



IMMS

JAHRESBERICHT

2021

3	Vorwort	101	Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision
5	Nachruf Dr.-Ing. Christoph Schäffel	102	Highlights 2021 im Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision
6	25 Jahre IMMS	107	Untersuchungen zur Positionsregelung von vertikalen Bewegungssystemen für Präzisionsanwendungen im Nanometerbereich
31	Stimmen aus Industrie und Wissenschaft zu aktuellen Projekten	115	Zahlen, Strukturen und Belege
39	Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau	116	Das IMMS in Zahlen
42	Nachwuchsförderung am IMMS	118	Organisation
43	Stimmen aus dem IMMS	120	Lehrangebot
47	Integrierte Sensorsysteme	120	Veranstaltungen
49	Highlights 2021 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme	124	Publikationen
67	Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme	132	* Förderung
69	Highlights 2021 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme	136	Abkürzungen
86	Maschinelles Lernen auf ressourcenbeschränkten Mikrocontrollern für Edge-KI- und IoT-Anwendungen	137	Impressum, Datenschutz
94	Intelligente Sensorik für die Digitalisierung in der Landwirtschaft		

2	○
>	Integrierte Sensorsysteme
>	Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
>	Mag6D-nm-Direktantriebe
>	Inhalt
*	Förderung

Mehr Jahresberichte auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2021



Univ.-Prof.-Dr.-Ing. Ralf Sommer und Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

auch im zweiten Pandemiejahr, trotz der damit verbundenen Herausforderungen, konnten wir den Geschäftsbetrieb des Instituts gemeinsam mit unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern so gestalten, dass unser Jubiläumsjahr zu einem erfolgreichen Geschäftsjahr wurde. 2021 war für uns jedoch auch durch den plötzlichen Tod unseres geschätzten Kollegen und Themenbereichsleiters Dr.-Ing. Christoph Schäffel überschattet, der das IMMS seit 1995 mitgestaltet hat. Seine exzellente fachliche Expertise und auch die persönlichen Gespräche werden uns allen fehlen.

Für die Zukunft aufgestellt haben wir uns mit den zahlreich neu eingeworbenen Projekten (12), mit denen wir unsere strategische Ausrichtung konsequent weiterverfolgen können. Hier zeigt sich, dass die von uns vorangetriebenen Forschungsthemen weiterhin von hoher Relevanz für Gesellschaft und Unternehmen sind. Mit den Projektstarts von KODIAK, SensInt und FluoResYst im **Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme** forschen wir an den Herausforderungen eines individuellen, dezentralen Gesundheitsmonitorings für alle mit elektronischen Schnelltests. Mit den Ergebnissen möchten wir eine unserer Leituanwendungen „Sensorsysteme für die In-vitro-Diagnostik“ verbessern und erweitern. Zudem haben wir mit VE-VIDES und VE-ARIS die Projektarbeiten für vertrauenswürdige Elektronik mittels KI-basierter Chip-Entwurfsmethoden aufgenommen und bringen uns in die BMBF-Initiative zur technologischen Souveränität Deutschlands ein.

Mehr Jahresberichte auf www.imms.de.

Jahresbericht

© IMMS 2021

Im **Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme** haben wir 2021 Projekte wie ViroGraph, QuantumHub, thurAI, edgeCam, Trib.US und EcoHarvester begonnen. Dort arbeiten wir u.a. an einer neuartigen Technologieplattform zum Nachweis von SARS-CoV-2, an CMOS-basierten Einzelphotonendetektoren für Quantentechnologien aus Thüringen und Sensorik für SmartCity. Für unsere Leitanwendungen „Adaptive Edge-KI-Systeme für industrielle Anwendungen“ und „IoT-Systeme für kooperatives Umwelt-Monitoring“ haben wir Ergebnisse erzielt, die maschinelles Lernen auf ressourcenbeschränkten Mikrocontrollern für Edge-KI- und IoT-Anwendungen ermöglicht und den Herausforderungen in der Landwirtschaft in Zeiten des Klimawandels mit Sensorsystemen für eine optimierte Bewässerung begegnet.

4

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

Im **Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision** haben wir die Weichen für die Präzisionsfertigung der Zukunft gestellt. Unsere Arbeiten zur Pikometer-Positionierung wurden zur IEEE International Conference on Mechatronics 2021 mit dem Best Paper Award ausgezeichnet.

Möglich werden diese und weitere Lösungen durch Engagement und Förderung. Wir danken dem Freistaat Thüringen für seine institutionelle Förderung, die unsere Transferarbeit und die Kooperation mit Thüringer KMU erst möglich macht. Wir danken unseren Gremien dafür, dass sie uns in allen Fragen fördernd und beratend unterstützen. Allen Forschungspartnern danken wir für ihre vielfältigen Impulse, die wir in anwendungsnahe Lösungen transferieren. Unser Dank gilt auch unseren Geschäftspartnern und Förderern sowie all jenen, die uns in unserem Tun bestärken.

Unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken wir für ihren Einsatz, ihre kreativen Ideen und ihr Können, ohne das all die innovativen Lösungen nie entstehen würden. Beispiele für innovative Lösungen finden Sie im Bericht. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen.



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



Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

Mehr Jahres-
berichte auf
www.imms.de



NACHRUF

Dr.-Ing. Christoph Schäffel, *25. Juli 1961, †16. Mai 2021

Wir sind über seinen plötzlichen Tod erschüttert und sehr traurig.

Christoph Schäffel hat seit der Gründung des IMMS unseren Themenbereich Mechatronik geprägt. Er wollte nie im Mittelpunkt stehen, de facto war er der Mittelpunkt. Mit seiner hervorragenden fachlichen Expertise und seinen Ideen hat er als Themenbereichsleiter die Mechatronik im IMMS zu dem gemacht, was sie heute ist: Sie bestimmt den weltweiten Stand für nano- und mittlerweile pikometergenaue Präzisionsantriebe. Im Zuge dessen führte er in 25 Jahren zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Erfolg, war Autor und Co-Autor zahlreicher Publikationen und Patentschriften. Darüber hinaus begleitete er unseren wissenschaftlichen Nachwuchs.

Wir werden seine herzliche Art und seinen Humor vermissen. Er wird uns als Kollege persönlich fehlen und wir werden ihn in guter Erinnerung behalten.

Unser tiefes und besonderes Mitgefühl gilt seiner Frau und seinen Kindern.

In tiefer Trauer und im Namen der Belegschaft

Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer (Geschäftsführer), Martin Eberhardt (Geschäftsführer),
Robert Fetter (Vorsitzender des Aufsichtsrats)

Die kommissarische Leitung des Themenbereichs Mechatronik hat Dr.-Ing. Frank Spiller übernommen.

Von einem der weltweit ersten USB-Hubs zur KI

25 Jahre IMMS



Video 25 Jahre IMMS – Transfers aus der Grundlagenforschung in die Industrie

<https://youtu.be/o2ks-ks298s>

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

25 Jahre IMMS

Von einem der weltweit ersten USB-Hubs zur KI. Video 25 Jahre IMMS – Transfers aus der Grundlagenforschung in die Industrie

Zum Ende seines 25. Jubiläumsjahres hat das IMMS das Video „Von einem der weltweit ersten USB-Hubs zur KI“ veröffentlicht. Akteure von damals und heute spannen darin den Bogen von einem der ersten, 1996 gestarteten Transferprojekte bis hin zu aktuellen Lösungen des IMMS. Von Beginn an ist das IMMS dazu angetreten, Thüringen voranzubringen, indem es Forschungsergebnisse in Anwendungen und Produkte transferiert. Das landeseigene Unternehmen des Freistaats Thüringen und An-Institut der Technischen Universität Ilmenau unterstützt heute Unternehmen, international erfolgreiche Innovationen für Gesundheit, Umwelt und Industrie auf den Weg zu bringen und begleitet seine Partner in ihren Zielanwendungen von der Machbarkeitsstudie bis zur Serienreife.

Mehr zu 25 Jahren IMMS auf www.imms.de

„Dass heute jeder USB kennt, liegt auch an Entwicklern aus Thüringen.“

Das erklärt Dr.-Ing. Karsten Pahnke, Geschäftsführer der emsys Embedded Systems GmbH, bis 1998 Mitarbeiter am IMMS und verantwortlich für die USB-Entwicklungen. „1996 hatten Intel, Microsoft und IBM die Idee, einen Standard festzulegen, der universell für die PCs gedacht ist. Wir haben in Thüringen frühzeitig erkannt, dass das

bedeutet, nicht nur PCs, sondern auch Geräte mit USB ausrüsten zu müssen, und dass das eine intelligente Hardware und Software im Gerät braucht.“ Grundlage war der USB-Chip für PC-Mäuse der Erfurter Thesys GmbH, aus der später die X-FAB und MELEXIS hervorgingen. Solch ein Chip serialisiert die Daten zwischen PC und Maus und genau das sei noch komplizierter, wenn man mehrere Geräte anschließen wolle, so Pahnke weiter.

Den dafür benötigten Mehrfachverteiler, den USB-Hub, hat das IMMS entwickelt: „Wir waren damit weltweit einer der ersten, der das gewagt hat.“ Initiiert durch Anfragen von weltweit agierenden Computerzubehör-Herstellern, die die USB-Hub-Entwicklung für ihre Geräte nutzten, und nach zahlreichen USB-Workshopreihen und der Veröffentlichung des ersten deutschen USB-Buches gründeten die Entwickler um Pahnke aus dem IMMS die emsys Embedded Systems GmbH aus, die sich kundenspezifischen Entwicklungsprojekten für Hardware, Software und Technologie rund um USB widmete.

Auch heute geht es dort noch um USB, vor allem um anspruchsvolle Softwareentwicklungen für z.B. hohe Datenübertragungsraten bei möglichst kleinem Stromverbrauch für batteriebetriebene Geräte. Darüber hinaus entwickelt emsys auch eigene Produkte in anderen Bereichen, wie z.B. aktuell den Netz-Analyzer für das neue 450-Megahertz-Netz, der Servicetechnikern bei der Installation von Smart Meter Gateways unterstützt. Die Verbindung zum IMMS besteht nach wie vor. Aktuell arbeiten beide Partner an Edge-KI-Lösungen für virtuelle Sicherheitszonen und deren Anbindung über Mobilfunk. „Auch da geht es wieder darum, eine möglichst große Leistungsfähigkeit in ein sehr kleines System zu bringen“, fasst Pahnke zusammen.

Transfers heute – Beispiel SONAPHONE® für Miniaturisierung und intelligente Lösungen

Die Weiterentwicklungen des USB-Standards hat das IMMS 1998 in die Hände der ausgegründeten Firmen emsys und Thesycon übergeben. Seitdem entwickelt das IMMS vor allem für kleine und mittlere Unternehmen Lösungen zur Miniaturisierung und für intelligente Systeme, die der Schlüssel für neue Anwendungen und Produkte sind. Eine dieser Lösungen ist das SONAPHONE®, ein neuartiges digitales Prüfgerät, das mithilfe von Ultraschall Lecks in Industrieanlagen erkennen kann und das sich zur vorbeugenden Instandhaltung nutzen lässt. Das Smartphone-ähnliche Indust-

riemessgerät, das seit 2016 am Markt ist, haben IMMS und SONOTEC gemeinsam entwickelt. Das IMMS hat die digitalen Komponenten der Hardware realisiert und u.a. eine Software entwickelt, die die Ultraschall-Daten hörbar macht.

Prof. Dr. Peter Holstein, verantwortlich für die strategische Entwicklung bei der SONOTEC GmbH, bringt für den bisherigen Erfolg des Gerätes vor allem die Forschungs-kooperation mit dem IMMS zur Sprache, von der Unternehmen profitieren können: „Die kleinen und mittelständischen Unternehmen sind in der Regel mit Alltagsproblemen doch extrem beschäftigt. Gleichzeitig besteht aber auch die Aufgabe, neue Produkte zu entwickeln, Vorentwicklung zu leisten, so dass die Kooperation zu Forschungsinstituten absolut notwendig ist, um zusätzliches Know-how zu aktivieren.“ Für das SONAPHONE® können dank der gemeinsamen Entwicklung viele Frequenzen mit nur einem Gerät gemessen und gleichzeitig bewertet werden. Vorher seien Messungen so ähnlich gewesen, als wenn Sie Radio nur auf einer Frequenz hören würden, so Holstein weiter. „Da würden Sie nicht viel Freude an der Musik haben. Wir haben sozusagen die Hifi-Anlage in die Ultraschall-Welt hineingebracht.“

Fit für die Zukunft – KI und intelligente Systeme für Industrieanwendungen und darüber hinaus

Heute arbeitet das IMMS mit seinen Partnern u.a. an Ultraschall-Monitoring-Geräten mit KI. „Diese KI-Algorithmen versuchen wir nun, in das SONAPHONE zu integrieren. Damit machen wir das SONAPHONE jetzt KI-fähig, also fit für die Zukunft,“ erklärt Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, Themenbereichsleiter für System Design am IMMS. Das Gerät soll demnächst dreikanalig arbeiten, um eine Ortung der Ultraschall-Quelle zu ermöglichen. „Dafür nutzen wir KI. Das ist auch unser Ziel über das SONAPHONE hinaus: KI für Kleinstcomputer in der Industrie und hier vor allem für adaptive Edge-KI-Systeme zu realisieren.“ Damals wie heute geht es um immer leistungsfähigere und kleinere Systeme. Die am IMMS entwickelten Chips besitzen heute nur noch den Bruchteil der Größe des damaligen USB-Chips und sind im Schnitt nur wenige Quadratmillimeter klein. Mit miniaturisierten Systemen und intelligenter Software möchte das IMMS viele neue Anwendungen für die Zukunft erschließen, z.B. in den Bereichen Umweltmonitoring, Smart City und Life Sciences.



Kurzer Videozusammenschnitt aller Grußbotschaften. www.imms.de/25jahre

<https://youtu.be/ijLEio8EsMw>

25 Jahre IMMS – Grußbotschaften

Anlässlich unseres 25-jährigen Jubiläums haben uns zahlreiche Grüße und Glückwünsche erreicht. Viele davon greifen aktuelle Projekte und Ergebnisse der letzten Jahre auf und beleuchten so aus verschiedenen Blickwinkeln, wie wir am IMMS gemeinsam mit unseren Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft Forschungsergebnisse in Anwendungen und Produkte transferieren.

Unser Jubiläum fiel in eine Phase, in der wir trotz aller Widrigkeiten verstärkt daran gearbeitet haben, Unternehmen gerade dann für die Herausforderungen der Zukunft mit Forschung und Entwicklung zu unterstützen. Umso mehr freuen wir uns, dass sich unsere Partner und Förderer die Zeit genommen haben, in Videos und Textbeiträgen über gemeinsame Erfolge zu sprechen und mit uns in die Zukunft zu blicken.

Dafür möchten wir uns herzlich bedanken. Ihre Worte machen uns stolz auf das, was wir gemeinsam erreicht haben und spornen uns an, weiter mit Ihnen an zukunftsweisenden Innovationen zu arbeiten!



Interview mit Dr.-Ing. Karsten PAHNKE, Geschäftsführer der EMSYS Embedded Systems GmbH
www.emsys.de

<https://youtu.be/o2ks-ks298s>



Grußbotschaft von Prof. Dr.-Ing. Karlheinz BRANDENBURG, Geschäftsführer BRANDENBURG LABS GmbH
www.brandenburg-labs.com

<https://youtu.be/9tqWAt8FRB8>

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



Wir gratulieren zum **25-jährigen Jubiläum**



Grußbotschaft der Geschäftsführer Thomas BROCK und Prof. Dr. Thomas ORTLEPP, CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, www.cismst.de

<https://youtu.be/Lmq6S8uBvDc>



Grußbotschaft von Jörg DOBLASKI, X-FAB CTO, und Dr. Gabriel KITTLER, X-FAB CEO Site Erfurt,
www.xfab.com

<https://youtu.be/vzfcxwhm530>



Grußbotschaft von Dr.-Ing. Carsten EMDE und Andrea RUF, Open Source Automation Development Lab (OSADL eG), www.osadl.org

https://youtu.be/vzpk_8tbueg



Grußbotschaft von Hans-Christian FRITSCH, Geschäftsführer ILMSENS GmbH, Ilmenau,
www.ilsens.com

<https://youtu.be/fftiagGL1jw>

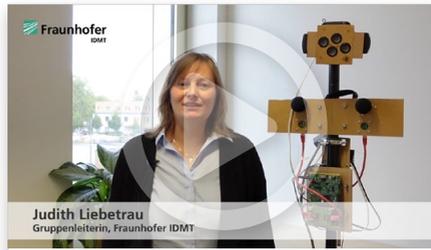
Mehr zu 25 Jahren IMMS auf www.imms.de

Jahresbericht



Grußbotschaft von Anton KLOTZ,
CADENCE GmbH, Germany,
www.cadence.com

<https://youtu.be/zomtifu4JuU>



Judith Liebetrau
Gruppenleiterin, Fraunhofer IDMT

Grußbotschaft Judith LIEBETRAU,
Gruppenleiterin Industrial Media
Applications, FRAUNHOFER IDMT,
Ilmenau, www.idmt.fraunhofer.de

<https://youtu.be/o2Xwc8v4jqc>



Prof. Dr.-Ing. Jens Müller
Präsidium TU Ilmenau

Grußbotschaft von Prof. Dr.-Ing. Jens
MÜLLER, Präsidium TU ILMENAU,
www.tu-ilmenau.de

<https://youtu.be/zY5FUxBdlC8>



Grußbotschaft des Thüringer
MINISTERPRÄSIDENTEN Bodo
RAMELOW,
www.staatskanzlei-thueringen.de

<https://youtu.be/fT2jaQ1PmKE>



Rene Rodigast
Business Manager, Fraunhofer IDMT

Grußbotschaft von Rene RODIGAST,
Business Manager Acoustics,
FRAUNHOFER IDMT, Ilmenau,
www.idmt.fraunhofer.de

<https://youtu.be/wl1YPAve5n8>



Peter Schneider, Fraunhofer IIS/EAS

Grußbotschaft von Dr. Peter
SCHNEIDER, Leiter FRAUNHOFER IIS
EAS, Dresden
www.eas.iis.fraunhofer.de

<https://youtu.be/xR0TE2gQ60k>

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

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Herzlichen Glückwunsch!



Prof. Dr.-Ing. Axel Sikora
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing.
wissenschaftlicher Leiter - IKTS



Grußbotschaft von Prof. Dr.-Ing. Axel
SIKORA, HOCHSCHULE OFFENBURG,
www.hs-offenburg.de

<https://youtu.be/Vi7Ej4zoWQU>



René Heidl
Geschäftsführer, Indu-Sol GmbH

Grußbotschaft vom Team der Firma
INDU-SOL GMBH, Schmölln in
Thüringen,
www.indu-sol.com

<https://youtu.be/RpeRj059hNw>



Grußbotschaft von Wolfgang TIEFEN-
SEE, MINISTER für Wirtschaft, Wis-
senschaft und Digitale Gesellschaft in
Thüringen, TMWWDG
www.wirtschaft.thueringen.de

<https://youtu.be/bEfu8KiWowo>



Prof. Dr. Ingolf Voigt
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Grußbotschaft von Prof. Dr. Ingolf
VOIGT, Stellvertretender Instituts-
leiter, Standortleitung FRAUNHOFER
IKTS, Hermsdorf
www.ikts.fraunhofer.de

https://youtu.be/4Mx0Zg_lNfA

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

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

**Grußbotschaft von Uwe Ahnert, Geschäftsführer
BioTeZ Berlin-Buch GmbH und Steffens Biotechnische
Analysen GmbH**



Herzlichen Glückwunsch IMMS und Prof. Dr. Sommer,

zu 25 wunderbaren Jahren voller Schaffenskraft für Forschung, Ausbildung und Innovation. BioTeZ und Steffens Biotechnische Analysen bedanken sich für die gute Zusammenarbeit und hoffen auf viele gemeinsame neue Projekte in der Zukunft, bei denen wir auf die Kompetenzen des IMMS im Bereich Mikroelektronik und Mechanik vertrauen dürfen, um diese mit unserer Expertise in der Proteinchemie und molekularen Diagnostik für neue Lösungen zu bündeln.

Alles Gute, Glück und Erfolg, liebes IMMS und lieber Prof. Dr. Sommer.

Uwe Ahnert, Geschäftsführer BioTeZ Berlin-Buch GmbH und Steffens Biotechnische Analysen GmbH, www.biotez.de, www.steffens-biotec.com

**Grußbotschaft von Judith Binzer, Geschäftsführerin
DFAM und Johanna Schreiner, Referentin VDMA Micro
Technologies**



Ein Vierteljahrhundert im Dienste der Wissenschaft auf dem Gebiet der Mikroelektronik und der mechatronischen Systeme. Wir bedanken uns für die Zusammenarbeit, sowohl bei der DFAM (Deutsche Forschungsgesellschaft für Automatisierung und Mikroelektronik e.V.) als auch bei der VDMA Fachabteilung Micro Technologies. Für uns und für unsere Mitgliedsunternehmen bedeutet die Verbundenheit mit Forschungsinstituten ein erheblicher Mehrwert, denn nur durch die Zusammenarbeit der Forschung und Industrie können neue Innovationen für den Maschinen- und Anlagenbau entstehen. Wir wünschen dem IMMS weiterhin viel Erfolg und freuen uns auf die nächsten 25 Jahre!

Judith Binzer, Geschäftsführerin DFAM, www.dfam.de

Johanna Schreiner, Referentin VDMA Micro Technologies, www.micro.vdma.org

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

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

Grußbotschaft von Geschäftsführer Dr. Denis Dontsov, SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau – Gemeinsam forschen, entwickeln, lösen

IMMS und die SIOS Messtechnik verbindet seit vielen Jahren die Begeisterung für spannende Forschungsprojekte und herausfordernde technische Lösungen im Bereich der Anwendung von mechanischen Systemen für die Nanopositionierung höchster Genauigkeit.

Dies konnten wir in den letzten 25 Jahren in zahlreichen Förderprojekten und gemeinsamen Entwicklungen unter Beweis stellen.

In unserer Team-übergreifenden Zusammenarbeit bewegen wir uns häufig an der Grenze des technisch Machbaren. Es geht jedoch in unserer Zusammenarbeit nicht darum, ausschließlich theoretische Ansätze zu entwickeln, vielmehr geht es stets darum, praxisnahe Lösungen zu finden und diese schlussendlich in innovative High-End-Lösungen und Produkte zu überführen. Dies ist die Voraussetzung für den gemeinsamen Erfolg. Dabei schätzen wir die fachliche Kompetenz am IMMS verbunden mit den äußerst hohen Qualitätsansprüchen sowie die systematische und zielorientierte Arbeitsweise der IMMS-Kollegen und nicht zuletzt die sehr kommunikative und unkomplizierte Art der Kooperation.

Erst in jüngster Vergangenheit konnten wir innerhalb der gemeinsamen Forschungsarbeit „Picometer-scale positioning of a linear drive system via feedforward feedback control“ mit der Auszeichnung des Best-Paper-Awards einen gemeinsamen Erfolg verzeichnen. In diesem Forschungsprojekt erfolgt die Positionierung im Pikometerbereich mit Hilfe des durch SIOS entwickelten ultrastabilen Differenzinterferometers.

Projekte dieser Art motivieren uns, die Zusammenarbeit auch in den nächsten Jahren gemeinsam mit den Kollegen des IMMS fortzuführen.

Geschäftsführer Dr. Denis Dontsov wünscht dem IMMS, auch im Namen der SIOS Meßtechnik Mitarbeiter, zum 25-jährigen Jubiläum inspirierende Ideen und innovative Lösungen, die uns gemeinsam zu neuen technologischen Entwicklungen antreiben und uns auch in der Zukunft voranbringen.



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



IMMS



Historische Beziehungen Erfurt - Mainz

- Über 1000 Jahre war die Geschichte Erfurts eng mit dem Erzbistum bzw. Kurfürstentum Mainz verbunden
- Seit 1988 sind Erfurt und Mainz Partnerstädte
- Seit 2019 besteht die Forschungskooperation zwischen der iC-Haus GmbH (Bodenheim bei Mainz) und der IMMS gGmbH (Erfurt)

... mit sichtbarer Bewegung auch in den Stadtwappen von Erfurt und Mainz



Wir gratulieren herzlich zum 25-jährigen Bestehen des IMMS und freuen uns auf die Partnerschaft in inzwischen drei mit Bundesmitteln geförderten Forschungsprojekten zur Schaltkreisintegration mit den Themen Künstliche Intelligenz, Kopierschutz und Medizin-Laser.

A blue ink signature of Dr. Heiner Flocke.

Dr. Heiner Flocke
und das iC-Haus Team

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung



Univ.-Prof. Dr. Matthias A. Hein. Quelle: privat, Matthias Hein.

Grußbotschaft von Univ.-Prof. Dr. Matthias A. Hein, Leiter Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik (HMT), Direktor ThIMO, Technische Universität Ilmenau

„Innovation und wirtschaftliche Wertschöpfung resultieren wesentlich aus einer kompetenten und leistungsstarken Überführung universitärer Vorlaufforschung in industrietaugliche Lösungen. Genau hier hat sich das IMMS in seinem 25-jährigen Bestehen als zuverlässiger F&E-Partner etabliert. Wir gratulieren dem gesamten IMMS-Team herz-

lich und freuen uns auf die weitere erfolgreiche Zusammenarbeit!“

Univ.-Prof. Dr. Matthias A. Hein, www.tu-ilmenau.de

Grußbotschaft von Direktorin Prof. Dr. Doris Heinrich, iba, Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt



Direktorin Prof. Dr. Doris Heinrich, iba, Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt. Foto: iba.

Lieber Herr Prof. Dr.-Ing. Sommer, liebes Team des IMMS,

ich möchte Ihnen im Namen aller Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V. in Heilbad Heiligenstadt und als Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates des IMMS anlässlich Ihres 25-jährigen Institutsjubiläums die herzlichsten Grüße senden.

Sie haben in diesen Jahren einen sehr erfolgreichen Weg der anwendungsorientierten Forschung zurückgelegt und waren dabei immer ein verlässlicher Partner bei der Suche nach neuen innovativen Lösungen für die Automation, Steuerung und Regelung von Prozessen in der Forschung und Industrie. Dabei stellten Sie sich auch immer den großen Herausforderungen der Datenerfassung und -verarbeitung in komplexen Milieus der Life-Science-Anwendungen. In diesem spannenden Umfeld konnten wir mit Ihnen zusammen hochinteressante Forschungsprojekte vorantreiben.

Die Ergebnisse des Projektes INSPECT mit der Entwicklung einer optoelektronischen In-situ-Detektion der Vitalität von Zellen in einem dreidimensionalen Mikro-

habitat sprechen für sich. Auch die aktuellen gemeinsamen Forschungen zur Anwendung einer integrierten Schaltung für die Analyse bioimpedimetrischer Daten aus biotechnologischen Prozessen im Projekt BICCell sowie das Engagement des iba im Projekt-begleitenden Ausschusses Ihres Forschungsprojektes „ViroGraph“ sind Zeugen einer gewachsenen kollegialen Zusammenarbeit.

Ich wünsche uns, daß wir als An-Institute der TU Ilmenau mit komplementärem Forschungsprofil auch in Zukunft eine starke und erfolgreiche Achse der Anwendungsforschung in Thüringen darstellen werden.

Ihnen und Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern wünsche ich erfolgreiche weitere Jahre in einem starken wissenschaftlichen Umfeld.

Ihre Doris Heinrich

im Namen des Instituts für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V.,

www.iba-heiligenstadt.de

Grußbotschaft von Frank Helbing, Leiter Abteilung Verkehr, Tiefbau- und Verkehrsamt, Landeshauptstadt Erfurt, Stadtverwaltung

Das Tiefbau- und Verkehrsamt der Landeshauptstadt Erfurt arbeitet intensiv an einer nachhaltigen Abwicklung der Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung. Hierbei werden neben dem Einsatz von Maßnahmen der strategischen Verkehrssteuerung auch die Aktivitäten auf dem Gebiet des Verkehrsmanagements intensiv verfolgt. Der Fokus liegt dabei auf dem systematischen Einsatz eines intermodalen und integrierten Verkehrs-



Einbau drahtloser Sensorknoten in die Straßendecke im Rahmen des sMobility-Feldtests in Erfurt. Foto: IMMS.

und Umweltmanagements. Die Landeshauptstadt Erfurt verfügt hierbei über eine der modernsten Verkehrsleitzentralen in Deutschland, deren Kernstück die so genannte Verkehrsmanagementplattform mit den Teilsystemen Verkehrsrechnerzentrale, Verkehrslageanalyse und -prognose sowie Verkehrs- und Umweltdatenmanagement ist.

Mit der IMMS GmbH hat das Tiefbau- und Verkehrsamt intensiv im Rahmen des Forschungsvorhabens „Smart Mobility in Thüringen (sMobility)“ (Laufzeit 01.10.2012 bis 30.09.2015) zusammengearbeitet. Im dem 3-jährigen Projekt zur Förderung der

Elektromobilität wurde die von der IMMS GmbH entwickelte Sensorplattform „Taktile Straße“ im Stadtgebiet von Erfurt erprobt und diente als wertvolle Datenquelle zur Erfassung von Verkehrs- und Umweltdaten. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse waren Voraussetzung für eine Reichweiten- und Reisezeitenprognose für Elektrofahrzeuge.

„Wir haben die IMMS GmbH als sehr innovatives, flexibles und ehrgeiziges Unternehmen kennen gelernt.“ führt Frank Helbing, Leiter der Abteilung Verkehr im Tiefbau- und Verkehrsamt aus. „Die gemeinsame Zusammenarbeit ist uns noch sehr gut in Erinnerung. Zusammen haben wir einzigartige und herausragende Projektergebnisse erzielt, von denen die Verkehrsabwicklung in der Landeshauptstadt Erfurt noch heute profitiert.

Wir wünschen der IMMS GmbH daher auch für die Zukunft nur das Beste sowie viele weitere spannende und innovative Projekte.“

Frank Helbing, Leiter Abteilung Verkehr, Tiefbau- und Verkehrsamt, Landeshauptstadt Erfurt, Stadtverwaltung, www.erfurt.de

Grußbotschaft von Prof. Dr. Peter Holstein und Hans-Joachim Münch, SONOTEC GmbH

Passend zum Jubiläum des IMMS „feiern“ die Kontakte von SONOTEC zum IMMS auch ihren 10. Jahrestag. SONOTEC unterstützt seit langem die Lehre an der Technischen Universität Ilmenau. Daraus ergaben sich folgerichtig auch die Kontakte zum IMMS. Die Leistungs- und Anforderungsprofile beider Partner ergänz(t)en sich hervorragend. Der zunehmende Einfluss der Digitalisierung auf die Geräteentwicklung

Preisverleihung TÜV Süd Innovationspreis 2019 (von links nach rechts): Sebastian Uziel (Hardwareentwickler, IMMS GmbH), Prof. Dr. Ralf Sommer (wissenschaftlicher Geschäftsführer, IMMS GmbH), Michael Münch (Geschäftsführer, SONOTEC GmbH), Christian Schreiber (International Sales Manager, SONOTEC GmbH).
Foto: SONOTEC GmbH.



Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

und damit verbundene Anforderungen an die Anwendungen führte zu gemeinsamen neuen Überlegungen für eine neue Klasse von Prüfgeräten für die Instandhaltung, für deren Entwicklung das IMMS ein idealer Partner für uns war und ist. Aus einem gemeinsam entwickelten Konzept, für das es auf dem internationalen Markt kein Vorbild gab, entstand im Rahmen einer gemeinsamen Entwicklung das inzwischen auf dem Markt äußerst erfolgreiche Prüfgerät SONAPHONE. Bei der Entwicklung konnten beide Seiten ihr Knowhow und Stärken einbringen und diese weiterentwickeln.

Die Kooperation der beiden Partner ist inzwischen eine Erfolgsgeschichte. Die Anforderungen des Marktes können von mittelständischen Unternehmen nicht allein bewältigt werden. Umgekehrt profitiert die Forschungseinrichtung von der Nähe zum Markt. Der Druck, der marktseitig aus den Anforderungen von I4.0 und Digitalisierung entsteht, ist immens. Neue Anforderungen und Möglichkeiten werden gemeinsam erschlossen. Bisher gingen vor allem die Erfahrungen des IMMS auf Gebieten wie Elektronikdesign, modellbasierter Entwicklung, embedded Computing und dem Verständnis von Betriebssystemen in die Kooperation ein. Zunehmend spielen datengetriebene Entwicklungen um die KI eine wichtige Rolle. Das IMMS hat hierfür im Projekt sUse die digitale Hardware-Plattform entwickelt, die die Grundlage für einen völlig neuen Ansatz in der stationären Überwachung von Leckagen in Druckluftsystemen ermöglicht. Durch den Anschluss von Volumenstrom- und Ultraschallsensorik können nach einer KI-gesteuerten Verarbeitung und Leckagebewertung entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

Die Verbindung von Kooperationsstruktur, technologischem Konzept und konsequenter Marktorientierung ermöglichte es, aufbauend auf der Basisentwicklung weitere innovative Geräte für Anwendungen in der Instandhaltung zu entwickeln. Mehrere gemeinsame Forschungsprojekte, Publikationen, Patente und auch gewonnene Innovations-Preise für die gemeinsame Entwicklung belegen dies.

Die Erfolge der Vergangenheit sind gleichzeitig unsere gemeinsame Basis für zukünftige Kooperationen.

Prof. Dr. Peter Holstein, Hans-Joachim Münch, SONOTEC GmbH., www.sonotec.de

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Grußwort von Dr. Jens Kosch, Fellow – X-FAB Global Services GmbH, Erfurt

Herzliche Glückwünsche zum 25-jährigen Jubiläum des Instituts, verbunden mit Dank und Anerkennung für ebenfalls 25 Jahre fruchtbarer Zusammenarbeit.

X-FAB bzw. seinerzeit Thesys hat sich schon in der Gründungsphase als wichtiger Thüringer Industriepartner eingebracht, da mit der Gründung die große Lücke der industrienahen Forschungslandschaft für die Mikroelektronik- und Mechatronik-Hersteller und Anwender in Thüringen geschlossen werden sollte. Dies ist – das kann ich aus industrieller Sicht sagen – sehr gut gelungen, ist doch das IMMS unser wichtigster externer Forschungspartner.

Auch persönlich hatte ich die Ehre und das Vergnügen, das Institut von Anfang an zu begleiten, nicht nur in der Rolle des Industriepartners, sondern auch als ehemaliges Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates und später und bis heute als Aufsichtsratsmitglied.

Obwohl das Institut relativ klein ist, ist es doch gelungen, gute Kompetenzen in einem recht breiten Spektrum aufzubauen. Dieses und die räumliche Nähe hat es erst ermöglicht, dass das IMMS der Wunschpartner für sehr viele Projekte wurde, von industrieller Auftragsforschung bis hin zu großen, als Europäische Konsortien geförderten Projekten wie ADMONT.

