieeffizient, genau und leistungsfähig und stellen daher die Schlüsseltechnologie für das Internet-of-Things (IoT) dar. Durch funktionalisierte Chipoberflächen können weitere physikalische sowie chemische und biologische Parameter digitalisiert werden. Mit integrierten Sensorsystemen lassen sich Strukturgrößen im  $\mu\text{m}$ -Bereich realisieren und damit auch Eigenschaften im molekularen Maßstab erfassen, wie z.B. bei der Sequenzierung von DNA.

### **Ziel: neue Anwendungen durch funktionale Integration und Miniaturisierung**

Wir haben das Ziel, durch funktionale Integration und Miniaturisierung neue Anwendungen zu erschließen. Im Bereich der **CMOS-basierten Biosensoren** erforschen wir CMOS-integrierte Transducer und deren Interaktion mit biologischen Rezeptoren. Im Bereich der **ULP-Sensorsysteme** senken wir den Energiebedarf integrierter Sensorsysteme durch intelligentes Power Management und Ultra-Low-Power(ULP)-Schaltungstechnik. Im Bereich **MEMS-Sensoren** fokussieren wir uns auf piezoelektrisch angelegte Cantilever- bzw. balkenbasierte Sensoren, um z.B. schwächste Magnetfelder für Medizinanwendungen zu detektieren. Unsere intensive Forschung an **KI-basierter Entwurfs- und Testautomatisierung** ermöglicht es unseren Partnern und uns, die Entwicklung von hochkomplexen integrierten Sensorsystemen zu automatisieren und sicherer zu machen.

### **Forschung mit kommerziellen Technologien für industrielle Verwertung**

Unsere Forschung hat stets die industrielle Verwertung als Ziel. Wir fokussieren uns daher auf den Systementwurf mit kommerziellen Halbleitertechnologien. Hier können durch große Stückzahlen kompetitive und kostengünstige Lösungen erzielt werden. Zusätzlich werden der IP-Schutz und die Vertrauenswürdigkeit gestärkt.

Integrierte Sensorsysteme fließen in Lösungen für alle Zielmärkte des IMMS ein. Wir konzentrieren uns in den Leitanwendungen Sensorsysteme für die In-vitro-Diagnostik und RFID-Sensoren auf den Einsatz von integrierten Sensorsystemen in den Zielmärkten Life Sciences sowie Automatisierungstechnik und Industrie 4.0.

## Highlights 2020 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

### Ovutinin\*-Start: CMOS-Imager zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung an Teststreifen

Für einen innovativen Schnelltest zur Fertilitätsdiagnostik entwickelt das IMMS seit 2020 einen Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung.

In Deutschland leidet fast jedes zehnte Paar zwischen 25 und 59 Jahren unter einem unerfüllten Kinderwunsch. Hilfe können unter anderem Ovulationstests bieten. Diese werden ähnlich wie Schwangerschaftstests gehandhabt und weisen im Urin meist das eisprungaushlösende luteinisierende Hormon (LH) nach, dessen Konzentration einen Tag vor dem Eisprung stark zunimmt. Einige Tests erkennen zusätzlich Östrogen, dessen Wert bereits drei bis vier Tage vorher ansteigt. Die Hormone werden mit Antikörpern auf dem Teststreifen sichtbar gemacht. Aktuelle digitale Schnelltests mit auswechselbaren Teststreifen erkennen anhand dieser beiden Hormone einen Eisprung etwa vier Tage vorher. Zuverlässig ist der Test dabei nur, wenn er mit Morgenurin verwendet wird.

Im Projekt Ovutinin wird ein neuer Schnelltest zur Fertilitätsdiagnostik entwickelt, mit dem sich zu Hause mit Teststreifen und einem Lesegerät bis zu sechs Tage vor dem Eisprung und unabhängig von der Tageszeit der Messung die fruchtbare Phase identifizieren lässt.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Das IMMS entwickelt für einen neuartigen Ovulationsschnelltest einen Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung. Foto: Serhii Kuch, Pixabay.

### Nachweise

Den Streifenfest entwickelt der Partner Senova. Mit ihm wird nicht nur wie derzeit üblich Östrogen- und LH-Gehalt, sondern auch Progesteron und Kreatinin im Urin simultan mit immunologischen und chemischen Nachweisverfahren bestimmt. Über Progesteron wird nachgewiesen, dass tatsächlich ein Eisprung stattgefunden hat. Der Kreatiningehalt ermöglicht eine Normierung auf die Urinmenge und damit tageszeitunabhängige Messungen.

### Aktuelle Lesegeräte begrenzen Anzahl von Testlinien

Aktuelle Lesegeräte für Heimanwendungen basieren meist auf reflektometrischen Messungen. Sie kommen daher bei mehr als zwei Hormonen auf einem Streifenfest an ihre Grenzen. Der Grund hierfür sind die mit der Anzahl der Testlinien steigenden Anforderungen an die Positioniergenauigkeit. Die Linien auf dem Teststreifen müssen zunächst genau gefertigt und die Streifen dann exakt im Lesegerät ausgerichtet werden.

### Bildsensor-Chip des IMMS zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung für genauere Messungen

Das IMMS entwickelt den Prototyp für ein kompaktes und kostengünstiges digitales Lesegerät, das die Teststreifen per Durchleuchtung auswertet. Kern des Geräts wird ein CMOS-Imager-Chip zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung sein. Dieser Sensor-IC wird bezüglich seiner geometrischen und optischen Eigenschaften auf den neuen Streifenfest ausgelegt. Ungenauigkeiten bei der Positionierung können dann einfach per Software ausgeglichen werden.

Im Teststreifen werden die nach einer Reaktion durch Biomarker verfügbaren Fluorophore optisch angeregt und emittieren Photonen, die vom Chip detektiert werden. Bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung wird diese Emission gemessen, nachdem das Anregungslicht abgeklungen ist. Dadurch sind keine weiteren optischen Filter notwendig. So lässt sich selbst sehr schwaches Fluoreszenzlicht quantitativ erfassen und es können höhere Empfindlichkeiten erreicht werden.



IMMS und iba entwickeln eine integrierte Schaltung für miniaturisierte, schnelle und breitbandige Impedanzanalysen. Foto: IMMS.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



> Integrierte  
Sensorsysteme

> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme

> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

## Projektstart von BICCell\*: Impedanz-Chip für vielfältige neue Anwendungen

Das Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V. (iba), Heilbad Heiligenstadt, und das IMMS stellten am 2. Oktober 2020 in den Räumen des iba dem projektbegleitenden Ausschuss aus neun Unternehmen Details des am 01. Juli gestarteten 30-monatigen Projekts BICCell vor, in dem ein energieeffizienter Breitband-Impedanz-Chip zur Echtzeit-Zellkulturüberwachung und zur Messung von Teststreifen erforscht und entwickelt wird.

## Impedanzspektroskopie muss kleiner und kostengünstiger werden

Die Impedanzspektroskopie als solche ist bereits in wissenschaftlichen Laboren etabliert und wird dort z.B. zur Charakterisierung von Batterien und Brennstoffzellen, zur Überwachung der Kinetik chemischer Reaktionen sowie als Messmethode von Biosensoren genutzt. „Die Messung von Impedanzen ist nicht nur für uns als Hersteller von Mikrobioreaktoren interessant. Sie kann für verschiedenste Anwendungen ein vielversprechender Wettbewerbsvorteil sein und neue Märkte erschließen. Dazu muss die komplexe Messtechnik allerdings deutlich kleiner und kostengünstiger werden“, erklärt Anna Kress, Director Technical Business Development bei der m2p-labs GmbH, die BICCell im projektbegleitenden Ausschuss unterstützt. Mit kommerziell erhältlichen integrierten Schaltungen (ICs) könne man dieses Ziel allerdings nicht erreichen, da sie zu teuer, zu energieintensiv, zu langsam und vor allem nicht in ein Mikrotiterplattensystem integrierbar seien, so Kress weiter.

## iba und IMMS entwickeln integrierte Schaltung für Relaxationsspektroskopie

In BICCell wird das IMMS daher einen neuen IC entwickeln, der im Unterschied zu gebräuchlichen Impedanzmessgeräten mit einem beim iba etablierten Verfahren, der

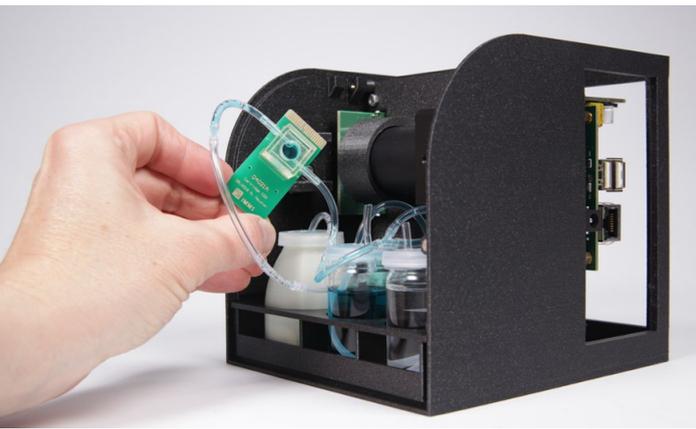
Relaxationsspektroskopie, arbeitet. Dabei wird das Zeitsignal ausgewertet, das sich bei der Anregung des zu untersuchenden Materials mit einer Sprungfunktion ergibt.

Dieses Verfahren und insbesondere die theoretischen Grundlagen zur Erzeugung des Anregungssignals und der Abtastung der Antwort sind die Basis für die Konzeption des Impedanzmesschips, die das iba in BICCell einbringen wird. Außerdem werden in den Laboren des iba die praktischen Messungen der Anwendungsbeispiele vorgenommen.

### Chip soll Impedanzspektroskopie für verschiedene Anwendungen erschließen

Mit der neuen integrierten Schaltung kann die Impedanzspektroskopie durch die hohe Variabilität leicht auf verschiedene Anwendungen übertragen und somit universell eingesetzt werden. Der Bauraum und die Kosten von Impedanz-Messsystemen können mit dem Chip minimiert werden. Mit diesem wird ein Demonstrator entworfen und an zwei ausgewählten Anwendungen verifiziert: der Überwachung von Zellkulturen und der Messung von Teststreifen. Die KMUs im projektbegleitenden Ausschuss können die Eignung des ICs für ihre spezifischen Anwendungen prüfen und nach Projektende daraus Prototypen entwickeln.

„Mit miniaturisierten Impedanzanalysatoren können wir unsere Systeme mit wichtigen Zusatzinformationen für Zellkulturen erweitern, insbesondere für die Bestimmung der Lebendzellzahl, die in Kulturen mit Säugetierzellen besonders von Bedeutung ist. Wir wollen langfristig die Forschungsergebnisse aus BICCell in unseren Produkten anwenden,“ kündigt Anna Kress für m2p-labs an. Dr. Friedrich Scholz, Entwicklungsleiter der Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH und ebenfalls Mitglied im projektbegleitenden Ausschuss von BICCell, erklärt, dass das Vorhaben wichtige Impulse für die diagnostische Entwicklung liefern und vor allem das Gesundheitssystem durch frühzeitige Diagnosen entlasten werde. Er prognostiziert: „Diese Technologie verspricht, sich von aktuellen, auf dem Markt verfügbaren Technologien deutlich abzuheben.“



Mit der am IMMS entwickelten modularen Hard- und Software-Plattform lassen sich Testaufbauten, funktionale Prototypen und Demonstratoren für integrierte Sensorsysteme zur In-vitro-Diagnostik schnell und kostengünstig realisieren.

Foto: IMMS.

- 30
- > *Integrierte Sensorsysteme*
  - > *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
  - > *Mag6D-nm-Direktantriebe*
  - > *Inhalt*
  - \* *Förderung*

## Modulare Prototyping-Plattform für integrierte Sensorsysteme zur In-vitro-Diagnostik

Das IMMS erforscht und entwickelt integrierte Sensorsysteme für die Anwendung in der In-vitro-Diagnostik. Die Arbeiten sind von einer hohen Interdisziplinarität geprägt. Jedes integrierte Sensorsystem des IMMS ist wiederum Teil eines übergeordneten Diagnostiksystems, in dem die verschiedenen Komponenten aus unterschiedlichen Domänen zusammenkommen. Typischerweise sind dies neben unserer Elektronik auch optische und fluidische Komponenten, chemische und biologische Prozesse sowie weitere Effekte, die gemeinsam betrachtet werden müssen.

Um unsere integrierten Systeme charakterisieren und gemeinsam mit unseren Partnern anwendungsnah erproben zu können, haben wir eine modulare Hard- und Software-Plattform entwickelt, mit der sich schnell und kostengünstig Testaufbauten, funktionale Prototypen und Demonstratoren realisieren lassen. Grundgedanke bei der Entwicklung der Plattform war die Realisierung eines Baukastensystems mit leistungsfähigen Modulen, um damit die typischerweise bei in-vitro-diagnostischen Applikationen benötigten Funktionalitäten bereitstellen zu können.

Die Plattform umfasst hardwareseitig Funktionsmodule für die Strom- und Spannungsversorgung, elektrische Signalaufbereitung, digitale Signalverarbeitung mittels FPGA und Prozessor bis hin zu Modulen für die Ansteuerung von Lichtquellen, Fluidik und Heizelementen sowie moderne Kommunikationsmodule mit Drahtlosschnittstellen wie WLAN und Bluetooth für die Steuerung und Datenübertragung. Die Plattform-Software deckt die grundlegende Ansteuerung der Hardwaremodule sowie Aufnahme und Verarbeitung der Messdaten ab. Darüber hinaus ermöglicht sie die automatisier-

der Durchführung von Messabläufen, wobei auf vorgefertigte Blöcke zurückgegriffen werden kann. Die Software verfügt über eine komfortable webbasierte Nutzerschnittstelle, über die Abläufe interaktiv ausgeführt und auch zusammengestellt werden können. Ergänzend ist über eine netzwerkbasierende Programmierschnittstelle (API) der direkte Zugriff aus Anwendungen unserer Partner möglich.

Die Plattform wurde in der internen Forschungsgruppe zu integrierten Systemlösungen für Life-Sciences-Anwendungen entwickelt.

## Forscherguppe MagSens\* abgeschlossen: Ultrasensitive Magnetfeldsensoren mit resonanten magneto-elektrischen MEMS

In den Jahren von 2018 bis 2020 forschte das IMMS in Kooperation mit der TU Ilmenau an MEMS-Sensoren zur Detektion schwächster Magnetfelder. Derartige Felder treten beispielsweise im menschlichen Körper auf, wo sie sehr präzise, berührungs- und zerstörungsfrei gemessen werden müssen.

Dazu werden in der Medizintechnik sowie in der Geologie, Archäologie oder Materialwissenschaft bisher Sensoren verwendet, die auf supraleitenden Interferometern (Superconductive Quantum Interference devices, SQUIDS) basieren. Diese müssen jedoch mit sehr hohem kryotechnischen Aufwand auf mindestens  $-196\text{ °C}$  gekühlt werden, um sich überhaupt betreiben zu lassen.

Als Alternative dazu wurden in MagSens unter der Leitung der TU Ilmenau magneto-elektrische MEMS untersucht, die vergleichsweise einfach zu fertigen sind und bei



ANSYS-Simulation des Übertragungsverhaltens einer magnetostriktiv-piezoelektrischen MEMS-Balkenstruktur für die Erforschung von MEMS-Sensoren zur Detektion schwächster Magnetfelder.

Foto: IMMS.

Raumtemperatur arbeiten. Entsprechende Teststrukturen der Sensoren konnten an der TU Ilmenau hergestellt und im IMMS vermessen werden.

Das erforschte Sensorprinzip basiert auf magnetostraktiv-piezoelektrischen Mehrschichtsystemen. Ein aus diesen Schichten bestehender Resonator wird über das Anlegen einer Spannung piezoelektrisch in Schwingung versetzt. Die vorhandene magnetostriktive Schicht ändert das Schwingverhalten, genauer die Eigenfrequenz, des Resonators unter Einfluss eines magnetischen Feldes. Anhand der Änderung der Eigenfrequenz lässt sich auf die Stärke des wirkenden Magnetfeldes schließen.

Das IMMS hat die **Modellierung des Sensorprinzips** übernommen und dafür zum einen den sogenannten Delta-E-Effekt analytisch beschrieben. Dieser Effekt wurde als der maßgeblich wirkende magnetostriktive Effekt identifiziert. Er zeigt, dass sich das Elastizitätsmodul der magnetostriktiven Schicht unter der Wirkung eines Magnetfeldes ändert. Zum anderen hat das IMMS das Schwingverhalten des Sensors in der FEM-Software ANSYS simuliert.

Damit wurde der **Einfluss von Material- und Geometriedaten** auf die Sensitivität des Sensors untersucht. Ziel war es, solche Strukturen zu finden, die bei der Wirkung kleinster Magnetfelder mit einer maximalen Frequenzverschiebung reagieren. Dies erforderte zum einen die Optimierung der magnetostriktiven Schicht in Hinblick auf einen möglichst stark ausgeprägten Delta-E-Effekt. Dabei fließen Materialgrößen ein, die abhängig vom Herstellungsprozess der Schicht sind. Gemeinsam mit den Kollegen von der TU wurden daraufhin Möglichkeiten diskutiert, auf diese Größen Einfluss zu nehmen, und erste Maßnahmen ergriffen, die magnetostriktive Schicht entsprechend zu gestalten. Zum anderen ging es um die **Dimensionierung des gesamten Mehrschichtsystems**, um den Einfluss der E-Moduländerung auf die Frequenzverschiebung zu maximieren. Dazu wurden verschiedene Grundgeometrien mit variablen Seitenverhältnissen simuliert und ausgewertet.

Bei den von der TU entwickelten Teststrukturen handelt es sich um einfach und doppelt eingespannte Balken verschiedener Dimensionierung. Diese Strukturen konnten erfolgreich am IMMS simuliert werden. Die **Simulationsdaten** deckten sich mit den Messergebnissen und wurden zur **Parameteridentifikation** unbekannter Materialdaten verwendet. Darauf aufbauend wurden **Designregeln** und Richtlinien zur Entwicklung variabler magnetoelektrischer Sensorsysteme abgeleitet.



In KI-EDA werden KI-Werkzeuge für den schnellen und zuverlässigen Entwurf von maßgeschneiderten Encoder- und Sensorchips erschlossen. Solche Systeme werden für neuartige intelligente, autonome Produktionssysteme benötigt. Quelle: IMMS.

GEFÖRDERT VOM



## Projektstart von KI-EDA\*: KI zum Entwurf von Antriebssteuerchips als Schlüsselprodukte für die Industrie 4.0

Am 24. März 2020 trafen sich die Partner iC-Haus, CENTITECH und IMMS in einer virtuellen Kick-off-Meeting, um Details zu dem am 1. Januar 2020 gestarteten dreijährigen und vom BMBF geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Künstliche Intelligenz für den Entwurf von mikroelektronischen Antriebssteuerchips als Schlüsselprodukte für Industrie 4.0 (KI-EDA)“ zu besprechen. Ziel von KI-EDA ist es, die Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz (KI) für den schnellen und zuverlässigen Entwurf von maßgeschneiderten Encoder- und Sensorchips zu erschließen. Solche mikroelektronischen Systeme werden für neuartige intelligente, autonome Produktionssysteme benötigt, die Daten sicher und dezentral analysieren und damit Fertigungsszenarien prognostizieren und verbessern können.

### Herkömmliche Entwurfsmethoden reichen für komplexe und individuelle Designs meist nicht aus

Mit Encoder- und Sensorchips werden beispielsweise Drehbewegungen an Maschinen erfasst und in elektronische Signale für die digitale Verarbeitung umgewandelt. Diese Chips werden für Produktionsanlagen und -prozesse individuell angepasst und werden immer leistungsfähiger und komplexer. Der Entwurf und die Verifikation der Chips stößt mit herkömmlichen Methoden der elektronischen Design-Automation (EDA) an Grenzen und ist in weiten Teilen durch das Erfahrungswissen von Design-Ingenieuren geprägt.

## Neue Methoden sollen Entwicklungszeit kundenspezifischer Chips um bis zu zwei Drittel senken

Im Projekt KI-EDA wird daher unter der Leitung der iC-Haus GmbH an KI-unterstützten Methoden der Entwurfsautomatisierung und an einem Baukastensystem für das Chipdesign gearbeitet. Individuelle Funktionen sollen sich in Form von Funktionsblöcken mit kurzen Designzeiten und geringer Fehlerquote schnell und kostengünstig auswählen, kombinieren, simulieren und in ein für die geplante Anwendung maßgeschneiderten Encoder- bzw. Sensorchip überführen lassen. Weiterhin wird es damit möglich, neue Funktionalitäten wie z. B. KI-basierte Predictive-Maintenance-Lösungen flexibel und schnell zu realisieren. Fehler im Entwurf und damit zeitaufwändige Redesigns sollen auf diese Weise reduziert werden. Es wird angestrebt, die Entwicklungszeit von kundenspezifischen Chips um bis zu zwei Drittel zu senken.

Die **Partner iC-Haus und CENTITECH** werden hierfür intelligente Funktionen und energieautarke Lösungen für die neuen mikroelektronischen Systeme erforschen, realisieren und in anwendungsnahen Demonstratoren charakterisieren. Damit sollen die für einen flächendeckenden und breiten Einsatz in I4.0-Produktionsumgebungen erforderlichen Eigenschaften gewährleistet werden. Zudem stellen die Partner sicher, dass die Systeme in hohen Stückzahlen gefertigt werden können.

## IMMS überführt ML-Algorithmen und smarte Modelle in Baukastensystem zum schnellen und sicheren Chip-Entwurf

Das **IMMS** wird Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) für ihre Anwendbarkeit im Chip-Design (EDA) erforschen und in ein neuartiges Designer-Assistenzsystem überführen, um die Entwurfsprozesse effizienter zu gestalten und zu beschleunigen. Die neu zu erforschenden ML-Methoden werden vor allem einer schnellen Entwurfsabsicherung dienen und damit die Designsicherheit erhöhen. Sie zielen insbesondere auf die modellbasierte Fehlersuche ab und sollen die Komplexität bei der Arbeit mit IP-Bibliotheken, d. h. mit Sammlungen von vorhandenen Schaltungskomponenten bzw. Elektronikblöcken, reduzieren. Neue Chips lassen sich so im Baukastensystem zusammensetzen. Darüber hinaus wird das IMMS „Smart Models“ erforschen und realisieren. Erstmals werden damit Modelle dank neuer Algorithmik in die Lage versetzt, ihren eigenen Gültigkeitsbereich rechnerisch zu überprüfen und damit falsch-positive Verifikationsergebnisse auszuschließen.



Das IMMS hat die edaBarCamps 2016 mit initiiert und ist seitdem einer der Organisatoren. 2021 gab Georg Gläser vom IMMS in seinem Keynote-Vortrag “Artificially IntelligEnt EDA?!” Impulse für die Themenauswahl.