Menschen machen den Unterschied. In jeder Phase der 25-jährigen Entwicklung waren es die engagierten Menschen, egal ob Forscherinnen und Forscher, Verwaltung oder Geschäftsführer, die das Institut geprägt haben und sehr gut die Bedürfnisse und Ansprüche ihrer industriellen Partner verstanden haben. Viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IMMS haben in den letzten 25 Jahren auch den Weg in die Industrie gefunden. Auch diese Wirkung des Instituts zur Fachkräftegewinnung für die Wirtschaft ist wichtig.

Vor 25 Jahren hatten nur wenige die volkswirtschaftliche Bedeutung der Mikroelektronik wirklich erkannt. Nunmehr ist es auch der breiteren Öffentlichkeit bewusst, welche Hebelwirkung die Mikroelektronik als industrielle Schlüsseltechnologie hat, welche unverzichtbar sie für die technologische Souveränität Europas ist. Sie wird aber auch immer komplexer und wird mit anderen Bereichen wie Mechanik, Optik und bio-chemischen Prozessen kombiniert. Auch dadurch ergeben sich große Chancen



Dr. Jens Kosch, X-FAB Fellow. Foto: X-FAB Global Services GmbH.

und Impulse für das IMMS, Mechatronik- und Mikroelektronik-Forschung noch enger zu verbinden. Die Reflexion der 25-jährigen Geschichte und Erfolge ist schön. Sie ist auch nützlich, wenn man daraus auch die Motivation, das Selbstvertrauen und Leidenschaft für die Gestaltung der Zukunft gewinnt.

Ich wünsche allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IMMS alles Gute für die Zukunft und den Gremien des Instituts eine glückliche Begleitung und Unterstützung.

Dr. Jens Kosch – Fellow – X-FAB Global Services GmbH, www.xfab.com

Grußwort von Geschäftsführer Andreas Krey, Landesentwicklungsgesellschaft Thüringen mbH (LEG Thüringen)



Andreas Krey, Geschäftsführer der Landesentwicklungsgesellschaft Thüringen mbH (LEG Thüringen). Foto: LEG Thüringen / Andreas Pöcking.

LEG und IMMS blicken zurück auf ein Vierteljahrhundert der produktiven und engen Zusammenarbeit. Von den ersten Kooperationen – ich denke an die Etablierung der heutigen Technologieregion Arnstadt-Ilmenau – bis heute gibt es ein kontinuierliches und erfolgreiches Miteinander. So bereichert das IMMS das Wirken verschiedenster Netzwerke und Cluster mit seiner breit gefächerten Kompetenz in unterschiedlichsten Technologiefeldern und ist damit starker Partner unseres Thüringer ClusterManagements (ThCM). Gründungsmitglied war das IMMS unter anderem beim Netzwerk ELMUG eG., und das Institut hat wesentlichen Anteil an der erfolgreichen Entwicklung dieses innovativen Clusters. Von Anfang an war das IMMS ein wichtiger FuE- und Transferpartner für die innovativen Thüringer Unternehmen; sehr bedeutend war sein Wirken vor allem für die vielen Aus- und Neugründungen, die nach der Wende in der Region Ilmenau erfolgten. Das Institut gab zentralen Input für die Profilierung des Freistaats auf dem Felde verschiedener Zukunftstechnologien, beispielhaft sei hier im Bereich der Mechatronik-Systeme die Konzipierung und Fertigung von Antriebstechnik für Nanopositionier- und Nanomessmaschinen genannt.

Ich gratuliere der Mannschaft des IMMS sehr herzlich zum 25-jährigen Bestehen und wünsche dem Institut für die Zukunft weiterhin viel Erfolg!

Andreas Krey, Geschäftsführer der Landesentwicklungsgesellschaft Thüringen mbH (LEG Thüringen), www.leg-thueringen.de

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

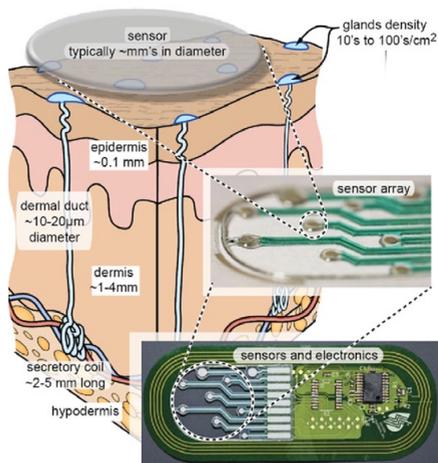
Grußwort von Dr. Andreas Laute,
Product Manager Datacom, Melexis
GmbH, Erfurt

Seit seiner Gründung vor 25 Jahren ist das IMMS ein verlässlicher Partner in vielen geförderten Projekten sowie bei Entwicklungs-Outsourcing-Aktivitäten. Daher ist die Zusammenarbeit mit dem IMMS ein wichtiger Faktor bei der Unterstützung der F&E-Aktivitäten von Melexis. Im Laufe der Jahre waren die meisten unserer Kooperationen auf sehr anspruchsvolle Entwicklungen in der Automobilelektronik ausgerichtet.

In jüngster Zeit hat sich Melexis weiteren Marktsegmenten zugewandt, zum Beispiel der digitalen Gesundheit. In diesem Zusammenhang freuen wir uns sehr über das starke Engagement des IMMS in dem geförderten Projekt „Virograph“. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Biosensor-Elektronik auf Basis von Graphen-Feldeffekttransistoren (G-FETs). Melexis ist als Mitglied des Beirats tätig. Wir glauben, dass die Ergebnisse von „Virograph“ uns helfen können, schneller zu integrierten Lösungen für Biosensoren zu gelangen. Mögliche Anwendungen sind schnelle Selbsttests für Viren, die Erfassung von Umweltbedingungen, die Überwachung des Blutzuckerspiegels und Point-of-Care-Dienste.

Wir freuen uns auf weitere Kooperationen und wünschen dem IMMS alles Gute zum 25-jährigen Bestehen.

Andreas Laute
Product Manager Datacom, Melexis GmbH, Erfurt, Germany,
www.melexis.com



Sensorpflaster zur Überwachung der Elektrolyte im Schweiß, Quelle: Melexis GmbH.

- 22
- > Integrierte Sensorsysteme
 - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - > Mag6D-nm-Direktantriebe
 - > Inhalt
 - * Förderung

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

**Grußbotschaft von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel,
Vorstand, OFFIS e.V., Institut für Informatik,
Oldenburg**

Lieber Herr Sommer,

fast seit Gründung ist mir das IMMS als einer der stärksten Leistungsträger für Themen in der Verbindung von Mechatronik und Mikroelektronik und deren Anwendungen in Deutschland bekannt. Gemeinsam konnten wir spannende und hochrelevante Projekte initiieren und umsetzen. Besonders freue ich mich als Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats, das IMMS ganz nah begleiten und beraten zu dürfen. Dem Institut wünsche ich für die nächsten 25 Jahre weiterhin viel Erfolg, seinem Team viel Freude an der Forschung und uns allen wichtige Beiträge des Instituts für unsere gemeinsame technologische Zukunft.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel, www.offis.de



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel,
Vorstand OFFIS e.V., Institut für Informatik Oldenburg. Foto: OFFIS e.V.

**Grußbotschaft von Prof. Dr. W. Nebel, Prof. Dr. U. Schlichtmann und Dr. J. Haase,
Vorstand des edacentrum**

Von Beginn an stand das fünf Jahre „erfahrenere“ IMMS dem edacentrum als verlässlicher Partner in enger und fruchtbarer Kooperation zur Seite: Unterstützt von der guten persönlichen Beziehung ihrer „Gründerväter“, der Professoren Rößler (IMMS) und Barke (edacentrum), hat das IMMS von Beginn an bis heute die Arbeit des Fachbeirats des edacentrum mitgestaltet. Dabei wurden Strategien für die deutsche Mikroelektronikforschung erarbeitet, die im Anschluss auch in zahlreichen Projekten mit sehr hohem Innovationsgrad der technischen Lösungen sowie kreativen Kooperationskonzepten wie z.B. der Clusterforschung umgesetzt wurden.

Die zahlreichen gemeinsamen, erfolgreichen Verbundprojekte im Bereich der Entwurfsautomatisierung für Elektronik (EDA) waren ein Garant dafür, dass IMMS und edacentrum stets voneinander profitieren konnten. In Projekten wie ANAS-TASIA2, SpeAC, DETAILS, DIONYSYS, HERKULES, HONEY, SYENA, RAPIDMPSOC, ANCONA, MEMS2015, RoMulus oder ganz aktuell VE-VIDES war das IMMS als Kompetenz-



Vorstand des edacentrum: Prof. Dr. Ulf Schlichtmann, Lehrstuhl für Entwurfsautomatisierung, Technische Universität München (TUM); Prof. Dr. Wolfgang Nebel, Abteilung Eingebettete Hardware-/Software-Systeme im Department für Informatik der Universität Oldenburg, Vorstandsvorsitzender des OFFIS Institut für Informatik; Dr. Jürgen Haase, Geschäftsführer der edacentrum GmbH. Fotos: edacentrum.

träger rund um die Verbindung von Mechatronik und Mikroelektronik und deren Anwendungen ein wertvoller Partner, der seinerseits vom umfassenden Netzwerk des edacentrum und dessen Verbindungen in die Mikroelektronik-Industrie und deren Anwendungen profitieren konnte. Das IMMS hat dabei stets die Rolle als DAS prägendste Institut für MEMS und deren Anwendungen übernommen und hat mit herausragenden Innovationen aufgewartet. Exzellenz und Praxisrelevanz der Forschungsarbeiten des IMMS wird nachdrücklich dadurch belegt, dass mit Prof. Dr. Ralf Sommer und Georg Gläser gleich zwei Wissenschaftler des IMMS den jährlich ausgelobten EDA-Achievement-Award erhalten haben, der vom edacentrum für hervorragende EDA-Forschungsergebnisse mit hoher praktischer Relevanz verliehen wird.

Neben dieser erfolgreichen Zusammenarbeit in Projekten haben IMMS und edacentrum aber auch bei der Gestaltung von Veranstaltungen gemeinsam neue innovative Wege beschritten. So haben IMMS und edacentrum zusammen mit dem OFFIS – Institut für Informatik die Veranstaltungsserie „edaBarCamp“ ins Leben gerufen und Deutschlands erste als „BarCamp“ organisierte „Unkonferenz“ im Bereich der Entwurfsautomatisierung für mikroelektronische und eingebettete Systeme durchgeführt. Das neue Veranstaltungsformat nutzt intensiv neue Kommunikationsmethoden der „Social Media“, was insbesondere für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler die bevorzugten Kanäle sind. Dank der organisatorischen und inhaltlichen Unterstützung des IMMS war das erste „edaBarCamp“ so erfolgreich, dass inzwischen fünf solche Veranstaltungen an verschiedenen Standorten in Deutschland stattfanden, eines davon beim IMMS in Erfurt.

Zum 25-jährigen Jubiläum gratuliert das edacentrum dem IMMS ganz herzlich und wünscht dem Institut mit seinem hochkompetenten und engagierten Team bei der

Einschätzung und Gestaltung der Forschungsthemen der Zukunft weiterhin so viel Erfolg und Geschick wie bisher und noch ein Stück darüber hinaus. Wir freuen uns auf mindestens 25 weitere Jahre erfolgreicher Kooperation!

Prof. Dr. W. Nebel, Prof. Dr. U. Schlichtmann, Dr. J. Haase,
Vorstand des edacentrum, www.edacentrum.de

Grußwort vom Team der X-FAB Global Services GmbH, Erfurt

X-FAB sagt Danke & wünscht alles Gute für die nächsten 25 Jahre!

Das Team von X-FAB gratuliert ganz herzlich zum Jubiläum. Die Kolleginnen und Kollegen in der Collage stehen stellvertretend für viele weitere, die im vergangenen Vierteljahrhundert die Gelegenheit hatten, zusammen mit den Kollegen vom IMMS an spannenden Forschungs- und Industrialisierungsprojekten zu arbeiten. Wir sind stolz auf das gemeinsam Erreichte und froh, einen so innovativen und verlässlichen Partner an unserer Seite zu haben. Macht weiter so!

www.xfab.com

Im Bild von links oben: Tina Zimmermann, Detlef Sommer, Markus Ackermann, Antje Zimmermann, Melanie Wilhelm, Jörg Doblaski, Uwe Schwarz, Klaus Heinrich, Roberto Gärtner, Lars Bergmann, Marc Schuchart, Daniel Gäbler, Anja Noack, Pierre Rollberg, Alexander Zimmer, Gabriel Kittler.





GRUSSWORT



25 Jahre Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme

Ein guter Anfang

„Die beste Möglichkeit, die Zukunft vorherzusagen ist, sie zu erfinden.“ Alan Kay

Durch kontinuierliche Innovationstätigkeit sind Unternehmen in der Lage, sich in rasant verändernden Märkten nachhaltig zu behaupten. Innovationen sind der Motor wirtschaftlichen Fortschritts – heute mehr denn je – und bedürfen einer fundierten wissenschaftlichen Basis, auch in unserer vom Mittelstand geprägten Südthüringer Wirtschaftsregion. Hier, wo unternehmenseigene Entwicklungs- oder gar Forschungsabteilungen Seltenheitswert haben.

Und so freut es mich ganz besonders, Ihnen im Namen der Industrie- und Handelskammer Südthüringen zum 25-jährigem Bestehen Ihres Instituts gratulieren zu dürfen. 25 Jahre, in denen zukunftsfähige Forschungsergebnisse in markt- und margenfähige Anwendungen und Produkte überführt wurden und ein wesentlicher Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung unserer Region geleistet wurde. Tatsächlich: ein guter Anfang.

Strukturwandel, Digitalisierung und Fachkräftebedarf: nur einige Herausforderungen, welche es in der Zukunft zu meistern gilt. Dabei wird die Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft eine elementare Rolle einnehmen. Hierfür wünsche ich Ihnen und Ihrem Team alles erdenklich Gute und viel Erfolg. Auf eine weiterhin sehr gute Zusammenarbeit.

Dr. Ralf Pieterwas
Hauptgeschäftsführer der IHK Südthüringen

1/1

Industrie- und Handelskammer Südthüringen
Bahnhofstraße 4 – 8 / 98527 Suhl / Tel. +49 3681 362-0 / Fax +49 3681 362-100
info@suhl.ihk.de / www.suhl.ihk.de

Grußwort der Finanzministerin Heike Taubert anlässlich des 25-jährigen Bestehens der IMMS GmbH (Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH)

„Stolz, dass ein Teil Hightech auch aus Thüringen kommt!“



Sehr geehrter Herr Prof. Dr.-Ing. Sommer,
sehr geehrter Herr Eberhardt,
sehr geehrter Herr Fetter,
sehr geehrte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der IMMS GmbH,

ich gratuliere Ihnen herzlich zu 25 Jahren IMMS in Thüringen und danke Ihnen für Ihre großartige Forschungsarbeit in den vergangenen Jahren. Ich bin sehr stolz, dass ein Teil Hightech auch aus Thüringen kommt. Sie entwickeln Techniken, die zukunftsweisende Impulse setzen und moderne Forschung voranbringen. Das zeigt ganz aktuell zum Beispiel Ihr großes Engagement für die Entwicklung von miniaturisierter Messtechnik für eine neue Technologieplattform zum Nachweis von SARS-COV-2. Das IMMS ist nicht nur Wegbereiter für neuartige Automatisierungstechniken für die Fertigungs- und Metallverarbeitungsindustrie, KI-Verfahren oder Chip-Design, sondern vor allem auch ein zuverlässiger Partner für kleine und mittlere Unternehmen im Freistaat.

Die Entwicklung von Fahrzeug- und Maschinensystemen, Industrie- und Telekommunikationsanlagen oder die intelligente Vernetzung von Mess- und Testsystemen wird immer anspruchsvoller. Unternehmen wollen heute kosten- und energieeffizient, sicher und funktional arbeiten. Dafür benötigen sie Ihre Hilfe, denn Sie kennen sich aus mit der digitalen Transformation von Unternehmensprozessen für den Mittelstand. Ihre Arbeitsergebnisse kommen in der Praxis an. Durch Ihr Knowhow und mit Ihrer Technik können die Unternehmen komplexe Automatisierungslösungen realisieren und Unternehmensprozesse effizienter gestalten.

Als Finanzministerin freue ich mich besonders, dieses Jubiläum mit Ihnen feiern zu können. Ich danke Ihnen für Ihre starken Leistungen in den vergangenen 25 Jahren und wünsche Ihnen für die Zukunft alles Gute, weiter frische Ideen und Begeisterung für Ihre innovative Arbeit.

Herzlichst Ihre

Heike Taubert
Thüringer Finanzministerin

In Erfurt 1991 gegründet, ist microsensys GmbH heute eines der innovativsten und flexibel agierenden RFID-Unternehmen in Europa. Die große Bandbreite an smarten ID-Produkten und die vorhandene große Fertigungstiefe vom Sensortransponder über Gateway, Systemsoftware bis zur Datenkonfektionierung öffnen den effizienten Zugang zur IoT-Welt.

Im Rahmen mehrerer Projekte arbeiteten wir mit dem IMMS-Forschungsteam seit Jahren eng und konstruktiv zusammen. Im Laufe unserer Kooperation haben wir das IMMS-Team als kompetenten Partner kennengelernt und schätzen die Innovationsfreudigkeit, die eine hervorragende Grundlage für technologisch anspruchsvolle Entwicklungen bietet. Das IMMS-Forschungsinstitut stellt für uns einen innovativen regionalen Technologiepartner dar, der uns bei der Umsetzung von Entwicklungsaufgaben im Bereich ASIC-Design, aber auch koordinierend bei der Durchführung von industriellen und öffentlich geförderten Projekten unterstützen kann. Wir freuen uns – aufbauend auf den bisherigen Entwicklungserfolgen – auch zukünftig gemeinsam anspruchsvolle Problemstellungen zu lösen.

Wir gratulieren allen Mitarbeitern und unseren Projekt-Kollegen vom Institut für Mikroelektronik und Mechatronik Systeme zum 25. Jubiläum und nehmen dies gerne zum Anlass, Ihnen für die langjährige Zusammenarbeit sowie das große Engagement bei der Durchführung mehrerer erfolgreich abgeschlossener Projekte zu danken.

Wir wünschen Ihnen weiterhin viel Erfolg auf dem eingeschlagenen Weg sowie Innovationskraft für kommende Entwicklungen und öffentliche Forschungsprojekte, die einen effizienten und schnellen Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ermöglichen, und somit das Gesellschaftsleben positiv beeinflussen.



microsensys Team

www.microsensys.de

Mehr zu 25

Jahren IMMS auf

www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

Grußbotschaft von Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Leiter des Fraunhofer-Institutes für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

Licht ist ein vielseitig einsetzbares Werkzeug. Seine Potenziale, um als Grundlage innovativer Technologien zur Lösung relevanter Zukunftsfragen beizutragen, sind dabei noch lange nicht ausgeschöpft. Ganz im Gegenteil: Die

sogenannte »zweite Quantenrevolution«, die die gezielte Manipulation einzelner Lichtteilchen als ihr wesentlichstes Werkzeug nutzt, entwickelt eine immer stärkere Dynamik und zieht immer größere Kreise in ihrer Relevanz für Gesellschaft, Industrie und Wirtschaft. Hier sieht sich die Photonik, als Wissenschaft des Lichts, als zentrale Wegbereiterin für den Schritt der grundlegenden Quantenexperimente hinaus aus den Laboren hin zu marktreifen Anwendungen. Um diesen Weg letztlich erfolgreich beschreiten zu können, braucht es eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit vieler Forschungsfelder. Die Komplexität und Anforderungen, die auf Seite der Endnutzer an Quantenanwendungen gestellt werden, kann von einer Wissenschaftsdisziplin allein nicht bewältigt werden.

Aus diesem Grund brauchen Forschungseinrichtungen wie das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena starke Partnerinnen und Partner für die Entwicklung anwendungsorientierter Quantensysteme. Ein bedeutender Wegbegleiter für uns ist hier seit vielen Jahren das IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme aus Ilmenau. In den letzten 25 Jahren hat sich das Institut als standfeste Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft etabliert und trägt damit dazu bei, die Forschung in konkrete Anwendungen für Wirtschaft und Industrie zu übertragen. Das IMMS ist mit seinem Knowhow in den Bereichen Mikroelektronik, Systemtechnik und Mechatronik ein fortwährender Katalysator des Transferprozesses, den auch die Anwendungen der zweiten Quantenrevolution für sich anstreben.

Das Fraunhofer IOF blickt deshalb voller Zuversicht auf das nächste große gemeinsame Vorhaben, das die beiden Institute in Kooperation mit anderen Thüringer Einrichtungen realisieren werden: Im Rahmen des »Quantum Hub Thüringen«, einem



Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Leiter des Fraunhofer-Institutes für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF. Quelle: Max Planck School of Photonics.

Thüringer Forschungsnetzwerk für Quantentechnologien, wird ein Feed-Forward-System für die hochsichere Quantenkommunikation entstehen. Hier bringt das IMMS seine Kompetenzen im Bereich der Entwicklung optoelektronischer Sensorik ein und trägt somit nicht nur zum Gelingen dieses speziellen Projektes, sondern langfristig betrachtet auch zu einer Entwicklung relevanter Quantentechnologien in einem globalen Maßstab bei.

Ohne den reichen Erfahrungsschatz des IMMS aus mehr als 850 erfolgreich abgeschlossenen Projekten wären solche bahnbrechenden gemeinsamen Vorhaben nicht möglich. Das Fraunhofer IOF gratuliert dem IMMS und seinen Mitarbeitenden daher herzlich zu seinem 25-jährigen Bestehen und bedankt sich für die stets guten und erfolgreichen Kooperationen! Voller Freude richten wir den Blick auf die nächsten 25 Jahre der gemeinsamen Zusammenarbeit.“

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Leiter des Fraunhofer-Institutes für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

www.iof.fraunhofer.de

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

Mehr zu 25
Jahren IMMS auf
www.imms.de



Damir Redžepagić, IC Architect, ArtIC Solutions.
Foto: ArtIC Solutions.

Damir Redžepagić, ArtIC Solutions

„Die Entwicklung integrierter Schaltungen und die Umsetzung von Lösungen auf der Grundlage von Halbleitertechnologien ist ein sehr anspruchsvolles Unterfangen. Die Halbleiterindustrie und die Technologien entwickeln sich in einem unglaublichen Tempo weiter und mit den Veränderungen Schritt zu halten, kann durchaus eine entmutigende Aufgabe sein. Um die Erfolgchancen zu erhöhen, sind die Halbleiterunternehmen gezwungen, schnell die richtige Lösung für den Markt zu entwickeln – und diese Lösung muss auf Anhieb richtig sein.“

Wie schafft man nun die richtige Lösung für den Markt? Die Antwort auf diese Frage ist recht einfach: indem man zuhört und die Bedürfnisse der Kunden versteht. Und wie schafft man auf Anhieb die richtige Lösung? Die Antwort auf diese Frage ist ebenfalls recht einfach: keine Fehler machen. Dazu braucht man Erfahrung.

Das IMMS ist das Unternehmen, bei dem wir sowohl Erfahrung als auch den Fokus auf das Verstehen der Kundenbedürfnisse gefunden haben. Die Erfahrung in den Bereichen digitales IC-Design, Synthese, Place & Route, Verifikation und Sign-Off unter Verwendung modernster Tools und Methoden macht das IMMS zu einem hervorragenden Partner bei der Entwicklung von integrierten Mixed-Signal-Sensoren. Wir schätzen auch die proaktive Einstellung, die Flexibilität, die schnelle Reaktionsfähigkeit und den sehr angenehmen Umgang, die wir beim IMMS und den IMMS-Mitarbeitern vorgefunden haben.

Wir bedanken uns für die tolle Zusammenarbeit.“

www.art-ic-solutions.com

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

Zur Dienstleistung Integrierte Schaltungen:
www.imms.de

Mehr Stimmen aus der Industrie:
www.imms.de



ARTIC
The Art Of Integration

Alexander Zimmer,

X-FAB Global Services GmbH, Erfurt

„Seit mehreren Jahren sind wir bei der Entwicklung von neuartigen Einzelphotonendetektoren, sogenannten SPADs, aktiv. Dabei sind die Spezifikation und die Charakterisierung dieser Detektoren eine große Herausforderung. Das IMMS konnte uns aufgrund seiner jahrelangen Erfahrung im Bereich Messtechnik und dem Schaltungsdesign für optische Sensoren wertvolle Unterstützung anbieten. Neben den Möglichkeiten der Methodikentwicklung spielt die Systemintegration bei SPADs eine große Rolle. Zusammen konnten Bereiche identifiziert werden, in denen eine gemeinsame Entwicklung für diese spezielle Art von Sensoren Anwendung findet. So konnte das Know-how von X-FAB-Technologie mit der IMMS-Expertise in Schaltungsdesign und Charakterisierung vereint werden.

Die zuverlässige Arbeit und die vertrauensvolle Partnerschaft ist eine hochgeschätzte Basis für die Zusammenarbeit mit dem IMMS. In der Vergangenheit haben wir bereits sehr gute Erfahrungen in diversen Projekten mit dem IMMS machen können. Für die SPAD-Sensoren konnten wir somit schnell neue Felder und Anwendungen ausmachen, bei denen eine gemeinsame Entwicklung für beide Seiten lohnend ist. Insbesondere stellt die Entwicklung des SPAD-Evaluierungskits einen Meilenstein in unserer Kooperation dar. Aufbauend auf diesem Erfolg möchten wir die Zusammenarbeit auch in Zukunft fortführen.

Über die Einzelphotonendetektoren hinaus haben wir perspektivisch weitere Projekte und Schnittstellen ausmachen können, durch die wir mit dem IMMS thematisch tiefer zu neuen Lösungen vordringen möchten.

Insbesondere der Enthusiasmus sowie die pragmatische und kreative Art und Weise, an neue Entwicklungen heranzugehen, sind Eigenschaften, die ich besonders hervorheben möchte. Auch die intrinsische Motivation, Dinge stetig weiterzuentwickeln, Messmethodiken und Parametern auf den Grund zu gehen sowie die Zusammenhänge zu verstehen, sind positive Eigenschaften, von denen unsere Partnerschaft profitiert.“

www.xfab.com



Alexander Zimmer, Master of Engineering, Principal Engineer Process Development OPTO, X-FAB Global Services GmbH, Erfurt. Foto: X-FAB.

32

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

*Dienstleistung
Charakterisierung und Test:
www.imms.de*

*Mehr Stimmen
aus der Industrie:
www.imms.de*

xfab

Jahresbericht
© IMMS 2021



Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder, Fachgebietsleiter Daten-intensive Systeme und Visualisierung (DAISY), Institut für Praktische Informatik und Medieninformatik, Technische Universität Ilmenau.

Foto: arifoto UG.

Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder, Technische Universität Ilmenau

„Unser Fachgebiet für Daten-intensive Systeme und Visualisierung (dAI.SY) am Institut für Praktische Informatik und Medieninformatik an der Technischen Universität Ilmenau und das IMMS haben in der Thüringer Forschergruppe IntelligEnt zusammengearbeitet, um die Entwurfsautomatisierung für integrierte Schaltungen und Systeme durch den Einsatz von Algorithmen des maschinellen Lernens zu verbessern.

*Mehr zur
Forscherguppe
IntelligEnt:
www.imms.de*

Gemeinsam mit dem IMMS haben wir für den Entwurf von Analog-/Mixed-Signal-Schaltungen eine Schaltungsverarbeitung durch lernende Algorithmen realisiert. Integriert in die Entwurfssoftware werden Algorithmen eingesetzt, um den Schaltungsentwickler durch neuartige Funktionen wie der Erkennung untypischer Strukturen während des Entwurfsprozesses zu unterstützen. Die dafür entwickelte Schaltungsrepräsentation und das entwickelte Lernverfahren ermöglichen es, dass neuronale Netzwerke die Funktion von Schaltungsblöcken implizit lernen können. Darüber hinaus hat das IMMS auf der Basis unserer KI-Unterstützung neue Lösungen für die Modellierung, das Layout, die Simulation und Verifikation sowie für Test und Charakterisierung integrierter Schaltungen entwickelt.

*Kernthema KI-
basierte Ent-
wurfs- und Test-
automatisierung:
www.imms.de*

Neben der Entwurfsautomatisierung haben wir gemeinsam mit dem IMMS ein Verfahren für die Machine-Learning-gestützte Messdatenanalyse für ASICs entwickelt. Unsere entwickelte Methode analysiert umfangreiche und zahlreiche Signalverläufe selbstständig auf potentielle und unbekannte Fehler und erstellt automatisch Gruppen zusammenhängender Fehlertypen. Praxistests mit industriellen Partnern

ergaben eine zehn- bis 30-fache Verringerung des sonst enormen Zeit- und Kostenaufwands für die Analyse von Messdaten.

Es war für uns eine große Freude zu sehen, mit welcher Zielstrebigkeit und mit welchem Engagement die Kollegen vom IMMS mit ihrem fundierten Anwendungs-Know-how daran gearbeitet haben, die von uns erforschten Methoden und Werkzeuge und das immense Potential des maschinellen Lernens für den Mikroelektronik-Entwurf zu erschließen. Dafür hat das IMMS Anforderungen und Datensätze aus der Industrie genutzt, die von Unternehmen des projektbegleitenden Beirats beigesteuert wurden. Es konnte daran die Methoden nicht nur validieren, sondern auch deren großen Nutzen erfolgreich demonstrieren. Für uns zeigt die Kooperation, wie wichtig das IMMS für einen Ergebnistransfer von der Grundlagenforschung in die Praxis ist. Dazu trägt aus unserer Sicht neben dem tiefen fachlichen Verständnis auch die lösungsorientierte, agile und kollegiale Arbeitsweise bei.

Darüber hinaus haben wir gemeinsam mit dem IMMS am Softwareprojekt AnoPCB gearbeitet. Dort haben von uns gemeinsam betreute Studenten auf der Grundlage der IntelligEnt-Ergebnisse zum Schaltungs-Layout ein Plugin für die PCB-Entwurfssoftware KiCad entwickelt. Die Lösung wurde vom IEEE Council on Electronic Design Automation (CEDA) mit dem EDA Competition Award für Nachwuchswissenschaftler ausgezeichnet. Dieser Erfolg beim Wettbewerb anlässlich der internationalen Konferenzen zu Methoden für den Entwurf integrierter Schaltungen SMACD 2021 und PRIME 2021 macht deutlich, mit welcher Schubkraft das IMMS Nachwuchsförderung mit Forschung und Entwicklung verbindet.

Wir zählen auf eine weiterhin gute gemeinsame Betreuung von Studentinnen und Studenten und freuen uns auf die nächste Gelegenheit zur Zusammenarbeit bei F&E-Themen zur elektronischen Entwurfsautomatisierung und KI.“

schiedliche Varianten der Bewässerung und zwei Varianten Mulchabdeckung erfassen. Das IMMS hat uns die Messdaten über eine Anbindung an unseren Server für unsere Versuche bereitgestellt und grafisch aufbereitet. Bereits der alleinige Einsatz von Bodenfeuchtesensoren lieferte uns entscheidende Informationen, um gegenüber festen Bewässerungsintervallen oder einer Bewässerung nach aktuellem Standardmodell Einsparungen zu erreichen. Dafür hat das IMMS für uns auch die Eignung unterschiedlicher Bodensensoren für diesen Anwendungsfall untersucht. Das ist für unsere Handlungsempfehlungen für Obstbauern wichtig, zumal es für die Sensoren auch deutliche Preisunterschiede gibt.

Wir haben das IMMS als zuverlässigen und proaktiven Partner erlebt, der unsere Perspektive eingenommen und daraus zielführende Lösungen realisiert hat und immer offen für neue Impulse ist. So hatten wir z.B. in unseren Treffen, die ich immer als sehr konstruktiv und zielführend empfinde, weitere Einsparpotenziale diskutiert, die wir erreichen könnten, wenn wir neben abiotischen Größen auch Informationen über die Pflanze selbst nutzen könnten. Daraufhin hat das IMMS einen Sensor zur Messung des Fruchtwachstums entwickelt, um diesen zukünftig in das bestehende System zu integrieren. Damit können wir perspektivisch die unterschiedlichen Phasen der Fruchtentwicklung erkennen und immer dann bewässern, wenn es der Fruchtqualität zugutekommt. All diese Ergebnisse, die sehr gute Zusammenarbeit, für die ich mich herzlich bedanke, und die vielen neuen Ideen wollen wir künftig in gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten weiterverfolgen.“

<https://tllr.thueringen.de/wir/gartenbau>



Landesamt für
Landwirtschaft und
Ländlichen Raum

36

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

Leitanwendung
IoT-Systeme für kooperatives Umwelt-Monitoring:
www.imms.de

Mehr Stimmen aus der Forschung:
www.imms.de



Heinz-Wolfgang
Lahmann,
Geschäftsbereichs-
leiter Messtechnik/
Prüfstandsba-
u, -entwicklung, GFE
– Gesellschaft für
Fertigungstechnik
und Entwicklung
Schmalkalden e.V.

Foto: GFE.

Heinz-Wolfgang Lahmann, GFE – Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.

„Wir als GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V. sind eine industrienaher Forschungseinrichtung, die unseren Kunden Komplettlösungen rund ums Werkzeug anbietet. Seit über 30 Jahren entwickeln wir gemeinsam mit unseren Partnern Produkt- und Technologielösungen für Unternehmen und gehen dabei gleichzeitig praxis- und bedarfsorientiert in der Umsetzung vor. Wir verfügen dafür über ein großes Partnernetzwerk und sind in jedem Jahr in zahlreichen Forschungs-, Entwicklungs- und Industrieprojekten tätig. Im Zuge dessen pflegen wir auch langjährige Beziehungen mit dem IMMS. Als Partner im Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau und im neuen Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau unterstützen GFE und IMMS gemeinsam schon seit mehr als sechs Jahren KMU bei ihrer digitalen Transformation.“

*Mehr zu Mittel-
stand Digital in
diesem Bericht*

Bei der Digitalisierung spielt zunehmend Künstliche Intelligenz (KI) eine wichtige Rolle. Aus unserer Sicht verfügen KI-Technologien auch bei Zerspanungsprozessen und den zugehörigen Werkzeugen große Anwendungspotenziale. Kombiniert mit geeigneten Sensorsystemen und prozessnahen Datenverarbeitungssystemen ermöglichen sie beispielsweise Lösungen zur prozessbegleitenden Qualitätssicherung bei der Präzisionsmetallbearbeitung oder für Verschleißprognosen bei Zerspanungswerkzeugen.

*Mehr zum
KIQ-Projekt in
diesem Bericht*

Wir sind daher auf das IMMS mit seiner Expertise bei der Entwicklung und Anwendung von intelligenten Sensorsystemen, eingebetteten Elektroniklösungen und KI zugegangen, um im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten und Umsetzungsprojekte die Randbedingungen und konkrete Lösungsansätze für den Einsatz von KI in dieser Domäne zu untersuchen. Neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen entstanden dabei auch Demonstratoren, die KMU einen praxisnahen Einblick in die Möglichkeiten von KI vermitteln können.

Bei der Zusammenarbeit mit dem IMMS schätzen wir besonders das Fachwissen im Bereich der Sensordatenerfassung und -verarbeitung, die hohe Anwendungsorientierung der Lösungen und die konstruktiven Kontakte mit den Mitarbeitenden – nicht zuletzt auch bei den gemeinsamen Arbeiten vor Ort an Maschinen und Ausrüstungen. Wir stehen im stetigen Austausch mit dem IMMS und entwickeln dabei immer wieder neue Ideen und Ansatzpunkte für den Einsatz aktueller digitaler Technologien und insbesondere von KI bei Werkzeugen und Werkzeugmaschinen. Wir freuen uns, gemeinsam die nächsten Themen angehen zu können.“

www.gfe-net.de



GFE – Gesellschaft für
Fertigungstechnik und Entwicklung
Schmalkalden e.V.

38 ○

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

Leitanwendung Adaptive Edge-KI-Systeme für industrielle Anwendungen:
www.imms.de

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 2021 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

IntelligEnt*: EDA Competition Award für intelligente Layoutverarbeitung

Ein Team aus acht Studenten, Doktoranden und Forschern der TU Ilmenau und des IMMS gewann am 22. Juli 2021 den EDA Competition Award des IEEE Council on Electronic Design Automation (CEDA) zum Wettbewerb anlässlich der internationalen Konferenzen zu Methoden für den Entwurf integrierter Schaltungen SMACD 2021 und PRIME 2021. In der gemeinsamen Forschergruppe IntelligEnt wurde eine KI-basierte Anomalie-Erkennungsmethode entwickelt, die nicht nachgewiesene und potenziell fehlerhafte Stellen in Layouts automatisch erkennen kann. Mit dem prämierten Plugin für das kostenlose Leiterplattenentwurfswerkzeug KiCad können Signale in KiCad kategorisiert und in den Trainings- oder Bewertungsprozess übernommen werden.

[Mehr zum](#)[Award in](#)[diesem Bericht](#)[Mehr zu](#)[IntelligEnt auf](#)[www.imms.de.](#)

Quantum Hub Thüringen*: IMMS erforscht CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

Gemeinsam mit der TU Ilmenau und neun weiteren Thüringer Partnern forscht das IMMS seit 2021 an Quantentechnologien, die die Leistungsfähigkeit konventioneller Systeme weit übertreffen können und disruptive Anwendungen ermöglichen. Das IMMS erforscht dabei den Einsatz von Einzelphotonendetektoren (SPAD), die in einer Standard-Halbleitertechnologie (CMOS) gefertigt werden. Sie werden zur Wandlung einzelner Photonen in elektrische Signale eingesetzt und erlauben einen Betrieb bei Raumtemperatur ohne große und aufwändige Kühlsysteme.

[QuantumHub](#)[Thüringen auf](#)[www.imms.de](#)

thurAI*: Sensorik für SmartCity und Methoden, Daten im Netz für KI-Auswertungen intelligent aufzubereiten

In thurAI arbeiten die TU Ilmenau, die FSU Jena und das IMMS seit 2021 an aktuellen Lösungen in den drei Bereichen Smart City, Gesundheitswesen und Medizintechnik sowie Produktions- und Qualitätssicherung. Das IMMS und die TU Ilmenau werden zusammen mit der Stadt ein „LivingLab“ in Ilmenau realisieren. Kern sind dabei Daten, die für unterschiedlichste KI-basierte Dienste im SmartCity-Kontext benötigt werden. Das IMMS wird zum einen Sensorik für die Erfassung unterschiedlicher Parameter auswählen und erproben. Zum anderen geht es um die Bereitstellung „smarter Daten“ durch geeignete Vorverarbeitungsmechanismen am Sensorknoten selbst oder im nachgelagerten Netz für die erleichterte Anwendung von KI-Algorithmen.

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

Bis 2026 arbeiten 13 Doktoranden, darunter einer am IMMS, in Phase II des von der DFG geförderten NanoFab-Graduiertenkollegs 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.

IMMS als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“*

Das IMMS gibt als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ 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.

Im Wachstums-kern 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.

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

Gemeinsame Nachwuchsförderung

Das IMMS ergänzt nicht nur die Lehre an der TU durch umfangreiche Praxisangebote. Auch einige Lehrveranstaltungen werden von IMMS-Mitarbeitern gegeben. Darüber hinaus 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.

Mehr zu
HIPS auf
www.imms.de.
Praxisangebote
fürs Studium:
www.imms.de



Jun Tan hat am 18.02.2021 seine am IMMS erarbeitete Dissertation "Design Methodology and Implementation of Fully Passive RFID SoC with Temperature Sensor" erfolgreich an der Technischen Universität Ilmenau verteidigt. Foto: IMMS.

Wissenschaftlicher Nachwuchs hat bei uns höchste Priorität. Wir fördern vor allem Studentinnen und Studenten der Ingenieurwissenschaften und verwandter Fachrichtungen und betreuen u.a. Fachpraktika, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen. Für den Nachwuchs bietet unsere Vernetzung mit der Industrie die Chance auf praxisnahe Themen und ergebnisorientiertes Arbeiten. So wird theoretisch fundiertes Methodenwissen vermittelt und dieses frühzeitig mit der praktischen Umsetzung in Anwendungen verknüpft. Für die Grundlagenausbildung halten wir auch Lehrveranstaltungen u.a. an der Technischen Universität Ilmenau. Zudem bieten wir Trainingskurse und Firmenbesichtigungen an. Auch Schülerinnen und Schüler bekommen bei Events und Praktika Einblicke in die Arbeiten bei uns oder werden von uns bei Facharbeiten betreut.

Wir begleiten beispielsweise Angebote zur Sommeruni der TU Ilmenau und organisieren regelmäßig BarCamps zum Thema elektronische Designautomatisierung. An diesen interaktiven und offenen Forschungstreffen nehmen auch Studentinnen und Studenten teil. Unsere international wettbewerbsfähige Infrastruktur nach industriellem Standard für Entwurfsunterstützung und Labortechnik für elektronische und mechatronische Systeme steht auch für studentische Forschungsarbeiten zur Verfügung.

*Praktika,
BSc/MSc/HiWi-
Themen auf
www.imms.de*

Hani Abdullah, M.Eng., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Nach meiner Abschlussarbeit „Entwicklung von Kernbaugruppen für einen universellen UHF-RFID-Sender und 4-Kanal-Empfänger“ an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena bei Prof. Ludwig Niebel habe ich Kontakt mit Eric Schäfer vom IMMS aufgenommen. Ich kannte das IMMS von meinem betrieblichen Betreuer Prof. Johannes Trabert. Eric hatte großes Interesse an dem RFID-Thema meiner Arbeit und hat mir das Institut und die Projekte vorgestellt. Es gab viele interessante Fragen zu RFID-Transpondern und Ultra-Low-Power-Applikationen, die ich dort erforschen wollte. Im offiziellen Vorstellungsgespräch konnte ich dann meine zukünftigen Kollegen kennenlernen und mir gut vorstellen, am IMMS anzufangen. Denn wir sind gleich in die Diskussion zu kontaktloser Datenübertragung, Fernfeldkommunikation und vor allem zum RFID-Thema eingestiegen und es war wie ein Brainstorming für neue Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Seitdem arbeite ich mit in einem Projekt, in dem sich alles um das Thema RFID dreht. Ziel ist es, integrierte Sensorsysteme zu bauen, die mit extrem wenig Energie auskommen und mit denen somit batterielose RFID-Sensor-Transponder-Systeme entwickelt werden können. Damit werden viele IoT- und Industrie-4.0-Anwendungen überhaupt erst möglich, wo viele kleine Sensoren genutzt und nicht gewartet werden sollen.

Seit Anfang 2020 bin ich am IMMS und mein Arbeitsschwerpunkt liegt auf der Applikation und Verifikation von Mixed-Signal-ASICs vor allem für RFID-Transponder.



Hani Abdullah,
M.Eng., wissenschaftlicher Mitarbeiter
im Themenbereich
Mikroelektronik am
IMMS in Erfurt.

Foto: IMMS.

Praktika,
BSc/MSc/HiWi-
Themen auf
www.imms.de

Mehr Stimmen
aus dem IMMS:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

Dort habe ich einen Testaufbau für batterie lose RFID-Sensor-Transponder-Systeme entwickelt. Mit diesem kann man unsere passiven UHF-RFID-Transponder zusammen mit kommerziellen, oft stromhungrigen Sensoren testen und charakterisieren. Diese Erkenntnisse sind in die neuen Chip-Entwicklungen für passive UHF-RFID-Sensoranwendungen eingeflossen. Es ist sehr schön, wenn man einen Beitrag zu völlig neuen und sehr anspruchsvollen Lösungen leisten kann.

Es macht mir sehr viel Spaß, hier in einem Team zu arbeiten, in dem man offen diskutieren und seine Ideen austauschen kann. Das und die flachen Hierarchien sind mir eine große Freude und ich denke gerne an den nächsten Arbeitstag. Nicht nur das! Die Projekte, die wir am IMMS haben, sind nicht nur wichtig, um die Unternehmen mit Innovationen zu unterstützen. Vielmehr arbeiten wir an Lösungen, von denen unsere Gesellschaft profitieren kann. Das motiviert mich ungemein, weil ich etwas beitragen will für eine bessere Gesellschaft.“

Jakob Hampel, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Mit dem Ziel, das Fachpraktikum im Ingenieurinformatik-Studium abzulegen, wurde ich durch den Tag der offenen Tür sowie durch die Vorlesungen von Prof. Sommer auf das IMMS aufmerksam. Am Themenbereich für Industrielle Elektronik und Messtechnik am IMMS entwickelte ich eine Software zur automatischen Auswertung, Visualisierung und Reportgenerierung aus den durch den Wafertest entstehenden Messdaten.

Unmittelbar nach dem Abschluss des Fachpraktikums begann ich mit der Bearbeitung der Bachelorarbeit – ebenfalls am IMMS. Dabei wurde eine FPGA-Konfiguration zur Auswertung eines Einzelphotonendetektors entwickelt. Obwohl ich auf dem sehr interessanten Gebiet der FPGA-Entwicklung nur wenig Vorkenntnisse hatte, konnte ich dank der Betreuung durch Prof. Töpfer und der Hilfe der Kollegen am IMMS wichtige Kenntnisse erlangen und eine gute Bachelorarbeit einreichen. Anschließend konnte ich im Rahmen der HiWi-Tätigkeit das in der Bachelorarbeit Gelernte weiter vertiefen und in der folgenden Masterarbeit ein fortgeschrittenes FPGA-Thema bearbeiten.

Die Hilfsbereitschaft der Kollegen im Themenbereich IEM, insbesondere bei dem Aufbau von Analogschaltungen und bei der Bedienung der teils sehr komplexen

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

Praktika,
BSc/MSc/HiWi-
Themen auf
www.imms.de

Mehr Stimmen
aus dem IMMS:
www.imms.de



Jakob Hampel, M.Sc.,
wissenschaftlicher
Mitarbeiter im
Themenbereich
Industrielle Elektro-
nik und Messtechnik.

Foto: IMMS.

Messgeräte spielte für den erfolgreichen Abschluss der Bachelor- und Masterarbeit eine große Rolle.

Das in der Masterarbeit entstandene, vollständig auf dem FPGA integrierte System zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung ergab nicht nur einen sehr guten Masterabschluss, sondern wurde auch zu einem fertigen Produkt für die X-FAB in Form des SPAD-EvalKits weiterentwickelt und wird weiterhin in vielfältigen Messungen eingesetzt. Durch die Betreuung am IMMS und die Möglichkeiten, immer Neues zu lernen, konnte ich meine Fähigkeiten auf einem sehr interessanten Themenbereich von einem Anfängerlevel zu einem Kenntnisstand erweitern, auf welchem erfolgreich ein Forschungsthema in einer Masterarbeit bearbeitet werden kann.

Inzwischen arbeite ich am IMMS als wissenschaftlicher Mitarbeiter und entwickle dabei FPGA-Lösungen für verschiedenste Messaufbauten, sowohl in Forschungs- als auch in Industrieprojekten. Dank der Nähe zur Technischen Universität Ilmenau sowie anderen Instituten wird man immer wieder mit neuen, spannenden Aufgaben konfrontiert und kann stets Neues lernen. Derzeit arbeite ich im Projekt Quantum-Hub Thüringen an der Charakterisierung halbleiterbasierter Einzelphotonendetektoren zum Einsatz in Quantenkommunikationssystemen.“

Jonathan Josue Gamez Rodriguez, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Das IMMS ermöglicht eine äußerst kreative und vielseitige Arbeitsatmosphäre. Die Umsetzung von Projekten mit verschiedenen Partnern aus der Wissenschaft und der Industrie bringt immer neue Herausforderungen, die gelöst werden müssen. Mit Hilfe

*Praktika,
BSc/MSc/HiWi-
Themen auf
www.imms.de*

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



Jonathan Josue Gamez Rodriguez, M.Sc., Embedded Hardware- und Software-Ingenieur im Themenbereich System Design am IMMS in Ilmenau.

Foto: IMMS.

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

von modernster Technik, verschiedenster Kompetenzen im Team und einer offenen Arbeitsatmosphäre entwickle ich mich beruflich weiter und habe auch viel Spaß an den Aufgaben. Ich beschäftige mich hauptsächlich mit der Software-Entwicklung von eingebetteten Sensorsystemen. Das umfasst in der Regel mehrere Schritte: Konfiguration und Kommunikation mit Sensoren durch diversen Protokolle, Erfassung und Bearbeitung der Daten und die Übertragung zu anderen Systemen. Solche Vorgänge sind immer relevanter in der modernen Welt, wo die Automatisierung und die Selbstüberwachung von Prozessen deren Effizienz erhöht und damit auch unsere Lebensqualität.

Seit ich im IMMS arbeite, erweitere ich kontinuierlich meine Kenntnisse aus dem Studium und gleichzeitig kann ich neue Konzepte und Methoden ausprobieren, um immer bessere Lösungen zu finden. Dabei sind die Aufgabenstellungen immer wieder neu und niemals langweilig. Wenn eine Teilaufgabe eines Projektes sehr komplex ist, kann ich mich jederzeit an meine Kollegen wenden, um entweder im Team alternative Lösungen zu diskutieren oder direkt Hilfe zu bekommen. Diese Hilfsbereitschaft erlebe ich nicht nur durch die Kollegen vom selben Team, sondern auch durch Kollegen aus anderen Abteilungen.

Bei den Arbeitskollegen findet man auch Resonanz bei privaten Initiativen. Ein tolles Beispiel nach meiner Erfahrung ist die Teilnahme beim Stadtradeln, die ich vorgeschlagen hatte. Viele Kollegen haben gerne mitgemacht und die Motivation war so gut, dass wir mit Gold von der Ilmenauer Kommune ausgezeichnet wurden – aber vor allem hat es uns viel Spaß gemacht. Ich kann sagen, die Umgebung ist sehr freundlich und ich fühle mich sehr wohl.“

Praktika,
BSc/MSc/HiWi-
Themen auf
www.imms.de

Mehr Stimmen
aus dem IMMS:
www.imms.de

FORSCHUNGSFELD

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME



Voruntersuchungen für einen UHF-RFID-Sensor-Transponder-IC zur Überwachung von Pflanzen in Gewächshäusern und für einen Wake-Up-Empfänger-IC zum Monitoring von Windkraftanlagen. Diese ICs entwickelt das IMMS im Projekt StorAlge. Foto: IMMS.

Das Projekt StorAlge wird vom ECSEL Joint Undertaking (JU) unter der Fördernummer 101007321 finanziert. JU wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizon 2020“ der Europäischen Union sowie durch Frankreich, Belgien, die Tschechische Republik, Deutschland, Italien, Schweden, die Schweiz und die Türkei unterstützt. StorAlge wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 16MEE0155T sowie mit Mitteln des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft unter dem Förderkennzeichen 2021 ECS 0003 gefördert.



GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

Jahresbericht

© IMMS 2021

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 μm -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. 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.



Voruntersuchungen für einen UHF-RFID-Sensor-Transponder-IC zur Überwachung von Pflanzen in Gewächshäusern und für einen Wake-Up-Empfänger-IC zum Monitoring von Windkraftanlagen, die das IMMS im Projekt StorAlge entwickelt. Foto: IMMS.

Highlights 2021 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

StorAlge* gestartet – eingebettete Datenspeicher mit extrem niedrigem Energieverbrauch in Frontend-ICs für drahtlose Sensoren

Innovative, miniaturisierte und extrem stromsparende drahtlose Sensorlösungen sind die Grundbausteine für Industrie-4.0-Anwendungen

Das IMMS entwickelt im 2021 gestarteten Projekt StorAlge zwei ASICs für drahtlose Sensoren für Industrie- 4.0-Anwendungen. In enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern microsensys und endiio wird das IMMS einen UHF-RFID-Sensor-Transponder-IC zur Überwachung von Pflanzen in Gewächshäusern und einen Wake-Up-Empfänger-IC zum Monitoring von Windkraftanlagen realisieren. Diese neuen und innovativen ICs werden den Benchmark-ULP-Speicher von X-FAB nutzen, um sicherzustellen, dass die Chips nur sehr wenig Strom für den Betrieb benötigen.

*StorAlge auf
www.imms.de*

*Leitanwendung
RFID-Sensoren:
www.imms.de*

Entwicklung eines UHF-RFID-Sensor-Transponder-ICs mit extrem niedrigem Stromverbrauch für die Überwachung von Pflanzen in Gewächshäusern

In hochautomatisierten und modernen Gewächshäusern werden Pflanzen auf Förderbändern permanent umplatziert, um für alle Pflanzen die gleichen klimatischen Bedingungen zu schaffen. Außerdem ist es sehr wichtig, die Temperatur und die Bodenfeuchte der einzelnen Pflanzen kontinuierlich zu überwachen, um sicherzustellen, dass sie sich gleich entwickeln. Ein Monitoring mit batteriebasierten drahtlosen Sensoren ist dafür in der Regel zu teuer. Passive UHF-RFID-basierte Sen-

sortransponder werden dagegen nicht mit Batterien, sondern mit der Energie aus den Lesegeräten betrieben und gelten daher als hervorragende Alternative.

Allerdings besteht hier die Herausforderung darin, die Bodenfeuchtesensoren ohne Batterien bei einer Reichweite von zwei Metern zu messen und passiv auszu-lesen, während sich die Pflanzen kontinuierlich auf dem Förderband bewegen. Mit dem Know-how aus dem BMBF-Projekt RoMulus entwickelt das IMMS einen extrem stromsparenden UHF-RFID-Sensor mit intelligentem Energiemanagement für solche anspruchsvollen Anwendungen.

Entwicklung eines Wake-Up-Empfänger-ICs mit extrem niedrigem Stromverbrauch für das Monitoring von Windkraftanlagen

Das Getriebe in Windrädern verursacht unter allen Komponenten den größten Anteil an jenen Ausfällen, die sich direkt auf die Betriebs- und Wartungskosten auswirken. Um im Fehlerfall kostenintensive Lagerschäden zu verhindern, müssen umfangreiche Daten, wie etwa zu Vibrationen und der Temperatur, lokal über Sensoren erfasst und mit einer lokalen Intelligenz für eine Diagnose ausgewertet werden. Eventgesteuerte Wake-up-Empfänger sind eine Schlüsselkomponente für den energiearmen Betrieb von Sensoren in solchen Anwendungen.

In StorAlge wird das IMMS einen Wake-up-Empfänger-IC mit extrem niedrigem Stromverbrauch für drahtlose Sensoranwendungen entwickeln. Die Herausforderung besteht darin sicherzustellen, dass die Sensorknoten unter strengen Stromverbrauchsgrenzen u.a. im Nanowattbereich betrieben werden können und in der Lage sind, in einem „schlafenden, aber bewussten“ Zustand zu verbleiben und beim Empfang eines Funk-Wake-Up-Signals den Betriebsmodus sofort zu wechseln. Durch unseren Wake-Up-Empfänger soll sichergestellt werden, dass in anspruchsvollen Anwendungen wie Windrädern, in denen extreme und schwierige Bedingungen herrschen, Fehler schnell erkannt und wartungsintensive Folgeschäden vermieden werden können.



Wissenschaftliche Aussprache (öffentlicher Teil) im Promotionsverfahren von Jun Tan am 18. Februar 2021 an der Technischen Universität Ilmenau: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hannes Töpfer (Vorsitz Promotionskommission), Jun Tan, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer (Betreuer), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Müller, Dr.-Ing. Dominik Krauß (v.l.n.r.). Foto: Ralf Sommer.

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

Hochgenau und batteriefrei per RFID messen: IMMS-Doktorand verteidigt Dissertation zu präziser passiver RFID-Sensorik

Jun Tan, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS, hat am 18.02.2021 seine Dissertation „Design Methodology and Implementation of Fully Passive RFID SoC with Temperature Sensor“ erfolgreich an der Technischen Universität Ilmenau verteidigt.

Hochgenau, klein und batteriefrei – bislang unerreicht bei RFID-Sensorik

„Mein Ziel war es, präzise mikroelektronische Low-Power-Sensorik mit miniaturisierter und passiver RFID-Technologie zu kombinieren. Wenn das gelingt, werden viele Anwendungen erst möglich, beispielsweise im Bereich Life Sciences“, sagt Jun Tan. „Hochgenaue Einzelsensoren gibt es schon, z.B. Temperatursensoren, die von -55°C bis 125°C messen können und dabei bis auf $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ genau sind. Die sind aber nicht ohne weiteres für drahtlose Messungen per RFID geeignet oder gar für passive, also batteriefreie RFID-Transponder.“ Bei passiver und damit wartungsfreier RFID-Sensorik erzeugt die RFID-Ausleseinheit ein magnetisches Feld, das dazu ausreicht, den RFID-Transponder mit Strom zu versorgen, Messdaten zu erfassen und zu senden.

Dafür waren nicht nur Konzepte für äußerst energieeffiziente Schaltungen gefragt, damit diese mit dem wenigen Strom aus dem RFID-Feld arbeiten können. Es musste auch sichergestellt werden, dass weder die Energieversorgungen noch die drahtlose Kommunikation die anvisierten hochpräzisen Messungen stören. „Für Anwendungen mit kleinem Bauraum ist es außerdem besser, den Temperatursensor direkt im Chip zu integrieren“ erklärt Tan weiter. „Auch da gibt es schon Lösungen, die bilden aber nur sehr schmale Temperaturkorridore von z.B. $50 - 60^{\circ}\text{C}$ ab und sind darin nur bis $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ genau.“

Leitanwendung
RFID-Sensoren:
www.imms.de

Kernthema ULP-
Sensorsysteme:
www.imms.de

Jun Tans Konzepte sind in einen RFID-Chip gemündet, dessen integrierter Temperatursensor in einem großen Bereich von 0°C bis 125°C mit einer systematischen absoluten Genauigkeit (3σ) von $\pm 0,4^\circ\text{C}$ messen kann. An diesen Chip muss bis auf die RFID-Antenne keine weitere Komponente angeschlossen werden und er erreicht die höchste Genauigkeit mit dem größten Arbeitsbereich im Vergleich zu den derzeit bekannten RFID-Temperatursensoren.

„Dass der Chip so genau arbeitet, liegt vor allem an dem neuen Power-Management- und Kommunikationskonzept“, so Jun Tan. „Der Sensor an sich kann genau sein. Davon habe ich aber nicht viel, wenn ich gleichzeitig Daten empfangen und eine Messung durchführe, weil der Sensor immer genau dann gestört wird, wenn das Lesegerät Temperaturdaten abfragt.“ Tan hat daher eine Lösung entwickelt, bei der durch einen einzelnen Befehl mehrere Messwerte seriell aufgenommen und übertragen werden können. Sein Power-Management-System stellt dem Temperatursensor eine stabilisierte Versorgungsspannung bereit. Die Kombination dieser beiden Ansätze verbessert die Genauigkeit um den Faktor 16.

Arbeiten gehen Hand in Hand mit neuen RFID-Entwicklungen für die Industrie

„Jun Tan hat nicht nur für diesen Chip neuartige Konzepte erarbeitet, seine Arbeiten in den für die RFID-Community maßgeblichen Journals veröffentlicht und sogar auch auf einer IEEE-Konferenz in Japan den Best-Paper-Award gewonnen“, erklärt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, Tans Doktorvater und wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS sowie Fachgebietsleiter für Elektronische Schaltungen und Systeme an der TU Ilmenau. Seine Ansätze habe er über die Jahre in verschiedenen F&E-Projekten am IMMS erarbeitet, mit Anforderungen aus der Industrie gespiegelt, konsequent weiterentwickelt und in neue Konzepte fließen lassen, die für die Dienstleistungsangebote des IMMS in der RFID-Sensorik weiter verfolgt würden, so Sommer weiter. Dabei gehe es vor allem um passive RFID-Sensor-Transponder-Chips, mit denen sich verschiedene kommerzielle Einzelsensoren betreiben lassen. „Im Vergleich zu Jun Tans vollintegriertem RFID-Temperatursensor löst dort ein RFID-Chip dank neuer Konzepte die Energieversorgungs-, Signalqualitäts- und Kommunikationsprobleme mehrerer einzeln angeschlossener Sensoren, was vorher so nicht möglich war. Damit können neue Point-of-Care-Anwendungen und Automatisierungslösungen schneller, einfacher und preiswerter entwickelt werden. Ohne Jun Tans Arbeiten wären wir hier noch nicht da, wo wir jetzt sind.“

Einrichtung der Mikrofluidik-Kartusche für Tests mit SPARCL®-Chemilumineszenz-Assay zur Vorbereitung der Entwicklungsarbeiten für die hochsensitiven Bildsensoren mit SPADs.

Foto: IMMS.



REACT-EU – Als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie finanziert.



Start von KODIAK* – Bildsensoren für Chemilumineszenz-Assays mit Thüringer Industrie und Instituten aus Erfurt-Südost und Jena

Lab-on-Chips (LOC) integrieren verschiedene labordiagnostische Verfahren zur Probenaufbereitung und -analyse auf einem Chip und können Patientenproben automatisiert verarbeiten und auswerten. Die Einwegkartuschen sind häufig nicht größer als eine Kreditkarte, deren Geräteplattformen klein und somit optimal für die Diagnose oder Erstversorgung in Arztpraxen oder allgemein für Point-of-Care-Diagnostik. Ergebnisse können dadurch kostengünstiger, schneller und früher als herkömmliche Analysen in einem medizinischen Labor bereitgestellt werden. In KODIAK sollen elektronische, optische und fluidische Komponenten und zugehörige Integrationstechniken entwickelt werden, die die LOC-basierte Point-of-Care-Diagnostik für weitere Anwendungsfälle erschließt.

KODIAK auf
www.imms.de

Leitanwendung
Sensorsysteme
für die In-vitro-
Diagnostik:
www.imms.de

Hochsensitive Bildsensoren mit SPADs für Chemilumineszenz-Assays

Das IMMS bringt seine Kompetenzen zu CMOS-integrierten optischen Sensoren in das Projekt ein. Wir erforschen, wie sich die neuen Single-Photon-Avalanche-Dioden (SPADs) unseres Projektpartners X-FAB in hochsensitiven Bildsensoren für Chemilumineszenz-LOC-Assays einsetzen lassen. Darüber hinaus werden auch diverse Hard- und Softwaremodule entwickelt, um den Sensorchip anwendungsnah zu evaluieren.

Erste Anwendung – Diagnostik des häufig tödlichen CR-Syndroms

Die Entwicklung ist wesentlich davon getrieben, schnelle und kostengünstige Diagnosen für das Zytokin-Freisetzungssyndrom (cytokine release syndrome, CRS) zu ermöglichen und gleichzeitig die Eignung der technischen Projektergebnisse in der

medizinischen Anwendung zu demonstrieren. CRS tritt als schwerwiegende Nebenwirkung bei einer Vielzahl von Erkrankungen und Therapien auf, wie z.B. Immunotherapie, Graft-versus-Host-Disease, Sepsis und Infektionserkrankungen wie Covid-19 und endet häufig tödlich. Je nach Studie erleiden beispielsweise zwischen ca. 20 – 45% der in der Onkologie mit CAR-T-Zell-therapierten Patienten ein CRS sowie der Großteil der verstorbenen Corona-Patienten. CRS muss daher schnellstmöglich erkannt und therapiert werden. Derzeitig erfolgt die Diagnostik symptomatisch, also zeitverzögert und unspezifisch, und über Bluttests und somit invasiv, was z.B. ein online-Monitoring ausschließt. Mit den neuen Bildsensoren sollen ernsthafte Krankheitsverläufe früher erkannt, klinische Kapazitäten effektiver genutzt und die medizinische Versorgung von Patienten gestärkt werden.

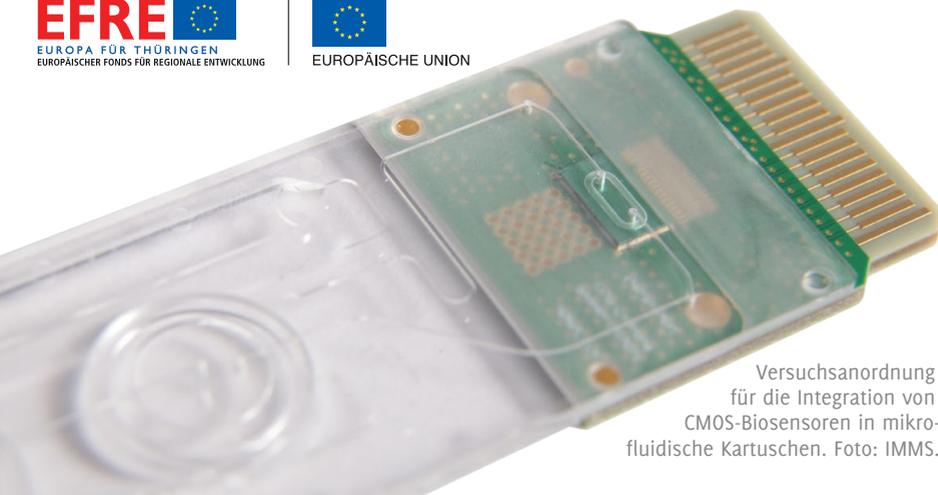
Start von SensInt* – CMOS-Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzdetektion für die direkte Integration in mikrofluidische Kartuschen mittels 3D-Siebdruck

Hohe Nachfrage von Point-of-Care-Tests

Nicht erst durch die SARS-CoV-2-Pandemie ist die Nachfrage nach Lösungen für eine schnelle, patientennahe Diagnostik (Point-of-Care, POC) stark angewachsen. Um die Ausbreitung von Infektionskrankheiten wirkungsvoll zu unterbinden, ist ein dichtes Testregime inzwischen als ein entscheidendes Instrument der Pandemiebekämpfung identifiziert. Die Mikrofluidik hat sich bereits seit Jahren als die Schlüsseltechnologie in diesem Bereich etabliert, mit der sehr genaue Ergebnisse auf molekularbiologischer Basis, wie z.B. per PCR, erzielt werden können.

Leitanwendung
Sensorsysteme
für die In-vitro-
Diagnostik:
www.imms.de

REACT-EU – Als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie finanziert.



Versuchsanordnung für die Integration von CMOS-Biosensoren in mikrofluidische Kartuschen. Foto: IMMS.

Um solche Systeme kleiner, portabler und perspektivisch preiswerter anbieten zu können, werden zunehmend Sensoren zur Detektion in solche Mikrofluidik-Kartuschen integriert. Hierbei existieren einerseits prototypische Lösungen mit Klebverfahren oder Lösungen für sehr große Stückzahlen. Für den Zwischenbereich, der sowohl für die Entwicklung, klinische Untersuchungen und Markteinführung wichtig ist, gibt es zurzeit keine zufriedenstellende Lösung.

3D-Siebdruck schließt die Technologielücke

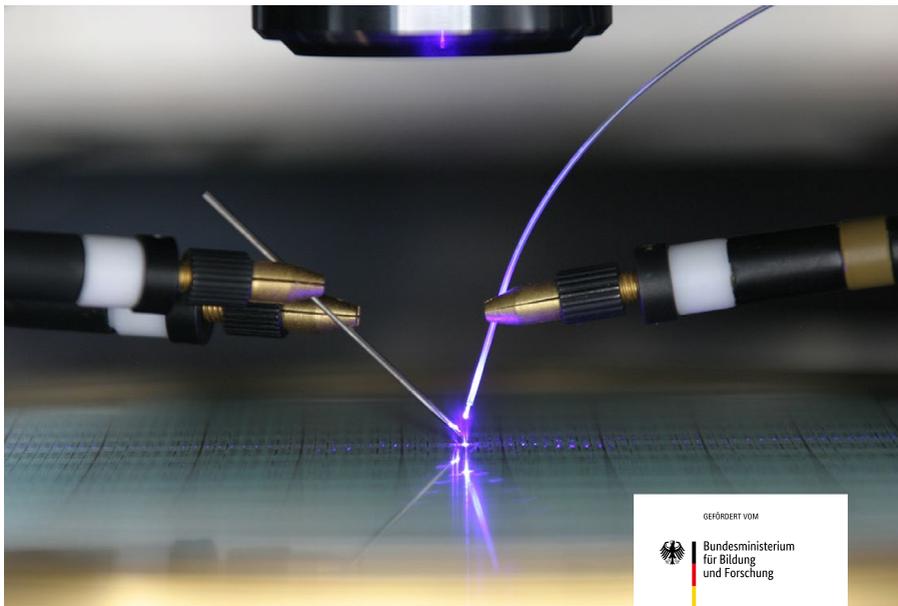
Das Projekt möchte genau diese Technologielücke, die vor allem für kleinere und mittlere Diagnostikunternehmen oft zu einem "Valley of Death" wird, durch die Kombination von Spritzguss, 3D-Siebdruck und Sensortechnologie schließen. Am Beispiel einer mikrofluidischen Kartusche zur molekulardiagnostischen Diagnose von Atemwegserkrankungen soll die gesamte Technologiekette demonstriert und allgemeingültige Designregeln für eine solche Integration erarbeitet werden. Die Herausforderung liegt darin, Fertigungstechnologien unterschiedlichster Bereiche und Materialien zu integrieren, wie thermoplastische Kunststoffe, Elastomere und Silizium. Damit können zukünftig solche POC-Tests schneller und preiswerter hergestellt werden.

Bildsensor für die Integration in mikrofluidische Kartuschen

Das IMMS wird ein optisches Sensorsystem für mikrofluidische Fluoreszenz-Anwendungen erforschen und prototypisch aufbauen. Dieses System umfasst einen speziell für die Integration in eine mikrofluidische Kartusche entwickelten CMOS-Bildsensor, der neben den optischen Detektionselementen, den Photodioden, auch die benötigten elektronischen Ansteuerungs- und Ausleseschaltungen enthält sowie eine für diesen Bildsensor angepasste Elektronikeinheit, mit der der Bildsensor betrieben werden kann.