Quelle: edacentrum.

## edaBarCamp – Number 5 is alive

Am 18. und 19. Februar 2020 fand bei IBM Deutschland Research & Development das 5. edaBarCamp statt. Mit 68 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Industrie und Forschung war es das bisher größte edaBarCamp. Organisiert wurde es von edacentrum, IBM, IMMS, OFFIS – Institut für Informatik, TU Ilmenau und der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Es gab vielfältigen Input zur Entwurfsmethodik und regen Austausch zu Themen wie Entwurfsverifikation für Mikroelektronik, integrierte Schaltungen und eingebettete Systeme, durchgängiges Hardware-/Software- Engineering, künstliche Intelligenz für die elektronische Design-Automation EDA und mehr.

In der von edacentrum, OFFIS und IMMS 2016 initiierten und organisierten Veranstaltungsreihe werden regelmäßig interaktive und offene Forschungstreffen nach dem BarCamp-Prinzip auf die Beine gestellt. Im edaBarCamp wird nicht nur passiv zugehört, sondern vor allem aktiv teilgenommen. Georg Gläser vom IMMS gab in seinem Keynote-Vortrag “Artificially IntelligEnt EDA?!” Impulse für die Themenauswahl des 5. edaBarCamps.

Mehr zum eda-  
BarCamp auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).



## Lock-In-Imager für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium

Das IMMS hat einen Lock-In-Imager-Chip für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium entwickelt und in eine Beispielapplikation zum digitalen Auslesen von Streifen-tests integriert. Das Bild zeigt den Demonstrator. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

In der In-Vitro-Diagnostik werden Zielanalyten zunehmend mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert, da sie sich leicht von Hintergrund- und Störsignalen unterscheiden lassen. Das IMMS hat im Projekt MEDIKIT einen Lock-In-Imager-Chip für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium entwickelt und in eine Beispielapplikation zum digitalen Auslesen von Streifen-tests integriert. Diese auch Lateral-Flow-Assays (LFA) genannten Tests spielen eine wichtige Rolle für die In-vitro-Diagnostik. Sie sind kostengünstig, einfach zu handhaben und daher prädestiniert für die dezentrale und zeitkritische Diagnostik. Sie sind u.a. als Schwangerschafts- oder COVID-19-Schnelltests weit verbreitet, um qualitative Aussagen (positiv oder negativ) treffen zu können. Für viele diagnostische Fragen werden jedoch quantitative Aussagen zu Konzentrationen und Verhältnissen benötigt. Gängige LFA-Reader-Kombinationen mit klassischen Farbstoffpartikeln wie Gold sind dafür nicht empfindlich genug. Neue LFA-Reader-Kombinationen mit Europium-Markern bieten weitaus höhere Ausleseempfindlichkeiten, die durch den Imager unterstützt werden. Durch dessen Lock-In-Prinzip können aufwändige optische Filter eingespart werden.

*Mehr zu  
MEDIKIT auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*

Der am IMMS entwickelte Imager-Chip erfasst mit zeitaufgelöster Fluoreszenz die Konzentration von Biomarkern mit molekularbiologischen und immunologischen Assays, die von den Projektpartnern Senova und oncnostics erarbeitet wurden. Durch die Biomarker werden Fluorophore, wie Europium in der Beispielanwendung mit Streifentests, gebunden und diese werden mit Licht bestimmter Wellenlängen angeregt. Dadurch emittieren sie Photonen anderer Wellenlängen, die von dem Chip detektiert werden. Bei herkömmlichen Fluoreszenzmessungen werden Anregungs- und Emissionslicht durch optische Filter getrennt. Bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung wird die Emission erst erfasst, nachdem das Anregungslicht abgeklungen ist. Getrennt werden Anregungs- und Emissionslicht dabei anhand ihrer unterschiedlichen zeitlichen Abklingeigenschaften, vgl. Abbildung 1.

Schaltet man das Anregungslicht ab, fällt dessen Intensität bei Europium innerhalb von wenigen Nanosekunden weit unter die des Fluoreszenzlichts, das Abklingzeiten von mehreren hundert Mikrosekunden aufweist. Mit dem neuen Bildsensor des IMMS kann das Anregungslicht zeitlich ausgeblendet und das Fluoreszenzlicht über mehrere Beleuchtungszyklen gesammelt werden. Das ermöglicht eine sehr hohe Sensitivität sowie einen kostengünstigen Systemaufbau für Point-of-Care-Diagnosesysteme. Ferner lassen sich mit dem Bildsensor die zeitlichen Abklingkurven auch direkt messen, sodass simultan unterschiedliche Fluoreszenzfarbstoffe voneinander unterschieden werden können und damit Multiparameterdiagnosen ermöglicht werden.

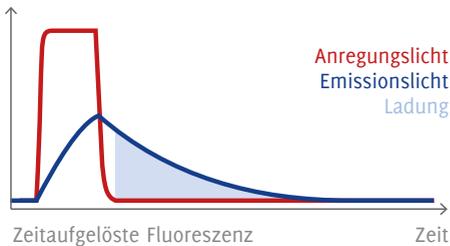


Abbildung 1:

Unterschiedliche zeitliche Abklingeigenschaften von Anregungs- und Emissionslicht. Die Fläche unter der blauen Kurve entspricht der zur Messung relevanten Ladung des Emissionslichts.

Grafik: IMMS.

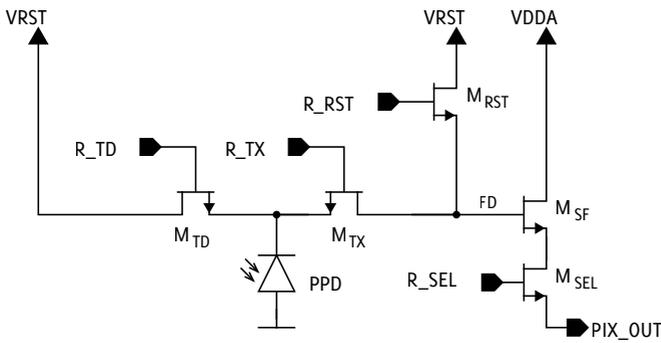


Abbildung 2:

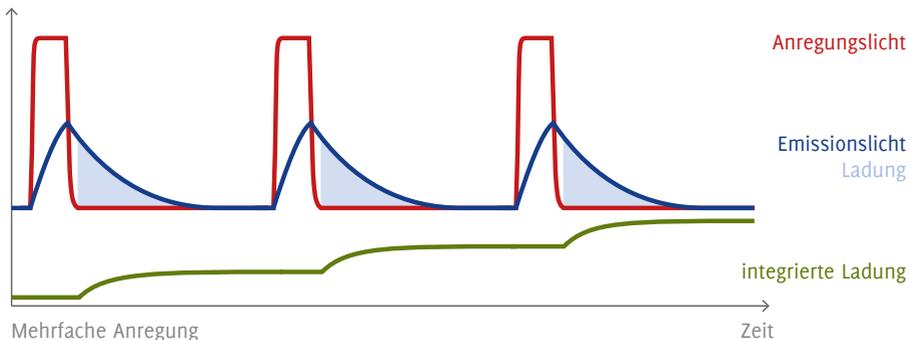
Vereinfachter Schaltplan des Lock-In-Pixels.

Grafik: IMMS.

### Lock-In-Prinzip des Bildsensors

Der Bildsensor selbst ist aus Pixeln aufgebaut, die nach dem Lock-In-Prinzip arbeiten, vgl. Abbildung 2. Das bedeutet, dass die Photodiode (PPD) als lichtempfindliches Element im Pixel mehrere schnell über Transistoren umschaltbare Abgriffe ( $M_{TX}$ ,  $M_{TD}$ ) besitzt, um die durch den Lichteinfall erzeugten Ladungsträger zeitlich in unterschiedliche Anteile zu separieren. Wenn nun die Fluoreszenzfarbstoffe durch einen Lichtpuls angeregt werden, lässt sich durch eine entsprechende Konfiguration der Pixel das Anregungslicht größtenteils ausblenden ( $M_{TD}$  leitend). Sobald es abgeklungen ist, wird der Abgriff im Pixel umgeschaltet ( $M_{TX}$  leitend) und das eigentlich zu messende Emissionslicht kann aufgesammelt werden (Akkumulation erfolgt auf der Kapazität des Knotens FD), bis auch dieses abgeklungen ist. Diese Abfolge kann mehrfach wiederholt werden, vgl. Abbildung 3, und so die Empfindlichkeit signifikant gesteigert werden. Die Signalanteile, die vom Fluoreszenzmissionslicht stammen, werden dabei Zyklus für Zyklus akkumuliert und verstärken so das Ausgangssignal. Anschließend werden die gesammelten Ladungen im Pixelfeld zeilenweise digital gewandelt (mit Hilfe von  $M_{RST}$ ,  $M_{SF}$  und  $M_{SEL}$ ) und am Ende die Bilddaten übertragen.

Abbildung 3: Sobald das Anregungslicht abgeklungen ist, wird das emittierte Fluoreszenzlicht gemessen, bis auch dieses abgeklungen ist. Das kann mehrfach wiederholt werden. Das Fluoreszenzmissionslicht wird Zyklus für Zyklus akkumuliert, wodurch das Ausgangssignal verstärkt wird. Grafik: IMMS.



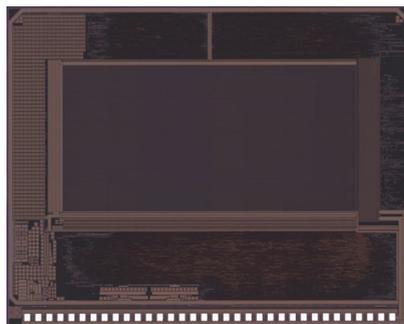
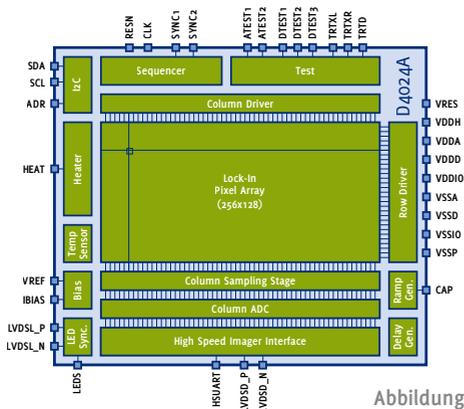


Abbildung 4:  
links: Blockschaltbild, rechts: Chip-Foto. Grafik/Foto: IMMS.

## Chip-Aufbau

Der in Abbildung 4 dargestellte Bildsensor hat eine Auflösung von 256 x 128 Pixeln bei einer Pixelgröße von 10  $\mu\text{m}$  x 10  $\mu\text{m}$ , um eine Vielzahl von diagnostischen Anwendungen realisieren zu können, wie z.B. das Auslesen von LFA oder direktes Spotting von Sonden-DNA. Neben dem eigentlichen Bildfeld enthält der Sensor weiterhin einen Single-Slope-Analog-zu-Digital-Wandler für die Bilddaten, einen programmierbaren Sequenzer zur frei konfigurierbaren Steuerung des kompletten Bildaufnahme Prozesses, eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle zur Chipkonfiguration und einen analogen Temperatursensor.

## Demonstrator

Auf der Grundlage der IvD-Rapid-Prototyping-Plattform des IMMS wurde ein Demonstrator zur anwendungsnahen Evaluation des neuen Bildsensors entwickelt. Die Plattform ist in einem 3D-gedrucktem Gehäuse zusammen mit einer Impuls-Lichtquelle zur Anregung der Fluoreszenzfarbstoffe untergebracht, vgl. Abbildung 5. Der Demonstrator stellt eine WLAN-Schnittstelle zur drahtlosen Konfiguration des Sensors und zur Bildauslese bereit, über die der Anwender mit dem Chip per Webbrowser interagiert.

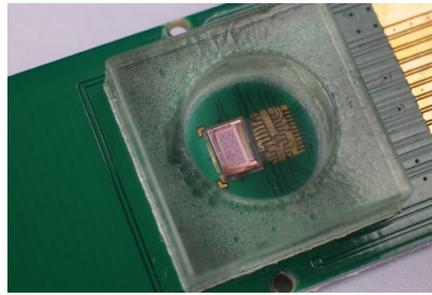
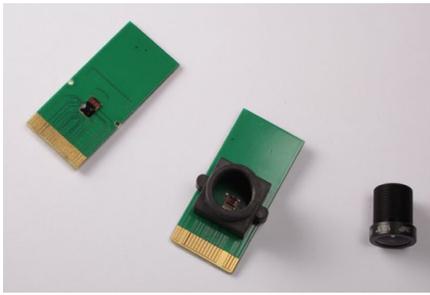
*Mehr zur Platt-  
form in diesem  
Bericht.*



Abbildung 5:

Demonstrator zur anwendungsnahen Evaluation des neuen Bildsensors mit der IvD-Rapid-Prototyping-Plattform des IMMS. Diese ist im Gehäuse zusammen mit einer Impuls-Lichtquelle zur Anregung der Fluoreszenzfarbstoffe untergebracht.

Foto: IMMS.



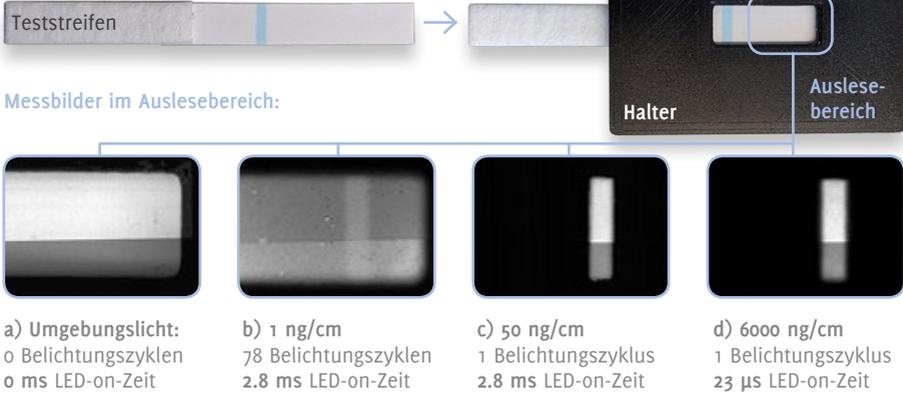
**Abbildung 6:** links: Cartridge mit Linse zum Auslesen von LFA; rechts: fluidische Cartridge mit Kavität und biokompatibel vergossenem Sensorchip für molekularbiologische Nachweise, die direkt auf der Chipoberfläche stattfinden. Fotos: IMMS.

Der Bildsensor kann auf eine anwendungsspezifische Cartridge aufgebaut werden, die in den Demonstrator eingesteckt wird. Im Projekt MEDIKIT wurden dafür zwei Typen entwickelt: Eine Cartridge mit Linse zum Auslesen von LFA und eine fluidische Cartridge mit Kavität und biokompatibel vergossenem Sensorchip für molekularbiologische Nachweise, die direkt auf der Chipoberfläche stattfinden, vgl. Abbildung 6.

## Evaluation

Die LFA-Reader-Applikation arbeitet mit einem Europium-basierten Fluoreszenz-Farbstoff, der mit UV-Licht angeregt wird. Zur anwendungsnahen Evaluation des Bildsensors hat unser Projektpartner Senova standardisierte Streifen-tests zur Verfügung gestellt, auf welche Europium-Linien in einer Konzentrationsreihe aufgebracht wurden. Es konnte mit dem Chip ein sehr weites Konzentrationsspektrum mit über 4 Dekaden (von 0,1 – 6.000 ng/cm) nachgewiesen werden, vgl. Abbildung 7. Dieser sehr hohe Dynamikbereich wird durch den oben beschriebenen Mehrfachbelichtungsmodus erzielt, der es ermöglicht, die sehr niedrigen Konzentrationen sichtbar zu machen und noch vom Hintergrundsignal zu unterscheiden.

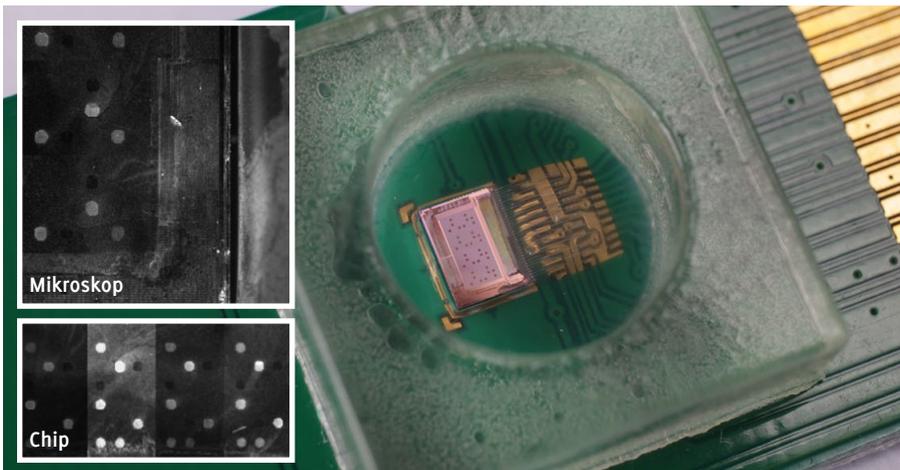
Abbildung 7: Die Bildfolge (a – d) zeigt tatsächliche Messbilder bei unterschiedlichen Europium-Konzentrationen:



(a) Referenzbild im Umgebungslicht (*ohne Anregungslicht bleibt die Fluoreszenzlinie unsichtbar*), (b) bei niedrigen Konzentrationen (*durchscheinender Hintergrund mit schwacher, verrauschter, aber deutlicher Linie bei langer Belichtungszeit und mehreren Beleuchtungszyklen*), (c) bei mittleren Konzentrationen (*intensive Linie bei langer Belichtungszeit*) und (d) bei hohen Konzentrationen (*intensive Linie bei sehr kurzer Belichtungszeit*). Fotos/Grafik: IMMS.

Auch mit der fluidischen Cartridge wurden erste vielversprechende Ergebnisse erzielt. Unser Projektpartner oncgnostics konnte in der Cartridge einen Assay zur Diagnose von Gebärmutterhalskrebs abbilden, vgl. Abbildung 8. Dabei konnte die Ziel-DNA deutlich nachgewiesen werden (Abbildung 8 unten), wie die dazu entsprechende Aufnahme durch ein Fluoreszenzmikroskop (Abbildung 8 oben) zeigt.

Abbildung 8: Assay-Cartridge mit Messbild des Lock-in-Imager-Chips (links unten) und Referenzbild eines Fluoreszenzmikroskops (links oben). Fotos: IMMS und oncgnostics.



Die Ergebnisse aus den Untersuchungen des Chips sind bereits in Folgeprojekte gemündet. Im Projekt Ovutinin mit Senova wird der Chip speziell auf die LFA-Reader-Applikation angepasst und weiterentwickelt. Er wird sich durch ein adaptiertes Bildfeld und einen höheren Integrationsgrad auszeichnen. Ziel des Projekts ist es, einen kommerziellen mobilen LFA-Reader für die Fertilitätsdiagnostik zu entwickeln.

Auch der Einsatz für fluidische Applikationen soll im Folgeprojekt „SensInt“ weiter vertieft werden. Hier wird ein Derivat des ASICs entstehen, welches direkt für die Integration in einen Mikrofluidik-Chip mit den Partnern microfluidic ChipShop GmbH und Axenoll 3D Printing GmbH ausgelegt ist.

Über diese beiden Projekte hinaus streben wir an, mit dem Lock-In-Imager den Weg für andere Anwendungen zu ebnen, für die die zeitaufgelöste Fluoreszenz der Schlüssel zur massentauglichen, industriellen Verwertung ist.

**Kontakt:** Eric Schäfer, M.Sc., [eric.schaefer@imms.de](mailto:eric.schaefer@imms.de)

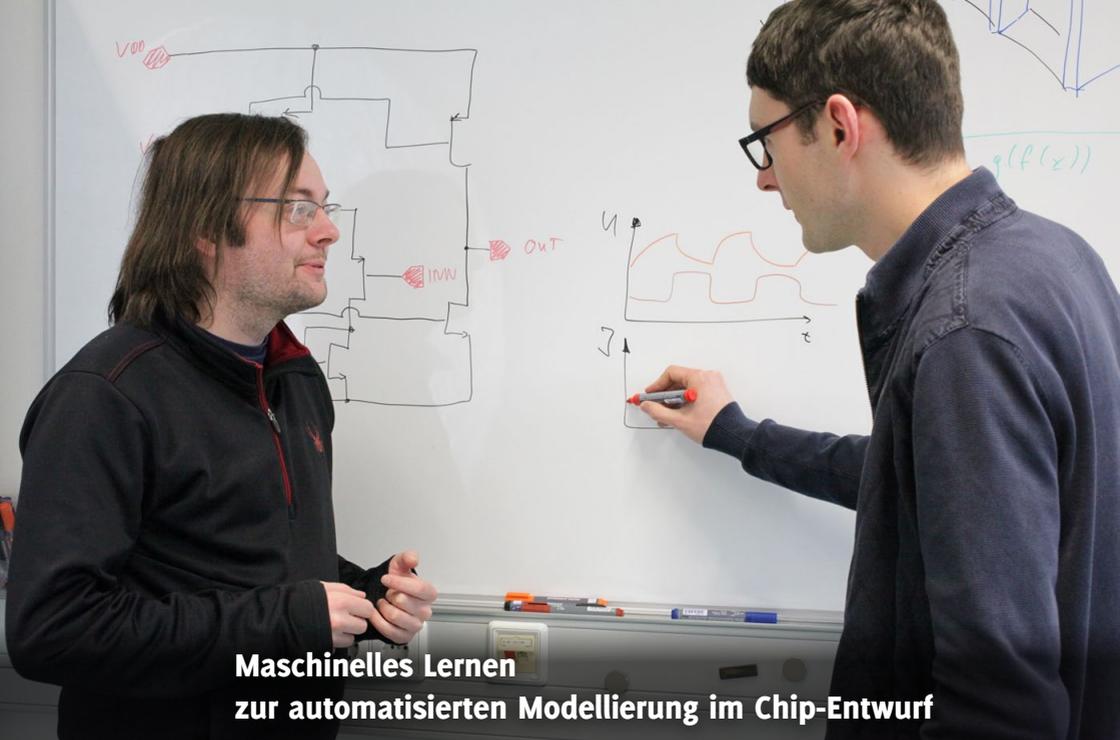


Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Freistaat Thüringen unter der Nummer 2017 FE 9044 gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert. Projektpartner waren die ALS Automated Lab Solutions GmbH, oncgnostics GmbH und die Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

IC-Entwicklungsleistungen auf [www.imms.de](http://www.imms.de)

Mehr zu **MEDIKIT** auf [www.imms.de](http://www.imms.de)



## Maschinelles Lernen zur automatisierten Modellierung im Chip-Entwurf

Die am IMMS entwickelten Methoden zur automatisierten Modellierung im Chip-Entwurf machen System-Simulationen aussagekräftiger. Maschinelles Lernen und neuronale Netze reduzieren den manuellen Modellierungsaufwand signifikant. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

Mikroelektronik-Chips sind heute aus unterschiedlichsten Funktionsblöcken aufgebaut. Diese werden mehr und mehr so integriert, dass sich komplexe Anwendungen im Automobil-, Industrie- oder Medizintechniksektor immer weiter miniaturisieren lassen. Auf nur einem Chip werden Sensorik, Aktorik, Kommunikation, Energiemanagement, Mikrokontroller, Speicher und weitere Funktionen vereint. Der Entwurf solcher Systeme wird dadurch immer herausfordernder. Die Mixed-Signal-Verifikation nimmt daher eine zunehmend wichtige Rolle im Entwurf ein: Sie deckt Fehler im Zusammenspiel der Komponenten auf und stellt sicher, dass übergeordnete Anforderungen an das Produkt erfüllt werden. Dieser Nachweis wird üblicherweise durch Simulationen des kompletten Designs aus Analog- und Digitalteil inklusive Außenbeschaltung erbracht. Simulationen mit SPICE-Modellen sind dafür zwar am genauesten, dauern aber auf System-Ebene viel zu lange. Um alle benötigten Test-

dieser abstrakten Modelle für die jeweilige Verifikationsaufgabe ist zeitaufwändig und erfordert viel Erfahrung. Das IMMS hat daher Methoden entwickelt, um solche Modelle automatisiert mit zusätzlichen Eigenschaften zu erweitern und damit die Aussagekraft von Simulationen auf System-Ebene zu verbessern. Dank maschinellem Lernen und neuronaler Netze reduziert sich der manuelle Modellierungsaufwand signifikant.