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

Kernthema
CMOS-basierte
Biosensoren:
www.imms.de



Charakterisierung von neuen optoelektronischen Sensoren im Wafervverbund. Foto: IMMS.



Start von FluoResYst* – SPAD-basierter Sensor zum zeitaufgelösten Auslesen von Fluoreszenz-markierten DNA-Mikroarrays

Multiresistenzen sind ein zunehmendes Problem bei Infektionskrankheiten

Laut der WHO ist Tuberkulose nach COVID-19 weltweit die zweittödlichste Infektionskrankheit. Um den mehr und mehr gegen Antibiotika auftretenden Multiresistenzen von Tuberkulose-Bakterien zu begegnen, müssen Verdachtsfälle täglich getestet und bei positivem Laborbefund schnell behandelt und isoliert werden. In der Regel fehlt es jedoch an der dafür notwendigen Laborinfrastruktur und Logistik, denn 95 Prozent der Tuberkulose-Erkrankungen treten in Entwicklungs- und Schwellenländern auf.

*FluoResYst auf
www.imms.de*

Kombination zweier Innovationen führt zu einer neuen Detektionstechnologie

Das Gesamtziel von FluoResYst ist die Entwicklung eines schnellen Point-of-Care-Nachweissystems für Multiresistenzen, dass außerhalb von Laboren durch eine beschleunigte Diagnostik vor Ort zur Eindämmung von Seuchen beiträgt. Durch die Kombination der photonischen Integration zeitaufgelöster Fluoreszenzmessung für kurzlebige Fluorochrome und des biochemischen Fluoreszenz-Quenching-Antikörper-Assays sollen bisher aufwändig zugängliche komplexe Analysen stark vereinfacht und somit in der Breite zugänglich gemacht werden.

*Leitanwendung
Sensorsysteme
für die In-vitro-
Diagnostik:
www.imms.de*

Im technologischen Teil wird dazu eine photonische Plattform entwickelt, die durch einen hohen Integrationsgrad die Tuberkulosedagnostik auch außerhalb einer Laborumgebung ermöglichen soll. Das Prinzip der Detektionsplattform beruht auf zeitaufgelöster Fluoreszenzmessung, mit der auf komplexe Optik und Wellenlängenfilter weitgehend verzichtet werden kann. Dies wird durch den Einsatz eines sehr schnellen Anregungslasers und eines schnellen CMOS-integrierten Detektors möglich.

Das IMMS entwickelt im Projekt diesen Detektorchip für das Auslesen von DNA-Mikroarrays. Der Chip beinhaltet neben mehreren Arrays von Single-Photon-Avalanche-Dioden (SPADs) auch die für deren Auswertung benötigten Histogramm-Generatoren. Durch den Einsatz von Through-Silicon-Vias (TSVs, Silizium-Durchkontaktierungen), lässt sich der Chip mit seiner planaren Oberfläche sehr gut in mikrofluidische Systeme integrieren. Neben den SPADs werden im Chip auch klassische Photodioden verteilt und ausgewertet, was die Anforderungen an die Homogenität der optischen Anregung entspannt und die Gerätekomplexität weiter senkt.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Kernthema

CMOS-basierte

Biosensoren:

www.imms.de



Vorarbeiten für einen SPAD-Teststand mit Messkammer für Fluoreszenzfarbstoff.

Foto: IMMS.

Hacker greifen bereits heute gezielt vernetzte Fahrzeuge, Maschinen, Industrie- und Telekommunikationsanlagen an, um sich illegal Vorteile zu verschaffen, wie z.B. Wettbewerbern zu schaden, geistiges Eigentum zu stehlen oder sensible Daten zu entwenden.

Gleichzeitig steigt der Bedarf, Automobilsysteme, Unternehmens- und Produktionsnetzwerke funktionaler, komfortabler, verkehrssicherer und energie- sowie kosten-effizienter zu gestalten. Bereits diese Anforderungen lassen die Systeme nicht nur immer komplexer und in ihrer Entwicklung immer anspruchsvoller werden. Sie sind auch immer stärker vernetzt. Mehr Komplexität und mehr Vernetzung bieten auch mehr Möglichkeiten für Angriffe auf diese Systeme, die zudem größere Auswirkungen haben können und somit für Angreifer auch lukrativer sind.

Innovative Chip-Architekturen, Modellierungs- und Verifikationsmethoden

Im Projekt sichert das IMMS mit seinen Partnern den Entwurf von integrierten Systemen durch innovative Chip-Architekturen sowie automatisierte Modellierungs- und Verifikationsmethoden ab. Dadurch soll die Vertrauenswürdigkeit des Systems nicht nur während des Entwurfs, sondern auch im Betrieb laufend überprüft und somit ein Hackerangriff abgewehrt werden können.

VE-VIDES auf
www.imms.de

Kernthema KI-
basierte Ent-
wurfs- und Test-
automatisierung:
www.imms.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Gegen Hacker-
angriffe werden im
Projekt VE-VIDES u.a.
innovative Chip-
Architekturen für
vertrauenswürdige
Elektronik entwickelt.
Foto: IMMS.





Das IMMS entwickelt in VE-ARiS neue Entwurfsverfahren auf der Basis von Machine Learning für einen Kopierschutz von integrierten Schaltungen.

Foto: IMMS.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Elektronischer Knowhow-Schutz für innovative Sensorsysteme: iC-Haus, IMMS und Wachendorff starten BMBF-Vereinbarung VE-ARiS*

Produktpiraterie ist längst in der Welt der modernen hochintegrierten Sensorsysteme angekommen. Diese Systeme werden vor allem in Schlüsselindustrien eingesetzt, wie in der Robotik, Automatisierungs-, Antriebs- und Lasertechnik sowie in sicherheitskritischen Anwendungen. Neben einem massiven wirtschaftlichen Schaden beim Original-Entwickler und -Hersteller ziehen Fälschungen und aktive Angriffe auf kritische Systeme gravierende Sicherheitsrisiken nach sich. Daher entwickeln die iC-Haus GmbH, das IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH) und die Wachendorff Automation GmbH & Co. KG neuartige Kopierschutzverfahren für integrierte Schaltungen und Platinen. Details ihres im März 2021 gestarteten dreijährigen Verbundprojekts „Elektronischer Knowhow-Schutz für innovative Sensorsysteme – ARiS“ stellten die Partner am 14. April 2021 auf der digitalen Konferenz „Vertrauenswürdige Elektronik“ des BMBF vor.

VE-ARiS auf
www.imms.de

Fälschungen und Kopien als Risiko für sicherheitskritische Systeme und wirtschaftliche Substanz

„Selbst bei einfachen Kopien, die in der Regel auch nicht wie Original-Teile intensiv getestet und qualifiziert werden, besteht die Gefahr von Fehlfunktionen. Die Risiken etwa in der Medizintechnik oder bei autonomen Fahrzeugen gehen weit über die von Sachschäden hinaus,“ erklärt Dr. Heiner Flocke, Geschäftsführer der iC-Haus GmbH und Koordinator des ARiS-Projekts. Betroffen sind neben Leiterplatten auch die dort verbauten integrierten Schaltungen, die in erheblichen und langwierigen Entwicklungsleistungen und mit dem Knowhow von High-Tech-Unternehmen entstanden sind. Auch kleinere Hersteller, die sich mit ihren Chips in mittleren Stückzahlen als

Kernthema Kl-
basierte Ent-
wurfs- und Test-
automatisierung:
www.imms.de

Schlüsselprodukte im Industrie-Bereich einen Namen gemacht haben, sind davon nicht verschont.

Zweistufiger Kopierschutz: Tarnung und Wasserzeichen als aktive Abwehr

Deshalb werden am IMMS neue Verfahren zur Tarnung von Schaltungen und zum Einweben eines Wasserzeichens entwickelt, um das „Abzeichnen“ und damit Kopieren von integrierten Schaltungen und Systemen zu erschweren. Die Methoden werden von iC-Haus und Wachendorff untersucht, inwieweit sie implementierbar und robust genug für Industrieentwicklungen sind, sowie durch weitere Tarn- und Abwehrmechanismen ergänzt.

Zur Tarnung von Schaltungen wird am IMMS ein Verfahren entwickelt, das auf Machine Learning basiert. „Wir werden die Perspektive eines potentiellen Fälschers simulieren und so dessen Blick schon im Entwurf trüben,“ erklärt Georg Gläser vom IMMS, Spezialist für die Integration von KI-Methoden in die Entwurfsautomation. Das werde möglich, indem beispielsweise Komponenten mit gleichem Aussehen, aber unterschiedlicher Funktion verwendet werden. Ein Reverse Engineering werde dadurch extrem aufwändig und wirtschaftlich unattraktiv, so Gläser weiter.

Die angestrebten „Wasserzeichen“ stellen neuartige Abwehrmechanismen dar. Auf Chip-Ebene werden sie als Schaltungsblock integriert, der als digitale Signatur wirkt. Mit ihr werden die Chips erst direkt vor Lieferung oder Inbetriebnahme freigeschaltet, sofern die auch im Chip enthaltenen Sensoren die erwarteten Parameter liefern. Auf Leiterplatten werden personalisierte Wasserzeichen integriert. Mit einem zusätzlichen Abwehr-IC wird die Platine durch den Sensorsystem-Hersteller aktiviert.

Validierung an Systemen der Industriepartner – und darüber hinaus

Den Praxistest machen iC-Haus mit einer Chip-Entwicklung und Wachendorff mit einem neuen Leiterplatten-Design. „Die neuen Verfahren zum Kopierschutz eignen sich prinzipiell für alle Chips und Platinen. Validieren werden wir sie mit einem neuartigen, kopiergeschützten Positionsgeber-IC“, führt Flocke aus. Chip und Leiterplatte werden umfangreichen Laborversuchen unterzogen, in relevante Feldumgebungen integriert und getestet. „Mit der aktiven Abwehr auf Board-Ebene stellen wir am Ende die Originalität aller Komponenten eines Systems sicher“, erklärt Robert Wachendorff, Geschäftsführer der Wachendorff Automation GmbH & Co. KG. Bei beiden Industriepartnern habe man im Blick, die neuen Verfahren in die jeweils eigene Produktpalette einzubringen, fasst Flocke zusammen. „Das ist darüber hinaus für die ganze Branche interessant und kann einen Standard-Anspruch für vertrauenswürdige Elektronik erzeugen.“



Die in Erfurt geplanten Konferenzen SMACD & PRIME 2021 fanden vom 19.-22. Juli virtuell statt.
Foto Krämerbrücke Erfurt: lapping @ Pixabay.

Internationale Konferenzen zu Methoden für den Entwurf integrierter Schaltungen: Wissenschaftlicher Nachwuchs aus der Elektrotechnik besucht Erfurt virtuell

Vom 19. – 22. Juli 2021 nahmen vorwiegend europäische Fachkräfte an zwei internationalen Konferenzen zu Methoden für den Entwurf integrierter Schaltungen (SMACD) sowie zur Forschung von Doktorandinnen und Doktoranden in der Mikroelektronik und Elektronik (PRIME) teil. Die 1991 und 2005 ins Leben gerufenen Veranstaltungen laden zum wissenschaftlichen Austausch zu anwendungsnahen Entwicklungen an wechselnden, vorwiegend europäischen Orten ein. 2021 wurden sie gemeinsam vom IMMS, der TU Ilmenau, der RWTH Aachen und der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) des VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. organisiert. Aus Sicherheitsgründen fanden die ursprünglich in Erfurt geplanten Konferenzen in virtueller Form statt.

Nachwuchsförderung am IMMS: www.imms.de

Konferenzen sollen Nachwuchs über die Themen hinaus auch für Deutschland begeistern

„Nachwuchskräfte liefern traditionell viele Themen für beide Konferenzen und machen regelmäßig etwa die Hälfte des Publikums aus. Das Feedback aus der Community ist für sie ein enormer Ansporn und zeigt ihnen neue Richtungen für ihre Arbeit auf“, erklärte Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, General Chair der SMACD 2021, wis-

senschaftlicher Geschäftsführer des IMMS sowie Fachgebietsleiter für Elektronische Schaltungen und Systeme an der TU Ilmenau. „Gleichzeitig möchten wir natürlich die Gelegenheit nutzen, Deutschland als künftigen Arbeits- und Lebensmittelpunkt in den Fokus zu rücken“, so Sommer weiter. Er persönlich blicke da natürlich auf Erfurt als Mikroelektronikstandort, die Thüringer Hochschul- und Forschungslandschaft und Institute wie das IMMS, in denen die Fachkräfte von morgen studienbegleitend in die Praxis eingebunden und für einen Berufsstart in der Industrie und der anwendungsnahen Forschung befähigt werden. Hier wie in ganz Deutschland gelte es, Mikroelektronik-Kompetenzen zu stärken und auszubauen, um mit sicheren und verlässlichen Chip-Entwicklungen, ausreichenden Fertigungskapazitäten und vor allem aber mit gut ausgebildeten Fachkräften international wettbewerbsfähig zu bleiben.

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

Breites Themenspektrum und agile Formate für neue Ideen in der Mikroelektronik

211 Autorinnen und Autoren aus 21 Ländern hatten 72 Beiträge für die SMACD-Konferenz eingereicht, für die PRIME-Konferenz kamen 69 Themenvorschläge von 237 Personen aus 19 Ländern, jeweils vorwiegend aus Europa. Etwa zwei Drittel konnten jeweils die Gremien überzeugen und sorgten für ein vielfältiges Themenspektrum in den vier Tagen. Es ging vor allem darum, wie man durch neue Methoden für Synthese, Modellierung, Analyse und Simulation den Entwurf für immer komplexere Mikroelektronik-Chips effizienter und sicherer machen kann. Schwerpunkte waren unter anderem Machine Learning, drahtlos kommunizierende Systeme, biomedizinische Schaltkreise und die Energieversorgung integrierter Schaltungen, beispielsweise durch Energy Harvesting.

Kernthema KI-
basierte Ent-
wurfs- und Test-
automatisierung;
www.imms.de

In den Keynote-Beiträgen sprach Jörg Doblaski, CTO der X-FAB, über Herausforderungen und Chancen künftiger Anwendungen in den Automobil-, Medizin- und Industriebranchen. Marco Seeland von der TU Ilmenau gab einen Überblick zum maschinellen Lernen für den Entwurf und die Charakterisierung von mikroelektronischen Systemen. Darüber hinaus standen acht Tutorials auf dem Programm, die sich unter anderem mit elektronischer Design-Automation, Quanten-Computing, gedruckter Elektronik und neuronalen Netzen für eingebettete Systeme beschäftigten. Angeboten wurden sie unter anderem vom Fraunhofer IIS/EAS Dresden, dem Forschungszentrum Jülich, der RWTH Aachen, der University of Glasgow, von Cadence Design Systems Deutschland, von der Technischen Hochschule Brandenburg, vom OFFIS e.V. Oldenburg und der Hochschule Reutlingen. Zudem organisierten IMMS, die TU Ilmenau, Cadence, die Universität Oldenburg und das OFFIS – Institut für

Jahresbericht
© IMMS 2021

Informatik ein BarCamp für elektronische Design-Automation. Dort bestimmten aktive „Teilgeberinnen und Teilgeber“ Themen, Agenda und Formate und trugen so zu einem regen Austausch in einer unkonventionellen „Unkonferenz“ bei, die einige Schnittmengen zu agilen F&E-Formaten in der Industrie aufweist und zu neuen Ideen und gemeinsamen Projekten führte.

Bogen von der Wissenschaft zur Praxis zentral

„Die wissenschaftliche Förderung und Betreuung in Hochschulen, die Rückmeldung der Gutachter in Konferenzen wie unseren und die damit verbundenen IEEE-Veröffentlichungen sind natürlich eine wichtige Säule in der Nachwuchsförderung“, so Universitätsprofessor Dr.-Ing. Stefan Heinen, General Chair der PRIME 2021 und Inhaber des Lehrstuhls für Integrierte Anlogschaltungen und des Instituts für Halbleitertechnik an der RWTH Aachen. Darüber hinaus sei es essenziell, Nachwuchskräfte frühzeitig an Herausforderungen aus der Praxis heranzuführen und konkrete Perspektiven in der Elektronikbranche aufzuzeigen. „Dafür bieten wir an der RWTH Aachen eine umfassende theoretisch fundierte und anwendungsorientierte Ausbildung an. Unsere Studierenden konzipieren und realisieren innovative Schaltkreise aus den Bereichen HF-Systeme und der Integrierten Leistungselektronik.“ Für die SMACD und PRIME hieß das, dass die Sponsoren Cadence, X-FAB, Europractice, Infineon und NXP nicht einfach nur Geld beisteuerten, damit die Konferenzen stattfinden konnten. „Hier geht es vor allem um Inhalte und den Austausch zu konkreten Themen, die in den Vorträgen laufen und direkt durch die Industrie gespiegelt werden.“

Erfurt – digital und analog

Um die Halbleiterindustrie, die Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, die momentan in Erfurt ausgebaut wird, ging es auch in der Videobotschaft, mit der sich Erfurts Oberbürgermeister Andreas Bausewein zum Auftakt der beiden Konferenzen an die Teilnehmerinnen und Teilnehmer gewandt hatte. Viele Tausend Menschen haben seit den 70er Jahren in Erfurt in der Mikroelektronik gearbeitet und viele sind es noch heute. „Meine Hoffnung ist, dass die Mikroelektronik in Erfurt noch weiter wächst und auch noch mehr junge Menschen hier in der Stadt und in diesem beruflichen Feld ihre Zukunft finden“, so Bausewein. Dazu verweist er auch auf die Lebensqualität in Erfurt. Die Live-Übertragung der Stadtführung gab am Rande der digitalen Konferenz Einblicke in die mittelalterliche Altstadt, die als größtes Flächen-



Das Team aus Studenten, Doktoranden und Forschern der TU Ilmenau und des IMMS gewann am 22. Juli 2021 Platz 1 beim EDA Competition Award. V.l.n.r.: Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder (JP), Henning Franke, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, Julian Kuners, Paul Kucera, Martin Grabmann, Tom Reinhold, Dr. rer. nat. Marco Seeland, Georg Gläser. Foto: IMMS.

EDA Competition Award für „Trash or Treasure“ – Intelligente Layoutverarbeitung.

1. Preis des IEEE CEDA geht an Nachwuchswissenschaftler von TU Ilmenau und IMMS

Ein Team aus acht Studenten, Doktoranden und Forschern der Technischen Universität Ilmenau und des IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH) gewann am 22. Juli 2021 den EDA Competition Award. Der vom IEEE Council on Electronic Design Automation (CEDA) für Nachwuchswissenschaftler mit 1000\$ gesponserte Wettbewerb rief anlässlich der internationalen Konferenzen zu Methoden für den Entwurf integrierter Schaltungen SMACD 2021 und PRIME 2021 dazu auf, Lösungen zu demonstrieren, die die Entwurfsautomatisierung für integrierte Schaltungen und Systeme verbessern helfen.

Software-Plugin erschließt KI-basierte Anomalie-Erkennungsmethode aus der Forschergruppe IntelligEnt* für das freie Leiterplatten-Design-Tool KiCAD

Julian Kuners, Student der Ingenieurinformatik an der TU Ilmenau und studentischer Mitarbeiter am IMMS, präsentierte der Jury aus Vertretern von Cadence Design Systems GmbH Germany, Dialog Semiconductor Germany, Infineon Technologies Germany, Gebze Technical University Turkey und der Universität Reutlingen den Beitrag „Trash or Treasure? Machine-learning based PCB layout anomaly detection with AnOPCB“.

Dieses Software-Projekt wurde an der TU Ilmenau von Dr. Marco Seeland und Prof. Dr.-Ing. Patrick Mäder vom Lehrstuhl Daten-intensive Systeme und Visualisierung sowie am IMMS betreut. Die Arbeit baut auf Lösungen auf, die in der Thüringer

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

Kernthema KI-basierte Entwurfs- und Testautomatisierung:
www.imms.de

Forscherguppe IntelligEnt für das Layout von Mikroelektronik-Chips entwickelt wurde. „Beim Layout von Analog-/Mixed-Signal-Schaltungen entwirft man den Bauplan für den Chiphersteller. Formal korrekte Layouts können aber Unstimmigkeiten enthalten, wie z.B. Substratkopplung und Mismatch“, erklärt Georg Gläser vom IMMS, Spezialist für die Integration von KI-Methoden in die Entwurfsautomation und Leiter der Forschergruppe. Design-Erfahrung von Ingenieuren spiele vor allem beim geometrischen Entwurf von Schaltungen eine große Rolle und 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, so Gläser weiter. „Wir haben deshalb in der Forschergruppe ein KI-basiertes Anomalie-Erkennungsverfahren entwickelt, mit dem nicht-erprobte und potenziell fehlerhafte Stellen in Layouts detektiert werden können.“ Wichtig seien dabei die Lösungen für eine flexible Datenrepräsentation, denn damit lassen sich Layoutdaten sowohl für Chips als auch für Leiterplatten verarbeiten – und um letztere gehe es im prämierten Beitrag. „Julian Kuners, Henning Franke und Paul Kucera haben dann als studentische Mitarbeiter am IMMS das Software-Projekt weiterentwickelt. Sie haben unserem lernenden Anomalie-Erkennungsverfahren als Plugin für das freie PCB-Entwurfswerkzeug KiCad den letzten Schliff gegeben. Damit können unsere Ansätze viel breiter angewendet werden“, so die Einschätzung von Gläser.

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

Mehr zur
Forscherguppe
IntelligEnt:
www.imms.de

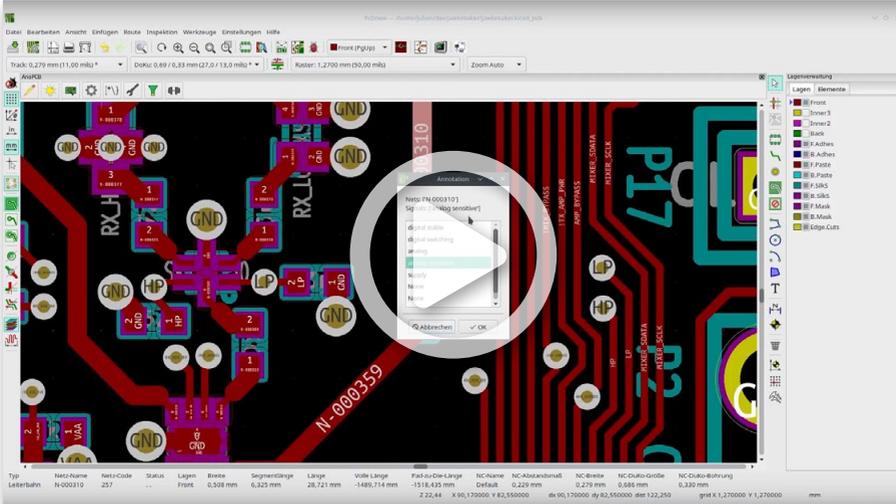
Plugin erkennt automatisch nicht geprüfte und potentiell fehlerhafte Stellen in Layouts

Mit dem Plugin lassen sich KiCad-Signale in Kategorien einteilen und an den Trainings- bzw. Evaluationsprozess übergeben. Das System wurde so entworfen, dass die Entwurfsdaten beim Benutzer für das Verfahren vorbereitet 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.

Kernthema KI-
basierte Ent-
wurfs- und Test-
automatisierung:
www.imms.de

Die Jury bewertete die Lösungen der Kandidaten unter anderem anhand von Komplexität, Automatisierungsgrad, Designer-Schnittstelle, Anwendbarkeit, Integrationsgrad mit verfügbaren Entwurfswerkzeugen und Robustheit: „Das vorgestellte Tool überzeugte die Jury durch die Komplexität des gestellten Problems, das unserer Einschätzung nach gut gelöst wurde. Das Tool ist benutzerfreundlich und wir sehen es nicht nur als akademische Lösung an, sondern als eine Lösung, die auch im praktischen Einsatz von PCB-Designern genutzt werden kann. Das Tool hat ein erhebliches Poten-

Jahresbericht
© IMMS 2021



AnoPCB – plugin for the free PCB design tool KiCad for artificially Intelligent layout processing. Video-Tutorial von Julian Kuners, IMMS / TU Ilmenau.

<https://youtu.be/AXTA3GQwlvM>

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

Tutorial auf
YouTube zum
AnoPCB-Plugin

tial und wir sind interessiert, wie es weitergeht“, sagt Jury-Mitglied Anton Klotz der Cadence Design Systems GmbH.

„Fürs erste Training haben wir quelloffene Entwürfe wie Crazyflie und HackRF genutzt und dort dann Fehlerstellen eingebaut. Mit unserem Plugin zur Anomalie-Erkennung konnten wir diese Stellen schnell und korrekt ausfindig machen“, erklärt Julian Kuners. „Das spornt uns natürlich an – und der Preis sowieso. Den Anlass möchten wir gerne nutzen und Entwickler aufrufen, mit dem Plugin zu arbeiten. Je mehr Trainingsdaten es gibt, desto mehr können wir es ausbauen und verbessern.“ Dafür wurde das Plugin auf GitHub bereitgestellt und ein Videotutorial veröffentlicht.

Plugin-
Download auf
GitHub

FORSCHUNGSFELD

INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Projekt ViroGraph entwickelt das IMMS mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena und dem fzmb GmbH Forschungszentrum für Medizintechnik eine neuartige Technologieplattform mit Graphen-basiertem Feldeffekttransistor zum Nachweis von SARS-CoV-2. Das Foto zeigt Voruntersuchungen am IMMS am Sensor der FSU Jena mit 15 Graphen-FETs für die miniaturisierte Messtechnik. Foto: IMMS.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

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.

Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme auf

www.imms.de

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 2021 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

Start von ViroGraph* – neuartige Technologieplattform mit Graphen-basiertem Feldeffekttransistor zum Nachweis von SARS-CoV-2

Testen, testen, testen – wenn die Corona-Pandemie eines gelehrt hat, dann wie wichtig diagnostische Hilfsmittel sind, die schnell und zuverlässig beispielsweise Erreger oder Antikörper nachweisen können. Der diagnostische Werkzeugkasten muss dabei stetig durch neue innovative Methoden erweitert werden, um sowohl SARS-CoV-2 als auch zukünftigen Herausforderungen dieser Art begegnen zu können. Chemiker der Friedrich-Schiller-Universität Jena, das IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH) und die fzbm GmbH, Forschungszentrum für Medizintechnik und Biotechnologie entwickeln deshalb gemeinsam eine neue Technologieplattform für Schnelltests. Am 5.3.2021 startete das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt „ViroGraph – Multiplex-Detektionssystem zum Nachweis von Viren auf Basis von Graphen-Feldeffekttransistoren“, das für zweieinhalb Jahre angesetzt ist, mit einem virtuellen Auftakttreffen, an dem auch die Mitglieder des begleitenden Ausschusses aus sechs Unternehmen und Institutionen teilnahmen.

Ziel der neuen elektronischen Plattform ist es, die bereits an der Universität Jena erforschten Graphen-Sensoren für neue sogenannte Point-of-Care-Geräte zu erschließen. Solche kleinen und mobilen Geräte sollen künftig ähnlich einfach wie Covid-19-Schnelltests vor Ort einsetzbar sein und Viren, Virenproteine oder Antikörper hochsensitiv – vergleichbar mit PCR-Tests – nachweisen. Mit dem neuen Projekt wollen die Partner den Grundstein für viele weitere präzisere, sensitivere und spezifischere Anwendungen im Bereich der Vor-Ort-Diagnostik über SARS-CoV-2 hinaus legen.

ViroGraph auf
www.imms.de



Voruntersuchungen am IMMS am Sensor der FSU Jena mit 15 Graphen-FETs für die miniaturisierte Messtechnik zum SARS-CoV-2 Nachweis. Foto: IMMS.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

70

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

Sensor aus Graphen

Prinzipiell sind auf den Teststreifen der aktuell eingesetzten Schnelltests bestimmte Proteine als Fängermoleküle aufgebracht, die – falls in der untersuchten Probe vorhanden – mit Virusbestandteilen oder mit Antikörpern reagieren. Dabei entsteht ein Farbstreifen, der das Ergebnis anzeigt. In der neuen Plattform des ViroGraph-Projektes soll ein neuartiger elektronischer Sensor aus Graphen die Aufgabe des Teststreifens übernehmen – überzogen von einer nur einen Nanometer dicken Kohlenstoffmembran, die die Fängermoleküle auf der Sensoroberfläche fixiert. Lagern sich die Analyten aus einer Probe – also etwa Antikörper oder Virusbestandteile – auf der Sensoroberfläche an, dann verändert sich die elektrische Leitfähigkeit des Sensors. Dieser Parameter kann elektronisch ausgelesen werden und liefert das Testergebnis.

„Feldeffekttransistoren kommen bereits beispielsweise bei der Messung von pH-Werten zum Einsatz, für Anwendungen im Bereich der immunologischen Diagnostik allerdings waren sie bisher nicht sensitiv und spezifisch genug“, erklärt Prof. Dr. Andrey Turchanin von der Universität Jena. „Durch die Kombination von Heterostrukturen aus Graphen, die eine entsprechende Leitfähigkeit bereithält, und der molekularen Kohlenstoffnanomembran, die die Sensoroberfläche biochemisch funktionalisiert, konnte diese Schwachstelle allerdings behoben werden. Denn das aus nur einer Atomschicht bestehende 2D-Material Graphen zeichnet sich durch eine besondere elektrische Leitfähigkeit aus – sensible Änderungen der Leitfähigkeit während der Ankopplung von Analyten, also den gesuchten Molekülen, lassen sich schnell und einfach messen.“

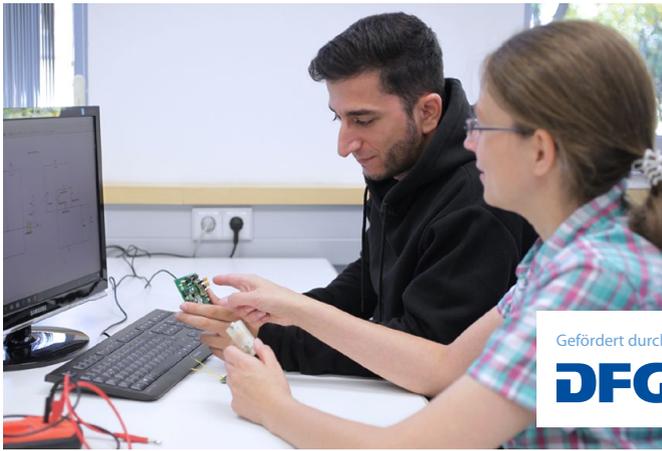
ViroGraph auf www.imms.de

Um diese kleinsten elektrischen Ströme im Bereich einiger Nanoampere überhaupt messen zu können, entwickeln die Projektkoordinatoren des IMMS geeignete miniaturisierte Messtechnik. „Das ist wichtig, um die für unsere Anwendung notwendige Leistungsfähigkeit sehr großer Messgeräte, die solche Parameter normalerweise ermitteln können, in ein handliches Point-of-Care-Gerät zu integrieren.“ sagt Michael Meister vom IMMS. „Eine besondere Herausforderung dabei ist außerdem, mehrere Graphen-Sensoren gleichzeitig zu messen, um eine Multiparameteranalytik realisieren zu können.“

Denn hierin soll die besondere Stärke der elektronischen Methode bestehen: „Wir wollen den Grundstein für ein Multiplex-Detektionssystem legen, mit dem wir mehrere Analyten gleichzeitig detektieren können“, erklärt Dominik Gary von der fzmb GmbH, deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter immunologische und molekularbiologische Nachweissysteme für den neuen Sensor entwickeln. „Somit wäre das ViroGraph-System möglicherweise sogar zur Gentytisierung geeignet und könnte deshalb verschiedene Mutationen von Viren im Schnellverfahren erkennen.“

Einschätzung aus der Industrie

„Für uns als Experten für Immunoassays und ELISA sind Ergebnissicherheit, einfache und schnelle Testverfahren zentral“, erklärte Dr. Peter Rauch, Mitglied im ViroGraph-Projektausschuss und Geschäftsführer der CANDOR Bioscience GmbH. Die Pandemie des SARS-CoV-2-Virus zeige deutlich den Bedarf an Point-of-Care-Systemen mit hoher analytischer Leistungsfähigkeit, die vor Ort am Patienten zu vertretbaren Preisen eingesetzt werden können. „Die im Projekt verfolgten Ansätze können den Herausforderungen auf elektronischem Weg begegnen. Wir werden daher die Arbeiten mit großem Interesse verfolgen und mit Rat und Tat unterstützen.“



Im Projekt ECo-Harvester wird eine computergestützte Entwurfsmethodik für das Co-Design aus Mechanik und Elektronik für elektrodynamische Vibrations-Harvester erarbeitet.

Foto: IMMS.

Gefördert durch

DFG

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

72

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Projektstart von ECo-Harvester* – Umgebungsenergie für dezentrale Sensoranwendungen

Die Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. und das IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH) nahmen im virtuellen Kick-off-Treffen am 15. Februar 2021 die Arbeiten in dem Anfang des Monats gestarteten dreijährigen DFG-Forschungsprojekt „ECo-Harvester – Entwurfsmethodik für das Co-Design von mechanischer Struktur und Schnittstellenschaltung elektrodynamischer Energy-Harvester“ auf.

Energy-Harvester wandeln Umgebungsenergie in elektrische Energie, um somit beispielsweise energieautarke Funk-Sensor-Knoten für Monitoring-Aufgaben im Industrieumfeld zu betreiben und die dafür notwendigen Wartungs- bzw. Installationskosten zu minimieren. Energy-Harvester weisen damit ein hohes Potential auf, zu einer Schlüsseltechnologie zu werden, um Sensoranwendungen dezentral verbreiten zu können.

Im Forschungsprojekt „ECo-Harvester“ soll eine computergestützte Entwurfsmethodik für das Co-Design aus Mechanik und Elektronik für elektrodynamische Vibrations-Harvester entwickelt werden, um abhängig von gegebenen Anforderungen das optimale Harvesting-System ableiten zu können.

„Wir wollen nicht einfach zwei Komponenten zusammenbauen, sondern streben eine Gesamtsystemauslegung an. Das Optimum des Gesamtsystems ist eben nicht immer das jeweilige Optimum der Teilsysteme“, erklärte Prof. Dr. Ralf Sommer, wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS. Diese Gesamtsystemsicht sei notwendig, damit sich die Effizienz des Systems steigern lasse, also mehr Leistung liefere bzw.

ECo-Har-
vester auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

bei gleicher Leistung kleiner gebaut werden könne, so Sommer weiter. Ein solcher Ansatz erweitert den Stand der Technik, da aktuell die Komponenten vielfach getrennt voneinander entwickelt werden.