## Modellierungskonzept

Verhaltensmodelle z.B. in VerilogAMS spiegeln üblicherweise das funktionale Verhalten einzelner Schaltungsblöcke oder Subsysteme. Wenn es sich um einen selbstentwickelten Block handelt, erstellt der jeweilige Design- oder Verifikationsingenieur das entsprechende Modell. Handelt es sich dagegen um eine Blackbox IP, ist man zwingend auf die Bereitstellung eines Modelles durch den IP-Anbieter angewiesen. In jedem Fall erfolgt die Modellierung bisher hauptsächlich durch manuelle Abstraktion, indem beispielsweise das Eingangs-Ausgangs-Verhalten beschrieben wird. Sogenannte nicht-funktionale Eigenschaften wie beispielsweise der Leistungsbedarf werden üblicherweise nicht modelliert, da dafür komplexe, nicht-lineare Abhängigkeiten zu anderen Systemgrößen erfasst und mathematisch beschrieben werden müssen. Für bestimmte Designs sind jedoch genau diese nicht-funktionalen Eigenschaften von essenzieller Bedeutung. Beispielsweise muss der Leistungsbedarf der einzelnen Schaltungsblöcke eines RFID-Sensoren-Transponder-ICs bei der Systemverifikation zwingend mitbetrachtet werden.

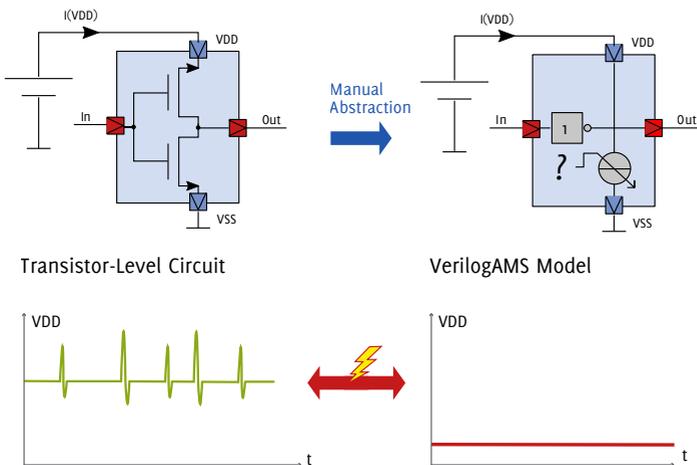


Abbildung 1:

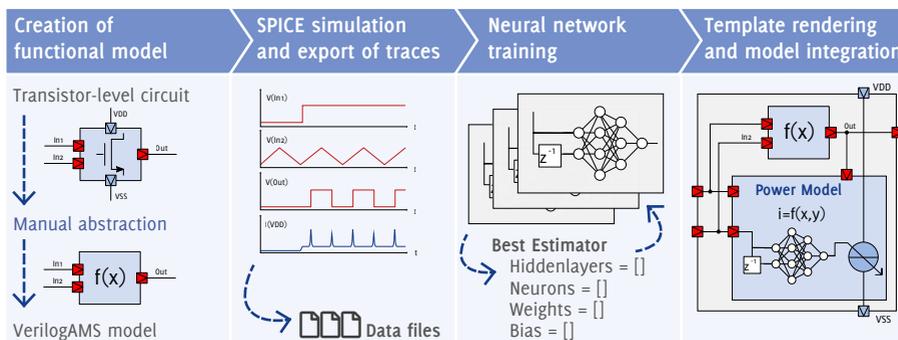
Nicht-funktionale Eigenschaften werden üblicherweise nicht bei der Erstellung von Verhaltensmodellen integriert.

Grafik: IMMS.

An diesen Herausforderungen hat das IMMS im Projekt IntelligEnt gearbeitet und einen Modellierungsablauf entwickelt. Dieser lernt solche nicht-funktionalen Größen durch Methoden des maschinellen Lernens aus Daten und reduziert dadurch die manuell vom Ingenieur auszuführenden Modellierungsarbeiten signifikant. Konkret wurden neuronale Netze als universelle Funktionsschätzer eingesetzt. Zur Einbeziehung von zeitlichen Zusammenhängen wurden Netze mit Verzögerungsgliedern an den Eingängen ergänzt, was zu sogenannten Time Delay Neural Networks (TDNN) führt. Diese Netze können effizient in einer digitalen Event-getriebenen Simulation ausgewertet werden. Dadurch ist das resultierende Modell im Vergleich zur Transistor-Level-Schaltung deutlich schneller simulierbar, während trotzdem nichtfunktionale Eigenschaften mit zufriedenstellender Genauigkeit abgebildet werden.

Der prototypisch implementierte Modellierungsablauf ist in Abbildung 2 dargestellt. Ausgehend von der Transistor-Level-Implementierung wird ein vorhandenes funktionales Modell um Informationen zu seinem transienten Energieverbrauch erweitert. Dafür werden zunächst SPICE-Simulationen durchgeführt, um den Energieverbrauch der Schaltung zu charakterisieren. Die aus der Simulation gewonnenen Daten werden anschließend aufbereitet und in Trainingsdaten umgewandelt. Trainiert wird das Modell in einer Python-Umgebung, da hier auf umfangreiche Bibliotheken für diesen Zweck zurückgegriffen werden kann. Das Ergebnis des Trainings ist eine durch Hyperparametersuche ausgewählte Netztopologie sowie ein dafür optimierter Parametersatz. Das Netz wird im folgenden Schritt in die Designumgebung exportiert, indem durch Template-Rendering Verilog-Code erzeugt wird. Mit einem am IMMS entwickelten Verilog-Rewriting-Werkzeug kann der erzeugte Code in dem vorhandenen funktionalen Modell automatisch instanziiert und angeschlossen werden.

Abbildung 2: Modellierungsablauf zur automatisierten Erweiterung von funktionalen Modellen mit Energiebedarfsinformationen. Grafik: IMMS.



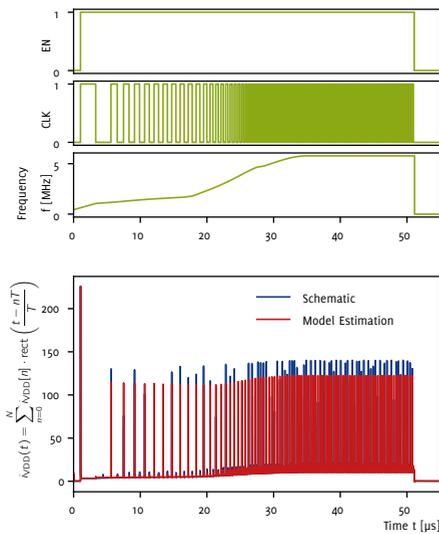


Abbildung 3:

Vergleich von Simulationszeit und Genauigkeit zwischen Transistor-Level-Implementierung, funktionalem Modell und einem mit der entwickelten Methode erweitertem funktionalem Modell.

Grafik: IMMS.

Die Übersetzung zurück nach Verilog hat den Vorteil, dass sich das Modell vollständig mit der vorhandenen Designumgebung benutzen lässt und keine externe Software zur Simulation notwendig ist.

### Beispiel: Modellierung eines Relaxationsoszillators

Der beschriebene Entwurfsablauf wurde prototypisch auf das Beispiel eines häufig als On-Chip-Taktquelle eingesetzten Relaxationsoszillators angewendet. Um den Energieverbrauch des Digitalteils zu minimieren, wird der Oszillator nur aktiviert, wenn ein Takt für den Betrieb notwendig ist. Um die Energieaufnahme des Oszillators in die Systemverifikation einzubeziehen, wurde der transiente Stromverbrauch zu einem funktionalen Modell hinzugefügt. Wie in Abbildung 3 gezeigt, bildet das erweiterte Modell den Stromverbrauch ausreichend genau ab, während die Simulationszeit sich im Vergleich zum rein funktionalen Modell nur minimal erhöht hat.

### Beispiel: Modellierung von Switched-Capacitor-Schaltungen

Switched-Capacitor-Schaltungen sind beispielsweise in Form von Ladungspumpen wesentlicher Bestandteil des Power-Managements von Speicher-IP oder energieautarker Sensorik. Aktuelle Modellierungsansätze dazu sind allerdings auf den Entwurf ausgerichtet und nicht für die Systemebene geeignet. Gleichzeitig sind diese Schaltungen mit SPICE-Modellen nur sehr langsam zu simulieren, was die Simulationsdauer

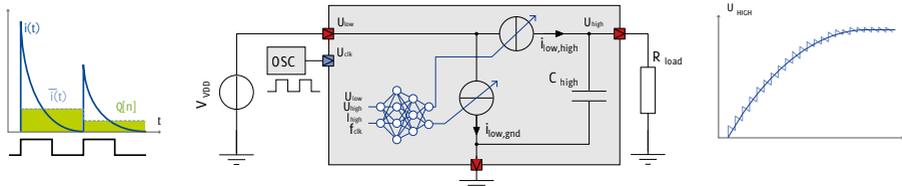


Abbildung 4: Beispiel für ein Modell einer Charge-Pump basierend auf der Schätzung von Ladungstransfers. Grafik: IMMS.

er auf Systemebene sehr stark beeinträchtigt. Mit einer ML-basierten automatisierten Modellierung wird dagegen die mittlere Menge an Ladung durch ein neuronales Netz geschätzt, die pro Taktzyklus zwischen den Kapazitäten und über die Systemgrenzen transportiert wird. Neben der Taktfrequenz sind der Laststrom sowie die aktuellen Knotenspannungen Eingänge des Netzes. Wie in Abbildung 4 gezeigt, kann der geschätzte Ladungstransfer zur Implementierung eines Real-Number-Modelles genutzt werden. Durch die automatisierte Modellierung wurde für das Beispiel einer dreistufigen Ladungspumpe der Ladungstransfer so genau geschätzt, dass sich ein Fehler von maximal 1% in der Ausgangsspannung im Vergleich zum SPICE-Modell ergeben hat, während die Simulationszeit gleichzeitig um den Faktor 30 verkürzt wurde.

## Ausblick

Die Anwendung der entwickelten Methoden wurde erfolgreich in zwei Szenarien demonstriert, die u.a. in zwei Veröffentlichungen auf Fachkonferenzen präsentiert werden konnten. Entwicklungspotential gibt es an zwei Stellen im gezeigten Ablauf, an denen aktuell noch manuelle Eingriffe erforderlich sind. Zum einen ist die Auswahl der Eingangssignale entscheidend für die Qualität des Trainingsdatensatzes. Hier sollten durch eine automatische Analyse der Daten zunächst die Signale identifiziert werden, die Einfluss auf die Zielgrößen haben. Zum anderen muss aktuell die Größe des neuronalen Netzes manuell oder durch eine Hyperparametersuche bestimmt werden. Durch eine zu findende Heuristik könnte dieser Prozess effizienter gestaltet werden.

Leistungen zu  
IC-Entwurfsmethoden:

[www.imms.de](http://www.imms.de)

Am IMMS wird an die vorgestellten Arbeiten angeknüpft, indem die Ergebnisse auf die automatisierte Modellierung von komplexen IP-Blöcken wie eingebettete Spei-

cher angewendet werden. In diesem Bereich besteht ein großer Bedarf nach solchen Methoden, da Speicher in der Regel als Blackbox-IP von Kunden in ihre Chip-Designs integriert werden. Zudem können automatisch bereitgestellte Energiemodelle die Entwurfssicherheit deutlich erhöhen und es ermöglichen, Systeme hinsichtlich ihres Energiebedarfs weiter zu optimieren.

Das Verfahren ist daher besonders auch für IP-Anbieter interessant, die ihren Kunden anwendungsspezifische Verhaltensmodelle zu attraktiven Konditionen anbieten wollen.

**Kontakt:** Georg Gläser, M.Sc., [georg.glaeser@imms.de](mailto:georg.glaeser@imms.de)



Ministerium  
für Wirtschaft, Wissenschaft  
und Digitale Gesellschaft

Die Forschergruppe IntelligEnt wurde gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2018 FGR 0089.



## „Trash or Treasure“ – Intelligente Layoutverarbeitung

In der Forschergruppe IntelligEnt wurde ein KI-basiertes Anomalie-Erkennungsverfahren entwickelt, mit dem automatisch nicht-erprobte und potenziell fehlerhafte Stellen in Layouts detektiert werden können. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

Design-Erfahrung spielt vor allem beim geometrischen Entwurf von Leiterplatten und Chips eine große Rolle. Diese letzten Schritte auf dem Weg zur Fertigung erfordern Wissen darüber, welche Leitungen besonders empfindliche oder stark störende Signale führen und wie diese behandelt werden müssen. Im Falle des ASIC-Entwurfes kommen dazu Heuristiken für Symmetrien, spezielle Anordnungen usw. Selbst Lehrbücher geben hier einen wichtigen Ratschlag: „Wenn etwas schön aussieht, wird es funktionieren“. Oft wird hier die Qualitätssicherung auf Basis von Heuristiken, teils aufwendigen Simulationen und Reviews durchgeführt.

KI-basierte Algorithmen zeigten in verschiedenen Anwendungen, dass sie in der Lage sind, solches nicht-formales Erfahrungswissen abzubilden. Jedoch entstehen beim Einsatz zwei wichtige Herausforderungen: Zunächst muss eine passende Datenrepräsentation gefunden werden, die effizient verarbeitet (und gespeichert) werden kann und gleichzeitig alle wichtigen Informationen über die Geometrie und Signaltypen abbildet. Außerdem stehen zum Training keine vorklassifizierten Daten zur Verfügung: Es gibt derzeit keinen offenen Datensatz, der typische Fehlerfälle repräsentativ enthält.

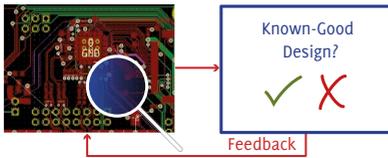


Abbildung 1:  
Die Design- und Feedback-Schleife im Leiterplattenentwurf. Quelle: IMMS.

In der Forschergruppe IntelligEnt haben IMMS und TU Ilmenau deshalb ein KI-basiertes Anomalie-Erkennungsverfahren entwickelt, mit dem automatisiert nicht-erprobte und potenziell fehlerhafte Stellen in Layouts detektiert werden können. Durch eine flexible Datenrepräsentation lassen sich damit sowohl PCB- als auch ASIC-Layoutdaten verarbeiten.

### Layout-Daten zu komplex für ML-Trainings

Layout-Daten liegen in den meisten Fällen als Vektorgrafiken vor, in denen die verschiedenen Objekte an Fertigungsebenen gekoppelt sind. Um einen Machine-Learning-Algorithmus anwenden zu können, müssen die Daten jedoch numerisch, also als Vektoren, Matrizen oder Tensoren vorliegen. Eine einfache Abbildung auf ein 3D-Zahlenschema, welches die verschiedenen Ebenen repräsentiert und alle Details beibehält, ist unpraktisch: In ASICs können hier mehr als 50 Ebenen auftreten. Wenn zusätzlich Signaleigenschaften berücksichtigt werden sollen, führt diese Repräsentation dazu, dass die Datensätze extrem groß werden und damit kaum sinnvoll für einen Trainingsprozess verwendet werden können.

### Daten auf das Wesentliche reduzieren

Die Forschergruppe IntelligEnt hat deshalb einen neuen Ansatz untersucht: Durch Querschnitte durch das Layout kann die Geometrie durch ein 2D-Datenschema (Bild) repräsentiert werden, Signaleigenschaften kommen in der dritten Dimension hinzu. Diese Methode ist vergleichbar mit einem Farbbild: Das Bild selbst (die Helligkeit) zeigt die Geometrie, während die Farbkanäle für die Signaleigenschaften wie z.B. Kategorien benutzt werden. Jedoch muss auch hier darauf geachtet werden, dass die Auflösung der Querschnitte oder Bilder hoch genug ist, um sämtliche Details des Layouts abzubilden. Hierzu kann z.B. die minimale Strukturgröße als Richtwert für die Genauigkeit herangezogen werden.

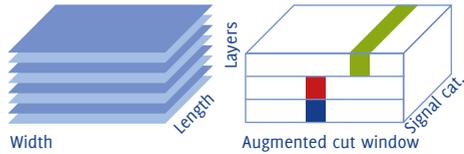


Abbildung 2: Lagenweise Datenrepräsentation (links) und in IntelligEnt verwendete Querschnittsdarstellung (rechts). Quelle: IMMS.

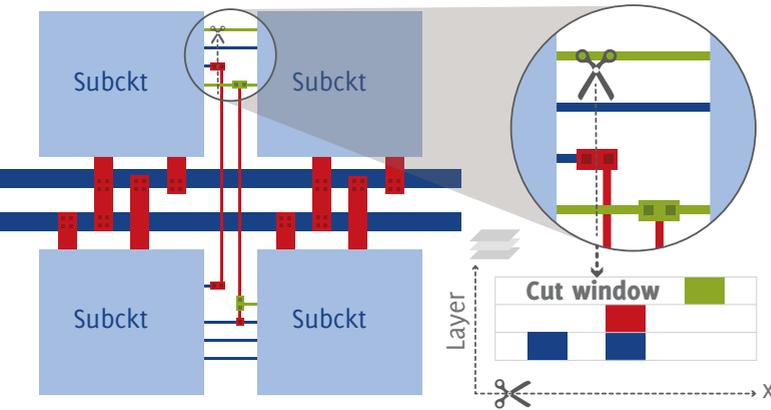


Abbildung 3:

Layout-Vorverarbeitungsprozess: Das Layout wird entlang einer Schnittlinie geschnitten und in ein entsprechendes „Bild“ zusammengefügt. Grafik: IMMS.

- > Integrierte Sensordysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

## Autoencoder – neuronales Netz unterscheidet gute und schlechte Entwürfe

Die Kernidee des Machine-Learning-Algorithmus ist es, Abweichungen von einem gegebenen Datensatz zu erkennen. Das heißt, dass anhand bekannter guter Entwürfe Abweichungen von dort verwendeten Entwurfsregeln erkannt werden sollen. Dabei wird angenommen, dass ein Beispieldatensatz vorliegt, in dem zumeist gute Entwurfspraxis verwendet wurde. Zur Anomalie-Erkennung wird ein Autoencoder verwendet. Dieses neuronale Netz basiert auf der Idee, dass ein Eingangsdatensatz wie durch einen Flaschenhals oder das Objektiv einer Kamera auf sich selbst abgebildet wird. Die Bildinformation wird somit verdichtet und beschnitten. Dadurch wird eine verkleinerte Repräsentation erzeugt, die mit den Eingangsdaten verglichen wird. Der Abbildungsfehler wird bei Daten, die den Trainingsdaten ähneln, sehr klein sein, während er bei abweichenden Daten größer wird. Er kann also als Maß für die Abweichung vom Trainingsdatensatz – und damit für die Abweichung von den dabei verwendeten Entwurfsregeln verwendet werden.

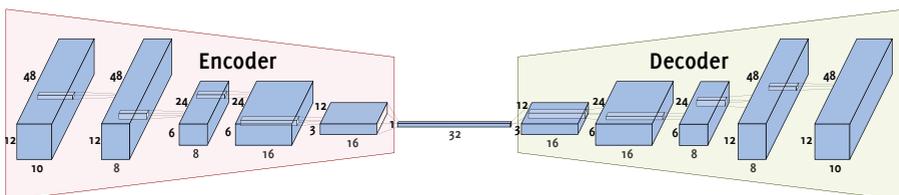


Abbildung 4: Die Architektur des verwendeten KI-Systems (Autoencoder). Grafik: IMMS.

### Anwendung auf ASICs

Analog-zu-Digital-Wandler (ADC) stellen besondere Herausforderungen an das Layout: Gerade hier müssen Symmetrien eingehalten und z.B. Kreuzungen von digitalen Schaltsignalen und analogen Messgrößen vermieden werden. Am IMMS werden z.B. ADCs entwickelt, die nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation arbeitet (SAR ADC). Das Layout eines solchen ADCs liegt in zwei Versionen vor: Im ersten Schritt wurde das Layout von einem unerfahrenen Ingenieur erstellt und im zweiten Schritt durch einen erfahrenen Layouter überarbeitet.

Das Layout des erfahrenen Layouters wurde zum Training des gezeigten Algorithmus verwendet. Die verschiedenen Signalleitungen wurden dazu in Kategorien eingeteilt, welche im „Farbkanal“ der Querschnitte eingefügt wurden. Nach dem Training des gezeigten Autoencoders wurde dieser zur Untersuchung der ersten Layoutvariante herangezogen. Die dabei entstandenen Rekonstruktionsfehler wurden in der Abbildung 5 farblich im Layout in einer Heatmap markiert, wobei rote Bereiche Stellen mit größerem Rekonstruktionsfehler darstellen.

Es zeigt sich, dass der Algorithmus genau die Bereiche markiert hat, die in der Überarbeitung stark angepasst wurden, um die Performance des Wandlers zu verbessern. Außerdem lassen sich die Fehlerstellen automatisch in verschiedene Kategorien ein-

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

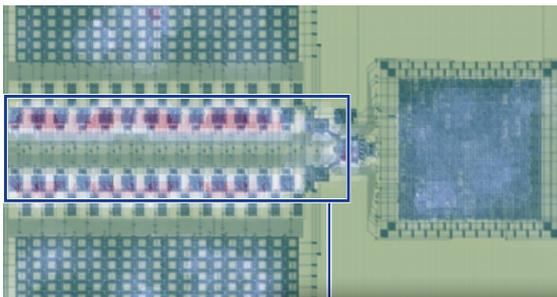
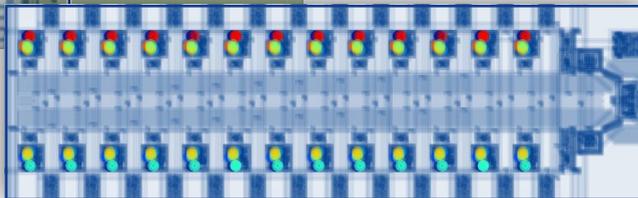


Abbildung 5:

Verarbeitetes Layout eines SAR-ADC. Die roten Flächen zeigen die Bereiche, die das entwickelte System gekennzeichnet hat – und die vom erfahrenen Ingenieur überarbeitet wurden.

Grafik: IMMS.



teilen, die in zukünftigen Analysen näher untersucht und verbessert werden sollen – z.B. darauf, ob dem Ingenieur hier Hinweise zur Verbesserung gegeben werden können.

Neben diesen erkannten Anomalien treten vereinzelt Artefakte auf, die in einer übergreifenden Analyse adressiert werden können. Wird das System so auf mehrere Entwürfe angewendet und der Trainingsdatensatz jeweils mit den „guten“ Entwürfen erweitert, ist zu erwarten, dass die Erkennungsgenauigkeit ansteigt und so immer zielgerichteter mögliche Fehlerstellen erkannt werden können.

## Anwendung auf PCBs

Die Forschergruppe IntelligEnt hat ein studentisches Software-Projekt an der TU Ilmenau betreut, in dem das Anomalie-Erkennungsverfahren als Plugin für das freie PCB-Entwurfswerkzeug KiCad entwickelt wurde. Mit dem Plugin können in KiCad-Signale in Kategorien eingeteilt und an den Trainings- bzw. Evaluationsprozess übergeben werden. Das System wurde so entworfen, dass die Entwurfsdaten beim Benutzer auf die für den Autoencoder notwendigen Querschnitte reduziert und dann an einen zentralen Server zur Verarbeitung übermittelt werden. So wird einerseits ein ggf. notwendiger Grafikprozessor nur im Server benötigt und andererseits können die Entwürfe mehrerer Benutzer kombiniert werden.

Für ein erstes Training wurde dabei auf quelloffene Entwürfe gesetzt, u.a. aus den Projekten Crazyflie und HackRF. Die Signale der Entwürfe wurden in Kategorien eingeteilt und dem Programm übergeben. Zur Evaluation wurden die in der Abbildung 6

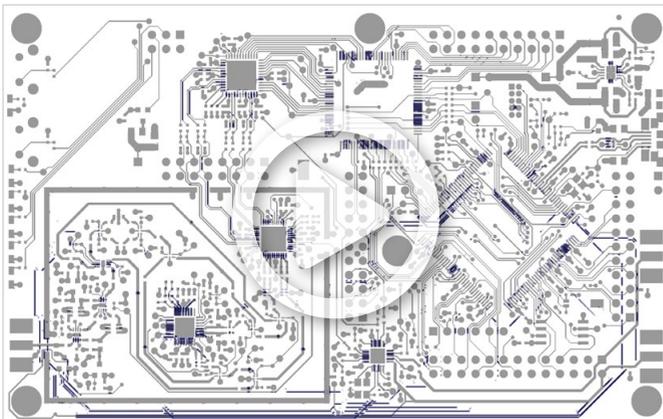


Abbildung 6:

Als Beispiel wurden Fehlerstellen in das quelloffene Layout des HackRF-Projekts eingefügt. Die gefundenen Anomalien (in Blau) markieren diese Modifikationen.

Grafik: IMMS.

*Download des Plugins auf GitHub*

*Video-Tutorial zum Plugin ansehen*

dargestellten Signale so verändert, dass sie von der Anomalie-Erkennung erkannt werden sollten: So wurde z.B. eine Taktleitung über einen sensitiven HF-Teil geführt.

Die Auswertung zeigt, dass die eingebauten Fehlerstellen korrekt erkannt wurden. Aufgetretene Artefakte bzw. falsch-positive Regionen, die vermeintlich fehlerhaft sind, können beispielsweise dadurch erklärt werden, dass sie im Trainingsdatensatz unterrepräsentiert waren. Jedoch sollte dieser Effekt nach einer Erweiterung des Trainingsdatensatzes vermindert werden oder sogar ganz verschwinden.

## Ausblick

Die entwickelte Methode zur Anomalie-Erkennung auf Layout-Daten wurde in zwei verschiedenen Szenarien demonstriert. Sowohl im ASIC- als auch im PCB-Entwurf können damit Abweichungen von guter Design-Praxis erkannt werden. Derzeit werden dafür jedoch nur Signalinformationen im Sinne von Signalkategorien (Analog, Digital, Taktsignal, usw.) im Algorithmus abgebildet. Eine Kombination mit Simulations- oder Messdaten könnte die Treffsicherheit des Verfahrens stark verbessern – und zudem die Handhabung vereinfachen, da diese Informationen nicht manuell eingetragen werden müssen.

Eine Erweiterung auf andere Layout-Typen wie z.B. MEMS-Layouts ist ebenso denkbar wie eine Anpassung und Verbesserung der eingesetzten Machine-Learning-Verfahren. Durch z.B. zusätzliche Klassifizierung könnte der genaue Fehlerfall identifiziert und dadurch Hinweise zur Behebung gegeben werden. Eine Kombination mit automatischen Layout-Algorithmen ist erfolgversprechend, da diesen so nahezu „menschliche“ Design-Erfahrung mitgegeben werden kann.

**Kontakt:** Georg Gläser, M.Sc., [georg.glaeser@imms.de](mailto:georg.glaeser@imms.de)

Die Forschergruppe IntelligEnt wurde gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2018 FGR 0089.



Ministerium  
für Wirtschaft, Wissenschaft  
und Digitale Gesellschaft

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

Leistungen zu  
IC-Entwurfs-  
methoden:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Mehr zu  
IntelligEnt auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

Jahresbericht



## Testen auf der Überholspur – Machine Learning beschleunigt Messdaten-Analyse für ASICs um ein Vielfaches

Das IMMS hat ein Machine-Learning-basiertes Verfahren für die Messdaten-Analyse von ASICs entwickelt. Es liefert gleiche Ergebnisse wie eine manuelle Auswertung, ist aber 10 – 30 Mal schneller.  
Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

Ob neu entworfene integrierte Schaltungen funktionieren und sich somit in Masse produzieren lassen, wird mit definierten Charakterisierungs- und Testverfahren eingehend untersucht. Dafür gibt es bei Mixed-Signal-Chips und MEMS bereits automatisierte Testsetups – um die spezifizierten Betriebsbedingungen zu überprüfen. Wenn jedoch identifiziert werden soll, wo und wie die Chips zu versagen beginnen, müssen Testabläufe außerhalb dieser Spezifikation erfolgen. Dabei entstehen umfangreiche Messdaten. Diese enthalten meist eine hohe Anzahl potenzieller Fehler, die individuell und vor allem manuell untersucht werden müssen, was sehr zeit- und kostenintensiv ist. Für derartige Testdaten-Analysen außerhalb der Spezifikation haben IMMS und TU Ilmenau eine neue Methode auf Basis von Machine-Learning-Algorithmen entwickelt. Damit lassen sich ähnliche Fehlerbilder- und Ausfallszenarien automatisch gruppieren. Die Methode wurde in einer Fallstudie mit einem industriellen Testdatensatz für einen Chip der Melexis GmbH evaluiert. Die automatisch generierten Gruppen fassten dabei das Verhalten bei potenziellen Fehlerszenarien effizient zusammen, lieferten dem Anwender repräsentative Beispiele sowie Datenvisualisierungen und verringerten damit den Zeitaufwand im Vergleich mit dem Experten um das 10- bis 30-Fache.

Mehr zu  
IntelligEnt auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

Jahresbericht

© IMMS 2020

Eine mögliche Fehlfunktion wird bei einer Messung aufgezeichnet, wenn das Testsystem Signalwerte misst, die außerhalb des erwarteten Wertebereiches liegen. Diese Stellen werden mit dem Zeitpunkt und dem auslösenden Messwert gespeichert, sodass diese Abweichung anhand der Signalverläufe später durch einen Ingenieur manuell analysiert werden kann.

Für Testabläufe, die innerhalb der Spezifikation eines Schaltkreises stattfinden, stellt diese Art der Auswertung auch kein Problem dar, da diese zumeist keine oder nur wenige Fails erzeugen. Wird jedoch auch außerhalb der Spezifikation gemessen, so werden einzelne Fehlerursachen häufig vielfach markiert. So ist es durchaus möglich, dass eine Messreihe in ihrer Gesamtheit mehrere tausend potenzielle Fehlstellen beinhaltet. Ein Testingenieur müsste sich anschließend mit dem sehr zeitaufwändigen Prozess beschäftigen, jede dieser Markierungen zu analysieren und einer Ursache zuzuordnen.

### Ähnliche Signalverläufe werden automatisch vorsortiert

Der am IMMS entwickelte Algorithmus zur Vorsortierung dieser gespeicherten Signalabweichungen basiert auf der Grundlage, dass die aufgezeichneten Markierungen der gleichen Ursache im Signalverlauf einander stark ähneln. Um diese ähnlichen Signalverläufe zusammenzufassen, müssen aussagekräftige Werte erzeugt werden, mit denen anschließend eine Gruppierung durch einen Clusteralgorithmus errechnet werden kann. Dabei werden für jede aufgezeichnete Stelle aus den Signaldaten einige Merkmale, auch Features genannt, ermittelt, die zusammen wesentliche Informationen über die Kurvenverläufe an den möglichen Fehlerstellen beinhalten.

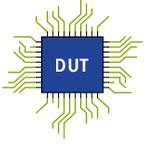
Ausschnitte der Signaldaten im Bereich der Fehlermarkierungen werden zunächst aus den Daten separiert (Abb. Abschnitt 1). Die anschließende Berechnung statistischer Merkmale (Abb. Abschnitt 2) in diesen Signalbereichen erzeugt die benötigten Features für jede Stelle eines potenziellen Fehlers. Diese Features bestehen aus Varianz, Standardabweichungen und Frequenzanteilen der Signalausschnitte sowie aus deren Minima, Maxima, Mittelwerten und deren Ableitungen. Sie sind frei konfigurierbar und werden für jedes der Signale errechnet. Je nach Anzahl der aufgezeichneten Messsignale werden damit 50 bis 100 Features für jede Signalmarkierung errechnet.

Durch Clusteralgorithmen aus dem Machine-Learning-Bereich können die aufgezzeichneten Markierungen mit den Daten der ermittelten Features nun in Gruppen sortiert werden. Die Evaluation mehrerer Verfahren ergab, dass sich der Clusteralgorithmus DBSCAN (Density Based Spectral Clustering for Applications with Noise) für

Überblick zu dem neuentwickelten Machine-Learning-basierten Verfahren für die Messdaten-Analyse von ASICs. Grafik: IMMS.

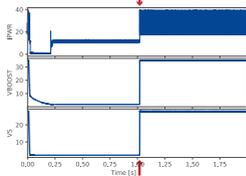
### Ausgangsdaten

Schaltungsevaluation



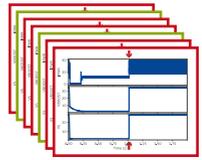
Funktionalitätschecks, Verhalten bei Änderungen der Versorgungsspannungen

### Aufzeichnung: Messungen



Mixed-Signal-Daten, Echtzeit-Checks, große Datenmengen bei langer Messdauer

### Gespeicherte Daten



umfangreiche Datenmengen (Terabyte) mit aufgezeichneten Fehlern (ca. 1.000)

## Auswertung

bisher:

mehrere Tage

Automatisierung:

durch intelligente Messdatenverarbeitung:

Stunden

### 1 Fail-Fensterung

Gleiche Fail-Ursachen haben ähnliches Aussehen:

- Informationen über Signale an Fallsstellen
- Extraktion von 1000 Datenpunkten: aus Signalen symmetrisch um die Fallstelle extrahiert
- starke Datenreduktion zu verarbeitender Daten

### 2 Merkmalsextraktion

Min, Max, Mittelwert, Stdabw., Varianz

Anstieg, mittel, max, Frequenz (4 Bänder)

Processor

submit

result

Operations

- Min
- Max
- Mean

### 3 Clustering

ähnliche Feature-Werte – ähnlicher Signalverlauf

- Spectral-Clustering-Verfahren mit Ausreißerkennung
- automatisch bestimmte Clusteranzahl
- Visualisierung durch Hauptachsentransformation

## Endauswertung

**Bisher (vollständig manuell):**

- Analyse jedes einzelnen Fehlers: stark repetitiv
- fehleranfällig
- viele Fehler = große Datensätze
- extremer manueller Aufwand

**Jetzt: KI-Clusterverfahren**

- manuelle Inspektion nur für wenige Clustergruppen
- bei vielen Fehlern: gute Separation der Fehlergruppen
- bessere Performance bei mehr Daten

	Konfusionsmatrix										Automatic clustering	Match [%]
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	94.2% # 179	0.0% # 0	50.4% # 45	0.0% # 0	0.0% # 0							
2	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
3	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
4	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
5	5.8% # 11	0.0% # 0	19.6% # 11	0.0% # 0	0.0% # 0							
6	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
7	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
8	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
9	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0
10	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0	0.0% # 0

diese Anwendung der Fehlerauswertung am besten eignet. Zum einen geht dieser Algorithmus nicht von festgelegten Gruppenanzahlen aus. Zum anderen ist er auch aufgrund der Rauscherkennung vorteilhaft, welche automatisch jene aufgezeichneten Stellen als Rauschen oder als Ausreißer markiert, die in der Messung ein individuelles Erscheinungsbild aufweisen.

Das Ergebnis des Clusters kann anschließend auf verschiedene Weise visualisiert werden. Zur Ursachenforschung eignet sich eine Darstellung der überlagerten Kurvenverläufe einer Gruppe. Damit kann man schnell identifizieren, ob alle Markierungen, die dieser Gruppe zugeordnet wurden, einer möglichen Fehlerursache entstammen. Eine weitere Ansicht kann durch die Hauptachsentransformation (PCA = Principal Component Analysis) der 50 bis 100 Merkmale erzeugt werden. Die PCA-Berechnung ermöglicht es, alle diese Merkmale so zusammenzufassen, dass sie auf nur zwei Dimensionen dargestellt werden (Abb. Abschnitt 3). Jedem Cluster wird dabei eine Farbe zugewiesen. So ist eine deutliche Gruppenabgrenzung zu erkennen. Weiterhin lassen sich durch diese Darstellung Zusammenhänge mehrerer Gruppen schnell identifizieren. So könnten beispielsweise auch Fehler gleicher Ursachen, die in verschiedene Gruppen unterteilt wurden, schnell erkannt werden, da sie in dieser Darstellung dann nah beieinander liegen.

Durch die Möglichkeit der Annotation einzelner Markierungen bzw. ganzer Gruppierungen wird im Anschluss auch die Dokumentation und Auswertung der Messdaten unterstützt und beschleunigt. Die Computer-unterstützte Auswertung von Chipmessungen vereinfacht damit den Aufwand der manuellen Auswertung drastisch.

### Evaluation an Messreihen aus der Industrie

Dieser Prozess wurde anhand mehrerer Messreihen der Melexis GmbH evaluiert. Eines der Ergebnisse daraus war, dass eine Messung, in der 320 Fails aufgezeichnet wurden, durch den Clusteralgorithmus in acht Gruppen sowie drei Ausreißer unterteilt wurde. Aufgrund der Struktur des entworfenen Algorithmus ist es im Nachhinein gut möglich, die Sortierung des Clusterverfahrens nachzuvollziehen. Der manuelle Aufwand wird somit von ursprünglich 320 auszuwertenden Bereichen der Messung auf acht auszuwertende Gruppen und drei Ausreißer, also in Summe auf 11 Fälle, verringert. Daher ist für dieses Beispiel zu erwarten, dass die Auswertung mithilfe des präsentierten Algorithmus um ca. das 10- bis 30-Fache beschleunigt wird.

## Machine-Learning liefert gleiche Ergebnisse wie manuelle Auswertung und ist 10 – 30 Mal schneller

Für einen Vergleich der neuen und herkömmlichen Auswertungsverfahren wurden die 320 Fails auch manuell und unabhängig von dem vorgestellten Gruppierungsverfahren untersucht.

Dabei wurde evaluiert, wie gut die Gruppierung der manuellen Auswertung mit dem automatisierten Gruppierungsverfahren übereinstimmt. Visualisieren lässt sich das mithilfe einer Konfusionsmatrix (unten in Abb.). Diese stellt die Anzahl der Übereinstimmungen der zwei Verfahren gegenüber, indem die Zuordnung der Fehler von den Auswertungsverfahren zusammengezählt werden. Diese werden anschließend in einer Matrix mit Sortierung nach Gruppengrößen abgebildet. In horizontaler Richtung ist das Ergebnis der automatisch erstellten Cluster und vertikal ist die manuelle Gruppierung zu sehen.

Die klar erkennbare Übereinstimmung zeigt, dass das Clusterverfahren gleiche Gruppierungen ermittelt, wie sie bei der manuellen Auswertung zu finden sind. Der Fall, dass in horizontaler Richtung mehrere Cluster (5, 3 und 1) einer Gruppe in vertikaler (2) Richtung zugeordnet wurden, zeigt, dass eine Fehlerursache auch mehrere Erscheinungsbilder im transienten Signalverlauf aufweisen kann. Bei einer anschließenden Untersuchung der Fehlerursachen durch einen Experten konnten diese Gruppen problemlos zusammengefasst werden. Außerdem wurden in dem automatisierten Verfahren drei Fehler der Gruppe „-1“ bzw. als erkanntes Rauschen zugewiesen. Diese drei Fälle sind Ausreißer und müssen anschließend separat ausgewertet werden.

Das entwickelte Clusterverfahren mit Machine Learning kann den manuellen Aufwand zur Messdatenauswertung von Chip-Tests mit großen Fehlerzahlen extrem minimieren. Im Beispiel müssten mit den evaluierten Messdaten nur noch acht Gruppen plus drei Ausreißer ausgewertet werden, anstatt der kompletten Fail-Anzahl von 320.



Das vorgestellte Verfahren wurde vom IMMS mit Unterstützung der TU Ilmenau in der Forschergruppe „IntelligEnt“ entwickelt.<sup>1</sup> Durch die grundlegenden Ergebnisse, welche mit industriellen, realen Messdaten und Ergebnissen der Melexis GmbH evaluiert wurden, ist es nur noch ein kleiner Schritt bis zur praktischen Implementierung. Die Grundlagen werden im nächsten Schritt in die industrielle Praxis überführt.

**Kontakt:** Georg Gläser, MSc, [georg.glaeser@imms.de](mailto:georg.glaeser@imms.de)



Die Forschergruppe IntelligEnt wurde gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Kennzeichen 2018 FGR 0089.

<sup>1</sup> T. REINHOLD, M. SEELAND, M. GRABMANN, C. PAINTZ, P. MAEDER and G. GLAESER, “Ain’t got time for this? Reducing manual evaluation effort with Machine Learning based Grouping of Analog Waveform Test Data,” *ANALOG 2020; 17th ITG/GMM-Symposium, 2020*, pp. 1-6, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9257338>

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

Leistungen für

Charakterisie-

rung und Test:

[www.imms.de](http://www.imms.de).

Mehr zu

IntelligEnt auf

[www.imms.de](http://www.imms.de).



FORSCHUNGSFELD

## INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Für künftige Sensor-, Mess- und Testsysteme, die Daten selbsttätig validieren, verarbeiten und bewerten können, forscht das IMMS an Lösungen für Eigenintelligenz direkt in den Geräten. In Trib.US entwickeln das IMMS und die SONOTEC GmbH ein mobiles Gerät, das den Prüfer bei Instandhaltungsentscheidungen an Transportrollen unterstützt und Stillstandzeiten in der Produktion reduzieren hilft. Das Bild zeigt Voruntersuchungen am IMMS. Foto: IMMS.

Jahresbericht

© IMMS 2020

> Integrierte

*Sensorsysteme*

> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

*Testsysteme*

> Mag6D-nm-

*Direktantriebe*

> Inhalt

\* Förderung

Integrierte Sensor-ICs stellen das Herz von Sensorik- und Messsystemen dar. Dabei kann es sich beispielsweise um Funksensoren, Handheld-Diagnosegeräte oder hochperformante stationäre Gerätelösungen für das Maschinen-Monitoring handeln.

## Für immer leistungsfähigere Sensoren bearbeiten wir folgende Forschungsfragen

Immer leistungsfähigere Sensoren und deren rasant steigende Anzahl führen zu immensen Datenmengen, deren Übertragung, Verarbeitung und Nutzung bisherige Technologien zunehmend an ihre Grenzen bringt. Es ist daher zukünftig erforderlich, Sensor-, Mess- und Testsysteme so zu konzipieren, dass sie Daten selbsttätig validieren, verarbeiten und bewerten können – durch Realisierung von Eigenintelligenz direkt in den Geräten. Durch die Vernetzung dieser Systeme entsteht die Möglichkeit, die Aufgaben im Netzwerk zu verteilen. Es kommen jedoch neue Herausforderungen in Form von dynamischen Aspekten durch Netzwerkprotokolle und sich ändernde Aufgaben über den Zeitverlauf hinzu.

In diesem Forschungsfeld stehen daher drei Fragen im Zentrum der Arbeiten: Wie lassen sich Sensordaten automatisch und so nah wie möglich am Ort ihrer Entstehung schnell, kostengünstig und energieeffizient zu nutzbaren Informationen verarbeiten? Welche zusätzlichen Informationen lassen sich mit Hilfe vernetzter Sensorsysteme gewinnen? Wie kann solch ein System aus verschiedenen Teilsystemen modelliert werden, um vorab Fragen wie z.B. den Energiebedarf, die optimale Verteilung von Funktionalitäten im Netzwerk und den Einfluss von Topologieentscheidungen zu klären?

## Mit unseren Lösungen adressieren wir folgende Anwendungen

Für die Lösung unserer Forschungsfragen beschäftigen wir uns zum einen mit der Analyse von verteilten IoT-Systemen, um energie- und ressourcenoptimierte eingebettete Systeme beispielsweise für das „Internet der Dinge“ (Internet of things – IoT) oder autarke Sensornetzwerke für das Umweltmonitoring oder für Smart-City-Anwendungen zu realisieren. Zum anderen erforschen wir eingebettete künstliche Intelligenz (KI), um KI-Algorithmen auf stark ressourcenbeschränkten Systemen z.B. für die Automatisierungstechnik und Industrie 4.0 effizient implementieren zu können.