Das IMMS wird den Schwerpunkt auf die mechanische Modellierung inklusive magnetischer Felder und mechanischer Dämpfung der Energy-Harvester legen, mit denen Energie aus Vibrationen gewonnen wird. Hahn-Schickard fokussiert sich auf die Frontendschaltungen mit hoher Effizienz bzw. geringen Verlusten, um damit die Energie aus der Harvester-Mechanik in geeigneter Form für Sensorsysteme bereitzustellen.

„Da aber beide Partner über ihre Schwerpunkte hinaus vor allem das Zusammenspiel von Harvester-Design und Schnittstellenschaltung betrachten, können wir Synergieeffekte nutzen“, sagte Dr.-Ing. Thorsten Hehn, Gruppenleiter für elektronische Systeme bei Hahn-Schickard. Mittels einer entsprechenden Modellierung kann für gegebene Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Signalform, Frequenz und Amplitude der Anregung, Baugröße des Harvesters etc., ein optimales Gesamtkonzept aus den Topologien für den Harvester und der Schnittstellenschaltung inklusive der Parameterbestimmung generiert werden. Das ermöglicht nicht nur einen kostengünstigen Entwurf, sondern auch erweiterte Einsatzszenarien durch verbesserte Systemeigenschaften.

„Die Herausforderungen liegen darin, dass es eine Vielzahl von topologischen Grundstrukturen seitens der Mechanik und zum Beispiel viele Spannungsbereiche auf der Elektronikseite gibt“, fasste Hehn zusammen. „Die spannende Frage ist, was für das Gesamtsystem am besten ist. Wir freuen uns auf die Antworten, die wir gemeinsam liefern werden.“



Demonstrator für elektromagnetische Energy-Harvester, für die das IMMS bereits in einem Vorprojekt eine Entwurfsmethodik für die Mechanik entwickelt und mit Demonstratoren verifiziert hatte. Im Projekt ECo-Harvester werden Mechanik und Elektronik gemeinsam entworfen.

Foto: IMMS.



Für solch ein mobiles Multisensorik-Prüfgerät entwickelt das IMMS die echtzeitfähige Plattform und Algorithmen. Foto: IMMS.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

74

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

Projektstart von Trib.US* – echtzeitfähige Plattform und Algorithmen für 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.

In 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.

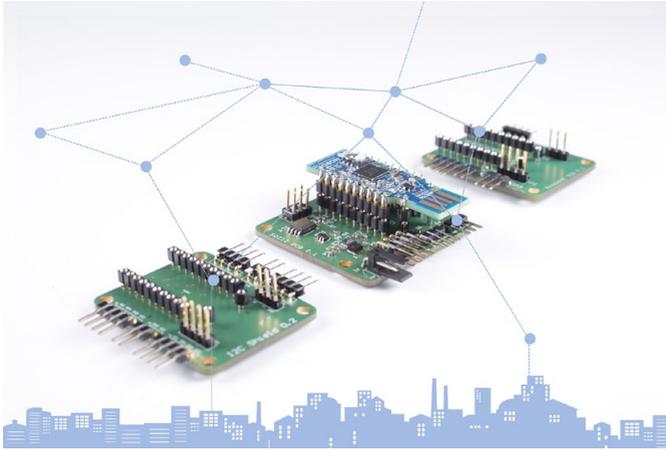
Mehr zu
Trib.US auf
www.imms.de

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Kernthema
Echtzeit-Daten-
verarbeitung u.
-kommunikation:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021



Messmodule für die Anbindung unterschiedlicher Sensoren an eine am IMMS entwickelte Umweltmonitoring-Plattform, die Ausgangspunkt für die Arbeiten an der SmartCity-Sensorik ist. Foto: IMMS.

Freistaat
Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.

75

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

thurAI* gestartet – Sensorik für SmartCity und Methoden, Daten im Netz für KI-Auswertungen intelligent aufzubereiten

In thurAI arbeiten die Technische Universität Ilmenau, die Friedrich-Schiller-Universität Jena und das IMMS an aktuellen Lösungen in den drei Bereichen Smart City, Gesundheitswesen und Medizintechnik sowie Produktions- und Qualitätssicherung. Das IMMS und die TU Ilmenau werden für das Thema SmartCity zusammen mit der Stadt ein „LivingLab“ in Ilmenau realisieren. Kern sind dabei Daten, die für unterschiedlichste KI-basierte Dienste im SmartCity-Kontext benötigt werden.

Das IMMS wird zum einen Sensorik für die Erfassung unterschiedlicher Parameter auswählen und erproben. Dazu wird es bestehende Messplattformen weiter ergänzen und ausbauen. Themen sind hier die Energieautarkie, Größenoptimierung sowie die Realisierung intelligenter IoT-Systeme mit z.B. am Gateway integrierten Analysefunktionen und Konzepten für kooperative Messaufgaben, in denen mehrere Sensorinformationen kombiniert werden können.

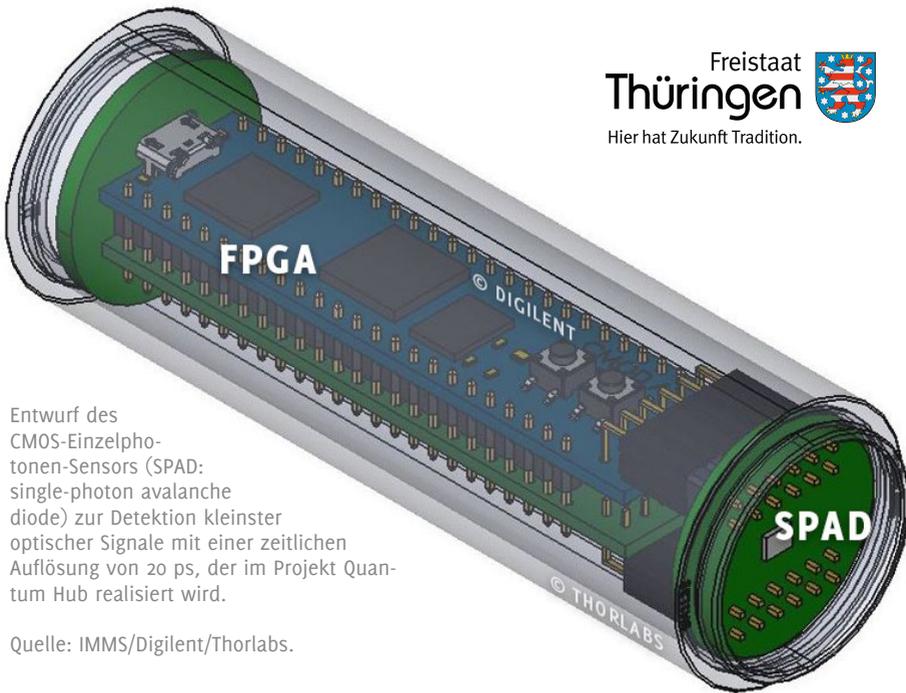
Der zweite Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Bereitstellung sogenannter „Smarter Daten“ durch geeignete Vorverarbeitungsmechanismen am Sensorknoten selbst oder im nachgelagerten Netz. Ziel ist es, dass in der Datenplattform saubere Daten abgelegt werden und so die Anwendung von KI-Algorithmen erleichtert wird.

thurAI auf
www.imms.de.

Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de

Kernthema
Analyse von
verteilten IoT-
Systemen:
www.imms.de

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de



Entwurf des CMOS-Einzelphotonen-Sensors (SPAD: single-photon avalanche diode) zur Detektion kleinster optischer Signale mit einer zeitlichen Auflösung von 20 ps, der im Projekt Quantum Hub realisiert wird.

Quelle: IMMS/Digilent/Thorlabs.

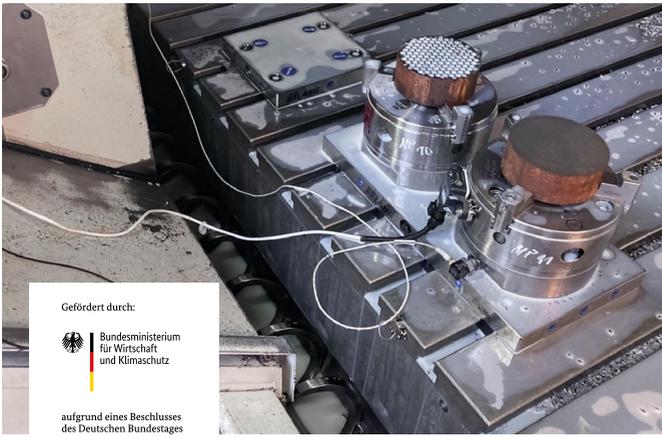
Start des Quantum Hub Thüringen* – für Quantentechnologien aus Thüringen erforscht das IMMS CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

Quantentechnologien werden als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft betrachtet. Sie ermöglichen die Entwicklung hocheffizienter Technologien, die die Leistungsfähigkeit konventioneller Systeme weit übertreffen können. Durch die Kontrolle einzelner Quanten, also kleinster Licht- und Energiebausteine, werden disruptive Anwendungen zum Beispiel im Bereich der Datenverarbeitung (Quantencomputer), der Kommunikation (abhörsichere Kommunikation) sowie in der Messtechnik (Quantenabbildungen, Quantensensorik) ermöglicht.

Das IMMS erforscht dabei den Einsatz von Einzelphotonendetektoren (SPAD), die in einer Standard-Halbleitertechnologie (CMOS) gefertigt werden. Sie werden zur Wandlung einzelner Photonen in elektrische Signale eingesetzt und erlauben einen Betrieb bei Raumtemperatur ohne große und aufwändige Kühlsysteme. Zur Interpretation der Sensorsignale ist eine statistische Auswertung erforderlich, die durch einen programmierbaren Logikbaustein (FPGA) übernommen wird. Perspektivisch wird darüber hinaus die Integration eines solchen optischen Sensorelements in Verbindung mit der erforderlichen Auswertelektronik in einen Mikrochip angestrebt.

QuantumHub
Thüringen auf
www.imms.de

Kernthema Mo-
dulare u. mobile
Testsysteme:
www.imms.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Im Projekt KIQ haben wir Lösungen für eingebettete KI untersucht und auf dieser Grundlage eine KI-basierte nachrüstbare und kostengünstige Lösung zur Qualitätssicherung bei Werkzeugen in der Zerspangung realisiert. Foto: IMMS.

Mittelstand-
Digital

77

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

KIQ* – KI-basierte nachrüstbare und kostengünstige Lösung zur Qualitätssicherung bei Werkzeugen in der Zerspangung

Tatsächlichen Verschleiß erkennen und beheben statt Werkzeuge verfrüht zu wechseln

Um eine gleichbleibende Qualität in der Zerspangung zu sichern und ungeplante Maschinenstillstände sowie Ausschuss durch verschlissene Werkzeuge zu vermeiden, werden diese regelmäßig erneuert. Allerdings kann je nach Randbedingungen der Verschleiß um bis zu 50% schwanken. Daher werden die Werkzeuge in der Regel weit vor Standzeitende gewechselt, was zu Mehrkosten führt.

Zwar lässt sich der Verschleiß der Werkzeuge an speziellen Prüfplätzen mit optischen und taktilen Messmethoden ermitteln. Da das in der Praxis jedoch zu aufwändig ist, werden die Werkzeuge meist in festen Intervallen ausgetauscht. Mit einem neuen Ansatz lässt sich der Verschleiß anhand verschiedener Messgrößen während der Bearbeitung ermitteln. Gemeinsam mit dem Partner GFE hat das IMMS dafür eine KI-basierte nachrüstbare und kostengünstige Lösung umgesetzt.

Grundsätzlich kann man dazu bei neueren Maschinen auf die Messdaten der bereits in der Spindel integrierten Sensoren zugreifen, wie z.B. Strom- oder Schwingungssensoren. In vollem Umfang und in Echtzeit lassen sie sich jedoch nicht nutzen. Das ist derzeit nur mit nachrüstbaren Lösungen möglich.

KIQ auf
www.imms.de

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

Im Projekt hat das IMMS beim Projektpartner ein Präzisionsbearbeitungszentrum mit Schwingungssensorik und einer maschinennahen kompakten Verarbeitungseinheit mit integrierter KI nachgerüstet. Damit wurden die beim Bohren auftretenden Schwingungen in verschiedenen Frequenzbereichen gleichzeitig an mehreren Stellen im Bearbeitungsraum erfasst und als Trainingsdaten für eine auf maschinellem Lernen basierende Software verwendet. Diese ist in der Lage, sowohl den aktuellen Verschleißzustand abzuschätzen als auch die verfügbare Reststandzeit des Werkzeuges zu prognostizieren.

Die Daten werden mit 3-achsigen Beschleunigungssensoren am Spindelgehäuse und an der Werkstückaufnahme erfasst. Um die Datenmenge zu reduzieren und spezifische Merkmale abzuleiten, werden die Signale zunächst mit verschiedenen Operationen vorverarbeitet. Das KI-Modell wurde mit den Daten mehrerer Messreihen auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes trainiert. Die Signalvorverarbeitung und das trainierte KI-Modell lassen sich in Echtzeit in einer kompakten Box direkt an der Maschine ausführen. Das Ergebnis kann direkt an der Maschine sowohl als prognostizierte Reststandzeit als auch als klassifizierter Verschleißzustand des Werkzeugs bereitgestellt werden.

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Die Arbeiten zu KIQ waren ein Teilvorhaben im „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“.

Mehr zu Mittel-
stand Digital:
www.imms.de



Mit installierten Funksensorknoten wie diesem am/im Newtonbau erhebt das IMMS über einen Gebäudekomplex am Campus der TU Ilmenau verteilt mikroklimatische Daten für Energieverbrauchsoptimierungen. Die zylindrische Einhausung schützt die Sensorik vor Aufheizeffekten durch direkte Sonneneinstrahlung. Foto: IMMS.

Projekt und Leistungszentrum InSignA*: Mikroklimadaten zur Optimierung des Energieverbrauchs

Pilotprojekt Echtzeitfähige Energie-Simulationsplattform

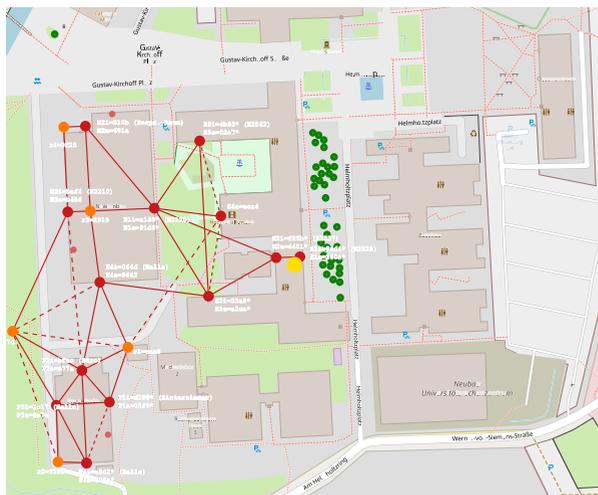
Ziel waren Entwurf, Konzeption und Umsetzung einer einrichtungsübergreifenden, echtzeitfähigen Simulationsplattform für cross-sektorale Energiesysteme. Diese verknüpfen über die sog. Sektorenkopplung die Bereiche Strom, Wärme, Gas, Verkehr und Industrie.

Als Modell hierfür diente ein Gebäudekomplex auf dem Campus der TU Ilmenau. Für diesen sollten sowohl energetische Zählerdaten als auch mikroklimatische Sensordaten erhoben werden. Beides in Kombination erlaubt es, Energieverbräuche mit wetterbedingten Daten in Bezug zu setzen, Zusammenhänge zu erkennen und daraus Maßnahmen zur Energieeinsparung abzuleiten.

*Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de*

Unser Beitrag: Drahtlose Mikroklima-Messungen

Das IMMS hat im Pilotprojekt gemeinsam mit dem Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik (FG TET) der TU Ilmenau Mikroklima-Sensorik ausgebracht, Messdaten erhoben und diese ausgewertet. Für das „Mikroklima“ werden Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten an verschiedenen Messpunkten innerhalb des Gebäudekomplexes erfasst.



- Knotenpaar
- innenpos. real
- Router
- Gateway
- Verbindung (erwartet stabil)
- - - Verbindung (evtl.)
- ★ mit oberflächen-temperatursensor

Netzwerk-Topologie der Funksensoren-Installation an den Gebäuden Helmholtzbau, Newtonbau, Projekthalle. Grafik: IMMS.

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

Dazu haben wir eine bestehende Technologie für drahtlose Sensorknoten (MiraOS) auf die Bedürfnisse des Projekts angepasst, entsprechende Hardware aufgebaut und Software konfiguriert, um in und an den Gebäuden Helmholtzbau, Newtonbau und Projekthalle auf dem Campus der TU Ilmenau Mikroklimadaten zu erheben.

Die batteriebetriebenen und damit autarken Funksensorknoten organisieren sich in ihrer Kommunikation selbst und senden ihre Messdaten – je nach den örtlichen funktechnischen Gegebenheiten über mehrere der Knoten hinweg – zu einem zentralen Gateway. Dieses sammelt die Messdaten auf und legt sie in einer Datenbank am IMMS ab. Von dort aus können die Daten visualisiert oder für Analysen exportiert werden. Letztlich fließen sie so in die Simulationsplattform des Pilotprojekts ein.

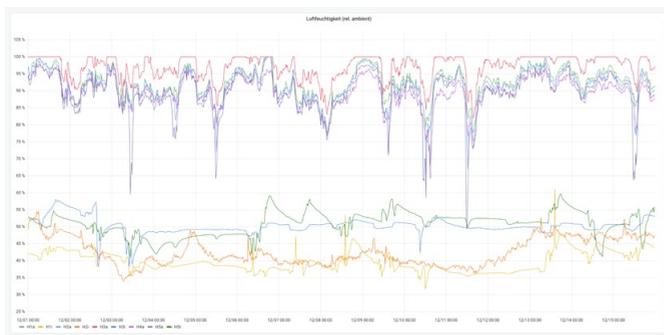
Gemessen werden an den Gebäuden an den vier grob den Himmelsrichtungen entsprechenden Seiten jeweils Lufttemperatur- und -feuchtigkeit innen und außen (im selben Bereich der Gebäudehülle) sowie an einem Teil der Messpunkte auch Oberflächentemperaturen der Fassade bzw. Wandoberflächen innen.

Ergebnis des Pilotprojekts fließt ein in Leistungszentrum InSigna

Zum Ende der Projektlaufzeit lagen mikroklimatische Messdaten für den modellhaften Gebäudekomplex für ca. sechs Monate vor. Um die Datenbasis auf ein volles Jahr zu erweitern, wird das Sensornetz über das Projektende hinaus weiter betrieben.

Analysen des FG TET haben bereits Korrelationen mit Energieverbrauchs- sowie Wetterdaten nachgewiesen. Um konkrete Maßnahmen zur Energieeinsparung abzuleiten, sind noch feinaufgelöste Messdaten zu Energieverbräuchen in den Gebäuden erforderlich. Hierzu laufen durch das Dezernat Gebäude und Technik (DGT) der TU Ilmenau Ausbau- und Erschließungsmaßnahmen.

Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de



Mikroklimatische Werteverläufe über einen Zeitraum von zwei Wochen im Dezember 2021.

Dargestellt sind Verläufe der Sensoren an („...a“ = außen) und im („...i“ = innen) Helmholtzbau („H...“), vgl. vorherige Abbildung.

Grafik: IMMS
(Dashboard-Lösung
Grafana)

Die Partner streben an, diese Vorarbeiten in weiteren Projekten innerhalb des Leistungszentrums fortzuführen und darin neben der Generierung von Vorschlägen für Energieeinsparungsmaßnahmen auch deren Wirkung sensorisch zu beurteilen.

Das Leistungszentrum InSignA

Ziel des Leistungszentrums „InSignA“ in Ilmenau ist es, einen beschleunigten Technologietransfer zu ermöglichen. Mit diesem sollen regionale Wertschöpfungsnetzwerke in den zukunftsorientierten Transferbereichen Signalanalyse- und Assistenzsysteme in Produktion, Energieversorgung und Robotik aufgebaut und etabliert werden.

Damit soll die lokale und regionale Wirtschaft gestärkt und weiterentwickelt sowie widerstandsfähiger gemacht werden. Hierfür werden die Kernkompetenzen der Fraunhofer-Einrichtungen in und um Ilmenau, die Forschungsprofilinien der TU Ilmenau und die Kompetenzen weiterer Forschungseinrichtungen gebündelt. Als An-Institut und Transferpartner der TU Ilmenau bringt sich das IMMS im Unterauftrag der TU Ilmenau in das Pilotprojekt InSignA ein.

Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de

Ilmenauer Arbeiten des Kompetenzzentrums als Basis zur Fortführung in Mittelstand-Digital

Im Oktober 2016 startete das „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“ seine Arbeit. Das IMMS war neben vier weiteren Thüringer Partnern von Anfang an mit dabei, kleinen und mittleren Unternehmen die Digitalisierung verständlich und anschaulich zu machen. Ende September 2021, fünf Jahre nach dem Start, konnte das Team des Kompetenzzentrums auf 250 Digitalisierungsprojekte, 600 Vorträge, 170 Stammtische und 210 Fachworkshops für KMU, sowie 2.000 Informationsgespräche zur Digitalisierung zurückblicken. Nach dem Auslaufen der Förderung „Mittelstand 4.0“ entschied sich das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das bewährte Konzept weiterzuentwickeln und mit der Förderbekanntmachung für ein bundesweites „Netzwerk Mittelstand-Digital“ neue Schwerpunkte zu setzen. Vier Thüringer Partner unterstützen daher seit Oktober 2021 kleine und mittlere Unternehmen im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ – darunter auch das IMMS.

Das Mittelstand-Digital-Zentrum mit seinen vier Modellfabriken legt nun auch einen deutlichen Schwerpunkt auf Nachhaltigkeit, Plattformökonomie und KI. Das IMMS widmet sich darin als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ vor allem den Themen Retrofit, vorausschauende Wartung, smarte Sensorsysteme und Diagnoselösungen. So können für Maschinen Nachrüstlösungen bereitgestellt werden, mit denen der Maschinenzustand automatisch erfasst und visualisiert werden kann. Eine weitere Kernkompetenz liegt in der praktischen Umsetzung von smarten Sensorsystemen, bei denen etwa Werkzeugmaschinen mittels künstlicher Intelligenz überwacht werden. Außerdem zeigen Demonstratoren digitale Diagnoselösungen, die beispielsweise mit mobilen Messgeräten kostenintensive Leckagen in Druckluftsystemen finden können. Fragestellungen der KMU rund um den Einsatz von KI werden durch die KI-Trainer bei allen Partnern des Zentrums behandelt.

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

Mehr zu Mittelstand Digital:
www.imms.de

maschinen unterstützen bereits die Fernabfrage von Daten und Betriebszuständen, aber eine weitergehende Protokollierung bzw. Archivierung dieser Daten ist bisher nicht möglich. Bei der realisierten Lösung können die Maschinendaten per REST-API über einen Mini-PC ausgelesen und in eine InfluxDB-Zeitreihendatenbank geschrieben werden. Ein mit dem Visualisierungstool Grafana erstelltes Dashboard kann den aktuellen Status und vergangene Zustände der Maschine darstellen. Dieses Dashboard ist aus dem gesamten lokalen Netz erreichbar.

Der Übergang von analogen zu digitalen Instandhaltungsplänen für Maschinen- und Anlagenparks wird mit dem **Demonstrator „Smarte Wartung“** veranschaulicht. Mit Hilfe von Wartungskarten werden in Unternehmen die Wartungszyklen für Maschinen beschrieben und deren Ausführung dokumentiert. Die Erstellung eines optimalen Wartungsplans kann sehr aufwändig sein. Mit einer digitalen Instandhaltungssoftware, wie z.B. anxio®, ergeben sich dafür vielfältige automatisierbare Optionen. Instandhalter und Produktionsleiter werden dabei durch Web-Apps (Wartungs- und Planungs-Client) unterstützt. Im Ergebnis lassen sich die wartungsbedingten Produktionsausfallzeiten von Maschinen minimieren und der zusätzliche Dokumentationsaufwand reduzieren.

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

Mehr zu Mittel-
stand Digital:
www.imms.de

Datenerfassungslösung für industrielle KI-Anwendungen. Die robuste Gerätelösung (im Bild links) kommt direkt an einer Werkzeugmaschine zum Einsatz. Für die Parametrierung der Messungen und die Datenanzeige kann z.B. auch ein Laptop verwendet werden. Foto: IMMS.



Für die Erhebung und Vorverarbeitung von Sensor- und Prozessdaten an Maschinen und Anlagen in realen Fertigungsumgebungen wurde eine „Flexible Datenerfassungslösung für KI-basierte industrielle Anwendungen“ konzipiert und realisiert. Das Gerät kann über verschiedene Messkanäle und Datenschnittstellen Sensordaten aufnehmen und intern strukturiert speichern, sodass die spätere Verarbeitung und Analyse der Daten deutlich vereinfacht wird. Auch große Datenmengen, die bei längeren Messkampagnen anfallen, können verarbeitet werden. Die Lösung ist robust implementiert und verfügt über ein webbasiertes Bedieninterface, so dass z.B. mit einem Smartphone drahtlos darauf zugegriffen werden kann. Für KI-Anwendungen zur Zustandsbewertung von Zerspanungswerkzeugen konnten mit dieser Datenerfassungslösung bereits umfangreiche Datensätze erstellt werden.

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

Vernetzung mit Digitalisierungsakteuren ausgebaut

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeit im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ ist die Vernetzung der an der digitalen Transformation der Unternehmen beteiligten Akteure. Im bundesweiten Mittelstand-Digital-Netzwerk gab es einen regelmäßigen Austausch – u.a. in themenspezifischen Arbeitsgruppen oder auf Regionalkonferenzen der beteiligten Zentren – zu den Bedarfen der Unternehmen, dem Ausbau und der zielgruppengerechten Ausgestaltung der Unterstützungsangebote. Das IMMS stand darüber hinaus auch in regelmäßigem Austausch mit Thüringer Netzwerken und Initiativen, wie z.B. der Cross-Cluster-Initiative Thüringen (CCIT), dem Cluster für Elektronische Mess- und Gerätetechnik Thüringen eG (ELMUG), dem Zentrum Digitale Transformation Thüringen (ZeTT), dem Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR) und dem Thüringer Kompetenzzentrum Wirtschaft 4.0.

Mehr zu Mittel-
stand Digital:
www.imms.de.

Als neues Angebot für KMU bei der Unterstützung des Transfers von KI-Technologien und Ergebnissen der KI-Forschung in praktisch nutzbare Anwendungen wurde im Oktober 2021 zusammen mit dem „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ eine Initiative zum Aufbau des „KI-Hub Sachsen-Thüringen“ gestartet. Neben dem „Mittelstand-Digital Zentrum Chemnitz“ und weiteren Partnern mit KI-Qualifizierungsangeboten ist auch das nationale KI-Kompetenzzentrum „ScaDS.AI

– Center for scalable data analytics and artificial intelligence“ aus Dresden/Leipzig als Akteur der KI-Spitzenforschung daran beteiligt.





Maschinelles Lernen auf ressourcenbeschränkten Mikrocontrollern für Edge-KI- und IoT-Anwendungen

Abbildung 1: Am IMMS wurden mithilfe des Machine-Learning-Ansatzes TinyML Algorithmen für eingebettete Systeme entworfen, optimiert und in einem Demonstrator zur KI-basierten Lüfterüberwachung realisiert: Motorlager oder Lüfterschaukeln lassen sich mit der kompakten nachrüstbaren Lösung direkt überwachen. Defekte Teile werden über eine rote LED direkt angezeigt. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Für viele Industrie-Anwendungen wird verteilte Sensorik benötigt, die an verschiedenen Stellen oft über lange Zeit direkt am Prozess z.B. Fehlerzustände oder Verschleiß detektiert oder Daten zur vorausschauenden Instandhaltung erhebt. Das IMMS forscht an adaptiven Edge-KI-Systemen, um Künstliche Intelligenz direkt in den Sensor zu integrieren und somit Entscheidungen in Echtzeit ohne Umweg über die Cloud abzuleiten. Durch die automatisierte Anpassung an neue Umgebungsbedingungen lassen sich vielseitige Edge-Computing- und IoT-Anwendungen erschließen.

Hierfür arbeitet das IMMS zum einen daran, eingebettete Ultra-Low-Power-Systeme (ULP) immer energieeffizienter zu gestalten. Zum anderen forscht das IMMS daran, Machine-Learning-Algorithmen und Software für solche ULP-Systeme zu entwerfen und zu optimieren. Denn diese Kleinstgeräte arbeiten mit einer Leistungsaufnahme von nur wenigen Milliwatt und mit nur wenigen Kilobyte Arbeitsspeicher und können aufgrund ihrer begrenzten Ressourcen für die herkömmlichen, für hochperformante Rechner ausgelegten Machine-Learning-Modelle nicht genutzt werden. Um mit möglichst wenig Ressourcen die für die Anwendung benötigten Ergebnisse zu erhalten,

*Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de*

*Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de*

Jahresbericht

© IMMS 2021

hat das IMMS seine Lösungen auf Tiny ML (tiny machine learning) aufgebaut. Dieses Teilgebiet des maschinellen Lernens beinhaltet Hardware, Algorithmen und Software. Damit konnte das IMMS KI-Algorithmen direkt am Sensor ausführen und somit die Daten direkt auf batteriebetriebenen ULP-Systemen auswerten und analysieren.

Im gezeigten Beispiel lässt sich damit der Zustand und der Wartungsbedarf von Lüftern ermitteln. Damit kann zudem Energie eingespart werden, da keine Datenübertragung zu einem energieintensiven Server notwendig ist. Darüber hinaus ist die Sicherheit der Daten gewährleistet, da sie direkt am Sensor verarbeitet und keine Rohdaten übertragen werden.

Ziel ist es, auf der Grundlage dieser Lösungen Entwicklungen für adaptive Edge-KI-Systeme für weitere industrielle Anwendungen abzuleiten. Beispielsweise werden am IMMS ML-Algorithmen entworfen und neuronale Netzwerke trainiert, die über die reine Datenerhebung und -auswertung hinaus auch KI-basierte Vorhersagen zur vorausschauenden Wartung ermöglichen, wie z.B. zur Vorhersage von Bohrerstandzeiten.

Klassisches Maschine Learning versus Deep Learning

Beim Entwurf von KI-Algorithmen für die vorausschauende Wartung bzw. zur Zustandsanalyse von Maschinen können grundsätzlich zwei Ansätze verwendet werden. Das klassische Machine-Learning mit Merkmalsextraktion, dem Feature Engineering, und ein Deep-Learning-Ansatz.

Beim **klassischen Machine-Learning** geht es um Algorithmen, die zielgerichtet und automatisiert aus vorbereiteten und strukturierten Daten Muster erkennen. Ohne definiertes Ziel und aufbereitete Daten sind somit keine Analysen und Vorhersagen möglich. Daher wird Machine Learning in der Regel für kleine, strukturierte Datenmengen eingesetzt.

Für die genannten Anwendungen werden mittels Signalverarbeitung relevante Informationen, Merkmale oder Features aus den Sensorsignalen berechnet. Dafür können statistische Methoden für die Analyse im Zeitbereich, wie z.B. Mittelwert, Kurtosis oder Crestfaktor, aber auch Analysen im Frequenzbereich, z.B. Fourier- oder Wavelet-Transformationen verwendet werden.

Im **Deep Learning** werden dagegen sehr viele sowie unstrukturierte Daten in vielen Iterationen analog zum menschlichen Lernen verarbeitet. Künstliche neuronale

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

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de

Jahresbericht
© IMMS 2021

le Netzwerke erzeugen die für Analysen benötigten Merkmale und Strukturen aus diesen Daten selbst. Im Gegensatz zum Machine Learning erfolgt eine selbständige Datenaufbereitung und Feature-Extraktion, sofern genug Daten und Rechenleistung vorhanden sind.

Für die genannten Anwendungen mit Deep-Learning werden die Sensordaten direkt in ein neuronales Netzwerk, ein KI-Modell, gegeben. Für das Training eines solchen Modells werden viele Daten möglichst gleich verteilt auf die unterschiedlichen Maschinenzustände benötigt.

Machine Learning ist dagegen aufwändiger als der Deep-Learning Ansatz, ist aber für den Entwickler durch die händische Auswahl der Merkmale teilweise erklärbar. Der Machine-Learning-Ansatz ist besser geeignet, wenn auf Expertenwissen zurückgegriffen werden kann oder aber nur wenige Daten verfügbar sind, wie das oft in der vorausschauenden Wartung der Fall ist.

Optimierung im klassischen Machine Learning

Hochdimensionale KI-Modelle sind leistungsfähig, benötigen aber Speicher, Rechenleistung und Energie

KI-Modelle werden oft so entworfen, dass die maximale Klassifikations- oder Vorhersagegenauigkeit erreicht wird. Die Optimierung ist einer der wichtigsten Aspekte von KI-basierten intelligenten Algorithmen, um sie auf ressourcenbeschränkten, energieeffizienten eingebetteten Systemen implementieren zu können. Die Systemanforderungen wie Energieverbrauch und Hardwarekosten hängen vom verwendeten Modell ab. Für die vorausschauende Wartung (Predictive Maintenance, PdM) und zur Schätzung des Maschinenzustands sind nicht nur die Roh-Sensordaten, sondern auch die Statistiken der spektralen Informationen sehr informativ, wodurch ein sehr großer Designraum entsteht. Jeder zusätzliche Sensor und Merkmalsextraktor verbessert die Leistung des KI-Modells, erhöht aber auch die Systemkomplexität. Ein solch großer Merkmalsraum erhöht die Systemanforderungen hinsichtlich Speicher, Rechenleistung und Energie. Das macht PdM auf ressourcenbeschränkten Geräten wie Mikrocontrollern zu einer großen Herausforderung.

Feature Ranking verschlankt KI-Modelle durch Aussortieren redundanter Merkmale

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden an den öffentlich verfügbaren Datensätzen Prognostia¹ und XJTU² durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse

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

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de

Jahresbericht
© IMMS 2021

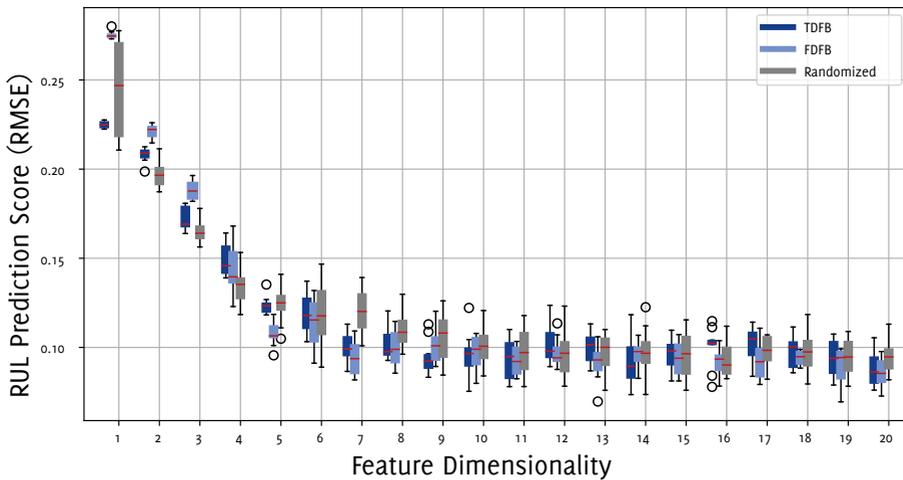


Abbildung 2: Mittels Feature Ranking geordnete Merkmale. Grafik: IMMS.

für vorhandene Modelle zu erzielen. Diese Datensätze enthalten Sensordaten zum Verschleißprozess von Kugellagern.

Bei vielen Anwendungen kann jede zusätzliche Sensorinformation oder jeder zusätzliche Merkmalsextraktor die Gesamtleistung des KI-Modells potenziell verbessern. Mehr Merkmale und damit eine höhere Dimensionalität garantieren jedoch nicht immer eine höhere Vorhersagegenauigkeit. Durch stark korrelierende Merkmale und Überanpassung kann es zu einer suboptimalen Lösung führen.

Eine Möglichkeit, das Problem der hohen Dimensionalität zu lösen, sind Algorithmen für das Feature-Ranking (FR), um die Auswirkungen jeder Variable (Feature oder Inputs) zu analysieren, die in das KI-Modell gespeist werden. FR-Methoden liefern eine detaillierte, interpretierbare Metrik der Merkmalsbedeutung, die für den Aufbau eines optimierten Systems für die jeweilige Anwendung verwendet werden kann. Es gibt einige verschiedene Ansätze, die am IMMS untersucht und evaluiert wurden: Wrapper-Methoden, die rechenintensiv, aber sehr genau sind; Filter-Methoden, die sehr schnell zu berechnen sind, jedoch von den optimalen Ergebnissen abweichen können; Embedded-Methoden, die ein einmaliges Training erfordern und im Vergleich zu Filter-Methoden genauer sind.

Ziel der Arbeiten war es, die optimale FR-Methode zur Analyse des Informationsgehalts von Merkmalen bzw. Eingangsvektoren zu finden, um somit die Gesamtsystemressourcen (Rechenaufwand, Speicher, Energiebedarf) zu senken. Dazu werden die nicht-informativen, redundanten Eingangssignale und ihre Merkmale aus dem KI-Modell entfernt. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2. Die x-Achse stellt die Dimension

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de

der Merkmale dar, die von zwei verschiedenen Schwingungssensoren (horizontale und vertikale Achse) stammt und die in ihre spektralen Komponenten aufgeteilt wurden. Die Y-Achse ist der Fehler des trainierten KI-Modells bei der Zustandsschätzung. Jeder Box-Plot veranschaulicht die Fehlerstatistik für die gegebene Dimension an Features. Es ist zu beobachten, dass sich der Schätzfehler nach 7 Features nicht weiter signifikant verbessert. Dies bedeutet, dass die restlichen 13 von 20 Merkmalen nicht aussagekräftig sind, was auf Rauschen und redundante Informationen zurückzuführen sein kann.

Für das betrachtete Beispiel, einem öffentlich verfügbaren Datensatz, stammen die meisten informativen Merkmale von einem Sensor. Das bedeutet, dass die Hardware- und Rechenkosten reduziert werden können, indem der andere Sensor und die entsprechenden Merkmale aus dem System komplett entfernt werden. Diese reduzierte Merkmalsdimensionalität kann als neue Grundlage für die Entwicklung optimierter eingebetteter Systeme dienen.

Optimierung für Deep Learning für ressourcenbeschränkten Systeme

Neuronale Netze können durch Ausdünnen (engl. Pruning) reduziert bzw. verkleinert werden. Dabei werden Verbindungen und ganze Neuronen in dem Netzwerk entfernt. Ziel des Pruning ist es, das Netz so zu verkleinern, dass die Aussagegenauigkeit nur minimal sinkt.

Die Ansätze lassen sich grob in strukturiertes und unstrukturiertes Pruning unterteilen. Beide haben ihre Vor- und Nachteile. Neuronale Netze lassen sich auch als Matrizen darstellen. Unstrukturiertes Pruning wirkt sich nur geringfügig auf die Genauigkeit des beschnittenen Modells aus, kann aber Operationen auf schwachbesetzte Matrizen forcieren, die schwer zu beschleunigen sind. Dies kann zu längeren Abarbeitungszeiten und damit zu einem höheren Energieverbrauch des Systems führen.

Das IMMS hat sich bei seinen Arbeiten mit strukturiertem Pruning beschäftigt und dazu AlexNet- und ResNet-KI-Modelle basierend auf einem öffentlich verfügbaren Datensatz (XJTU²) und Ergebnissen anderer Forschungsarbeiten³ untersucht und optimiert. Das strukturierte Pruning führt nicht zu dünnbesetzten Matrizen und eignet sich besser für die Implementierung auf Mikrocontrollern. Bei den Modellen wurden mit strukturiertem Pruning die kompletten Filter entfernt. Dies kann die Form der Ein- und Ausgänge der Schichten verändern, ermöglicht aber Operationen auf vollbesetzten Matrizen. Das strukturierte Pruning kann bei aggressivem Vorge-

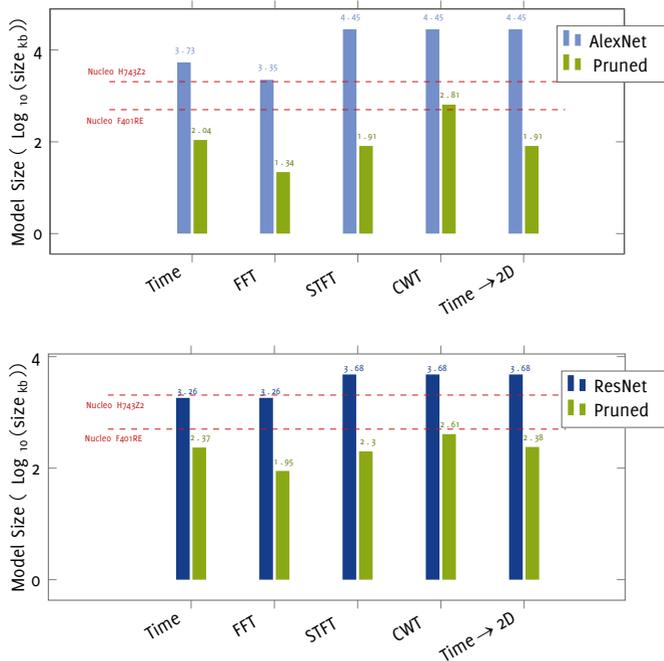


Abbildung 3:

Vergleich des Speicherbedarfs der ursprünglichen AlexNet- und ResNet- Modelle mit den beschnittenen Modellen, sowie Darstellung des verfügbaren Speichers von zwei Mikrocontroller-Typen (STM32F401 und STM32H743).

Grafiken: IMMS.

hen erheblichen Einfluss auf die erzielte Genauigkeit haben, daher wurde vor dem Pruning ein Schwellwert für den maximalen Genauigkeitsunterschied zwischen dem ursprünglichen AlexNet- und ResNet-Modell und dem beschnittenen Modell von 3% festgelegt. Das Pruning wird gestoppt, wenn der Genauigkeitsunterschied unter 3% fällt.

In der Abbildung 3 sind die Ergebnisse des Speicherbedarfs der ursprünglichen Modelle und der beschnittenen Modelle dargestellt. Zur besseren Einordnung ist der verfügbare Speicher von zwei Mikrocontroller-Typen (STM32F401 und STM32H743) mit eingezeichnet. Die ursprünglichen Modelle benötigen mehr Speicher als im Controller vorhanden. Dem gegenüber können die angepassten Modelle auf einem Mikrocontroller implementiert werden. In der Tabelle sind die erzielten Genauigkeiten der Modelle gegenübergestellt.

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de

Features	AlexNet		ResNet	
	Original	Pruned	Original	Pruned
Zeitsignal	96,10%	93,23%	99,73%	97,02%
FFT Fast Fourier transform	98,4%	96,87%	99,21%	97,84%
CWT Continuous wavelet transform	90,02%	87,43%	92,91%	90,23%
2D Zeitsignal	97,70%	95,35%	95,57%	93,23%
STFT Short-time Fourier transform	98,37%	97,65%	99,6%	96,35%

Das IMMS hat einen Demonstrator zur KI-basierten Lüfterüberwachung realisiert, um die vorgestellten Methoden zur optimierten Nutzung von Algorithmen für eingebettete ULP-Systeme zu erproben und im Applikationsfeld der vorausschauenden Wartung zu veranschaulichen, siehe Abbildung 1. Motorlager oder Lüfterschaukeln lassen sich mit der kompakten nachrüstbaren Lösung direkt überwachen. Die Lüfter können am Demonstrator einzeln an- und abgeschaltet werden. Das Sensorsystem wird mittig auf einem der Lüfter platziert und ist mittels eines Magneten befestigt. Defekte Teile werden direkt über eine LED rot angezeigt, intakte grün.

Zunächst wurde hierfür mit 10 handelsüblichen PC-Lüftern mit Vibrationssensoren ein Datensatz aufgenommen und erstellt. Bei drei Lüftern wurden die Kugellager verschlissen. Mit den zwei vorgestellten Ansätzen, dem klassischen ML und mit einem neuronalen Netzwerk wurden mit dem Datensatz zwei KI-Modelle trainiert, die den Zustand (intakt und defekt) der Lüfter abschätzen können.

Ein batteriebetriebenes System aus einem Vibrationssensor, Mikrocontroller (STM32L4) und LEDs zur Statusanzeige wurden entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen. Die beiden KI-Modelle wurden mit den vorgestellten Methoden optimiert und auf dem Mikrocontroller implementiert.

Anwendungsfälle

Das IMMS fokussiert sich bei seinen Arbeiten zu adaptiven Edge-KI-Systemen darauf, Maschinen- und Werkzeugzustände zur vorausschauenden Wartung mithilfe von KI zu bestimmen und vorherzusagen. Neben der oben beschriebenen Beispielanwendung zur KI-basierten Lüfterüberwachung hat das IMMS dazu in einem weiteren Anwendungsfall Schwingungssensoren an einer Zerspannungsmaschine nachgerüstet und die während der Bohrung auftretenden Vibrationen an mehreren Stellen im Bearbeitungsraum erfasst. Ziel der Untersuchung war es, die Reststandzeit der Bohrer abzuschätzen, um somit die Werkzeuge optimal zu nutzen und Ausschuss durch beschädigte Werkzeuge zu vermeiden. Um die Datenmenge zu reduzieren und spezifische Merkmale abzuleiten, werden die Daten zunächst mit verschiedenen Signalverarbeitungsoperationen vorverarbeitet. Mit den Daten mehrerer Messreihen wurde das KI-Modell auf Basis eines künstlichen neuronalen Netzes trainiert. Das Ergebnis kann über eine direkt an der Maschine nachgerüstete kompakte Box sowohl als prognostizierte Reststandzeit als auch als klassifizierter Verschleißzustand des Werkzeugs in Echtzeit bereitgestellt werden.

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

Kernthema
Eingebettete KI:
www.imms.de

Leitanwendung
Adaptive Edge-
KI-Systeme für
industrielle
Anwendungen:
www.imms.de

Zusammenfassung und Ausblick

Das IMMS hat die Methoden zur Optimierung von KI-Modellen für ULP-Systeme erfolgreich in einem Demonstrator implementiert und publiziert bzw. auf Fachkonferenzen präsentiert. Der Fokus wird künftig in der automatischen Analyse und Auswahl der wichtigen Merkmale liegen, wo derzeit noch aufwändigere manuelle Eingriffe notwendig sind. Darüber hinaus wird das IMMS untersuchen, wie sich das Pruning von neuronalen Netzen auf andere KI-Modelle, z.B. Autoencoder, anwenden lässt. Der Demonstrator wird demnächst mit einer Funkschnittstelle zur Einbindung in bestehende Systeme erweitert. Ziel weiterer Entwicklungen ist, KI-Lösungen besser für KMU zu erschließen, indem aufwändige Prozesse bei der KI-Anwendungsentwicklung weitestgehend automatisiert werden. Das soll die Ableitung weiterer Anwendungen deutlich beschleunigen.

Kontakt: Sebastian Uziel, sebastian.uziel@imms.de

Literatur:

- [1] P. NECTOUX, R. GOURIVEAU, K. MEDJAHER, E. RAMASSO, B. CHEBEL-MORELLO, N. ZERHOUNI, and C. VARNIER, **Pronostia: An experimental platform for bearings accelerated degradation tests.** in *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM'12. IEEE Catalog Number: CPF12PHM-CDR, 2012, pp. 1 – 8.*
- [2] Biao WANG, Yaguo LEI, Naipeng LI, Ningbo LI, **A Hybrid Prognostics Approach for Estimating Remaining Useful Life of Rolling Element Bearings.** *IEEE Transactions on Reliability 2020, 69, 401 – 412.*
- [3] Zhibin ZHAO, Tianfu LI, Jingyao WU, Chuang SUN, Shilin WANG, Ruqiang YAN, Xuefeng CHEN: **Deep learning algorithms for rotating machinery intelligent diagnosis: An open source benchmark study.** *ISA Transactions 2020, 107, 224 – 255.*

Die Forschung zu Methoden für die optimierte Nutzung von Algorithmen in adaptiven Edge-KI-Systemen wurden in der internen, vom Freistaat Thüringen finanzierten KI-Forschungsgruppe erarbeitet. Die Arbeiten zu den Beispielapplikationen bzw. der Demonstrator wurden im „Mittelstand-Digital-Zentrum Ilmenau“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Kennzeichen 01MF21008C gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages





Intelligente Sensorik für die Digitalisierung in der Landwirtschaft

Das IMMS arbeitet an autarken modularen Sensorsystemen für kostengünstige Optionen zur Datenerhebung in der Landwirtschaft. Dazu haben wir den hier abgebildeten Prototypen für eine modulare IoT-Plattform entwickelt, mit der sich u.a. abiotische Parameter im Obstbau erfassen und Standortfaktoren bewerten lassen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Bewässerung spielt für viele Obstbauern zunehmend eine wichtige Rolle bei der Sicherung der Erträge. In Zeiten von Klimawandel und vermehrter Trockenheit ist es jedoch wichtig, die Ressource Wasser so sparsam wie möglich einzusetzen. Für diese Frage, die auch die Partner des Lehr- und Versuchszentrums Gartenbau (LVG) in Erfurt seit langem beschäftigt, hat das IMMS im Projekt EXPRESS Technik entwickelt und erprobt. Die langjährigen Ergebnisse der Bewässerungsversuche am LVG zeigen, dass alle bewässerten Varianten eine höhere Fruchtgröße und -qualität aufweisen als die unbewässerte Kontrolle. Diese Merkmale sind wichtig, um am Markt bestehen zu können, denn nur die beste Qualität kann Preise erzielen, die den Aufwand wirtschaftlich rechtfertigen. Die Bewässerung wird also immer wichtiger, wenn der Obstbau in Mitteldeutschland konkurrenzfähig bleiben soll. Gleichzeitig wird es durch Dürre und anhaltende Trockenheit jedoch immer wichtiger, das eingesetzte Wasser so sparsam wie möglich zu nutzen.

*Mehr zu
EXPRESS auf
www.imms.de*

*Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de*

Für diese Optimierungen müssen Daten durch unterschiedliche Sensoren erfasst und zusammengeführt werden. Da am Markt verfügbare Systeme jedoch häufig nur

*Jahresbericht
© IMMS 2021*

auf eine Fragestellung zugeschnitten sind, ist es schwer, verschiedene Sensoren zu einem System zu integrieren und so flexible Lösungen für den Obstbau zu realisieren.

Das IMMS hat daher eine modulare Plattform entwickelt, mit der sich angepasste Lösungen hinsichtlich der verwendeten Sensoren aber auch der eingesetzten Funktechnologien realisieren lassen.

Das LVG hat diese Plattform für Untersuchungen eingesetzt und konnte unter anderem mittels Bodenfeuchtesensoren Einsparungen gegenüber festen Bewässerungsintervallen oder einer Bewässerung nach aktuellem Standardmodell erzielen und die Bewässerung mithilfe von Daten zur Fruchtentwicklung weiter optimieren.



Abbildung 1:

Aus Komponenten der Plattform aufgebauter Mikroklimaknoten mit 2 kombinierten Sensoren für Lufttemperatur und -feuchte und einem Blattfeuchtesensor, wie sie im Obst- und Weinbau aktuell eingesetzt werden.

Foto: IMMS.

Entwicklung und Aufbau der modularen IoT-Plattform

Die entwickelte Plattform zeichnet sich dadurch aus, dass verschiedene Funkmodule (aktuell IEEE 802.15.4, LoRa und NB-IoT) mit unterschiedlichen Basisboards zum Anschluss von spezifischen Sensoren kombiniert werden können. Welches Basisboard genutzt wird, ist von der Schnittstelle zum Sensor abhängig. So gibt es Varianten für I²C, aber auch für spezifische Protokolle wie SDI-12. Neben einer klassischen Energieversorgung per Batterie werden auch Optionen zur autarken Versorgung mittels Solarpanel eingesetzt.

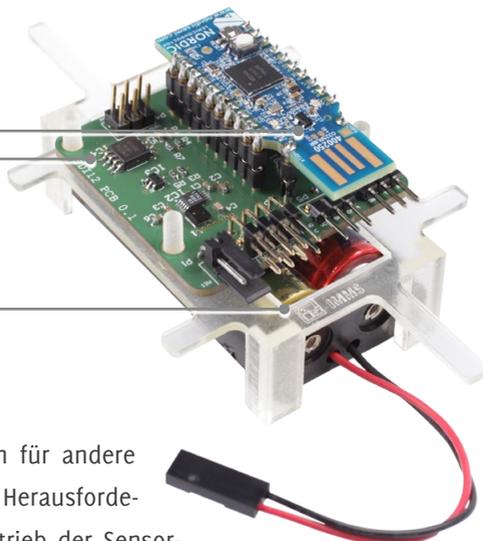
Auf dem Weg zu dieser Plattform war verschiedenen Herausforderungen zu begegnen. So musste eine Lösung für die Integration von komplexeren Protokollen wie SDI-12 gefunden werden. Das wurde über einen protokollspezifischen Co-Prozessor gelöst, der selbst per I²C angesprochen wird und die Kommunikation mit dem Sensor

Abbildung 2:

Komponenten der modularen IoT-Plattform:

- Funkmodul
- Messmodule
 - . Basis
 - . I²C-Mux
 - . Coprozessor
 - .. SDI-12
 - .. 1-Wire
- Energieversorgung
 - . Akku / Batterie
 - . Stromnetz
 - . Harvester

Foto: IMMS.



übernimmt. Dieses Konzept ist auch für andere Protokolle anwendbar. Eine weitere Herausforderung stellt der energieoptimierte Betrieb der Sensorknoten dar. Hier arbeitet das IMMS an der modellbasierten Evaluation des Energieverbrauchs und der daraus resultierenden Lebensdauer der Knoten unter bestimmten Szenarien. Dies wird insbesondere dann wichtig, wenn Sensoren intelligenter werden und keinem festen Schema für den Arbeitszyklus folgen.

Das so realisierte Prototyping-System ermöglicht es, schnell erste Lösungen aufzubauen, wenn die Sensoren das entsprechende Protokoll unterstützen. Darüber hinaus sind damit flexible Lösungen mit mehreren Sensoren möglich, die sich speziell für eine Fragestellung zuschneiden lassen. Im Projekt EXPRESS können so mittlerweile die Größen Lufttemperatur und -feuchte, Bodentemperatur und -feuchte, Luftdruck, photosynthetisch aktive Strahlung, Globalstrahlung, Blattfeuchte sowie Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst werden.

Neben den eigentlichen Funksensorknoten unterstützt die Lösung des IMMS darüber hinaus aufgrund des optimierten Energiemanagements den Anschluss solcher Spezialsensorik an das Gateway, die einen derart hohen Energieverbrauch aufweist, dass man normalerweise mit ihr keinen sinnvollen batteriebetriebenen Funksensorknoten aufbauen kann. Die Plattform bietet zudem Maßnahmen zur Sicherstellung der Datenqualität und ein umfassendes System zum Monitoring und zur Diagnose der Geräte im Feld. Auch in diesem Bereich war es eine Herausforderung, den Gerätezustand im Feld und die Datenqualität jederzeit evaluieren zu können, ohne vor Ort sein zu müssen. Um dies zu ermöglichen, wurden Statusinformationen in den Nachrichten sowie eine Server-seitige Qualitätssicherung mit Benachrichtigungsfunktion integriert.



Abbildung 3:

Einbringen von Bodenfeuchtesensoren und Installation der Sensorknoten für Untersuchungen des LVG.

Foto: IMMS.

Konfiguration der modularen IoT-Plattform für Untersuchungen am LVG

Am LVG wurden mit Hilfe der Plattform aufgebaute Sensorsysteme für einen Versuch zur Bewässerung von Süßkirschen installiert. Dabei wurde ein Ad-Hoc-Netzwerk verwendet, das auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4-basiert, und ein Mesh-fähiges Multihopnetzwerk bereitstellt. Für Fragestellungen im Versuchswesen mit vergleichsweise vielen Messpunkten auf kleinem Raum ist dies ideal. Das System erfasst an 9 Messpunkten Lufttemperatur und -feuchte, Bodentemperatur und -feuchte, die Blattfeuchte sowie den Luftdruck und die photosynthetisch aktive Strahlung. Für die Bewässerung sind jedoch vor allem die Bodenwerte und das Mikroklima in der Anlage relevant. Der Bewässerungsversuch vom LVG umfasst vier unterschiedliche Varianten der Bewässerung und zwei Varianten Mulchabdeckung. Die Daten der Sensoren werden lokal an einem Gateway gesammelt, als Backup zwischengespeichert und sowohl an einen Server am IMMS als auch an einen Server am LVG übertragen, dort in einer InfluxDB bzw. MariaDB gespeichert und per Grafana visualisiert.

Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de

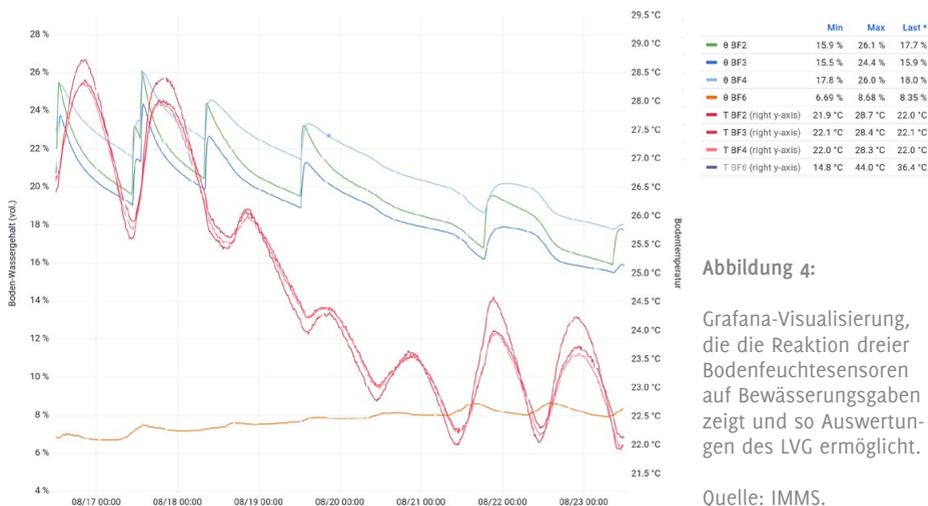


Abbildung 4:

Grafana-Visualisierung, die die Reaktion dreier Bodenfeuchtesensoren auf Bewässerungsgaben zeigt und so Auswertungen des LVG ermöglicht.

Quelle: IMMS.



Abbildung 5:
Auswahl an untersuchten Bodenfeuchtesensoren
für die Bewässerungssteuerung. Foto: IMMS.

Neben der Bereitstellung der Technik für die Versuche und deren Unterstützung am LVG erprobte das IMMS zusätzlich die Eignung unterschiedlicher Bodensensoren für diesen Anwendungsfall, um den Obstbauern Hinweise zu benötigten Investitionen geben zu können. Dazu wurden Sensoren in einer Preisspanne von 50 – 600 EUR getestet und verglichen.

Untersuchungen mit der modularen IoT-Plattform in verschiedenen Anwendungen

Versuche am LVG zur sparsamen Bewässerung und zum Fruchtwachstum im Obstbau

Das LVG führt jährlich Versuche durch, in denen unterschiedliche Bewässerungsarten, wie z.B. Tropfer oder Sprinkler, und Mulchauflagen als Verdunstungssperren geprüft werden. Der zusätzliche Sensorikeinsatz und damit die Digitalisierung zeigte hier erste Stärken. So können Bodenfeuchtesensoren die für die Pflanze verfügbare Menge Wasser im Boden erkennen und dabei helfen einzuschätzen, wann und wie viel bewässert werden muss. Die Ergebnisse am LVG zeigen, dass diese Information allein ausreicht, um gegenüber festen Bewässerungsintervallen oder einer Bewässerung nach aktuellem Standardmodell eine Einsparung zu erzielen.

Weitere Einsparungen sind möglich, wenn neben den abiotischen Faktoren der Bodenfeuchte und des Niederschlags auch Informationen über die Pflanze selbst genutzt werden können. So hat das IMMS auf Initiative des LVG einen Sensor zur Messung des Fruchtwachstums entwickelt und in das bestehende System integriert. Dieser Sensor erlaubt es, unterschiedliche Phasen der Fruchtentwicklung zu erkennen. Damit ist es möglich, die Wassergabe so anzupassen, dass nur dann bewässert wird, wenn es der Fruchtqualität zugutekommt.

*Leitanwendung
IoT-Systeme für
kooperatives
Umwelt-
Monitoring:
www.imms.de*



Abbildung 6:

Am IMMS entwickelter Sensor zur Messung des Fruchtwachstums. Mit ihm lassen sich unterschiedliche Phasen der Fruchtentwicklung erkennen. Folglich wird nur dann bewässert, wenn es der Fruchtqualität zugutekommt.
Foto: IMMS.

- 99
- > Integrierte Sensorsysteme
 - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - > Mag6D-nm-Direktantriebe
 - > Inhalt
 - * Förderung

Versuche zu Bewässerung, Knospenwachstum und Frostwarnung

Darüber hinaus werden die Versuche zu Bodensensorik mit weiteren Praxispartnern, unter anderem Obstgarten Orphalgrund e.G. (Fahner Obst) in Thüringen und Biofrucht Senst in Sachsen-Anhalt, durchgeführt, um auch diese Ergebnisse in die Praxis zu tragen. Ein weiterer Aspekt ist dabei, dass Ergebnisse nicht nur von einem Standort stammen, um unterschiedliche Rahmenbedingungen abzudecken.

Mit der am IMMS entwickelten Plattform ist es zudem möglich, Daten für andere Fragestellungen im Obst- und Weinbau zu sammeln. So ist z.B. eine leicht veränderte Version des Sensors für das Fruchtwachstum im Winter in Dresden-Pillnitz beim Julius-Kühn-Institut (JKI) für Züchtungsforschung an Obst eingesetzt worden, um das Knospenwachstum an unterschiedlichen Apfelsorten zu überwachen. Die Forschungsfrage des JKI zielt dabei auf Mechanismen für das Erwachen der Pflanzen im Frühjahr ab, um langfristig das damit einhergehende Risiko auf Frostschäden zu minimieren. Die Sensoren unterstützen die Forscher dabei, indem die Entwicklung im Frühjahr detailliert verfolgt werden kann.

Die Erkennung und Warnung vor Frostereignissen auf Basis von Wetterprognosen und im Feld installierter Sensorik ist ein weiteres Schwerpunktthema am IMMS. Dazu konnten erste Tests einer Schwellwert-basierten Warnung aufs Handy bereits

- Leitanwendung
- IoT-Systeme für kooperatives Umwelt-Monitoring:
- www.imms.de



Abbildung 7:

Sensor zur Messung des Knospenwachstums. Er hilft dabei, die Entwicklung der Pflanze zu untersuchen und perspektivisch Spätfrost-tolerante Sorten zu züchten.
Foto: IMMS.

erfolgreich durchgeführt werden. Dies soll es Obstbauern und Winzern ermöglichen, je nach Situation Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Auch für diese Fragestellung sind die entwickelten Sensorsysteme eine wichtige Basis.

Ausblick

Das IMMS hat mit seinen Arbeiten in EXPRESS dazu beigetragen, für Landwirte geeignete und bezahlbare Systeme zu identifizieren, deren Möglichkeiten zu erfassen und einen Nutzen zu generieren. Darüber hinaus hat das IMMS mit der Entwicklung der modularen IoT-Plattform für verschiedene Sensoren und damit verschiedene Anwendungen ein flexibles und kostengünstiges System realisiert, das alle erforderlichen Größen hinreichend genau erfassen und gleichzeitig mit möglichst wenigen Messpunkten verwertbare Aussagen mit einem hohen praktischen Nutzwert bereitstellen kann. Auf dieser Grundlage streben IMMS und LVG eine weitere Zusammenarbeit in Folgeprojekten an.

Zukünftige Entwicklungen beinhalten u.a. eine Datenfusion der gemessenen Werte mit Wetterprognosen, die in die Bestimmung der Bewässerungszeitpunkte mit einfließen. Dies kann helfen, bei angesagtem Niederschlag diesen erst abzuwarten und anschließend ein verbliebenes Defizit auszugleichen. Auch so kann zusätzlich Wasser eingespart werden, ohne die Fruchtqualität und damit den Erfolg der Landwirte zu beeinträchtigen.

Außerdem hat sich gezeigt, dass eines der häufig verwendeten Modelle für die Bewässerung in Zeiten des Klimawandels den jahreszeitlichen Verlauf nicht mehr exakt abbilden kann. Dies liegt an veränderten Bedingungen, die dazu führen, dass Grundannahmen des Modells nur noch sehr selten erfüllt werden. Auch hier kann die eingesetzte Sensorik künftig unterstützen, um einerseits die genaue Ausgangssituation im Frühjahr zu ermitteln und andererseits die erforderliche Anpassung der Berechnungsfaktoren zu bestimmen.

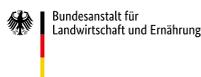
Kontakt: Dr.-Ing. Silvia Krug, silvia.krug@imms.de

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Die Förderung des Vorhabens EXPRESS erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Projekträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft mit dem Förderkennzeichen FKZ 28DE102D18.

FORSCHUNGSFELD

MAGNETISCHE 6D-DIREKTANTRIEBE MIT NANOMETER-PRÄZISION



Die Lösung "Picometer-Scale Positioning of a Linear Drive System via Feedforward-Feedback Control" wurde auf der ICM 2021 (IEEE International Conference on Mechatronics) mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Auf der Konferenz wurden über 100 Themen vorgestellt.

Der abgebildete Versuchsaufbau am IMMS validiert einen anspruchsvollen Reglerentwurf für ein lineares Antriebssystem und wurde mit

Partnern der TU Ilmenau und der SIOS Meßtechnik GmbH für die Forschung im Bereich der hochdynamischen Nano- und Pikometer-Positionierung entwickelt.

Die Wirksamkeit der vorgestellten Regelungsstrategie wurde durch Echtzeitexperimente verifiziert, bei denen das entwickelte Regelungsschema eine Positionierung im Pikometerbereich ermöglicht. Foto: IMMS.

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

Gefördert durch

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Jahresbericht

© IMMS 2021

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 Reinnräumen und an Orten mit besonderen Anforderungen hinsichtlich thermischer Isolation und Entkopplung von Vibrationen.

Magnetische
6D-Direkt-
antriebe mit
nm-Präzision:
www.imms.de

Highlights 2021 im Forschungsfeld

Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

Best Paper Award zur IEEE ICM 2021 für eine Positionierungslösung im Pikometermaßstab

Auf der IEEE International Conference on Mechatronics (ICM) am 8. März 2021 wurde der Best Paper Award für den Beitrag "Picometer-Scale Positioning of a Linear Drive System via Feedforward-Feedback Control" an Alex S. Huaman, Michael Katzschmann, Steffen Hesse und Christoph Schäffel vom IMMS, Christoph Weise, Eberhard Manske und Johann Reger von der Technischen Universität Ilmenau sowie Denis Dontsov von der SIOS Meßtechnik GmbH Ilmenau verliehen. Ihr prämierter Versuchsaufbau validiert einen anspruchsvollen Reglerentwurf für ein lineares Antriebssystem. Dieser wurde am IMMS realisiert und speziell für die Forschung zur hochdynamischen Positionierung im Nanometer- und Pikometerbereich entwickelt.

Mehr zu
NanoFab auf
www.imms.de

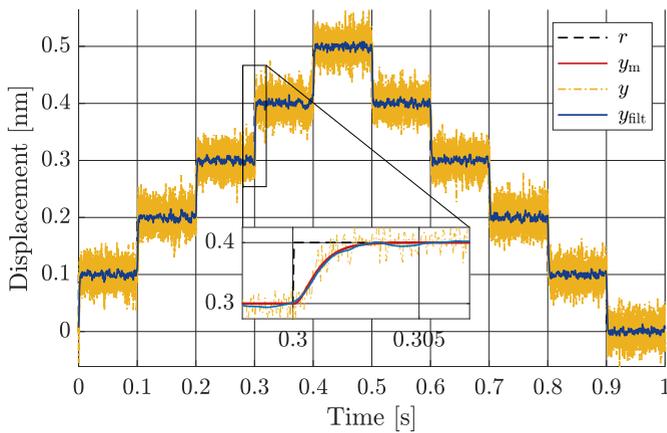


Abbildung 1:

Zeitreihe für die Sollwertregelung im Pikometerbereich.

Grafik: IMMS.

Viele High-Tech-Anwendungen, wie z.B. die Halbleiterfertigung, erfordern hochpräzise Positioniersysteme mit einem Mess- und Positioniervermögen bis in den Pikometerbereich. Zu diesem Zweck erforscht das IMMS gemeinsam mit der TU Ilmenau die physikalischen und technologischen Grenzen solcher Positionierlösungen.

Im Zuge dieser Forschungsarbeiten hat das IMMS einen neuartigen linearen Präzisionsantrieb mit einem Verfahrbereich von ± 15 nm entwickelt und realisiert. Mit Hilfe eines hochpräzisen differentiellen Laserinterferometers und Planspiegeln ist es möglich, die lineare Verschiebung extrem empfindlich zu erfassen. Für die Pikometerpositionierung wurde eine modellbasierte Regelungsarchitektur gewählt, die eine modellbasierte Vorsteuerung und eine Rückkopplungsstufe für die Stabilisierung und Störungsunterdrückung umfasst.