*Projekte*

*in diesem*

*Forschungsfeld*

*Jahresbericht*

© IMMS 2020

Im Bereich Echtzeit-Datenverarbeitung und -kommunikation optimieren wir eingebettete Systeme für die Signalverarbeitung und Datenübertragung in Echtzeit, damit etwa vernetzte, räumlich verteilte Edge-KI-Systeme reibungslos kommunizieren können. Darüber hinaus erarbeiten wir Konzepte und Implementierungsarchitekturen für modulare und mobile Testsysteme. Mit diesen modularen Hardware-Software-Plattformen lassen sich integrierte Schaltungen und eingebettete Systeme für verschiedene Anwendungen umfangreich, aber dennoch schnell und flexibel testen und charakterisieren.

## Highlights 2020 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

### Projektstart von Trib.US\* – mobiles Multisensorik-Prüfgerät zur Instandhaltung von Transportbändern

Rollen in Transportbändern sind aus keinem Industriezweig wegzudenken. Steht wegen einer defekten Transportrolle ein Band still, kann eine ganze Anlage ausfallen. Verschleiß an solchen Rollen rechtzeitig zu erkennen ist wichtig, um Ausfallkosten vermeiden zu können. Problematisch ist jedoch, dass ein einzelnes Band aus einer Vielzahl von Rollen besteht und diese so verbaut sind, dass sie sich nicht ohne weiteres oder nur sehr aufwendig prüfen lassen.

Im 2020 gestarteten Projekt Trib.US entwickeln das IMMS und die SONOTEC GmbH daher eine integrierte mobile Lösung, die den Prüfer bei Instandhaltungsentscheidungen an Transportrollen unterstützt. Ziel ist ein portables Gerät, mit dem der Instandhalter Defekte genau lokalisieren kann, um Stillstandzeiten in der Produktion zu reduzieren oder zu verhindern.

Das Gerät wird mit Ultraschall- und Drehzahl-Sensoren Abweichungen in den Signalen erfassen, die defekte Transportrollen von den normallaufenden unterscheiden. Mit der Entwicklung wird es möglich, durch Korrelation und Sensordatenfusion Rückschlüsse auf den Ort des Defektes zu erhalten und diese Information direkt in Echtzeit dem Prüfer auf seinem portablen Gerät anzuzeigen. Dadurch kann während des Betriebes geprüft werden, eine defekte Transportrolle unmittelbar identifiziert und bei einem Lagerschaden gezielt ausgebaut werden.

Dazu entwickelt das IMMS die echtzeitfähige Plattform sowie die Algorithmen zur Signalbewertung und Korrelation, während der Partner Sonotec GmbH die Ultraschallsensorik entwickelt und das Userinterface sowie die dazugehörige Managementsoftware für den Instandhalter realisiert.

Trib.US auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)



Für die EdgeCam-Lösung werden mehrere vernetzte Multikameras zusammenarbeiten, um Sicherheitszonen um mobile Kräne aufzubauen und Kranführer vor möglichen Gefahren zu warnen. Foto: ArtisticOperations/Pixabay.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Projektstart von EdgeCam\* – virtuelle Sicherheitszone für LKW-Kräne

In 2020 gestarteten Projekt EdgeCAM arbeiten wir mit unserem Partner emsys GmbH an der Entwicklung einer virtuellen Sicherheitszone um Fahrzeugkräne.

Virtuelle Sicherheitszonen existieren bisher nur in Form von Lichtschranken oder mit Hilfe von zusätzlicher Hardware, die gefährdete Personen bei sich tragen müssen. Das macht den Einsatz im mobilen Bereich schwierig. Dies trifft insbesondere auf LKW-Ladekräne zu, die häufig auch bei Kunden vor Ort genutzt werden, wo das vorherige Ausstatten von Passanten mit Tags nicht möglich ist.

In EdgeCam wird daher an einer Lösung gearbeitet, bei der mehrere vernetzte Multikameras zusammenarbeiten, um die Sicherheitszone aufzubauen und den Kranführer vor möglichen Gefahren zu warnen. Dazu entwickeln emsys und das IMMS zunächst eine modulare Hardwareplattform, die mit unterschiedlichen Kameras und Kommunikationsmodulen aufgebaut wird. Ziel ist es, aus unterschiedlichen Kommunikationsoptionen intelligent diejenige auszuwählen, die am jeweiligen Einsatzort und für die aktuelle Aufgabe am geeignetsten ist.

EdgeCam auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)



Gefördert durch  
 Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft  
 aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Installation eines Mikroklimamessnetzes in einer Obstanlage des Lehr- und Versuchszentrums Gartenbau Erfurt im regionalen Experimentierfeld EXPRESS. Foto: IMMS.

Projekträger  
 Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung

- 65
- > Integrierte Sensorysysteme
  - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
  - > Mag6D-nm-Direktantriebe
  - > Inhalt
  - \* Förderung

## EXPRESS\* – Monitoring von Mikroklima und Trockenstress im Obstbau

Das IMMS hat im Juli 2020 als einer von vier Partnern im regionalen „Experimentierfeld EXPRESS zur datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft“ den Prototyp für ein Mikroklimamessnetz in einer Obstanlage des Lehr- und Versuchszentrums Gartenbau Erfurt installiert. Damit werden zunächst lokale Änderungen von Lufttemperatur und -feuchte gegenüber einer entfernten Wetterstation sowie die Blattfeuchte bestimmt und gleichzeitig die günstigste Messposition für diese Parameter ermittelt. Dazu hat das IMMS Sensoren paarweise in der Obstanlage ausgebracht, um jeweils einen direkten Vergleich zwischen einer Position direkt am Baum oder etwas abseits davon zu ermöglichen. Diese Messungen wurden bis zum Herbst 2020 weitergeführt. Danach hat das IMMS das Mikroklimamessnetz für weitere Fragestellungen optimiert und ausgebaut.

### Arbeiten sind Teil des regionalen Experimentierfeldes EXPRESS

Im mitteldeutschen Experimentierfeld EXPRESS arbeiten unter der Leitung des Instituts für Wirtschaftsinformatik an der Universität Leipzig das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, das Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW und das IMMS an den Grundlagen für das Zusammenspiel bestehender technischer Infrastrukturen mit neuen Technologien und Methoden in landwirtschaftlichen Betrieben.

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 potentiell geeignete Technik erprobt und der Branche vorgestellt.

### IMMS unterstützt Monitoring von Mikroklima und Trockenstress

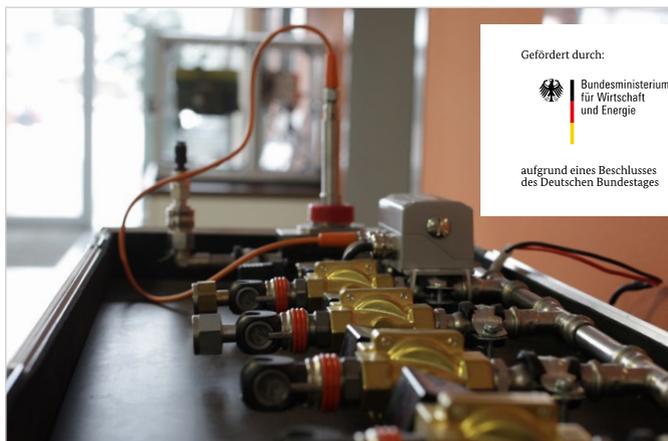
Das IMMS verantwortet in EXPRESS die Datenerhebung und kümmert sich um die Bestimmung des Mikroklimas sowie weiterer Parameter für das Monitoring von Trockenstress. Dabei sollen Agrarbetrieben unterschiedliche Systemlösungskonzepte für diese zwei Anwendungsfälle vorgestellt werden. Dazu erprobt das IMMS verschiedene am Markt verfügbare Sensorsysteme auf ihre Eignung für die beiden Schwerpunkte. 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.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

EXPRESS auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Mittelstand-  
Digital

„Mobile Druckluft-  
überwachung und  
Energiemonitoring“:  
eine von 4 Lösungen,  
die das IMMS 2020  
in Mittelstand 4.0  
für Demonstrations-  
zwecke realisiert hat.  
Foto: IMMS.

- > Integrierte  
Sensorsysteme
- > Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme
- > Mag6D-nm-  
Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

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

### Demonstratoren und Projekte 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. 2020 wurden dazu vier Lösungen realisiert und mit Publikationen begleitet.

Mit dem transportablen Demonstrationskoffer **„Mobile Druckluftüberwachung und Energiemonitoring“** lassen sich verschiedene Druckluft-Leckage-Situationen vorführen. Mit einem mobilen Ultraschall-Detektor können Lecks identifiziert werden. Durch Messungen des Energieverbrauchs am Kompressor und des Volumenstroms der verbrauchten Druckluft wird veranschaulicht, welchen wirtschaftlichen Schaden jede einzelne Leckage verursacht.

Der Demonstrator **„Ethernet-QS“** zeigt, wie in Maschinen verlegte Ethernet-Kabel im laufenden Betrieb überwacht werden können. Diese Kabel werden beim ständigen Bewegen in z.B. Schleppketten stark beansprucht. Schleichender Verschleiß wird oft zu spät erkannt und führt zu ungeplanten und z.T. langen Ausfällen der Maschinen. Fehlkommunikation und Defekte werden mit Ethernet-QS durch eine permanente Prüfung, die den eigentlichen Datenstrom in der Maschine nicht stört, frühzeitig erkannt und können im Sinne des Predictive Maintenance rechtzeitig beseitigt werden.

Im Projekt **„In-Prozess-Qualitätssicherung in der Zerspanung“** wurde zusammen mit dem Partner GFE Gesellschaft für Fertigung und Entwicklung in Schmalkalden

ein Bearbeitungszentrum mit nachrüstbaren Sensorsystemen, wie mehrachsigen Schwingungssensoren, einem Laservibrometer und Laserinterferometern ausgestattet. Ziel dieser Arbeiten war es zu untersuchen, welche Sensorsysteme geeignet sind, kritische Maschinenparameter zu erfassen, die die Qualität von Werkstücken während der Bearbeitung beeinträchtigen. Außerdem sollten Aussagen über den Zustand des Werkzeugs, wie z.B. den Verschleiß eines Fräasers, ermöglicht werden.

Der Demonstrator „EASY“ zeigt, wie sich Ursachen für Stillstandzeiten aufdecken und somit Maßnahmen für eine reibungslose Produktion ergreifen lassen. Dazu wurden die Betriebszustände einer Spritzgussmaschine in der Kunststoffindustrie an der Maschinenzustandsampel erfasst und aufgezeichnet. Mit den Daten lassen sich Aussagen zu gefertigten Stückzahlen, Produktionsausfällen, Reaktionszeiten bei Ausfällen, Einhalten von Produktionsprioritäten und zur Bewertung der Prozessstabilität ableiten. Die Daten werden von der Maschine zu einer Cloudlösung über ein kostengünstiges IoT-Gateway übertragen, das ohne großen Aufwand nachgerüstet werden kann. So lassen sich Maschinenzustandsdaten nun auch standortübergreifend mit relativ einfach Industrie-4.0-fähig gemachten Bestandsanlagen in der Cloud auswerten.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

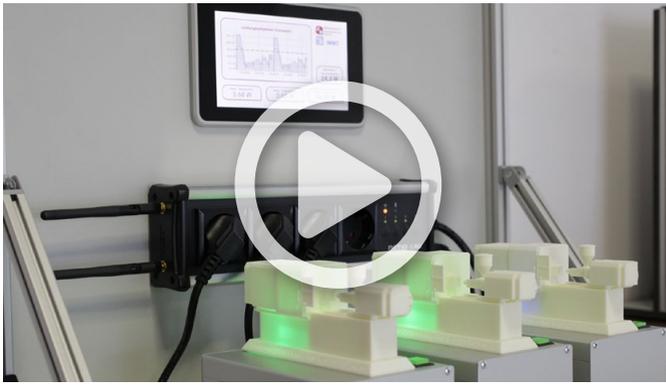
Mehr zu Mittel-  
stand 4.0 auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

### Start der KI-Trainer-Angebote

Seit Mai 2020 unterstützen KI-Trainer von Mittelstand 4.0 die Planung und Konzeption konkreter KI-Implementierungsmaßnahmen und -strategien. Sie vermitteln Wissen zu Methoden des Maschinellen Lernens und anderer Bereiche der künstlichen Intelligenz. Außerdem helfen sie bei der Konzipierung, Einführung oder Erweiterung von Digitalisierungslösungen mit KI. Der KI-Trainer der Modellfabrik Migration am IMMS, Wolfram Kattanek, bietet Unterstützung zu den Schwerpunkten intelligente Sensor- und Messsysteme, sensornahe KI-basierte Signalverarbeitung, Zustandsüberwachung von Maschinen und vorausschauende Wartung an. Damit leistet er einen wichtigen Beitrag zur Sensibilisierung für KI-Themen und zum Wissenstransfer aus der Forschung in KMU. Neben praxisnahen KI-bezogenen Demonstrations- und Umsetzungsprojekten erfolgt der Wissenstransfer auch durch Online-Veranstaltungen, wie Vortragsveranstaltungen zum Thema KI und der Veranstaltungsreihe KI-Entwicklerstammtisch. Bei letzterem sind an jedem zweiten Dienstag im Monat Interessierte eingeladen, Einblicke in die technische Umsetzung von KI zu erhalten und regionale Akteure zum Erfahrungsaustausch kennenzulernen. Entwickler stellen eine konkrete KI-Lösung oder ein KI-Entwicklungsprojekt aus verschiedenen Perspektiven vor: z.B. Algorithmen- und Modell-Entwicklung oder Software- und Hardware-Ent-

IMMS-Termine in  
Mittelstand 4.0:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Jahresbericht  
© IMMS 2020



**Energiemanagement von Maschinen und Anlagen.** Das Video vom Demonstrator zeigt modellhaft, wie sich der Energieverbrauch von Spritzgussmaschinen erfassen und so steuern lässt, dass Lastspitzen vermieden werden.

Quelle: IMMS.

- 69
- > Integrierte Sensorysysteme
  - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
  - > Mag6D-nm-Direktantriebe
  - > Inhalt
  - \* Förderung

wicklung. Den Anfang machte das Projekt StadtLärm\*, in dem das IMMS, das Fraunhofer IDMT, Software Service John und Bischoff Elektronik Lösungen zur KI-basierten Geräuschklassifikation in städtischen Umgebungen entwickelt hatten.

## Know-how-Transfer mit neugestarteten Formaten

### Videos von Demonstratoren

Anfang 2020 stand die Veranstaltungsplanung mit den etablierten Sensorik-4.0-Workshops und Stammtischen. Sie war thematisch untersetzt, terminiert und bereit, eine breite Zuhörerschaft in Präsenz zu erreichen. Durch die beginnende Pandemie mussten neue Formate für virtuelle Veranstaltungen etabliert und Videobeiträge produziert werden, um den KMU die Demonstratoren, die sonst live zu sehen sind, trotz geschlossener Institutstüren fachlich näher zu bringen.



**Nachrüstung einer Bohrmaschine mit Sensorik, Netzwerkfähigkeit und lokaler KI.** Das Video zum Demonstrator zeigt an einer Bohrmaschine, wie sich Bestandsanlagen mit Sensoren und KI nachrüsten lassen, um z.B. den Werkzeugverschleiß während der Bearbeitung zu erfassen. Quelle: IMMS.



**Nachrüstbare Lagerbestandsüberwachung.** Das Video zum Demonstrator zeigt, wie sich Füllstände, z.B. von Schüttgut- oder anderen Materialbehältern, automatisch über Ultraschallsensoren ermitteln lassen. Quelle: IMMS.

2020 fanden die Veranstaltungen größtenteils virtuell statt. Mit den 56 Informationsgesprächen, vier Stammtischen, zwei Vortragsveranstaltungen und zwei Vorträgen erreichte die Modellfabrik Migration am IMMS 588 Interessenten aus nahezu allen Thüringer Industriezweigen.

Highlight war im Januar die **Vortragsveranstaltung „Smarte Fertigung – Sensorik in der Produktion“** beim Gastgeber VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH in Großlöbichau mit über 100 Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus einem Organisationsverbund von Thüringer Netzwerken.

Im Laufe der Corona-Pandemie haben sich 19 Thüringer Branchennetzwerke und Cluster als sogenannte **Cross-Cluster-Initiative (CCIT)** zusammengeschlossen, um gebündelt alle nötigen unternehmensspezifischen Corona-Informationen zentral über eine Plattform aufzubereiten und anzubieten. Diese werden auf der gemeinsamen Webseite [netzwerktimer-thueringen.de](http://netzwerktimer-thueringen.de) dargestellt. Außerdem sind dort weitere Angebote präsent, wie z.B. der Gesamtüberblick zu Veranstaltungen, die die Netzwerke und Cluster in Thüringen aktuell vorbereiten und aufeinander abstimmen. Das IMMS unterstützt die Initiative vor allem als M40-Akteur und als Gründungsmitglied der ELMUG eG.

Aus diesem Verbund wurde im September auch eine sieben-tägige virtuelle **CCIT-Veranstaltungsreihe** mit verschiedenen fachlichen Workshops und Konferenzen organisiert. Auch das IMMS stellte an einem Tag neue M40-Projektergebnisse vor. Darüber hinaus wurden mit voraufgezeichneten Videobeiträgen oder Live-Schaltungen Demonstratoren einer breiten Zuhörerschaft präsentiert.

Durch die Spät-Sommer-Lockerungen wurde es möglich, Anfang Oktober die **Veranstaltungsreihe mit der Mittelstandsvereinigung pro Südthüringen e.V.** in kleinem Rahmen mit dem dritten Informationstag zu Ende zu bringen und in kleinen Gruppen intensive Gespräche zu führen, Fragen zu beantworten und zum Teil neue Projektanregungen aufzunehmen.

Ein herausragendes Ereignis für die Transferarbeit in M40 war die Teilnahme am **bundesweiten virtuellen Digitalgipfel** Ende November. Das Kompetenzzentrum war mit 5 Beiträgen vertreten, davon 2 vom IMMS als Modellfabrik Migration. In vorproduzierten Videobeiträgen wurden Demonstratoren und Projektergebnisse vorgestellt. In einem anschließenden Live-Chat konnten die Fragen beantwortet werden.

Eine weitere wichtige Veranstaltung war die **InnoCON**, die Thüringer RIS-3-Jahresveranstaltung, auf dem das IMMS gemeinsam mit allen M40-Modellfabriken mit einem virtuellen 3D-Stand vertreten war.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung



Das fernüberwachte Schwimmbad – Wasserdesinfektion mit UV-Licht. Quelle: IMMS / Digitalgipfel 2020.



Energieschonender Spritzguss durch intelligente Computersteuerung. Quelle: IMMS / Digitalgipfel 2020.



## Skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform

für die Optimierung  
der Energieeffizienz

Arbeiten an der Elektronik für eine automatisierbare Sensorlösung, um Druckluft in der Industrie energieeffizient zu nutzen. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

Druckluftlecks verursachen die meisten energetischen Verluste in der Industrie. Bis zu 10% der elektrischen Energie werden dort allein dafür verwendet, Druckluft zu erzeugen. 30 % davon gehen durchschnittlich aufgrund von Leckagen verloren. Umso wichtiger ist es, Lecks zu finden, Verluste zu bewerten und daraus Maßnahmen für die Instandhaltung einzuleiten. Um Druckluft für Industrieprozesse energieeffizient zu nutzen, hat das IMMS gemeinsam mit den Firmen SONOTEC GmbH und Postberg+Co. GmbH eine automatisierbare Sensorlösung zur Leckageortung und -bewertung entwickelt, mit der sich Druckluftsysteme nachrüsten lassen. Mit der skalierbaren Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform sUSe werden Entscheidungen zu Reparaturen und Instandhaltung vereinfacht und die energetische Effizienz deutlich gesteigert. Das Produkt wird im Jahr 2022 von der SONOTEC GmbH in den Markt gebracht.

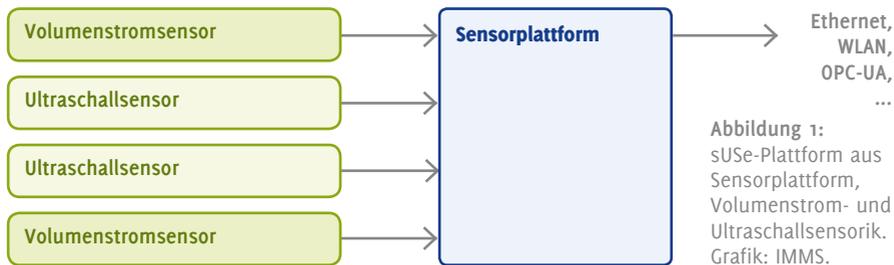
*Mehr zu  
sUSe auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)*

### Funktionsweise des Gesamtsystems

Die sUSe-Plattform ist ein ganzheitliches Monitoring-System, welches aus mehreren, über ein Druckluftsystem verteilten drahtlos vernetzten und fest installierbaren

*Jahresbericht*

© IMMS 2020



Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren besteht, mit denen sich die Energieeffizienz der Druckluftsysteme überwachen und bewerten lässt (Abbildung 1). Zum einen wird der Volumenstrom, also die integrale Menge an Druckluft, mit entsprechenden Sensoren an verschiedenen Stellen im System gemessen und zu jener Menge in Beziehung gesetzt, die in das Druckluftsystem eingespeist wird. Zum anderen werden durch die ebenso im Druckluftsystem verteilten Ultraschallsensoren und aus deren Anordnung zueinander Lecks akustisch geortet und bewertet. Aus den zusammengeführten Daten von Gesamtvolumenstrom und identifizierten Leckagestellen lassen sich die Anteile der Leckagen am Druckluftverlust genau zuordnen.

### IMMS-Beitrag: Elektronikplattform, Signalverarbeitung und Kommunikation

Das IMMS hat eine performante und skalierbare Elektronikplattform für die digitale Verarbeitung der Sensordaten entwickelt. Um Anteile von Leckagestellen am Druckluftverlust genau zuordnen zu können, müssen die Daten von Gesamtvolumenstrom und vieler, über das System verteilter Ultraschallsensoren zusammengeführt werden. Da die Druckluft für viele Anwendungen, wie z.B. für verschiedene Aktionen eines Industrieroboters, an wechselnden Stellen in unterschiedlicher Menge zugeführt wird, müssen sUse-Plattform und alle zugehörigen Sensoren zeitsynchron arbeiten. Daher hat das IMMS bei der Konzeption der Hardware-Komponenten einen modularen Ansatz verfolgt und die Sensoren mittels programmierbarer Logikbausteine (FPGA) angebunden, um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten.