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Regelungsstrategie wurde durch Echtzeitexperimente verifiziert, bei denen das geregelte System eine Positionierung auf Pikometer-Level ermöglicht, siehe Abbildung 1. Im Vergleich mit anderen bekannten Regelungsalgorithmen aus der Literatur zeigt sich mit der vorgeschlagenen Regelungsmethode eine schnellere Konvergenz und eine hervorragende Störungsunterdrückung.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

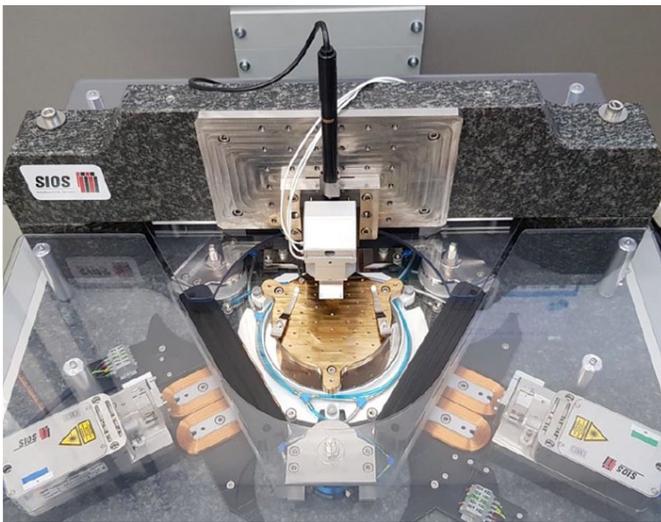


Abbildung 1:

Nano Fabrication
Machine NFM-100.

Quelle: [1]

NFM-100 – Planares Nanopositioniersystem ermöglicht Atomkraftmikroskopie in neuer Qualität

Die Inspektion von optischen Präzisionsbauteilen, Wafern und Masken, Oberflächen-scans auf atomarem Level mit Atomkraftmikroskopie (AFM), spitzenbasierte Nano-fabrikation mit aktiven Mikrocantilevern – diese und viele weitere Technologien der High-Tech-Industrie auch über die Halbleitertechnik hinaus sind auf hochpräzise Positioniersysteme angewiesen, um eine nanometergenaue Vermessung, aber auch um Nanofabrikation, d.h. eine Manipulation in dieser Größenordnung, zu ermöglichen. Dabei wird es zunehmend notwendig, diese Technologien nicht nur im Bereich einiger Mikrometer, sondern auch für große Messobjekte oder auf Waferebene, im Bereich von hundert Millimetern oder mehr, einsetzen zu können.

Für die Grundlagenforschung zur Nanomesstechnik und Nanofabrikation der TU Ilmenau wurde mit der Nanofabrikationsmaschine NFM-100 ein System realisiert, welches zum einen die Abtastung von Oberflächen (AFM) und zum anderen die Bearbeitung mittels Feldemissions-Rastersondenlithographie erstmalig in einem xy-Verfahrensbereich von $\varnothing 100$ mm möglich macht, siehe Abbildung 1.

IMMS Know-How zur Präzisionspositionierung

Bei der Entwicklung und Realisierung der NFM-100 unter Federführung der SIOS GmbH konnte das IMMS sein Know-how auf dem Gebiet der luftgeführten Präzisionsantriebe, insbesondere der Realisierung von Nanopositioniersystemen für große Verfahr-bereiche, einbringen, das nicht zuletzt aus der langjährigen gemeinsamen Forschung

*Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de*

mit der TU Ilmenau zu Nanopositionier- und Nanomessmaschinen resultiert. Das Positioniersystem der NFM-100 besteht aus einem vom IMMS entwickelten integrierten 3D-Direktantrieb, bei dem die Antriebskräfte berührungsfrei auf einen aerostatisch planar geführten Quarzglasläufer wirken. Die Verschiebung und Verdrehung des Läufers wird mittels ultrastabiler Differenz-Interferometer der SIOS GmbH ebenfalls berührungsfrei und mit Pikometer-Auflösung gemessen. Mit diesem rauscharmen und hochgenauen Feedback wird über die Echtzeitsteuerung eine Closed-Loop-Regelung für x , y und φ_z realisiert. Neben der Entwicklung und Realisierung des integrierten Direktantriebs und dessen Einbindung in das Gesamtsystem der Maschine steuerte das IMMS auch die Programmierung der Echtzeitsteuerung und insbesondere die Entwicklung, Implementierung und das Feintuning der Regelungsalgorithmen bei. Als Antastsystem kommt ein AFM-Messkopf der nano analytik GmbH zum Einsatz.

Long Range AFM Scans und 100-Pikometer-Schritte möglich

Im Ergebnis entstand mit der NFM-100 ein völlig neuartiges Gerät, welches durch den großen Arbeitsbereich neue Anwendungsfelder für die AFM-Technologie erschließt. Das Positioniersystem erreicht Subnanometer-Positionsstabilität und ermöglicht Positionierschritte von beispielsweise 100 Pikometern, siehe Abbildung 2.

Mit diesen herausragenden Eigenschaften wird die NFM-100 sehr erfolgreich für die wissenschaftliche Arbeit an der TU Ilmenau auf dem Gebiet der Nanofabrikation eingesetzt. So gelang hier in 2021 die Realisierung durchgängiger AFM-Scans über 50 mm ohne das sonst übliche Stitching, d.h. ohne die Aneinanderreihung von Teilaufnahmen, siehe Abbildung 3.

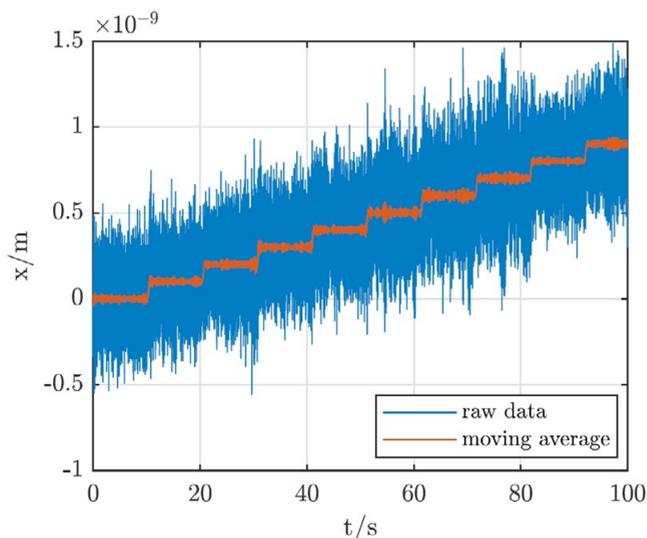


Abbildung 2:

Positionierung der NFM-100 mit 100 pm Schrittweite mit einer Geschwindigkeit von 500 pm/s.

Quelle: [2]

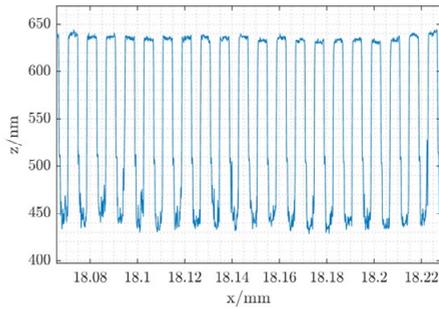
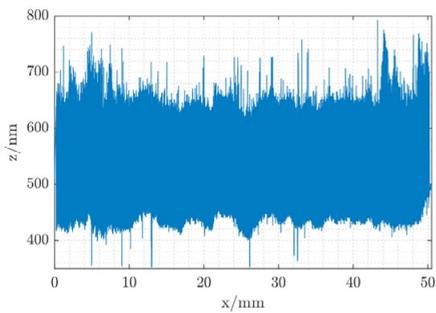


Abbildung 3: AFM-Linienscan an einem Testraster mit 8 μm Pitch und ca. 200 nm Strukturtiefe. Gesamtscan über 50 mm (links); Zoom auf einen 170 μm Abschnitt (rechts), Quelle [3]

Perspektivisch auch mit Vertikalverstellung

Das der NFM-100 zugrundeliegende Positioniersystem kann auch mit anderen Sensoren als Antast- bzw. Manipulationssystem ausgestattet werden, was die Adressierung weiterer Mess- oder Bearbeitungstechnologien auf Nanometer-Level ermöglicht. In obiger Konfiguration ist das Positioniersystem als modulare Plattform jetzt schon über die SIOS GmbH verfügbar.

Der zugrundeliegende skalierbare Maschinenansatz ermöglicht aber neben größeren xy-Verfahrbereichen auch die Implementierung einer z-Verstellung von bis zu 10 mm. Hierzu wurden am IMMS passende Hubmodule als vertikale Nanopositionierer mit integrierter Gewichtsentlastung entwickelt [4], [5].

[1] RAHNEBERG I., LANGLÖTZ E., DONTSOV D., HESSE S., STAUFFENBERG J., MANSKE E.: Interferometrically controlled, scalable x-y planar positioning stage concept, *euspen Special Interest Group Micro/Nanofabrication*, 2020

[2] STAUFFENBERG, J.; ORTLEPP, I.; BLUMRÖDER, U.; DONTSOV, D.; SCHÄFFEL, C.; HOLZ, M.; RANGELOW, I.W.; MANSKE, E.: Investigations on the positioning accuracy of the Nano Fabrication Machine (NFM-100). *tm-Tech. Mess.* 2021, 88, 581 – 589.

[3] STAUFFENBERG, J.; REUTER, C.; ORTLEPP, I.; HOLZ, M.; DONTSOV, D.; SCHÄFFEL, C.; ZÖLLNER, J.P.; RANGELOW, I.; STREHLE, S.; MANSKE, E.: Nanopositioning and -fabrication using the Nano Fabrication Machine with a positioning range up to \varnothing 100 mm. In *Proc. SPIE 11610, Novel Patterning Technologies 2021; SPIE Advanced Lithography*, 2021, Online Only p. 1161016

[4] GORGES, S.: Nanometergenaue Hubmodule für die Präzisionsantriebstechnik. *Konstruktion (2021) Nr. 11 – 12, Sonderteil Antriebstechnik*, Seite 36 – 40, www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hubmodule-fuer-die-praezisionsantriebstechnik/

[5] GORGES S.: A lifting and actuating unit for a planar nanoprecision drive system, *Dissertation TU Ilmenau*, 2020



Untersuchungen zur Positionsregelung von vertikalen Bewegungssystemen für Präzisionsanwendungen im Nanometerbereich

Abbildung 1: Das IMMS hat eine modellbasierte Steuerung und Regelung entwickelt, um Vertikalhubmodule in seine bestehenden planaren Nanopräzisionsantriebe zu integrieren. Dies soll in Zukunft eine hochpräzise Positionierung mit kompletten 6D-Systemen ermöglichen. Mit dem abgebildeten 1D-Versuchsaufbau wurde zunächst für ein einzelnes Hubmodul die modellbasierte Regelung umgesetzt und für den späteren Einsatz in 6D-Systemen validiert. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Der rasante Fortschritt bei der Miniaturisierung von Mikro- und Nanosystemen erfordert hochpräzise Positioniersysteme mit integrierter vertikaler Antriebstechnik. In der Halbleiterindustrie und anderen Branchen, in denen hochpräzise Antriebssysteme für industrielle Fertigungsprozesse benötigt werden, entwickeln sich die Anforderungen zunehmend zu immer präziseren Systemen mit einer Genauigkeit bis in den Sub-Nanometerbereich. Gleichzeitig sollen immer größere vertikale Bewegungen ausgeführt werden, um mehr Funktionalität und höhere Genauigkeit zu ermöglichen, weil durch die Vertikalverstellung einerseits Ebenheitsabweichungen kompensiert und andererseits die Messobjekte bzw. zu strukturierende oder zu produzierende Teile stets mit minimalem Abbe-Fehler, d. h. mit minimalen Winkelfehlern und Versätzen, angetastet werden können.

*Mehr zu NanoFab auf www.imms.de.
Leitanwendung nm-Vermessung u. -Bearbeitung von Objekten: www.imms.de*

Vor diesem Hintergrund arbeiten das IMMS und seine Partner daran, ein bestehendes planares Nanometer-Positioniersystem (NPPS100), das einen planaren Verfah-

Jahresbericht © IMMS 2021



Abbildung 2:

Nanometergenaues
planares Positio-
nierungssystem
NPPS100.

Foto: IMMS.

bereich von $\varnothing 100$ mm hat, mit speziell entwickelten Hubmodulen (LAUs) auszustatten. Im Ergebnis entsteht ein 6D-System, das nicht nur die Positionierung in der horizontalen xy-Ebene, sondern auch die Verschiebung in z-Richtung, z. B. über 10 mm, mit einer Auflösung im Sub-Nanometerbereich ermöglicht.

Ein erster Schritt bei diesen Untersuchungen war der Entwurf und die Optimierung eines maßgeschneiderten Regelkreises für die einzelnen LAU. Dieser wesentliche Schritt in der Forschung für eine hochgenaue vertikale Positionierung auf atomarem Level wird in diesem Artikel beschrieben. Durch systematische experimentelle Untersuchungen wurde die Leistungsfähigkeit der Hubmodule untersucht und die Effektivität der entwickelten Regelung bestätigt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für den schrittweisen weiteren Ausbau der Funktionalität bis hin zur vollständigen Implementierung des 6D-Systems.

Konzept des 6D-Antriebsystems

Das 6D-Antriebsystem entsteht aus der Kombination des Planarantriebs NPPS100 (mit Bewegung in x , y und φ_z) mit drei identischen LAUs für die vertikale Verschiebung in z -Richtung mit den zugehörigen Kippungen φ_x und φ_y . Mit Hilfe von vier Laserinterferometern (LIFs), einem Autokollimator und ebenen Spiegeln, die am Läufer montiert sind, ist es möglich, die Position und Orientierung im euklidischen Raum hochgenau zu bestimmen. Auf diese Weise ermöglicht die vertikale Bewegung die Messung und Manipulation dreidimensionaler Objekte mit einem minimalen Abbe-Fehler. Abbildung 3 zeigt die Explosionszeichnung des zugrundeliegenden Planarsystems, das drei Hubmodule integriert.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

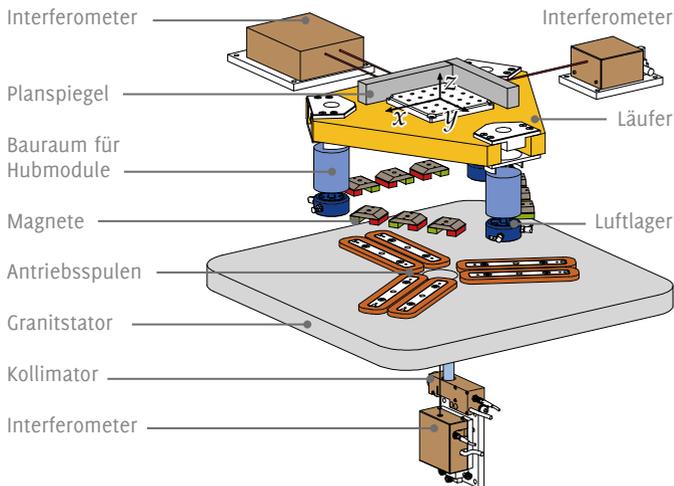


Abbildung 3:

Explosionszeichnung
des NPPS100-6D.

Grafik: IMMS.

Zweck der am IMMS entwickelten Hubmodule (LAUs) ist das Heben einer Gesamtmasse mit gleichzeitig präziser Positionierung im Nanometerbereich. Dabei müssen die LAU in Bezug auf Präzision und Dynamik eine Positionierperformance wie der Planarantrieb NPPS100 (siehe Abbildung 2) erreichen, d. h. RMS-Positionsfehler unter 1 nm und maximale Beschleunigungen von bis zu 250 mm/s². Die Hauptaufgabe des 3D-Vertikaltriebs (z, φ_x, φ_y) besteht darin, den Läufer und weitere Komponenten, d.h. insgesamt ca. 12 kg, über einen vertikalen Hub von 10 mm zu bewegen. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus des dreieckigen Läufers werden an dessen Ecken drei identische LAUs montiert, so dass sich ein vollständiges 6D-System ergibt ($x, y, z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$), siehe Abbildung 3.

Gestaltung des Hubmoduls

Das kompakte Design der Hubmodule vereint einen pneumatischen Aktuator zur Gewichtskraftkompensation (GKK), einen elektromagnetischen Antrieb für Präzisionsbewegungen und eine aerostatische Vertikalführung für reibungslose und stick-slipfreie Bewegungen in einem Bauraum von nur 50 mm Durchmesser und 60 mm Höhe. Zur Initialisierung der LIFs ist zusätzlich ein optischer Linearencoder integriert. Die größten Herausforderungen bei vertikalen Präzisionsantrieben sind die Wärmeabgabe und die damit verbundenen Störungen im Messraum. Dies wird im vorliegenden Entwurf durch den Einsatz einer thermisch passiven GKK adressiert, die der statischen Gewichtskraft entgegenwirkt. Infolgedessen erzeugt der elektromagnetische Aktor nur die Präzisionsbewegungskraft, wodurch die Wärmeabgabe

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

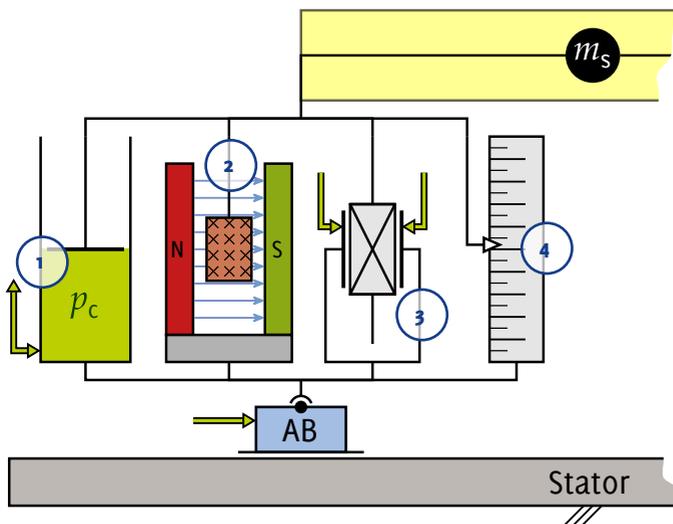


Abbildung 4:

Funktionskomponenten eines einzelnen LAU:

- (1) pneumatische Gewichtskraftkompensation GKK,
- (2) Präzisions-Aktor/VoiceCoil-Antrieb,
- (3) vertikale Führung,
- (4) integrierter Encoder.

Grafik: IMMS.

auf ein praktisch vernachlässigbares Niveau reduziert wird, das die Einhaltung der Wärmeabgabebedingung gewährleistet. In Echtzeit-Experimenten wurde bestätigt, dass sich ein pneumatischer Aktor als GKK und ein Lorentz-Antrieb als Präzisionsaktor sehr gut ergänzen. Darüber hinaus kann der integrierte Encoder als Sicherungssystem genutzt werden, falls ein Laserstrahl unterbrochen wird. Abbildung 4 zeigt die Funktionskomponenten eines einzelnen LAU.

Leitanwendung
nm-Vermessung
u. -Bearbeitung
von Objekten:
www.imms.de

Prüfstand mit einem Freiheitsgrad

Als Zwischenschritt zu einem vollständigen 6D-System wird ein einzelner LAU individuell auf einem Prüfstand installiert, der ein vertikales Antriebssystem mit einem Freiheitsgrad (DOF) darstellt, in das zwei Aktuatoren integriert sind. Abbildung 1 zeigt den Testaufbau. Das Antriebssystem ist auf einem passiven, schwingungsisolierenden Granitstator platziert. Das Hubmodul, siehe auch Abbildung 5, ist an einer Ecke eines dreieckigen Aluminium-Läufers montiert, während die anderen Ecken durch eine passive sekundäre Halterung unterstützt werden. Mit Hilfe eines mittig auf dem Läufer platzierten Reflektors und eines hochpräzisen LIF wird die vertikale Verschiebung mit einer Auflösung von 20 pm gemessen. Damit austretender und reflektierter Laserstrahl übereinstimmen, muss der Spiegel mit einer Winkeltoleranz von ca. 145 μ rad genau senkrecht zum Strahl des LIF justiert werden. Diese physikalische Einschränkung begrenzt die maximale vertikale Verschiebung auf 80 μ m. Für die Datenerfassung und das Rapid Prototyping der Steuerung wird ein dSpace-Echtzeitsystem in Kombination mit Matlab Simulink verwendet.



Abbildung 5:

Hubmodul, das in den 1-DOF-Testaufbau integriert wurde.

Foto: IMMS.

Modellbasierte Steuerung und Regelung

Standardregler nicht geeignet

Der Entwurf einer geeigneten Regelungsstruktur ist ein Schlüsselement für nanometergenaue Positionierung und Bahnverfolgung. Folglich ist die Auswahl der Steuerungs- und Regelungsstrategie sowie deren Feinabstimmung von wesentlicher Bedeutung, um die gewünschte Performanz und Robustheit zu erreichen. In vielen industriellen Anwendungen kommt der übliche Proportional-Integral-Derivativ-Regler (PID-Regler) zum Einsatz und kann mit heuristischen Methoden leicht eingestellt werden. Aufgrund der komplexen Dynamik der LAU erreichen Standard-PID-Ansätze jedoch weder die gewünschte Genauigkeit mit z-Positionsfehlern unter 1 nm, noch minimieren sie erfolgreich die Wärmeabgabe durch kleinstmöglichen Strom im elektromagnetischen Aktuator. Darüber hinaus fehlt ihnen auch die Robustheit gegenüber parametrischen Unsicherheiten und externen Störungen. Modellbasierte Regelungsstrategien ermöglichen an dieser Stelle ein effektives Vorgehen beim Reglerentwurf, das einen iterativen Ablauf der Entwurfsschritte beinhaltet, sobald das dynamische Streckenmodell aktualisiert wird. Dies schließlich ermöglicht eine effiziente Implementierung am realen System.

Integration der Vertikalkräfte in eine einzige Steuerkraft als Reglerausgang

Der Ausgangspunkt für den Entwurf des Kontrollsystems ist die Ableitung eines detaillierten Modells. Es sollte die überaktuierte Natur des Systems beschreiben, d. h. eines Systems, das mehr Aktoren als Freiheitsgrade (DOF) hat. In diesem Fall umfasste das Modell die komplexe überaktuierte Dynamik des LAU sowie weitere Komponenten des 1-DOF-Prüfstandes, d.h. Läufer, Luftführungen und sekundäres Stützsystem. Dazu werden die von der pneumatischen Gewichtskraftkompensation

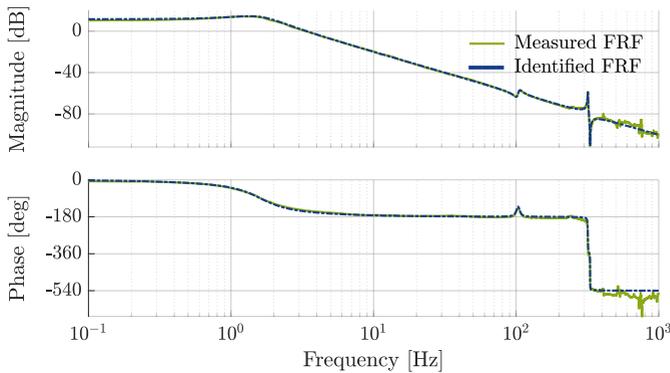


Abbildung 6:

Frequenzgangfunktion.
Eingang: Kraft F [N],
Ausgang: Verschiebung q_z [mm].

Quelle: IMMS.

und dem elektromagnetischen Antrieb erzeugten Kräfte in eine einzige Steuerungskraft integriert, indem eine Methode zur Stellgrößenzuteilung angewandt wird, siehe Abbildung 7.

Durch die Stellgrößenzuteilung wird das Modell zu einem Single-Input- und Single-Output-System reduziert. Angesichts der überwiegend linearen Dynamik des 1-DOF-Bewegungssystems wird der Frequenzgang gemessen, um einen genaueren Einblick in die Dynamik der Anlage zu erhalten, siehe Abbildung 5. Durch die Anwendung von Werkzeugen zur Systemidentifikation im Frequenzbereich wird ein sehr zuverlässiges Modell identifiziert, das die meisten der relevanten Dynamiken, d. h. weitere Resonanzmoden, des vertikalen 1-DOF-Bewegungssystems erfasst.

Das Steuerungs- und Regelungssystem wird auf der Grundlage des ermittelten dynamischen Modells entworfen. Abbildung 7 zeigt das Funktionsschema des geschlossenen Regelkreises. Die Regelungsarchitektur umfasst eine Vorsteuerung für die Bahnverfolgung und eine Rückkopplungsstufe für die Stabilisierung und die Unterdrückung komplexer Störungen. Der Kern der Regelung ist ein optimaler linear-quadratischer (LQ) Basisregler mit einer adaptiven Erweiterung. Der LQ-Regler erreicht die erwartete Regelgüte durch hohe Bandbreite und Robustheit. Die adaptive

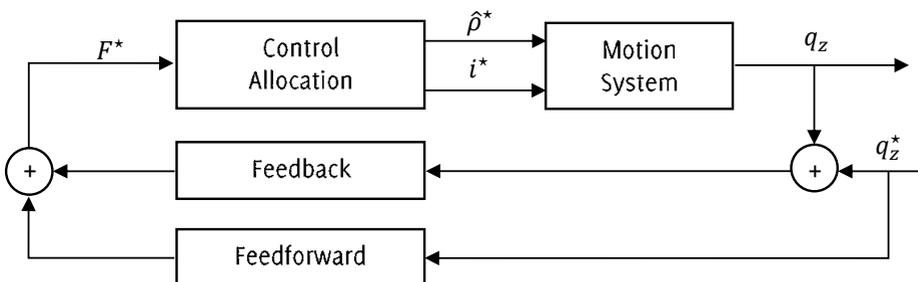


Abbildung 7: Blockschaltbild des geschlossenen Regelkreises. Grafik: IMMS.

Komponente spielt eine zentrale Rolle für die Regelperformance besonders auch unter externen Störungen und bei parametrischen Unsicherheiten. Hierfür wird für die Echtzeitimplementierung die vollständige Zustandsinformation durch einen integrierten erweiterten Zustandsschätzer rekonstruiert.

Ergebnisse ebnen den Weg zu einer 3D-Vertikalbewegung

Die Reglerentwicklung wurde abgeschlossen, indem die Wirksamkeit und Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Regleransatzes anhand der Echtzeitdaten bewertet wurde, die für potenzielle industrielle Anwendungen interessant sind. Abbildung 8 zeigt die endgültigen Messergebnisse des 1-DOF-Versuchsaufbaus. Zu Beginn der Versuche wurde das Hubmodul abgesetzt und ruhte auf dem massiven Granitstator. Die Grafik oben links zeigt das verbleibende Rauschen im Positionssignal (in blau) mit einer Standardabweichung von 0,21 nm. Im geregelten Betrieb hat der Positionsfehler (in grün) eine Standardabweichung von 0,22 nm. Der Aktorstrom im elektromagnetischen Antrieb hat einen quadratischen Mittelwert (RMS) von nur 0,26 mA, siehe obere rechte Grafik, und der Gleichgewichtsdruck für eine Masse von ca. 4 kg ist auf etwa 1,18 bar begrenzt, siehe untere linke Grafik. Weitere Experimente im geregelten Betrieb wurden auch über den gesamten vertikalen Hubbereich von 10 mm durchgeführt. Wie die untere rechte Grafik zeigt, bleiben der RMS-Positionierfehler und der RMS-Steuerstrom dabei unter 0,25 nm bzw. 0,3 mA. Angesichts des sehr geringen Stroms wird die Wärmeabgabe minimiert, indem nur wenige Nanowatt (ca. 54 nW) vom Aktor in den Messraum abgegeben werden.

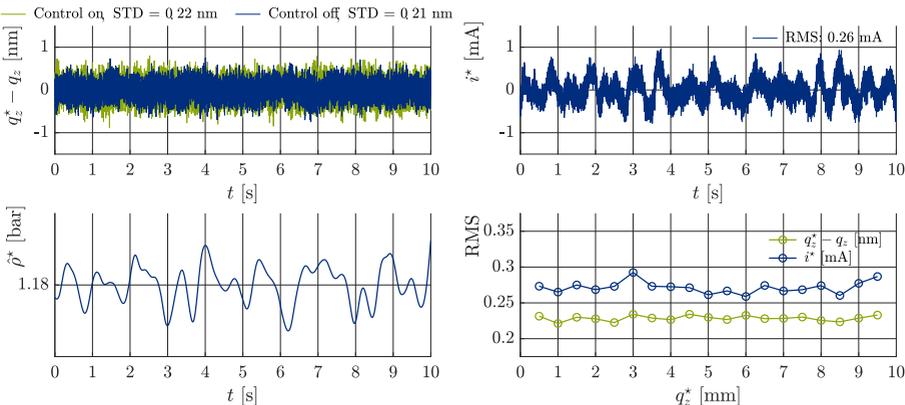


Abbildung 8: Zeitreihen des Positionsfehlers im geschlossenen Regelkreis (in nm), des Steuerstroms (in mA), des pneumatischen Drucks (in bar) sowie RMS-Wert der Regelabweichung und des Aktorstromes in Abhängigkeit der Vertikalposition. Quelle: IMMS.

Somit wurden die sehr anspruchsvollen Anforderungen einer Vertikalpositionierung auf atomarem Level und ohne Wärmeeintrag mit dem gewählten Ansatz auf ein-drucksvolle Weise erfüllt und die Ergebnisse sind ein wichtiger Baustein für die künftige Forschung auf dem Weg zu einem vollständigen 6D-System. Sie bestätigen darüber hinaus den Ansatz und die Gestaltung der Hubmodule zur Vertikalverstellung mit Nanometerpräzision und minimiertem Wärmeeintrag. Weitere Forschungsarbeiten werden sich mit einem vertikalen 3D-Bewegungssystem befassen, das drei LAUs umfasst, und neben der Bewegung in z-Richtung auch die Regelung der Kippwinkel φ_x und φ_y einbezieht.

Kontakt: Alex S. Huaman, M.Sc., alex.huaman@imms.de

Gefördert durch

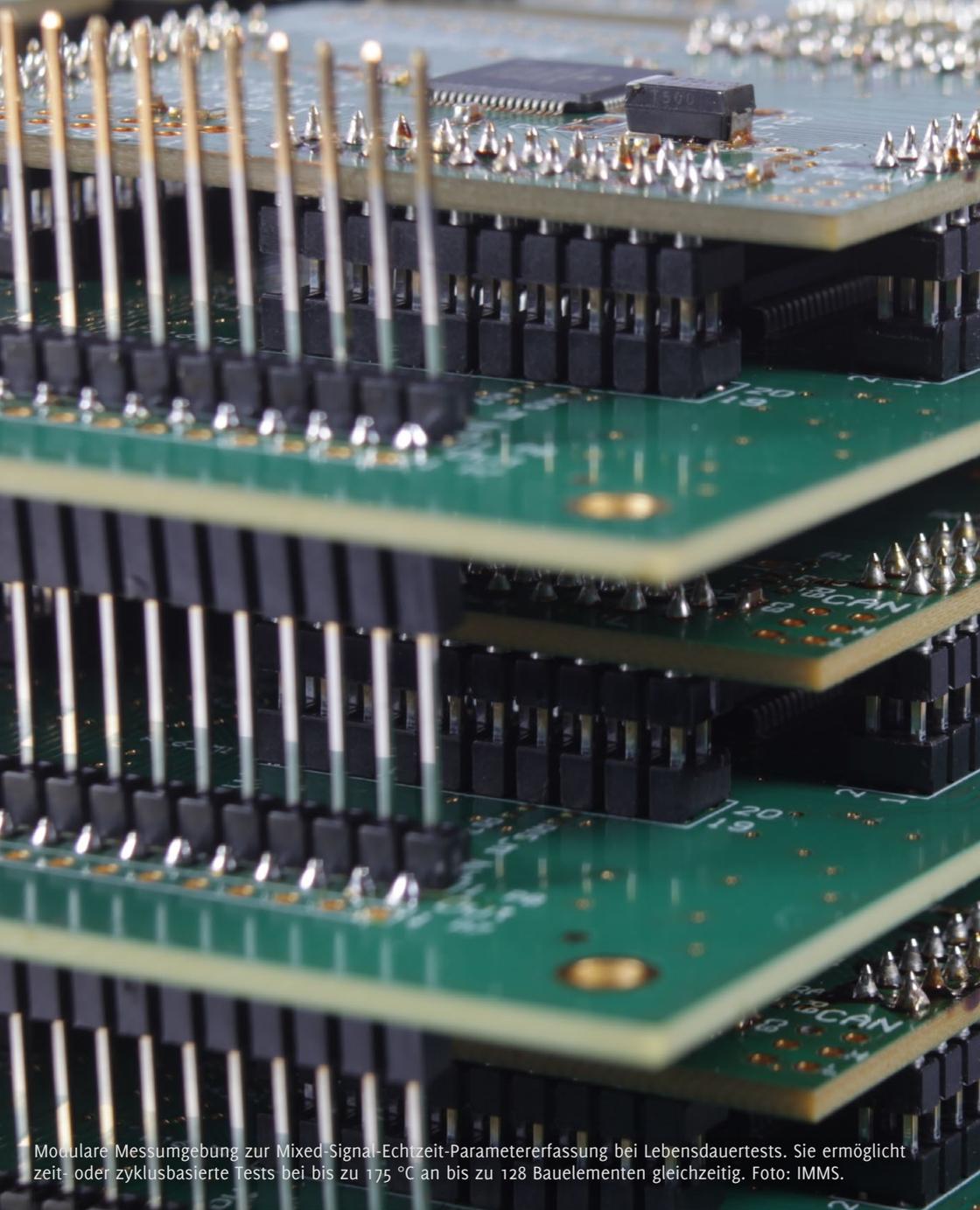


Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wird unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

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

*Mehr zu
NanoFab auf
www.imms.de*

ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE



Modulare Messumgebung zur Mixed-Signal-Echtzeit-Parameterfassung bei Lebensdauertests. Sie ermöglicht zeit- oder zyklusbasierte Tests bei bis zu 175 °C an bis zu 128 Bauelementen gleichzeitig. Foto: IMMS.

Das IMMS in Zahlen

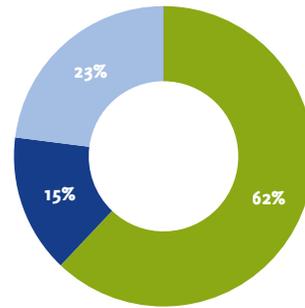
Zum Ende des Geschäftsjahres 2021 waren am IMMS 87 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter**¹ tätig. Hiervon waren 54 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 20 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 85 % aller Beschäftigten.

Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr 2021 am IMMS insgesamt 35 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 1 Bachelorarbeit und 6 Masterarbeiten, und 6 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben. Die Vielzahl der am IMMS vertretenen Nationalitäten hat auch in 2021 den internationalen Austausch für die Forschung und Entwicklung gefördert.