Diese Edge-Plattform zur dezentralen Datenverarbeitung wird für jeden Messpunkt des Monitoring-Systems eingesetzt. Um die Sensoren sehr flexibel für kundenspezifische Aufgaben anpassen zu können, ohne Änderungen an der Hardware vornehmen zu müssen, wurden vom IMMS die Komponenten zur Signalverarbeitung mit einer modellbasierten Entwurfstechnologie entwickelt und auf dieser Basis die

Anwendungsalgorithmen für die FPGA-Integration konfiguriert. Für die Integration in Instandhaltungssysteme wurden geeignete Kommunikationsschnittstellen und -protokolle implementiert und die entsprechende Kommunikationsfähigkeit der drahtlosen Sensoren hergestellt.

## Hardware-Entwicklung

Die Plattform besteht aus einem Mainboard mit integrierter zentraler Recheneinheit (CPU), einem FPGA und aufsteckbaren Sub-Modulen. Neben den von den Projektpartnern entwickelten Ultraschall- und Volumenstromsensoren sollen auch andere kommerziell erhältliche Sensoren integriert werden können, wie z.B. Druck-, Temperatur- und Beschleunigungssensoren. Dazu wurden Voruntersuchungen durchgeführt und die Übertragungsprotokolle und Schnittstellen für die Einbindung der Sensoren spezifiziert.

### Mainboard

Das IMMS hat verfügbare CPU-Module für das Mainboard untersucht und verglichen. Um Entwicklungsaufwand und Hardwarekosten zu minimieren, wurde ein Phycore iMx8M ausgewählt, ein System-on-Module (SoM) der Firma Phytec. Es beinhaltet eine iMx8-CPU sowie Speicher (LPDDR4 Ram und EMMC) und kann optional mit einem Funkmodul (WLAN, Bluetooth) ausgestattet werden.

Ein weiterer Bestandteil des Mainboards ist ein FPGA, mit dem die Schnittstellen zu den Sub-Modulen applikationsspezifisch angepasst werden können. Die erfassten Signale der Sensoren werden im FPGA weiterverarbeitet. So können Pegelberechnungen, FFT und Datenkomprimierung durchgeführt werden. Die Daten werden über eine PCIe-Verbindung anschließend zur CPU übertragen.

Weiterhin wurde ein M.2-Steckverbinder auf das Board aufgebracht, mit dem das System mit weiteren Komponenten erweitert werden kann, wie zum Beispiel mit dem KI-Hardwarebeschleuniger Google Coral AI Accelerator.

### Sub-Basic

Das Basismodul wird auf das Mainboard aufgesteckt, um Spannungsversorgung, Kommunikationsschnittstellen (Ethernet, USB 3.0, RS485(Modbus)) und Digital IO zu realisieren.

Die Spannungsversorgung wurde für einen Eingangsspannungsbereich von 7 bis 36 V konzipiert. Eine Schaltung schützt die nachfolgende Elektronik vor Überspan-

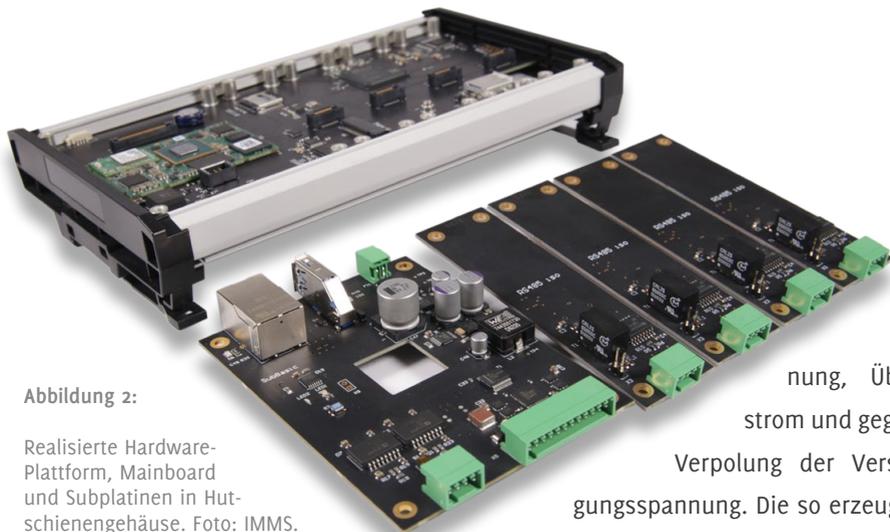


Abbildung 2:

Realisierte Hardware-Plattform, Mainboard und Subplatinen in Hut-schienegehäuse. Foto: IMMS.

nung, Überstrom und gegen Verpolung der Versorgungsspannung. Die so erzeugte 5V-Systemspannung wird dann dem Mainboard über einen Steckverbinder zugeführt. Als Kommunikationsschnittstellen wurden die Ethernet- und USB-3.0-Signale des System-on-Modul auf entsprechende Steckverbinder geführt. Weiterhin wurden zwei galvanisch getrennte RS485-Transceiver integriert. Somit kann eine Modbus-Kommunikation realisiert werden.

Es wurden 4 Anschlüsse für Digital-Input-Output-Signale realisiert. Diese sind galvanisch getrennt ausgeführt und ermöglichen eine Integration in bestehende Anlagen.

### Sub-Kommunikationsmodule

Als erste Kommunikationsmodule wurden eine RS485- und eine LVDS-Baugruppe entworfen, mit der alle im Projekt entwickelten und verwendeten Sensoren an die Plattform angeschlossen werden können. Um die Störsicherheit zu erhöhen, sind die Kommunikation und Spannungsversorgung der Sensoren galvanisch getrennt ausgeführt.

### FPGA

Mit dem FPGA werden die Schnittstellen zu den Sensoren realisiert, die Sensordaten per FFT und Pegelberechnung vorverarbeitet und die Daten zur CPU gepuffert und weitergeleitet. Die FPGA-Firmware kann je nach Applikation und verwendeten Modulen angepasst werden.

FPGA und CPU kommunizieren über eine PCIe-Verbindung. Die Daten werden im FPGA in einen Zwischenspeicher geschrieben und dann mittels Direct Memory Ac-

cess (DMA) in den Speicher der CPU übertragen. Es wurden mehrere verfügbare PCIe IP Cores evaluiert und das XDMA-Subsystem für PCIe implementiert.

## Sensorik

Durch das Konzept lassen sich eine Reihe von Sensortypen anschließen, die sowohl separat als auch parallel (z. B. für Echtzeit-Korrelationen) oder in Richtung Datenfusion eingesetzt werden können. Ideal für das Konzept sind digitale Sensoren.

## Plattform-Software

### Board Support Package (BSP)

Auf Basis des für das SoM-Modul Phycore iMX8M vorhandenen Board Support Packages wurde eine entsprechend angepasste Version erzeugt, die alle für die Sensorplattform benötigten Softwarekomponenten enthält. Zum Erstellen des BSPs kommt der Yocto-Distributions-Builder zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Framework, welches es erlaubt, äußert flexibel (Linux)-Distributionen aus dem Sourcecode aller enthaltenen Komponenten zu erstellen. Die hierfür benötigten Informationen im Yocto-Framework sind hierbei in Schichten (Layern) organisiert, die eine vom allgemeinen zum speziellen Fall immer feiner werdende Anpassung der erstellten Distribution an die notwendigen Anforderungen erlaubt. Demzufolge wurde den vorhandenen Schichten ein sUSE-Layer hinzugefügt. Dieser enthält die SoM-Konfiguration, Voreinstellungen für verschiedene Softwarepakete, Build-Anweisungen für noch nicht in den anderen Layern enthaltene Software usw.

Zusätzlich wurde über einen weiteren Yocto-Layer die Unterstützung für das RAUC-Projekt (Robust Auto-Update Controller) hinzugefügt. Mit Hilfe des RAUC-Projektes können Systemupdates sehr flexibel, robust und manipulationssicher durchgeführt werden. Für die Sensorplattform wurde RAUC so konfiguriert, dass über redundante Bootloader- und Rootfs-Partitionen ein vollständiges Systemupdate zur Laufzeit durchgeführt werden kann. Dieses ist zudem über digitale Signaturen abgesichert. Weiterhin ist es möglich, auch das initiale Aufspielen der Systemsoftware per RAUC-Update-Mechanismus durchzuführen. Darüber hinaus werden dank der Integration in den Yocto-Buildprozess RAUC-Update-Dateien automatisch erzeugt.

## Treiber

Zum Datenaustausch zwischen CPU und FPGA über PCIe sind verschiedene Treiber notwendig, welche die unterschiedlichen Ebenen der Schnittstellenkommunikation realisieren. Das ist zum einen ein bereits im Linux-Kernel vorhandener Treiber für den im SoC verwendeten PCI-Hostcontroller, zum anderen ein Treiber, welcher den Datenaustausch mit DMA sowie dessen Synchronisation regelt. Hierfür wird passend zum FPGA-PCIe-Core ein offizieller Treiber vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Verschiedene Versuche und Recherchen haben allerdings gezeigt, dass dieser insbesondere auf anderen Architekturen als i686 keinen zuverlässigen Datenaustausch erlaubt. Daher hat das IMMS ein Community-Projekt, das einen daraus abgeleiteten Treiber zur Verfügung stellt, entsprechend modifiziert und in das BSP integriert. Zudem wurden Testprogramme erstellt, die es erlauben, Daten aufzuzeichnen, die der FPGA über die PCIe-Schnittstelle liefert.

## Ausblick

Die Edge-Plattform wurde primär entwickelt, um die Energieeffizienz in Druckluftsystemen zu optimieren. Hier kann mit der Sensorplattform als Nachrüstlösung die Druckluft an Anlagen- und Maschinenteilen permanent überwacht, die Energieeffizienz verbessert und damit zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beigetragen werden. Durch den modularen Ansatz der Plattform kann diese aber auch einfach in anderen Anwendungsszenarien, wie z.B. zur vorausschauenden Wartung (Predictive Maintenance) eingesetzt werden.

Im nächsten Schritt wird das System in Anlagen integriert und evaluiert sowie der Einsatz der Plattform in weiteren Anwendungsfeldern demonstriert. Das Produkt wird 2022 von der SONOTEC GmbH in den Markt gebracht.

**Kontakt:** Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, [tino.hutschenreuther@imms.de](mailto:tino.hutschenreuther@imms.de)

Gefördert durch:

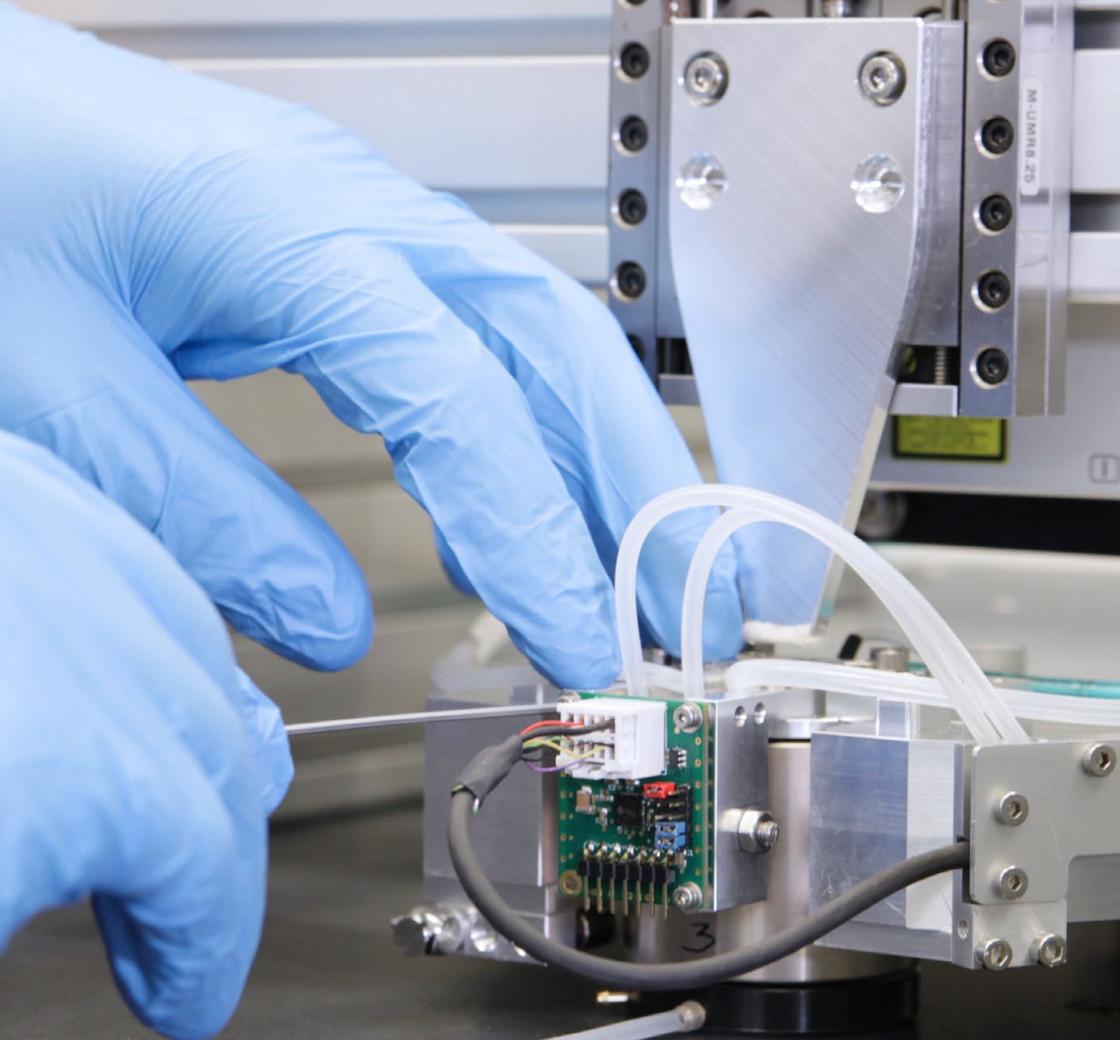


aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das Projekt sUSE wurde unter dem Kennzeichen ZF-4085709P08 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

FORSCHUNGSFELD

# MAGNETISCHE 6D-DIREKTANTRIEBE MIT NANOMETER-PRÄZISION



Gefördert durch

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

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. 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, forschen wir an wissenschaftlichen Grundlagen und technischen Lösungen zur Realisierung von Nanopositioniersystemen für große Bewegungsbereiche. Mit unseren hochdynamischen Mehrkoordinaten-Direktantriebssystemen können Objekte in Arbeitsbereichen von mehreren hundert Millimetern in kürzester Zeit mit Nanometer-Präzision positioniert werden. Unsere Lösungen eignen sich für den Einsatz im Vakuum, in Reinräumen und an Orten mit besonderen Anforderungen hinsichtlich thermischer Isolation und Entkopplung von Vibrationen.

## Highlights 2020 im Forschungsfeld

# Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

### IMMS-Doktorand verteidigt Promotion im DFG-Graduiertenkolleg NanoFab\*

Stephan Gorges, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS und Mitglied in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ (NanoFab) hat am 18. Juni 2020 seine Dissertation “A Lifting and Actuating Unit for a Planar Nanoprecision Drive System” erfolgreich an der Technischen Universität Ilmenau verteidigt.

### Vertikalantrieb für die 3D-Nanofertigung

„Viele technische Systeme werden immer mehr miniaturisiert. Die Produkte selbst sind noch einige Millimeter bis Zentimeter groß. Oberflächen und Funktionselemen-



Stephan Gorges am 18.06.2020 bei der Verteidigung seiner Promotion zu einem Vertikaltrieb für die 3D-Nanofertigung, die er im Graduiertenkolleg 2182 (NanoFab) bearbeitet hat.

Foto: IMMS.

te müssen aber im Produktionsablauf nanometergenau strukturiert und positioniert werden. Dazu braucht es immer genauere Präzisionsmaschinen,“ erläuterte Stephan Gorges. Zwar könne man bereits in der Fertigung unter 10 Nanometer strukturieren – allerdings nur relativ langsam, begrenzt genau, ohne Fehlerkorrekturen im laufenden Prozess und vor allem nur in kleinen Bearbeitungsbereichen von einigen 100 Quadratmikrometern. Doch nicht nur größere Arbeitsbereiche in einer Ebene sind laut Gorges für eine perspektivische Industrietauglichkeit wesentlich: „Vertikale Bewegungen sind eine besondere Herausforderung. Denn die Schwerkraft des bewegten Objektes muss permanent kompensiert werden.“ In seiner Dissertation hat er eine vertikale Hub- und Antriebseinheit erforscht und entwickelt, die einen elektromagnetischen Präzisionsantrieb sowie eine pneumatische Gewichtskraftkompensation beinhaltet, sich in Gesamtsysteme integrieren lässt und anwendungsrelevante Kriterien berücksichtigt.

### Graduiertenkolleg zur 3D-Nanofabrikation in makroskopischen Arbeitsbereichen

Um im großen Maßstab nanometergenau und mit Fehlerkorrekturen Freiformen in 3D fertigen zu können, forschen seit April 2017 insgesamt 13 Doktoranden im NanoFab-Graduiertenkolleg und werden von Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern der TU Ilmenau und des IMMS betreut. Diese arbeiten an verschiedenen methoden- und objektorientierten Themenfeldern auf Ebenen zu Theorie und Metrologie, zu Tools und Parallelisierung sowie zu Kinematik und Steuerungen u.a. zu den Themen Lithographie, optische Mikrosysteme, Echtzeitsteuerung und mehrdimensionale Kraftpositionskontrolle.

„Der vorgestellte parallelkinematische Ansatz zeichnet sich nicht nur durch seine gute Integrierbarkeit, geringste negative Einflüsse auf die umliegenden Systeme und die Verteilung der Last auf mehrere Stellglieder aus,“ so die Einschätzung von Prof. Eberhard Manske, Leiter des Fachgebiets für Fertigungs- und Präzisionsmesstechnik an der TU Ilmenau sowie Leiter des Graduiertenkollegs. Vertikaltriebe seien zudem ein weiterer Meilenstein in der fast 25-jährigen Zusammenarbeit mit dem IMMS, das durch seine Expertise auf dem Gebiet der Präzisionsantriebssysteme einen äußerst wertvollen Beitrag zu den Forschungsarbeiten der TU leiste. „Das IMMS ist ein wichtiger Partner der TU, um die Nanopositionier- und Nanomesstechnik in industrielle Anwendungen zu transferieren,“ erklärt Manske. So sind etwa planare Präzisionsantriebe des IMMS in Anlagen eingeflossen, mit denen weltweit in der Halbleiterfertigung dünne 300mm-Halbleiter-Wafer hochpräzise per Laser-Dicing zu Mikroelektronik-Chips vereinzelt werden.

„Die Anforderungen aus der Industrie gehen hin zu immer präziseren Systemen. Da reden wir schon von Pikometern. Gleichzeitig sollen aber immer größere Hub-Bewegungen in der Fertigung ausgeführt werden. Um das unter einen Hut zu bekommen, brauchen wir die Forschungsk Kooperation mit der TU,“ erläuterte Dr. Christoph Schäffel, Themenbereichsleiter für Mechatronik am IMMS, der neben Prof. René Theska und Prof. Bernd Hans Schmidt Gutachter für die Promotion war und der Stephan Gorges am IMMS betreut hatte. „Hochpräzisionsantriebe für neue Anwendungen sind am IMMS ein strategisch wichtiges Thema. Da sind wir permanent dran,“ so Schäffel weiter. Gearbeitet werde hierfür z.B. an streufeldarmen Planarmotorstrukturen, der Skalierung der Fahrbereiche und neuartigen Lösungsansätzen zur Steuerung und Regelung solcher Antriebe.

### Bereit zum Start

Der entwickelte Vertikaltrieb wurde 2020 im Labor des IMMS aufgebaut. Für Stephan Gorges ging es nahtlos am IMMS weiter. Er beteiligt sich im 2020 gestarteten Projekt K4PNP+Z\* daran, die Hub- und Antriebseinheit auf einen größeren Positionierweg zu skalieren und an eine neue Applikation anzupassen. Mit Kollegen zu arbeiten, die laut Deutscher Forschungsgemeinschaft den Weltstand auf dem Gebiet der Nanopositionier- und Nanomesstechnik mitbestimmen, sei ein großer Ansporn

- > Integrierte *Sensorsysteme*
- > Intelligente ver- *netzte Mess- u. Testsysteme*
- > Mag6D-nm- *Direktantriebe*
- > Inhalt
- \* Förderung

*Mehr zu NanoFab auf [www.imms.de](http://www.imms.de).*

für ihn. „Es ist toll, dass wir die Technik so präzise und in dem Fall ja auch buchstäblich zum Fliegen kriegen. Dafür legen sich hier alle ins Zeug und begegnen sich gleichzeitig auf Augenhöhe. Man hilft sich gegenseitig und lernt viel voneinander – das möchte ich jetzt gerne weitergeben.“

## Projektstart von K4PNP+Z\* – nanometergenaue Antriebe mit 25 mm Vertikalhub

Das IMMS entwickelt im 2020 gestarteten Projekt K4PNP+Z Aktoren für Direktantriebe, um Objekte in Ebenen bis 200 mm Durchmesser mit 25 mm Vertikalhub nanometergenau zu positionieren, wie z.B. Wafer und Belichtungsmasken in der Halbleiterfertigung. Damit Objekte nicht nur wie bis dato möglich über einer Fläche von wenigen Quadratmillimetern nanometergenau angehoben werden können, hatte das IMMS bereits mit Partnern einen 6D-Direktantrieb entwickelt. Dieser kann Objekte frei im Raum in einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm nanometergenau in einem Verfahrbereich von 100 mm Durchmesser in der Ebene bewegen.

## Größere Hub-Bewegungen limitieren bislang Präzision und Bewegungsdynamik

Die Anforderungen aus der Industrie betreffen nicht nur waagerechte Bewegungen (x, y), um Oberflächen und Strukturen von millimeter- oder zentimetergroßen Produkten nanometergenau strukturieren und positionieren zu können. Es sollen gleichzeitig immer größere Hub-Bewegungen ausgeführt werden. Der 6D-Direktantrieb arbeitet mit elektromagnetischen Vertikaltrieben (z). Je höher Objekte damit

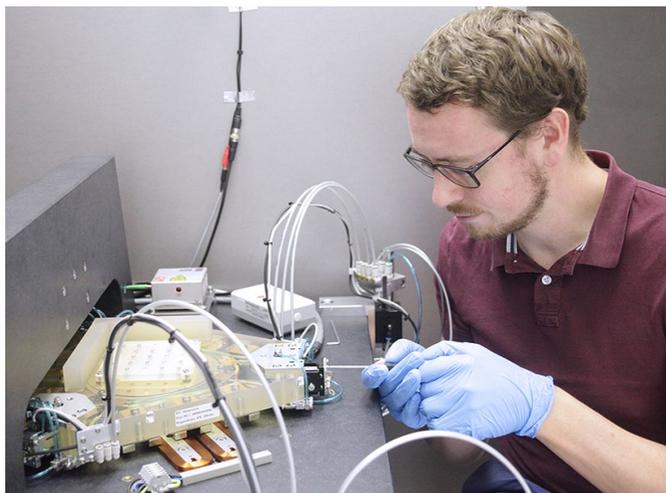
> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

K4PNP+Z auf  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Das IMMS entwickelt Aktoren, um Objekte in Ebenen bis 200 mm Durchmesser mit 25 mm Vertikalhub nanometergenau zu positionieren. Foto: IMMS.

angehoben werden, desto größer wird der Abstand zwischen den gestellfesten x-y-Antriebsspulen und den Magnetkreisen im Läufer, die für die waagerechten Präzisionsbewegungen benötigt werden. Bereits ein geringes Anheben reduziert die Effizienz des x-y-Antriebssystems drastisch, vervielfacht Verlustleistungen und limitiert dadurch wegen thermischer Effekte die erzielbare Bewegungsdynamik.

### Neue vertikale Nachführelemente werden Hub-Distanz vergrößern

Um diese Hürden zu überwinden, erarbeitet das IMMS im Projekt K4PNP+Z Konzepte für neue Komponenten, mit denen die bislang gestellfesten x-y-Antriebsspulen nun für einen größeren Hub vertikal nachgeführt und somit nah an den Magneten im Läufer gehalten werden sollen. Diese vertikalen Nachführelemente werden aufgebaut, in das Gesamtsystem integriert und experimentell untersucht. Ebenso werden die vertikalen Antriebseinheiten für die höheren Stellwege und für höhere Traglasten entworfen und erprobt. Perspektivisch sollen so z-Hübe bis zu 25 mm bei lateralen Fahrbereichen (x-y) über Durchmesser von 200 mm realisiert werden.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

K4PNP+Z auf

[www.imms.de](http://www.imms.de)



## Nanometergenaue Hubmodule für die Präzisionsantriebstechnik

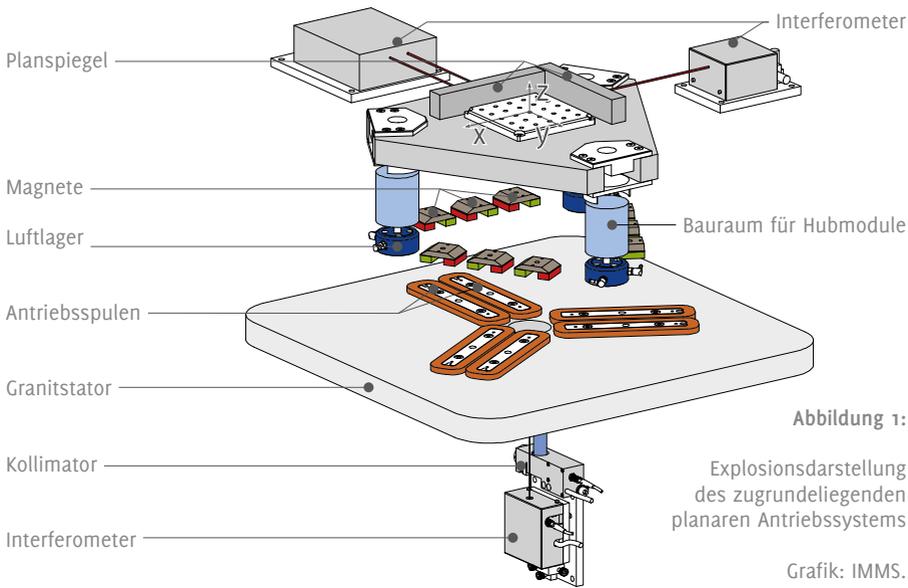
Die am IMMS entwickelten Hubmodule arbeiten in einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm bis auf 0,29 nm (Standardabweichung) genau und sind mit einem durchschnittlichen Wärmeeintrag von 54 nW für den Einsatz in der Fertigung und Messtechnik optimiert. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

Positioniersysteme in der Halbleiterfertigung und der hochgenauen Messtechnik müssen immer präziser bewegen, um die voranschreitende Miniaturisierung zu bewältigen. Für neue Fertigungsverfahren werden immer größere vertikale Stellbereiche gefordert. Dafür hat das IMMS bereits einen 6D-Direktantrieb entwickelt, der Objekte in einem Verfahrbereich von  $\varnothing 100$  mm in einem Hebe- bzw. Senkbereich von 10 mm frei im Raum nanometergenau und aktiv geregelt positioniert. Die Hubmodule wurden nun weiterentwickelt, um das System dank des 75% geringeren Wärmeeintrags für den Einsatz in der Fertigung und Messtechnik zu optimieren. Der parallel erarbeitete Design-Flow für große Bewegungsbereiche ist die Basis für noch effizientere anwendungsspezifische Entwicklungen.

### Ausgangspunkt der Neuentwicklung

Gemeinsam mit seinen Partnern entwickelt und realisiert das IMMS Präzisionsantriebe für die nanometergenaue Positionierung in Verfahrbereichen von 100 mm und mehr. Durch die Integration eigens entwickelter Hubmodule wird dies nicht nur für



eine planare Positionierung in der xy-Ebene sondern zusätzlich auch für die Bewegung in z-Richtung, beispielsweise über 10 mm möglich.<sup>1</sup>

Ein neu erarbeiteter Entwurfsprozess bildet die Grundlage für die passgenaue und optimierte Weiterentwicklung dieser hochintegrierten Hubmodule, womit auch für zukünftige Hub-Last-Kombinationen ein effizienter und schneller Entwurf möglich ist. Für den Neuentwurf der Hubmodule wurde zunächst das zugrundeliegende planare Antriebssystem (Abbildung 1) ganzheitlich betrachtet. Es basiert auf einem monolithischen Zentralkörper (Läufer), welcher auf drei Luftlagern reibungsfrei in der xy-Ebene bewegt werden kann.

Mit Hilfe von 4 Laserinterferometern, einem Autokollimator und in den Läufer integrierter Planspiegel ist es möglich, dessen Lage und Orientierung im Raum zu bestimmen. Gestellfeste Spulen erzeugen Kräfte auf NdFeB-Magneten auf der Unterseite des Läufers, wodurch dieser präzise in x- und y-Richtung bewegt werden kann. Zwischen den Luftlagern an den Ecken und dem Zentralkörper sollen nun zusätzliche Führungen und Aktoren eingebracht werden, um einen z-Hub des Läufers um 10 mm zu ermöglichen und die verbleibenden Fehler in den Kippwinkeln  $\varphi_x$  und  $\varphi_y$  eliminieren zu können. Mit dieser Anordnung muss der Läufer nur minimal modifiziert werden und es ist möglich, 3 identische Module einzusetzen, auf welche sich die zu tragende Masse von ca. 12 kg gleichmäßig verteilt.

<sup>1</sup> <https://www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hochpraezise-positionieren/>

Das Lastenheft für ein Präzisionssystem ist meist sehr ausführlich, da Wechselwirkungen, die im klassischen Maschinenbau vernachlässigbar sind, im Präzisionsbereich einen erheblichen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit haben können. Um alle Anforderungen angemessen zu erfüllen, ist ein geeigneter konstruktiver Entwicklungsprozess unerlässlich. Dazu werden in diesem Fall die Konstruktionsprinzipien aus der Präzisionstechnik (Funktionstrennung) mit denen aus der Mechatronik (Funktionsintegration) in Einklang gebracht. Das betrifft insbesondere die zwei funktionalen Kernkomponenten: den Vertikaltrieb und die Vertikalführung.

Das zu entwerfende Hubmodul soll in der Lage sein, 4 kg über 10 mm nanometergenau und stick-slip-frei zu heben, wofür ein Bauraum von lediglich ca.  $\varnothing$  50 mm x 60 mm zur Verfügung steht. Besonderes Augenmerk liegt auf der entstehenden Wärme im Betrieb: Diese soll minimal sein, da jede Erwärmung thermische Ausdehnung und damit Präzisionsverlust zur Folge hat. Zusätzlich sollen Antrieb und Führung so gestaltet sein, dass sie sich gut für größere Lasten und Bewegungsbereiche skalieren lassen. Eine Analyse der in Frage kommenden Antriebsprinzipien (pneumatisch, piezoelektrisch, elektromagnetisch) hat gezeigt, dass keines allein in der Lage ist, alle Anforderungen hinreichend zu erfüllen.

Eine sinnvolle Lösung bietet die Abwandlung des Grobtrieb-Feintrieb-Prinzips: Ein erster Aktor kompensiert maßgeblich die Gewichtskraft, wodurch ein zweiter Aktor nur noch sehr geringe Kräfte benötigt, um die Präzisionspositionierung zu ermöglichen. Als Gewichtskraftkompensation eignet sich besonders ein Pneumatikzylinder, da dieser über eine hohe Kraftdichte verfügt, lokal keine Wärme ins System einträgt und über den Druck an verschiedene Lasten anpassbar ist. Die verbleibenden niedrigen, aber hochdynamischen Präzisionskräfte sind dann durch einen optimal gestalteten elektromagnetischen Aktor realisierbar. Außerdem können beide Aktorprinzipien sehr gut an größere Hübe und Lasten angepasst werden.

Als reibungsfrei arbeitende Führung eignet sich insbesondere eine aerostatische Buchsenführung. Diese kann zusätzlich sehr gut in den Pneumatikzylinder integriert werden, ohne funktionale Abstriche zu machen.

Zentraler Entwicklungsschritt der Auslegung und Dimensionierung ist die Modellierung der Aktoren. Detaillierte pneumatische Modelle erlauben es, Rückschlüsse auf das statische und dynamische Verhalten sowie den Luftverbrauch des Pneumatikzylinders zu ziehen. So konnte die Kolben-Zylinder-Kombination mit einer reibungsfreien Dichtung ideal an die Anforderungen und die vorhandene Infrastruktur angepasst werden.

Der elektromagnetische Aktor hat einen deutlich höheren Design-Freiheitsgrad und ist damit der Schlüssel für darauf aufbauende anwendungsspezifische Entwürfe: Verschiedenste Magnetanordnungen können mit unterschiedlich gestalteten Eisenrückschlüssen und Spulen kombiniert werden. Um den idealen Antrieb für die gegebenen Randbedingungen zu finden, wurden 13 Topologien anhand eines universellen Performance-Parameters detailliert untersucht. Für Präzisionsantriebe eignet sich vor allem das Kraft-Leistungsverhältnis, da so die Antriebsstrukturen unabhängig von der verwendeten Endstufe und der erwarteten Bahnkurve bewertet werden können.

Die elektromagnetischen Feldsimulationen sind in eine numerische Optimierung eingebettet, wodurch für jede Topologie die ideale Geometrie gefunden werden kann. Der hier ermittelte Magnetantrieb verfügt über ein Kraft-Leistungsverhältnis von über  $60 \text{ N}^2/\text{W}$  in einem Bauraum von ca.  $\varnothing 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ . In Abbildung 2 sind der entsprechende Optimierungslauf (links) und die Magnetfeldverteilung (rechts) zu sehen.

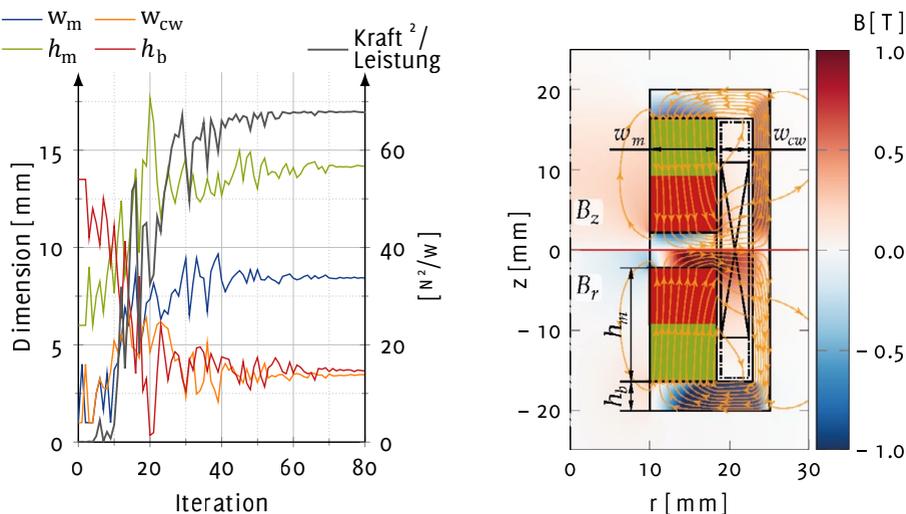


Abbildung 2: links: Optimierung der Aktorgeometrie für die final gewählte Antriebstopologie, per automatisiertem Optimierungsalgorithmus werden die Abmessungen von Magnet und Spule ( $w_m$ ,  $w_{cw}$ ,  $h_m$ ,  $h_b$ ) festgelegt; rechts: 2D-Querschnitt der gefundenen optimalen Antriebsgeometrie und FEM-basierte Analyse der zugehörigen Flussdichteverteilung. Grafik: IMMS.

Die endgültige Geometrie von Magnet, Spule und Rückschluss ergibt einen elektrodynamischen Aktuator mit maximalem Kraft-Leistungs-Verhältnis und einer homogen verteilten Flussdichte über den Hub der Spule, siehe Abbildung 2 rechts. Somit ist die Krafterzeugungscharakteristik des Antriebs über den Hub nahezu konstant. Aus einer anschließenden Parameterstudie kann dann die Spule ausgewählt werden, welche am besten zur Leistungsendstufe passt. Insgesamt konnte die entstehende Wärme gegenüber dem vorhergehenden Hubmodul um ca. 75% reduziert werden. Die geringe verbleibende Verlustleistung kann bei Bedarf zusätzlich durch ein integriertes Temperiersystem aus dem Messraum transportiert werden.

Neben dem konkreten Entwurfsergebnis steht nun zusätzlich eine erprobte Methodik zur Verfügung, um zukünftig auch für andere Hub/Last-Kombinationen und zugehörige Bauraumvorgaben schnell und effizient zu einem optimierten Entwurf des Hubmoduls zu kommen.

### Ergebnisse ebnen den Weg für industrielle Anwendung

Abbildung 3 zeigt das entwickelte Hubmodul. Der Magnetantrieb schließt dabei die meisten Komponenten in seinem Inneren ein, wodurch alle Antriebskräfte exakt auf der Führungsachse liegen und somit keine parasitären Kipplasten entstehen. Die Störkräfte durch geschleppte Leitungen konnten maßgeblich reduziert werden, indem die Komponenten, welche eine Zuleitung benötigen, in die läuferfeste Baugruppe integriert wurden. Die ersten Messergebnisse aus einem einachsigen Messstand in Abbildung 4 bestätigen den Entwurf. Im ersten Schritt wurde das Hubmodul druck- und stromlos auf dem massiven Granitstator abgestellt.

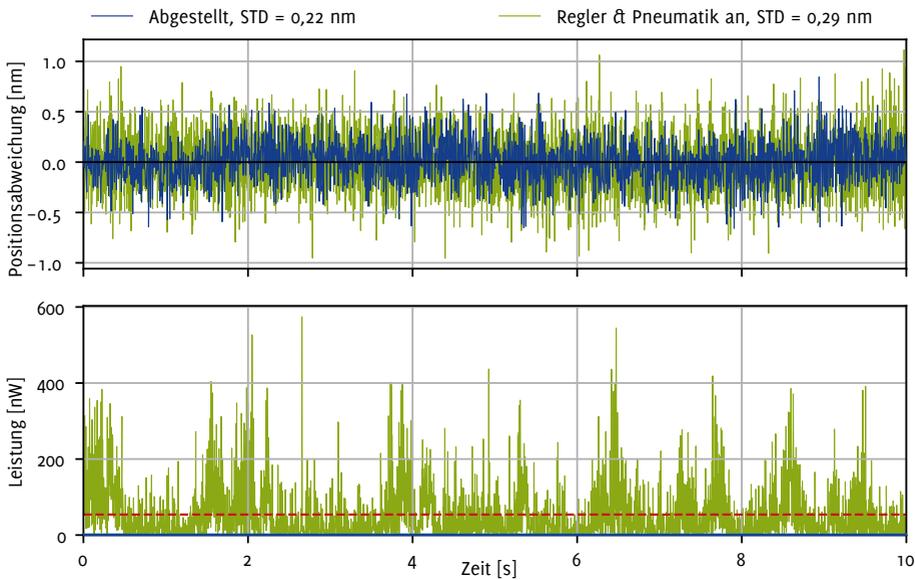
Das Positionsrauschen weist dabei eine Standardabweichung von 0,22 nm auf, was somit das theoretische Limit darstellt. Im Closed-loop-Betrieb (Luftführung, pneumatische Gewichtskraftkompensation, Magnetantrieb und Regler aktiv) wurde



Abbildung 3:

Neuentwickeltes  
Hubmodul.

Foto: IMMS.



**Abbildung 4:** Oben: Blau: Positionsmessung, während das Modul druck- und stromlos auf der Unterlage ruht, Grün: Positionsabweichung vom Sollwert im closed-loop Betrieb (mit aktiver pneumatischer Gewichtskraftkompensation und Positionsregelung durch den Magnetantrieb); Unten: Grün: zugehörige abfallende elektrische Leistung im Magnetantrieb; Rot: Durchschnittswert von 54nW der zum Positionierprozess benötigten elektrischen Leistung. Grafik: IMMS.

ein nur minimal größerer Fehler von 0,29 nm bei einer elektrischen Leistungsabgabe von durchschnittlichen nur etwa 54 nW erreicht.

Die neu entwickelten Hubmodule konnten beweisen, dass mehrere Kilogramm in einem makroskopischen Bewegungsbereich Nanometer-genau positioniert werden können, während nur eine Verlustleistung im niedrigen Nanowattbereich in den Messraum emittiert wird. Sie sind somit ein wichtiger Meilenstein für die industrielle Verwendung in 6D-Mess- und Nanofabrikationssystemen, die Objekte auf komplexen räumlichen Wegstrecken nano- und subnanometergenau positionieren sollen. Darüber hinaus bewährt sich der erarbeitete Konstruktionsleitfaden aktuell bei dem Entwurf weiterer Module für einen Hub von 25 mm und einer Last von 13 kg.

**Kontakt:** Dr.-Ing. Stephan Gorges, [stephan.gorges@imms.de](mailto:stephan.gorges@imms.de)

Gefördert durch

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Graduiertenkollegs „Tip and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas“ (GRK 2182), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), durchgeführt.

Mehr zu

NanoFab auf

[www.imms.de](http://www.imms.de).

Der Text basiert auf den Ergebnissen der Dissertation “A lifting and actuating unit for a planar nanoprecision drive system“ von Stephan Gorges ([https://www.db-thueringen.de/receive/dbt\\_mods\\_00047399](https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00047399)).

Jahresbericht

© IMMS 2020



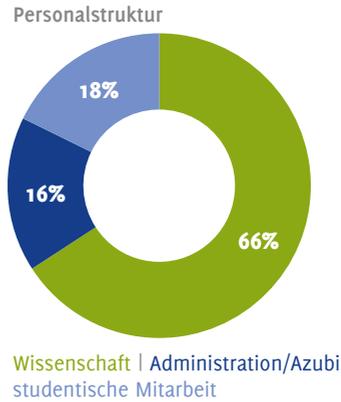
0.14  
f=200

# ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE

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

## Das IMMS in Zahlen

Zum Ende des Geschäftsjahres 2020 waren am IMMS 79 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** tätig.<sup>1</sup> Hiervon waren 52 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 14 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 84 % aller Beschäftigten. 12 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie eine Auszubildende unterstützten sie in der Administration.



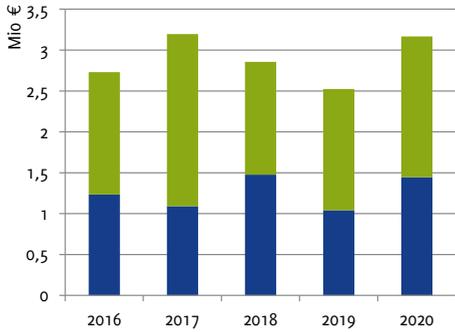
Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr 2020 am IMMS insgesamt 29 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 3 Bachelorarbeiten und 9 Masterarbeiten, und 8 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren für ihre Promotion an einer Universität eingeschrieben.

In 2020 konnten wir neue wissenschaftliche Nachwuchskräfte aus internationalem universitären sowie industriellen Umfeld für das IMMS begeistern. Die Gewinnung weiterer wissenschaftlicher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter steht dabei zunehmend unter der Herausforderung sinkender Absolventenzahlen in den für das Institut relevanten Fachgebieten sowie des zunehmenden Wettbewerbs um die besten Köpfe. Insgesamt waren in 2020 eine Vielzahl an Nationalitäten am IMMS vertreten, was den internationalen Austausch für die Forschung und Entwicklung am IMMS stärkt.

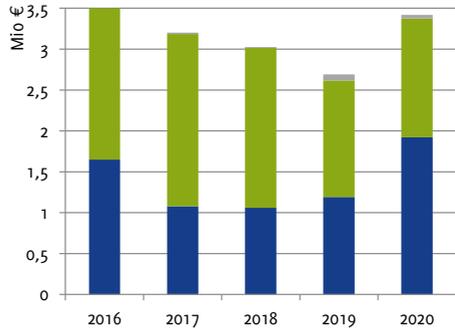
Die **Drittmittelträge** konnten in 2020 deutlich gesteigert werden, sodass im 5-Jahresvergleich nahezu an das hohe Niveau von 2017 angeknüpft werden konnte. Dies spiegelt sich insbesondere in der Entwicklung der Erträge aus Industrieprojekten wider, die über dem Vorjahresniveau lagen. Hier wirkte sich insbesondere der marktgetriebene hohe Bedarf unserer Partner an industrieller Auftragsforschung mit unseren Zukunftsthemen aus. Die Erträge aus öffentlich geförderter Forschung konnten gegenüber dem Vorjahresniveau gleichfalls gesteigert werden. Die Steigerung der öffentlich geförderten Drittmittelträge ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die vom IMMS bearbeiteten Forschungsthemen von hoher aktueller Relevanz sind. Die

<sup>1</sup> Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2020 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit vorherigen Berichten ist daher nur bedingt möglich.

Industrieprojekte / Förderprojekte



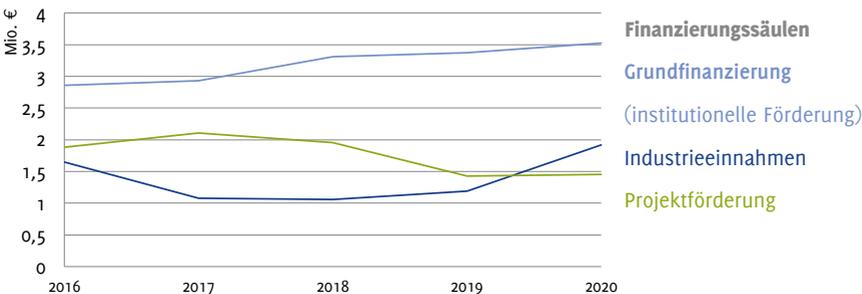
Industrieprojekte / Förderprojekte / Sonstige



- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

positive Entwicklung der Drittmittelträge zeigt sich auch bei den Einnahmen, die um insgesamt rd. 29 % über dem Vorjahreswert lagen. Sowohl die Einnahmen aus Industrieprojekten wie auch aus öffentlichen Förderprojekten konnten gesteigert werden.

Die **institutionelle Förderung** des Freistaats Thüringen dient der Finanzierung der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur und des wissenschaftlich-technischen Vorlaufs als Basis für die Innovationskraft des Institutes. In Kombination mit den Mitteln aus öffentlich geförderten Forschungsprojekten und den Umsätzen aus der industriellen Auftragsforschung ist die institutionelle Förderung weiterhin von großer Bedeutung für die Finanzierung der Forschungsaufgaben und damit für die Durchführbarkeit der angewandten Forschung des IMMS insgesamt. Sie ist die Grundlage der Finanzierung des Instituts. Insbesondere die Förderung der internen Forschungsgruppen ermöglicht die Bearbeitung von für die strategische Entwicklung wesentlichen Forschungsschwerpunkten, unabhängig von der Verfügbarkeit einer Finanzierung durch öffentliche Förderangebote.



Mehr zur Förderung auf [www.imms.de](http://www.imms.de).



- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

### Aufsichtsrat

- **Vorsitzender:** Herr <sup>1</sup>Robert FETTER, Referatsleiter Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau <sup>1</sup>Bianca KIZINA, Referentin Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- Herr Dr. Jens KOSCH, Fellow X-FAB Global Services GmbH
- Herr Andreas ROHWER, Referent Thüringer Finanzministerium
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe SATTLER, Präsident Technische Universität Ilmenau
- Herr Prof. Dr. rer. nat. Ingolf VOIGT, Stellvertretender Institutsleiter, Standortleitung Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Hermsdorf
- Frau Cathrin WILHELM, Geschäftsführerin, BINZ Ambulance- und Umwelttechnik GmbH

- **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, Geschäftsführer X-FAB Global Services GmbH und X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt
- Herr Dr. Ralph KLÄSGES, Head of 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

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

- Grundlagen der analogen Schaltungstechnik, Vorlesung & Übung
- Rechnergestützte Schaltungssimulation und deren Algorithmen (EDA), Vorlesung & Übung
- Modellierung und Simulation analoger Systeme, Vorlesung & Übung

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

- Theoretische Elektrotechnik I und II, Vorlesung
- Schaltungen der Quanteninformationsverarbeitung, Vorlesung
- Elektromagnetische Sensorik, Vorlesung
- Technische Elektrodynamik, Vorlesung
- Supraleitung in der Informationstechnik, Vorlesung
- Projektseminar ATET

## Veranstaltungen

### Workshop-Angebote/IMMS als Gastgeber/Veranstalter/Mitinitiator

- 21.01.2020 – **Industrieforum „Smarte Fertigung – Sensorik in der Produktion“**, *Organisation, Vortrag*, VACOM Vakuum Komponenten und Messtechnik GmbH, Großlöbichau
- 06.02.2020 – **Informationstag** Technikerklasse Berufsschule „Jakob-Preh“, *Organisation, Vortrag, Demonstratoren*, Veranstaltung am IMMS, Ilmenau
- 25.02.2020 – **User Group Meeting – Fachgruppe KI**, Veranstaltung am IMMS, Ilmenau
- 18.02.2020 – **edaBarCamp -- Number 5 is alive**, BarCamp zu elektronischer Design-Automation, *Organisation, Workshop, Vortrag*, IBM Deutschland Research & Development, Böblingen
- 16.09.2020 – **Cross-Cluster-Woche Thüringen** „Virtuell vernetzen, regional kooperieren“, Veranstaltungsreihe der Thüringer Netzwerke, *Organisation, Vortrag, Videos, Live-Demos*, online
- 30.09.2020 – **Mittelstandsvereinigung pro Südthüringen e.V.**, *Organisation, Vortrag, Live-Demo*, Veranstaltung am IMMS Ilmenau
- 13.11.2020 – **Stammtisch Kollaboration**, *Organisation, Vortrag*, online

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

Aktuelle

Termine:

[www.imms.de](http://www.imms.de)

Jahresbericht

## Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

16.02.2020 – **TuZ 2020**, 32. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, Ludwigsburg bei Stuttgart

19.06.2020 – **Bundesweiter Digitaltag 2020**, *Vorträge*, online

20.07.2020 – **IEEE SSD 2020 (SCI)**, International Conference on Sensors, Circuits and Instrumentation Systems 2020 at the 17th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices 2020, *Vortrag*, online

28.09.2020 – **Analog 2020**, 17. ITG/GMM-Fachtagung Analog 2020, Analoge Schaltungen: Schlüsselsysteme für Automotive, IoT und zukünftige drahtlose Technologien, 2 *Vorträge*, online

02.10.2020 – **TCoNS 2020**, Workshop on Tools and Concepts for Communication and Networked Systems, *Vortrag*, Karlsruhe

11.10.2020 – **ISCAS 2020**, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, *Vortrag*, online

13.10.2020 – **CadenceLIVE Europe 2020**, Konferenz zu elektronischen Design-Tools und Methoden, *Vortrag*, online

24.11.2020 – **InnoCON Thüringen 2020**, *Virtueller Messestand*, *Vortrag*, online

30.11.2020 – **Digital-Gipfel 2020**, 2 *Demonstratoren*, *Videos*, *Live-Chat*, online

07.12.2020 – **Thüringer KI-Forum**, *Panel-Diskussion*, online

08.12.2020 – **SMEKUL-Werkstatt** zur Digitalisierung im Obst- und Weinbau, *Vortrag*, online

## Videoproduktionen für Demonstratoren / Online-Veranstaltungen

- *Nachrüstung einer Bohrmaschine mit Sensorik, Netzwerkfähigkeit und lokaler KI*
- *Energiemanagement von Maschinen und Anlagen*
- *Nachrüstbare Lagerbestandsüberwachung*
- *Energieschonender Spritzguss durch intelligente Computersteuerung*
- *Das fernüberwachte Schwimmbad – Wasserdesinfektion mit UV-Licht*
- *25 Jahre IMMS*

Begutachtete Veröffentlichungen

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- \* Förderung

**Net-QoS – Adaptierung der Anwendungs-Quality-of-Service-Parameter an die Netzwerk-Quality-of-Service-Parameter**, Björn BARIG<sup>1</sup>. Thomas ELSTE<sup>1</sup>. Tino HUTSCHENREUTHER<sup>1</sup>. Rolf PEUKERT<sup>1</sup>. Sebastian UZIEL<sup>1</sup>. *Forschungsbericht, Nr. 14/2020, Studie der Deutschen Gesellschaft für die Anwendung der Mikroelektronik e.V. (DFAM)*. [www.dfam.de/service-studien-handbuecher.php](http://www.dfam.de/service-studien-handbuecher.php). <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

**Light-Controlled Photometer with Optoelectronic CMOS Biochip for Quantitative PSA Detection**, Alexander HOFMANN<sup>1</sup>. Michael MEISTER<sup>1</sup>. Alexander ROLAPP<sup>1</sup>. Peggy REICH<sup>1</sup>. Friedrich SCHOLZ<sup>2</sup>. Eric SCHÄFER<sup>1</sup>. *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sevilla, 10 – 21 October 2020, pp. 1 – 5, DOI: doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9180796*. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany.

**NISP: An NFC to I<sup>2</sup>C Sensing Platform with Supply Interference Reduction for Flexible RFID Sensor Applications**, Jun TAN<sup>1</sup>. Muralikrishna SATHYAMURTHY<sup>1</sup>. Alexander ROLAPP<sup>1</sup>. Jonathan GAMEZ<sup>1</sup>. Moataz ELKHARASHI<sup>1</sup>. Benjamin SAFT<sup>1</sup>. Sylvio JÄGER<sup>2</sup>. Ralf SOMMER<sup>1</sup>. J. TAN et al. in *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*. DOI: doi.org/10.1109/JRFID.2020.2967862. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>Micro-Sensys GmbH, Erfurt, Germany.

**Tip- and laser-based nanofabrication up to 100 nm with sub-nanometre precision**, Ingo ORTLEPP<sup>1</sup>. Michael KÜHNEL<sup>1</sup>. Martin HOFMANN<sup>1</sup>. Laura WEIDENFELLER<sup>1</sup>. Johannes KIRCHNER<sup>1</sup>. Shraddha SUPRETI<sup>1</sup>. Rostyslav MASTYLO<sup>1</sup>. Mathias HOLZ<sup>1</sup>. Thomas MICHELS<sup>1</sup>. Roland FÜßL<sup>1</sup>. Ivo W. RANGELOW<sup>1</sup>. Thomas FRÖHLICH<sup>1</sup>. Denis DONTSOV<sup>2</sup>. Christoph SCHÄFFEL<sup>3</sup>. Eberhard MANSKE<sup>1</sup>. *Proc. SPIE 11324, Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS and MOEMS 2020, 113240A (23 March 2020)*, DOI: doi.org/10.1117/12.2551044. <sup>1</sup>Technische Universität Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>SIOS Meßtechnik GmbH, Germany. <sup>3</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alle Publikationen: [www.imms.de](http://www.imms.de)

**Herausforderungen beim Einsatz von Sensorik und Monitoringlösungen im Obst- und Weinbau**, Silvia KRUG<sup>1</sup>. Rikard GRAß<sup>2</sup>. *SMEKUL-Werkstatt, Workshop “Innovative Ideen und Lösungen für den Obst- und Weinbau”, 8. Dezember 2020, Meißen, hybrid*. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department Monitoring- und Erkundungstechnologien.

**„Kommunikation – verständlich, oder? – Werkzeuge zur Gestaltung der Kommunikation in KMU mit modernen Kollaborationstools“**, Franziska BUCHWALD<sup>1</sup>. *Stammtisch Kollaboration „Business Chats – Anwendungen und Stolpersteine“, 13. November 2020, online*. <sup>1</sup>IMMS 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 GRABMANN<sup>1</sup>. Frank FELDHÖFF<sup>2</sup>. Georg GLÄSER<sup>1</sup>. *CadenceLIVE 2020 Europe, 13 – 14 October 2020*. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany.

**Evaluation of Interoperability Between Various Implementations of the Thread Protocol Stack**, Sebastian MIETHE<sup>1</sup>. Silvia KRUG<sup>1</sup>. *Workshop on Tools and Concepts for Communication and Networked Systems (TCoNS), 2 October 2020, online*. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

**Ain't got time for this? Reducing manual evaluation effort with Machine Learning based Grouping of Analog Waveform Test Data**, Tom REINHOLD<sup>1</sup>. Marco SEELAND<sup>2</sup>. Martin GRABMANN<sup>1</sup>. Christian PAINTZ<sup>3</sup>. Patrick MÄDER<sup>2</sup>. Georg GLÄSER<sup>1</sup>. *Analog 2020, 17. ITG/GMM-Fachtagung, Analoge Schaltungen: Schlüsselsysteme für Automotive, IoT und zukünftige drahtlose Technologien, 28 – 30 September 2020, online*. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany. <sup>3</sup>Melexis GmbH, Erfurt, Germany.

---

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

Testsysteme

> Mag6D-nm-Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

---

Alle

Publikationen:

[www.imms.de](http://www.imms.de)

**Entwurf, Evaluierung und Optimierung von HF- und UHF-RFID-Sensorsystemen**, Björn BIESKE<sup>1</sup>. Tom REINHOLD<sup>1</sup>. Jun TAN<sup>1</sup>. *Analog 2020, 17. ITG/GMM-Fachtagung, Analoge Schaltungen: Schlüsselsysteme für Automotive, IoT und zukünftige drahtlose Technologien, 28 – 30 September 2020, online.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> Integrierte  
Sensorsysteme  
> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme  
> Mag6D-nm-  
Direktantriebe  
> Inhalt  
\* Förderung

**Entwicklungstrends der elektronischen Mess- und Gerätetechnik aus Thüringen: branchenübergreifende Innovationen vom Sensor bis zum System – die IMMS GmbH**, Frank SPILLER<sup>1</sup>. *Technologiekonferenz »elmug4future 2020«, Vortragsveranstaltung zur Cross-Cluster-Woche Thüringen, 23. September 2020, online.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

**Die Thüringer KI-Trainer stellen sich vor – Neue Unterstützungsmöglichkeiten bei der Einführung und Entwicklung von KI im Mittelstand**, Wolfram KATTANEK<sup>1</sup>. Peter HELLWIG<sup>2</sup>. *Vortragsveranstaltung zur Cross-Cluster-Woche Thüringen, 24. September 2020, online.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>TU Ilmenau, 98693 Ilmenau, Germany.

**Neue Demonstratoren und Projektergebnisse aus der Modellfabrik Migration des Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrums Ilmenau**, Frank SPILLER<sup>1</sup>. *Vortragsveranstaltung zur Cross-Cluster-Woche Thüringen, 25. September 2020, online.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

**Artificially IntelligEnt EDA**, Georg GLÄSER<sup>1</sup>. *edaBarCamp, 18 – 19 February 2020, IBM Deutschland Research & Development, Böblingen, Germany.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

**Flexible PXI-Plattform für Evaluierung und Test von HF- und UHF-RFID-Sensorsystemen**, Björn BIESKE<sup>1</sup>. Tom REINHOLD<sup>1</sup>. Jun TAN<sup>1</sup>. *32. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2020), 16. – 18. Februar 2020, Ludwigsburg, Germany.* <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alle  
Publikationen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de).

**Hochpräzise positionieren – Integrierter 6-DOF-Direktantrieb bewegt Objekte nanometergenau im Raum**, Christoph SCHÄFFEL<sup>1</sup>. *Konstruktion, Sonderteil Antriebstechnik*, [www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hochpraezise-positionieren/](http://www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hochpraezise-positionieren/), 13. Oktober 2020. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme

gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

**Neue RFID-Technologie ermöglicht batterielosen Betrieb von Sensoren**, IMMS<sup>1</sup>. Alexander STARK<sup>2</sup>. *DeviceMed, Das Community-Magazin*, ISSN 1860-9414, Jahrgang 16, Ausgabe 6, S. 24 – 25, [www.devicemed.de/neue-rfid-technologie-ermoeglicht-batterielosen-betrieb-von-sensoren-a-969711/](http://www.devicemed.de/neue-rfid-technologie-ermoeglicht-batterielosen-betrieb-von-sensoren-a-969711/), Oktober 2020. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>DeviceMed, Redakteur.

**In-vitro-Diagnostik von Brustkrebs mit einem Kontakt-Bildsensor**, Valentin NAKOV<sup>1</sup>. Hendrik HÄRTER<sup>2</sup>. *in Elektronikpraxis*, Ausgabe 14/2020, Seite 44 – 46, [www.elektronikpraxis.vogel.de/in-vitro-diagnostik-von-brustkrebs-mit-einem-kontakt-bildsensor-a-950232](http://www.elektronikpraxis.vogel.de/in-vitro-diagnostik-von-brustkrebs-mit-einem-kontakt-bildsensor-a-950232). <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ilmenau,

Germany. <sup>2</sup>Fachzeitschrift ELEKTRONIKPRAXIS.

**Ko<sup>2</sup>SiBus – Kontinuierliche und Kostengünstige Signalanalyse für Ethernet-basierte Bus-Systeme**, Sebastian UZIEL<sup>1</sup>. Manuel SCHAPPACHER<sup>2</sup>. *Fachzeitschrift Elektronik*, 08.2020, 9. April 2020, S. 28 – 34, [www.elektroniknet.de/elektronik/halbleiter/die-aktuelle-elektronik-ausgabe-8-2020-als-epaper-174626.html](http://www.elektroniknet.de/elektronik/halbleiter/die-aktuelle-elektronik-ausgabe-8-2020-als-epaper-174626.html). <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik-

und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. <sup>2</sup>FH Offenburg.

**UHF-RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren für I4.0-Anwendungen**, Muralikrishna SATHYAMURTHY<sup>1</sup>. *Markt & Technik*, Ausgabe 07/2020, 14. Februar 2020, Seite 40-42. <sup>1</sup>IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige

GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

Alle

Publikationen:

[www.imms.de](http://www.imms.de).

## 2020 offengelegtes Patent

DE 10 2018 218 122 A1 „**Vorrichtung und Verfahren zur Analyse biologischer, chemischer und biochemischer Substanzen**“. Alexander HOFMANN. Andre JÄGER. Balazs NEMETH. Holger PLESS. Kristin EICHELKRAUT.

## 2020 erteiltes Patent

DE 10 2019 117 636 B3 „**Dichtungsanordnung für eine teilweise im Vakuum angeordnete Interferometerstrecke**“. (Mitinhaber Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig). Steffen HESSE. Michael KATZSCHMANN. Hans-Ulrich MOHR. Christoph SCHÄFFEL. Jens FLÜGGE.

## \* Förderung

- Das Projekt **KI-EDA** wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Maßnahme „Mikroelektronik für Industrie 4.0 (Elektronik I4.0)“ unter der Verbundnummer eszeli4001 gefördert, das IMMS unter dem Kennzeichen **16ME0010**.



- 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.



- Das Projekt **sUse** wurde unter dem Kennzeichen **ZF4085709P08** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.
- Das Projekt **EdgeCam** wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **KK5048101GR0** gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- Das Projekt **Ovutinin** wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **ZF4085713AJ9**.
- Das Projekt **K4PNP+Z** wird unter dem Förderkennzeichen **ZF4085714J09** im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.
- Das Projekt **Trib.US** wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **KK5048102ATO**.
- Das Projekt **StadtLärm** wurde unter dem Kennzeichen **ZF4085703LF6** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



Gefördert durch:

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energieaufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

> Integrierte  
Sensorsysteme

> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme

> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung

- Das Projekt **BICCell** wird durch die DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.) über die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) als Vorhaben der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) unter dem Kennzeichen **21174 BR/2** vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

Gefördert durch:

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energieaufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

- 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.

Mittelstand-  
Digital

Gefördert durch:

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energieaufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

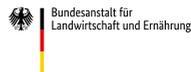
Mehr zur  
Förderung:  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

- 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 **28DE102D18**.

Gefördert durch

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektträger



> **Integrierte  
Sensorsysteme**

> **Intelligente ver-  
netzte Mess- u.  
Testsysteme**

> **Mag6D-nm-  
Direktantriebe**

> **Inhalt**

\* **Förderung**

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



- Die Forschergruppe **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**.

EUROPÄISCHE UNION  
Europäischer SozialfondsFreistaat  
ThüringenMinisterium  
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:**  
[www.imms.de](http://www.imms.de)

# Abkürzungen

**5G** Mobilfunkstandard der fünften Generation

**ADC** Analog-to-Digital-Converter, AD-Wandler

**API** Application Programming Interface, Anwendungsprogrammierschnittstelle

**ASIC** Application-specific Integrated Circuit, appli-  
kationsspezifische integrierte Schaltung

**BSP** Board Support Package

**CMOS** Complementary metal-oxide Semiconduc-  
tor, komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter

**CPU** central processing unit, zentrale Rechen-  
einheit

**DMA** Direct Memory Access, Speicherzugriffsart

**EDA** Electronic Design Automation, rechnerge-  
stützte Entwurfsautomatisierung

**FEM** Finite-Elemente-Methode

**FFT** Fast Fourier Transform, Algorithmus

**FPGA** Field Programmable Gate Array, vor Ort  
programmierbare Logik-Gatter-Anordnung

**I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus

**IC** Integrated Circuit, integrierte Schaltung

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engi-  
neers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren

**IO** Input/Output

**IoT** Internet of Things, Internet der Dinge

**ISFET** ionensensitiver Feldeffekttransistor

**KI** Künstliche Intelligenz

**KMU** Kleine und mittlere Unternehmen

**LFA** Lateral Flow Assay, Streifen-test

**LH** luteinisierendes Hormon

**MEMS** Mikroelektromechanische Systeme

**ML** Maschinelles Lernen

**NdFeB** Neodym-Eisen-Bor-Legierung für stärkste  
Dauermagnete

**PCA** Principal Component Analysis, Hauptachsen-  
transformation

**PCB** Printed Circuit Board, Leiterplatte

**PCIe** Peripheral Component Interconnect Express,  
Hardware-Schnittstelle

**POCT** Point-of-Care-Testsystem zur Vor-Ort-  
Diagnostik

**RFID** Radio-Frequency Identification

**RAUC** Robust Auto-Update Controller

**S2DES** Smart sensor-based Digital Ecosystem Servi-  
ces, Cloud-Dienst des gleichnamigen Projekts

**SAR** Successive Approximation Register

**SiCer** Silizium-(Si)-Keramik-(Cer)-Verbundsubstrat

**SoM** System-on-Module, Schaltung mit System-  
funktionen auf einem Modul

**SPICE** Simulations-Software für elektronische  
Schaltungen

**SQUIDS** Superconductive Quantum Interference  
devices, supraleitende Interferometer

**TDNN** Time Delay Neural Network,  
zeitverzögertes neuronales Netz

**ULP** Ultra Low Power

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-  
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-  
Direktantriebe

> Inhalt

\* Förderung



## Herausgeber / Anbieterkennzeichnung nach § 5 TMG, § 2 DLVO

IMMS Institut für Mikroelektronik-  
und Mechatronik-Systeme  
gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH)

Ehrenbergstraße 27

98693 Ilmenau, Deutschland

+49.3677.87493.00 *Telefon*

+49.3677.87493.15 *Fax*

imms@imms.de

www.imms.de

www.imms.de/impressumdisclaimer.html

## Vertretungsberechtigt:

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

## Rechtsform:

Gesellschaft mit beschränkter Haftung

**Registergericht:** Amtsgericht Jena

**Registernummer:** HRB 303807

**Umsatzsteuer-Identifikationsnummer**  
gem. § 27a UStG: DE 177 527 119

## Analyse verlinkter Inhalte mit Matomo

Für die in der digitalen Version dieses Berichts mit [www.imms.de](http://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](http://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

## Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

**Druck:** [www.BRANDTDRUCK.de](http://www.BRANDTDRUCK.de)

Alle Rechte sind vorbehalten.

Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

> Integrierte

*Sensorsysteme*

> Intelligente ver-

*netzte Mess- u.*

*Testsysteme*

> Mag6D-nm-

*Direktantriebe*

> Inhalt

\* Förderung

Datenschutz-

*erklärung auf*

[www.imms.de](http://www.imms.de).

*Impressum*

*und rechtliche*

*Hinweise auf*

[www.imms.de](http://www.imms.de).

*Ansprech-*

*partner und*

*Anfahrt auf*

[www.imms.de](http://www.imms.de).