Trotz des spürbar zunehmenden Wettbewerbs um die hervorragenden Köpfe konnten im Jahr 2021 weitere Forscherinnen und Forscher für die Mitarbeit in der IMMS gewonnen werden. Um auch für die nächsten Jahre die erwartete steigende Nachfrage der Wirtschaft nach den spezifischen Forschungsleistungen des Instituts und das damit verbundene notwendige Wachstum gewährleisten zu können, wurden vielfältige Maßnahmen/Aktivitäten zur Gewinnung neuer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unternommen.

Das Geschäftsjahr war wie auch in den Vorjahren von der Durchführung öffentlicher Forschungsprojekte und durch den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie (industrielle Auftragsforschung) geprägt. Die **Drittmittelträge** (Projekterträge) konnten 2021 gegenüber dem Vorjahr um rd. 4% gesteigert werden. Hier wirkte sich insbesondere der hohe Bestand an unfertigen Leistungen aus öffentlich geförderten Forschungsprojekten (Förderprojekte) aus, wodurch die Zurückhaltung der Industriepartner bei der Auftragsvergabe im Geschäftsjahr kompensiert werden konnte. Das öffentlich geförderte Projektgeschäft (Förderprojekte) konnte im Vergleich zum Vorjahr deutlich ausgebaut werden, so lagen die Erträge aus öffentlichen Projektzuschüssen um 26 % über dem Vorjahreswert. Es konnten 12 öffentlich geförderte

Personalstruktur

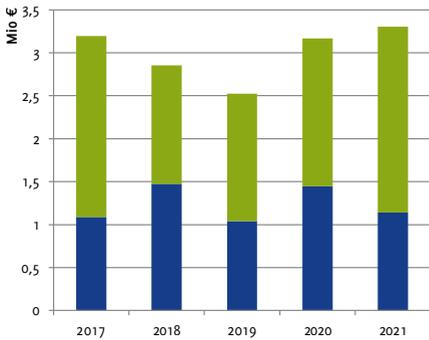


Wissenschaft | Administration/Azubi
studentische Mitarbeit

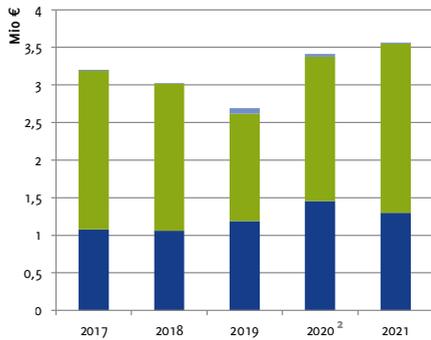
- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > Mag6D-nm-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

¹ Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2021 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit vorherigen Berichten ist daher nur bedingt möglich.

Projekterträge
 Industrieprojekte / Förderprojekte



Projekteinnahmen:
 Industrieprojekte / Förderprojekte / Sonstige

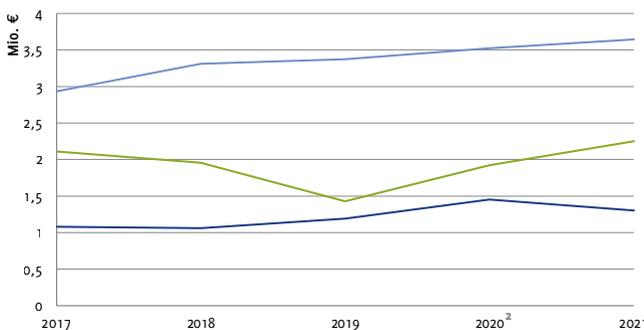


- 117**
- > Integrierte Sensorsysteme
 - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - > Mag6D-nm-Direktantriebe
 - > Inhalt
 - * Förderung

Forschungsprojekte begonnen werden. Die Erträge aus industrieller Auftragsforschung (Industrieerträge) blieben im Jahr 2021 um rd. 21 % hinter den hohen Vorjahreserträgen zurück, sie lagen im 5-Jahresvergleich jedoch noch auf gutem Niveau. Wie in den Vorjahren war die industrielle Auftragsforschung weitgehend durch eine Vielzahl vom Umfang her kleiner Aufträge der kleinen und mittleren Unternehmen Thüringens geprägt (rd. 58%). Die positive Entwicklung der Drittmittelerträge zeigte sich auch bei den Projekteinnahmen, die um insgesamt rd. 5 % über dem Vorjahreswert lagen. Die Verteilung der gesamten Drittmittelleinnahmen (Projekteinnahmen) auf Einnahmen aus Förderprojekten und Einnahmen aus der industriellen Auftragsforschung entspricht im Wesentlichen der Verteilung der Erträge.

Für die Durchführung der Forschungsaufgaben des IMMS bildete die **institutionelle Förderung** des Freistaats Thüringen die Grundlage. Insbesondere die Vorlauforschung ist eine wesentliche Voraussetzung für die Innovationskraft des Instituts. Die Förderung der internen Forschungsgruppen ermöglicht dem IMMS die Entwicklung und Bearbeitung der wesentlichen Forschungsschwerpunkte zur strategischen Weiterentwicklung, unabhängig von der Verfügbarkeit einer Finanzierung durch öffentliche Förderangebote.

Mehr zur Förderung auf www.imms.de.



Finanzierungssäulen

Grundfinanzierung (institutionelle Förderung)

Projektförderung

Industrieerträge

² Zahlen korrigiert



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

Ansprechpartner auf www.imms.de

Aufsichtsrat*

- **Vorsitzender:** Herr ¹Robert FETTER, Referatsleiter Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG), Stabsstelle Thüringen der Carl-Zeiss-Stiftung, Stuttgart
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau ¹Bianca KIZINA, Referentin Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- Herr Dr. Jens KOSCH, Fellow X-FAB Global Services GmbH, Erfurt
- Herr Andreas ROHWER, Referatsleiter Thüringer Finanzministerium
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe SATTLER, Präsident Technische Universität Ilmenau
- Herr Prof. Dr. rer. nat. Ingolf VOIGT, Stellvertretender Institutsleiter Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Hermsdorf
- Frau Cathrin WILHELM, Geschäftsführende Gesellschafterin Buchheim GmbH, Potsdam; Geschäftsführende Gesellschafterin BillCapital GmbH, Potsdam; Geschäftsführende Gesellschafterin BINZ Automotive GmbH, Ilmenau (Unternehmensverbund)

* zum 31.12.2021

- **Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin HOFFMANN, Chair of Microsystems, Ruhr Universität Bochum, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik
- **Stellvertretender Vorsitzender:** Prof. Dr. mont. Mario KUPNIK, Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktion, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST)
- Jörg DOBLASKI, Chief Technology Officer, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH
- Dr. Alfred HANSEL, Geschäftsführer oncgnostics GmbH
- Prof. Dr. Doris HEINRICH, Institutsdirektorin, Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V.
- Prof. Dr. Peter HOLSTEIN, Transferunternehmer, Steinbeis-Transferzentrum Technische Akustik und angewandte Numerik
- Dr. Peter MIETHE, Geschäftsführer Posanova GmbH
- Univ.-Prof. Dr. Jens MÜLLER, Technische Universität Ilmenau, Vizepräsident für Internationale Beziehungen und Transfer sowie Leiter des Fachgebietes Elektroniktechnologie, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang NEBEL, Vorstand OFFIS – Institut für Informatik e.V., Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät II Department für Informatik, Abteilung Eingebettete Hardware-/Software-Systeme
- Dr. Jörg PETSCHULAT, Head of Global R&D, Carl Zeiss SMT GmbH, ZEISS Semiconductor Mask Solutions
- Prof. Dr.-Ing. Ulf SCHLICHTMANN, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Entwurfsautomatisierung
- Prof. Dr.-Ing. Johannes TRABERT, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrgebiet Kommunikationssysteme und Übertragungstechnik

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

* zum 31.12.2021

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, betreute Teamarbeit

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

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Veranstaltungen

Workshop-Angebote/IMMS als Gastgeber/Veranstalter/Mitinitiator

12.01.2021 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Mittelstand 4.0, *Organisation, Vortrag*, online

01.02.2021 – **BarCamp at DATE 2021**, *Organisation, Session Chair, Moderation und Vortrag*; online

04.02.2021 – **Stammtisch „Sensorik 4.0“**, Rechtssicherheit in Open-Source-Anwendungen, Mittelstand 4.0, *Workshop*, online

26.02.2021 – **Stammtisch „Kollaboration“**, „Kollaboratives Arbeiten – Anwendungen und Stolpersteine“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, Online

17.03.2021 – **Cloud in der praktischen Anwendung**, Vortragveranstaltung von TGF GmbH, ELMUG e.G., Thüringer Kompetenzzentrum Wirtschaft 4.0 und Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Ilmenau, *Workshop*, Online

13.04.2021 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Mittelstand 4.0, *Organisation, Vortrag*, online

20.04.2021 – **Workshop mit der SONOTEC GmbH**: „Erarbeiten von Lösungsansätzen für Messdatenaufnahme bei Zerspanungsmaschinen und ressourceneffiziente KI-basierte Datenauswertung“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, online

18.05.2021 – **Workshop mit der KOMOS GmbH**: „KI-gestützte Digitalisierungslösungen 1“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, KOMOS GmbH, Bürgel

Aktuelle Ver-
anstaltungen:

www.imms.de

Jahresbericht

- 20.05.2021 – **Stammtisch „Sensorik 4.0“**, „Diagnoselösungen in der industriellen Anwendung“, Mittelstand 4.0, *Organisation*, 2 *Vorträge*, online
- 04.06.2021 – **Kooperationsworkshop mit ZO.RRO**: ZO.RRO – Innovative Lösungen für die CO2-freie Energieversorgung der Zukunft, Mittelstand 4.0, *Workshop*, online
- 08.06.2021 – **Workshop** „Der erste Eindruck zählt – auch virtuell“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, online
- 08.07.2021 – **Workshop** „Auch der zweite Eindruck zählt“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, online
- 14.07.2021 – **Workshop mit der KOMOS GmbH**: „KI-gestützte Digitalisierungslösungen 2“, Mittelstand 4.0, *Workshop*, KOMOS GmbH, Bürgel
- 19.07.2021 – **SMACD 2021**, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design, *Konferenzvorsitz und -organisation*, *Leitung technisches Programm*; 4 *Vorträge*; online
- 19.07.2021 – **PRIME 2021**, International Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics (PRIME 2022), *Konferenzorganisation*, 2 *Vorträge*; online
- 19.07.2021 – **BarCamp at SMACD 2021**, *Organisation*, *Session Chair*, *Moderation*; online
- 13.10.2021 – **KI für KMU** – Prozesse optimieren mit künstlicher Intelligenz, Vortragsveranstaltung von Mittelstand Digital, *Organisation und Vortrag*, online

Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

- 12.01.2021 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Mittelstand 4.0, *Organisation*, *Vortrag*, online
- 21.01.2021 – **3. Industrieforum „Smarte Fertigung“**, Integration flexibler Fertigungstechnologien und intelligenter Prozessketten, *Vortrag*, online
- 01.02.2021 – **DATE 2021**, Presentation at the Virtual University Booth / BarCamp, *Organisation BarCamp*, *Vortrag*, online
- 22.02.2021 – **TuZ 2021**, 33. ITG/GI/GMM-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, online
- 22.02.2021 – **SPIE 2021**, Advanced Lithography Digital Forum of The International Society for Optics and Photonics, *Vortrag*, online
- 26.02.2022 – **Stammtisch „Kollaboration“**, „Kollaboratives Arbeiten – Anwendungen und Stolpersteine“, Mittelstand 4.0, *Vortrag*, online
- 03.03.2021 – **KI-Frühling**, Veranstaltungsreihe des Thüringer Kompetenzzentrums Wirtschaft 4.0, *Moderation*, *Vortrag*, online
- 07.03.2021 – **ICM 2021**, International Conference on Mechatronics, *Vortrag*, online

08.03.2021 – **41. GIL-Jahrestagung**, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., *Vortrag*, online

24.03.2021 – **Stammtisch „Kollaboration“**, „Online sicher auftreten“, Mittelstand 4.0, *Vortrag*, online

13.04.2021 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Mittelstand 4.0, *Organisation, Vortrag*, online

14.04.2021 – **Vertrauenswürdige Elektronik**, Digitale Konferenz des BMBF zu Forschung und Innovation für technologische Souveränität, 2 *Vorträge*, online

12.05.2021 – **Think Wireless IoT Day on Healthcare and Security**, *Vortrag*, online

20.05.2021 – **Stammtisch „Sensorik 4.0“**, Diagnoselösungen in der industriellen Anwendung, *Organisation*, 2 *Vorträge*, online

07.06.2021 – **MetroInd4.0 IoT 2021**, 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, *Vortrag*, online

11.07.2021 – **ICSV27**, 27th International Congress on Sound and Vibration, *Vortrag*, online

14.04.2021 – **Silicon Saxony e. V.**, Veranstaltung der Arbeitskreise Künstliche Intelligenz und Smart Systems & Internet of Things, *Vortrag*, online

19.07.2021 – **SMACD 2021**, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design, *Konferenzvorsitz und -organisation, Leitung technisches Programm; 4 Vorträge*; online

19.07.2021 – **PRIME 2021**, International Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics (PRIME 2022), *Konferenzorganisation, 2 Vorträge*; online

15.08.2021 – **DAGA 2021**, 47. Jahrestagung für Akustik, *Vortrag*, Wien

18.08.2021 – **„Digitale Mittagspause“**, Thüringer Kompetenzzentrum Wirtschaft 4.0, Mittelstand 4.0 – Kompetenzzentrum Ilmenau, *Vortrag*, online

23.08.2021 – **SAS 2021**, Sensors Applications Symposium SAS, *Vortrag*, Sundsvall, Schweden, online

21.09.2021 – **elmug4future**, Sensoren, Systeme und Verfahren zur Ressourcenoptimierung, *Vortrag*, Erfurt und online

22.09.2021 – **EXPRESS-Regionalkonferenz**, Mitteldeutsche Digitaltage im Wein- und Obstbau, *Vortrag*, Meißen

30.09.2021 – **MOEMS-Workshop**, Optische Sensoren und Systeme für Fluoreszenz sowie Streulicht – CiS-Workshop, *Vortrag*, Erfurt (hybrid)

06.10.2021 – **IEEE BioCAS 2021**, Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS): Restoring Vital Functions by Electronics – Achievements, Limitations, Opportunities, and Challenges, *Vortrag*, Berlin, online

06.10.2021 – [IEEE RFID-TA 2021](#), 11th IEEE international Conference on RFID Technology and Applications, *Vortrag*, Delhi, India, virtual conference

13.10.2021 – [KI für KMU](#) – Prozesse optimieren mit künstlicher Intelligenz, Mittelstand 4.0, *Organisation und Vortrag*, online

26.10.2021 – [DVCon Europe](#), The Design and Verification Conference & Exhibition Europe, online

11.11.2021 – „[KI-Talk](#)“, Veranstaltung der Begleitforschung von Mittelstand Digital, *Vortrag*, online

17.11.2021 – [EUSPEN 2021](#), Special Interest Group Meeting: Micro/Nano Manufacturing, *Vortrag*, online

30.11.2021 – [InnoCON Thüringen 2021](#), „Mit der Thüringer Innovationsstrategie 2021 – 2027 die Herausforderungen unserer Zeit wie die digitale Transformation und die Dekarbonisierung angehen.“, *Vortrag, Demonstrator*, Arena Erfurt, hybrid

Messen

15.04.2021 – [Hannover Messe](#), Mittelstand 4.0, Thüringer Gemeinschaftsstand der LEG Thüringen, online

23.04.2021 – [BUGA 2021](#), Bundesgartenschau Erfurt, *Demonstrator*

26.10.2021 – [inova 2021](#), Karriereforum an der TU Ilmenau

30.11.2021 – [InnoCON Thüringen 2021](#), „Mit der Thüringer Innovationsstrategie 2021 – 2027 die Herausforderungen unserer Zeit wie die digitale Transformation und die Dekarbonisierung angehen.“, *Vortrag, Demonstrator*, Arena Erfurt, hybrid

Aktuelle Ver-
anstaltungen:
www.imms.de

Videoproduktionen für Demonstratoren / Online-Veranstaltungen

- **Your career at IMMS**, Recruiting-Clip für die virtuelle Ausstellung / Carrer Fair, *SMACD 2021, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design*
- **AnoPCB – plugin for the free PCB design tool KiCad for artificially IntelligEnt layout processing**. Video-Tutorial, *EDA Competition Award, SMACD 2021, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design*
- **25 Jahre IMMS – Wir bedanken uns herzlich für die Glückwünsche!** Videozusammenschnitt zu *Grußbotschaften, die dem IMMS zum 25. Jubiläum übermittelt wurden.*

Mehr Videos auf
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

- **Von einem der weltweit ersten USB-Hubs zur KI – 25 Jahre IMMS.** Video von einem der ersten, 1996 gestarteten Transferprojekte, das die weltweite USB-Entwicklung von Thüringen aus voranbrachte, bis hin zu einer Auswahl aktueller KI-Lösungen.

Publikationen

Begutachtete Veröffentlichungen

Evaluation of 2D-/3D-Feet-Detection Methods for Semi-Autonomous Powered Wheelchair Navigation, Cristian Vilar GIMÉNEZ¹. Silvia KRUG^{1,2}. Faisal Z. QURESHI^{1,3}. Mattias O’NILS¹. *Journal of Imaging*, vol. 7, no. 12, p. 255, Nov. 2021, DOI: doi.org/10.3390/jimaging7120255.

¹Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Faculty of Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe St. N., Oshawa, ON L1G 0C5, Canada.

Nanometergenaue Hubmodule für die Präzisionsantriebstechnik, Stephan GORGES¹. *Konstruktion (2021) Nr. 11-12, Sonderteil Antriebstechnik, Seite 36 – 40, www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hubmodule-fuer-die-praezisionsantriebstechnik/*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH,

98693 Ilmenau, Germany.

Filterless TRF Reader with CMOS Sensor ASIC for Lateral Flow Immunoassays, Alexander HOFMANN¹. Peggy REICH¹. Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. Max TRÜBENBACH². Alexander ROLAPP¹. Marco REINHARD¹. Friedrich SCHOLZ². Eric SCHÄFER¹. *2021 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2021, 6 – 9 October 2021, Berlin, Germany, virtual conference, pp. 1 – 6. DOI: doi.org/10.1109/Bio-*

CAS49922.2021.9645000, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany.

A UHF RFID to I2C Bridge IC with Configurable Power Storage Unit for Flexible RFID Sensor Applications, Jun TAN¹. Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. Hani ABDULLAH¹. Jonathan GAMEZ¹. Bjoern BIESKE¹. Benjamin SAFT¹. Martin GRABMANN¹. Jacek NOWAK². Sylvo JÄGER². Eric SCHÄFER¹. 2021 *IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 6 – 8 October 2021, Dehli, India, pp. 301 – 304, DOI: doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617266. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Microsensys GmbH, Erfurt, Germany.

Comparing BLE and NB-IoT as Communication Options for Smart Viticulture IoT Applications, Silvia KRUG^{1,2}. Sebastian MIETHE¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. 2021 *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 23 – 25 August 2021, virtual conference. DOI: doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530069, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University Sundsvall, Sweden.

Tip- and Laser-based 3D Nanofabrication in Extended Macroscopic Working Areas, Ingo ORTLEPP¹. Thomas FRÖHLICH¹. Roland FÜßL¹. et al. *Nanomanuf Metrol* 4, 132–148 (2021). DOI: doi.org/10.1007/s41871-021-00110-w. ¹Technische Universität Ilmenau, Germany.

Impact of Input Data on Intelligence Partitioning Decisions for IoT Smart Camera Nodes, Isaac Sánchez LEAL¹. Irida SHALLARI¹. Silvia KRUG^{1,2}. Axel JANTSCH^{1,3}. Matias O'NILS¹. *Electronics* 2021, 10, 1898. DOI: doi.org/10.3390/electronics10161898.

¹Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Institute of Computer Technology, TU Wien (Vienna University of Technology), Gusshausstrasse 27-29/384, 1040 Vienna, Austria.

Trash or Treasure? Machine-learning based PCB layout anomaly detection with AnoPCB, Henning FRANKE¹. Paul KUCERA¹. Julian KUNERS¹. Tom REINHOLD². Martin GRABMANN². Patrick MÄDER¹. Marco SEELAND¹. Georg GLÄSER². 2021 *17th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547913>*

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

Machine Learning in Charge: Automated Behavioral Modeling of Charge Pump Circuits, Martin GRABMANN¹. Christian LANDROCK². Georg GLÄSER¹. 2021 *17th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547918>*, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Global Services GmbH, Erfurt, Germany.

Modeling and Optimization of Supply Sensitivity for a Time-Domain Temperature Sensor, Jun TAN¹. 2021 *17th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547935>*, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Design and Optimization of a Control Algorithm for a Digital Low-Dropout Regulator in System-on-Chip Applications, Benedikt OHSE¹. Jun TAN². 2021 *17th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547956>*, ¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Jena, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Make Some Noise: Energy-Efficient 38 Gbit/s Wide-Range Fully-Configurable Linear Feedback Shift Register, Christoph WAGNER¹. Georg GLÄSER². Thomas SASSE¹. Gerald KELL³. Giovanni DEL GALDO^{1,4}. 2021 *16th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 2021, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547997>*, ¹Technische Universität Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Hochschule Brandenburg, Germany. ⁴Fraunhofer IIS, Ilmenau, Germany.

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

Alle Publikationen:
www.imms.de

Jahresbericht

Every Clock Counts – 41 GHz Wide-Range Integer-N Clock Divider, Christoph WAGNER¹. Georg GLÄSER². Gerald KELL³. Giovanni DEL GALDO^{1,4}. 2021 *16th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 19 – 22 July 2021, Erfurt, Germany, online. *Proceedings in: 423 Seiten, 140 x 124 mm, Slimlinebox, CD-Rom, ISBN 978-3-8007-5588-2, E-Book: ISBN 978-3-8007-5589-9, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9547998>*, ¹Technische Universität Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Hochschule Brandenburg, Germany. ⁴Fraunhofer IIS, Ilmenau, Germany.

A Case Study on Suitability of Machine Learning for Predictive Drill Bit Sharpness Estimation, Umut ONUS¹. Stefan MARR². Sebastian UZIEL¹. Silvia KRUG¹. 2021 *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, 7 – 9 June 2021, Rome, Italy, online, DOI: doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488429, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²GFE Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V.

Investigations on the positioning accuracy of the Nano Fabrication Machine (NFM-100), Jaqueline STAUFFENBERG¹. Ingo ORTLEPP². Ulrike BLUMRÖDER². Denis DONTSOV³. Christoph SCHÄFFEL⁴. Mathias HOLZ⁵. Ivo W. RANGELOW⁶. Eberhard MANSKE². *tm – Technisches Messen*. 2021, 88(9): 581 – 589. DOI: doi.org/10.1515/teme-2021-0079. ¹Technische Universität Ilmenau, Institute for Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Institute for Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany. ³SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau, Germany. ⁴IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ⁵nano analytik GmbH, Ilmenau, Germany. ⁶Technische Universität Ilmenau, Nanoscale systems Group, Ilmenau, Germany

Light Absorption Measurement with a CMOS Biochip for Quantitative Immunoassay Based Point-of-Care Applications, Alexander HOFMANN¹. Michael MEISTER¹. Alexander ROLAPP¹. Peggy REICH¹. Friedrich SCHOLZ². Eric SCHÄFER¹. *in IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, DOI: doi.org/10.1109/TBCAS.2021.3083359. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany.

127 
> Integrierte Sensorsysteme
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> Mag6D-nm-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

Alle
Publikationen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

Design space exploration for an IoT node: Trade-offs in processing and communication, Irida SHALLARI¹. Isaac S. LEAL¹. Silvia KRUG^{1,2}. Axel JANTSCH^{1,3}. Mattias O'NILS¹. *in IEEE Access, vol. 9, pp. 65078-65090, 2021, DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3074875.*

¹Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Sundsvall 85170, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Vienna, Austria.

Picometer-Scale Positioning of a Linear Drive System via Feedforward-Feedback

Control, Alex S. HUAMAN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Steffen HESSE¹. Christoph SCHÄFFEL¹. Christoph WEISE². Denis DONTSOV³. Eberhard MANSKE². Johann REGER². *2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2021, 7 – 9 March 2021, Kashiwa, Japan, pp. 1 – 6, DOI: https://doi.org/10.1109/ICM46511.2021.9385699,*

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Germany. ³SIOS Meßtechnik GmbH, Germany.

Nanopositioning and fabrication using the Nano Fabrication Machine with a positioning range up to 100 mm, Jaqueline STAUFFENBERG¹. Christoph REUTER¹. Ingo ORTLEPP¹. Mathias HOLZ². Denis DONTSOV³. Christoph SCHÄFFEL⁴. Jens-Peter ZÖLLNER¹.

Ivo RANGELOW¹. Steffen STREHLE¹. Eberhard MANSKE¹. *Proceedings Volume 11610, Novel Patterning Technologies 2021; 1161016 (2021), Event: SPIE Advanced Lithography, 2021, Online Only. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2583703,*

¹Technische Universität Ilmenau, Germany. ²nano analytik GmbH, Germany. ³SIOS Meßtechnik GmbH, Germany. ⁴IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Realworld 3D Object Recognition Using a 3D Extension of the HOG Descriptor and a Depth Camera, Cristian VILAR¹. Silvia KRUG^{1,2}. Mattias O'NILS¹. *Sensors 2021, 21(3),*

910. DOI: doi.org/10.3390/s21030910. ¹Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Interferometrically controlled, scalable x-y planar positioning stage concept, Ilko RAHNEBERG¹. Enrico LANGLOTZ¹. Denis DONTSOV¹. Steffen HESSE². Jaqueline STAUFENBERG³. Eberhard MANSKE³. *Special Interest Group Meeting: Micro/Nano Manufacturing, 17 – 18 November 2021, Virtual*. ¹SIOS Meßtechnik GmbH, Am Vogelherd 46, 98693 Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Universität Ilmenau, Production and Precision Measurement Technology, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, 98693 Ilmenau, Germany.

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

Zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Lock-In-Pixel und SPADs, Benjamin SAFT¹. *CiS MOEMS Workshop: Optische Sensoren und Systeme für Fluoreszenz sowie Streulicht, 30. September 2021, CiS e.V., Erfurt, Hybridveranstaltung*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Optimierung der Bewässerung im Obstbau durch Sensorikeinsatz, Martin PENZEL¹. Silvia KRUG². *Regionalkonferenz EXPRESS, 22. – 23. September 2021, Weingut Schloss Proschwitz, Meißen*. ¹Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau Erfurt, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Kontinuierliche Signalanalyse für Ethernet-Kabel, Sebastian UZIEL¹. *elmug4future, Technologiekonferenz, 21. – 22. September 2021, ComCenter Brühl, Erfurt*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Schallpegel im Ultraschallbereich, Peter HOLSTEIN¹. Nicki BADER¹. Hans-Joachim MÜNCH¹. Matthias DOMKE². Udo WAGNER². Tino HUTSCHENREUTHER³. Sebastian UZIEL³. *DAGA 2021 – 47. Jahrestagung für Akustik, 15. – 18. August 2021, Wien*. ¹SONOTEC GmbH, 06112 Halle, Germany. ²Microtech Gefell GmbH, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Measurement of exposition to ultrasound in environmental and industrial areas, Peter HOLSTEIN¹. Nicki BADER¹. Hans-Joachim MÜNCH¹. Matthias DOMKE². Udo WAGNER². Tino HUTSCHENREUTHER³. Sebastian UZIEL³. *27th International Congress on Sound and Vibration (ICSV27), 11 – 16 July 2021, virtual. ISBN 978-83-7880-799-5, ISSN 2329-3675*. ¹SONOTEC GmbH, 06112 Halle, Germany. ²Microtech Gefell GmbH, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Alle
Publikationen:
www.imms.de
Jahresbericht
© IMMS 2021

Vorhersage von Werkzeugverschleiß mittels KI, Umut ONUS¹. Sensorfusion und Künstliche Intelligenz, Veranstaltung der Arbeitskreise Künstliche Intelligenz und Smart Systems & Internet of Things, Silicon Saxony e. V., 14. Juli 2021, online. ¹IMMS

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

Kontinuierliches Monitoring von Ethernet-Kabeln, Sebastian UZIEL¹. Online-Stammtisch Sensorik 4.0, Diagnoselösungen in der industriellen Anwendung, 20. Mai 2021, online. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau,

Germany.

System zum Monitoring von Druckluft-Leckage und zur Optimierung von Druckluftanlagen, Sebastian UZIEL¹. Online-Stammtisch Sensorik 4.0, Diagnoselösungen in der industriellen Anwendung, 20. Mai 2021, online. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

NFC/HF-RFID transponder IC for Sensor Applications, Muralikrishna SATHYAMURTHY¹.

Think Wireless IoT Day on Healthcare and Security, 12 May 2021, online. ¹IMMS Institut

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

Prediction of tool wear using vibration measurements and AI / Vorhersage von Werkzeugverschleiß mittels Schwingungsmessungen und KI, Umut ONUS¹. KI-

Entwicklerstammtisch, 13. April 2021, online. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-

Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

EXperimentierfeld zur datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft (EXPRESS), Ingolf RÖMER¹. Martin SCHIECK¹. Hannes MOLLENHAUER². Rikard GRAß². Silvia KRUG³. Juliane WELZ⁴. Valentin KNITSCH⁴. 41. GIL-Jahrestagung, Informations- und Kommunikationstechnologien in kritischen Zeiten, 7. – 8. März 2021, online. ¹Universität Leipzig, Institut für Wirtschaftsinformatik, 04109 Leipzig, Germany. ²Helmholtz-Zentrum

für Umweltforschung GmbH – UFZ, Department Monitoring- und Erkundungstechnologien, 04318 Leipzig, Germany.

³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ⁴Fraunhofer Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, 04109 Leipzig, Germany.

Alle

Publikationen:

www.imms.de

Terminalsystem 2.0: Neue, flexible Möglichkeiten der Kombination von PXI-Testerressourcen bis 1 GHz, Björn BIESKE¹. Ludwig KIRCHER². Alexander ROLAPP¹. *33. GI/GMM/ITG-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2021)*, 22. Februar 2021, online. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²TU Ilmenau, Germany.

Modular hardware and software platform for the rapid implementation of asic-based bioanalytical test systems, Alexander HOFMANN¹. Peggy REICH¹. Marco GÖTZE¹. Alexander ROLAPP¹. Sebastian UZIEL¹. Thomas ELSTE¹. Bianca LEISTRITZ¹. Wolfram KATTANEK¹. Björn BIESKE¹. *2021 Design, Automation & Test in Europe (DATE)*, 01 – 05 February 2021, University Booth, past.date-conference.com/proceedings-archive/2021/html/date2021-uni-booth-pro.pdf, Virtual Conference. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Lösungsvorstellung zur Detektion von Druckluftleckage und Optimierung von Druckluftanlagen. Peter OTTO¹, Peter Holstein², Sebastian Uziel³. *3. IndustrieForum „Smarte Fertigung. Integration flexibler Fertigungstechnologien und intelligenter Prozessketten“*, 21.01.2021, Online, ¹Postberg + Co. GmbH, 34121 Kassel, Germany ²SONOTEC GmbH, 06112 Halle, Germany, ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Fachartikel in Zeitschriften

Zeitaufgelöste Fluoreszenz für genaue und mobile In-vitro-Diagnostik, Eric SCHÄFER¹. Benjamin SAFT¹. *DeviceMed, Das Community-Magazin, Jahrgang 17, November 2021, Seite 40 - 41, www.devicemed.de, ISSN 1860-9414*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

RFID-Chip zum batterielosen Betrieb kommerzieller Sensoren für medizinische und industrielle Anwendungen, Muralikrishna SATHYAMURTHY¹. *RFID im Blick, Ausgabe 05/2021, Seite 46 – 57, ISSN: 1860 – 5907*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

131

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

Alle Publikationen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2021

PSA-Nachweis direkt am Point-of-Care, Alexander HOFMANN¹. Michael MEISTER¹. Alexander ROLAPP¹. Peggy REICH¹. Friedrich SCHOLZ². Eric SCHÄFER¹. *in medical-design, Innovative Produkte und Lösungen in der Medizintechnik*, 02/2021, S. 29 – 32, shop.weka-business-communication.com/medical-design-dsb/Einzelhefte/medical-design-02-2021-Digital.html, www.medical-design.news. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Weimar, Germany.

Erteilte Patente

DE 10 2020 119 371 B3 „Mikroelektromechanischer Beschleunigungssensor“. Steffen MICHAEL.

* Förderung

- Das Verbundprojekt **VE-VIDES** wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **16ME0246** gefördert.
- Das Projekt **VE-ARIS** wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **16ME0242** gefördert.
- Das Projekt **FluoResYst** wird im Rahmen des Förderprogramms Photonik-Forschung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen **13N15807**).



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



- Das IMMS bringt sich als An-Institut und Transferpartner der TU Ilmenau im Unterauftrag der TU Ilmenau in das Pilotprojekt **InSignA** ein, das wie das Leistungszentrum InSignA vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft des Freistaats Thüringen gefördert wird.



- Das Projekt **Trib.US** wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **KK5048102AT0**.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- Das Projekt **ViroGraph** wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter der IGF-Vorhaben-Nr.: **21363 BR/1**.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- Die Arbeiten des IMMS im Teilvorhaben **KIQ** und als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ werden im „Mittelstand-Digital-Zentrum Ilmenau“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Kennzeichen



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

01MF21008C gefördert und führen die Aktivitäten aus dem „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“ fort. Das „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Ilmenau“ war bis September 2021 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 wurde. Das IMMS wurde unter dem Kennzeichen 01MF16005C als Akteur des Mittelstand-4.0-Kompetenzzentrums Ilmenau gefördert.

- Die Förderung des Vorhabens **EXPRESS** erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Projekträgerschaft erfolgt

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft mit dem Förderkennzeichen **FKZ 28DE102D18**.

- Das Projekt **KODIAK** wurde als Teil der Reaktion der Europäischen Union auf die COVID-19-Pandemie über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE-OP 2014 – 2022) unter dem Kennzeichen **2021 FE 9127** gefördert.



- Das Projekt **SensInt** wurde als Teil der Reaktion der Europäischen Union auf die COVID-19-Pandemie über den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE-OP 2014 – 2022) unter dem Kennzeichen **2021 FE 9072** gefördert.

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



- Das Projekt **StorAlge** wird vom ECSEL Joint Undertaking (JU) unter der Fördernummer **101007321** finanziert. JU wird durch das Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizon 2020“ der Europäischen Union sowie durch Frankreich, Belgien, die Tschechische Republik, Deutschland, Italien, Schweden, die Schweiz und die Türkei unterstützt. StorAlge wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen **16MEE0155T** sowie mit Mitteln des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft unter dem Förderkennzeichen **2021 ECS 0003** gefördert.



- Das **Graduiertenkolleg 2182** „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wird unter dem Förderkennzeichen **DFG GRK 2182** der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.
- Das Projekt **ECo-Harvester** wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer **452215927**.



134

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

Mehr zur Förderung:
www.imms.de

- Das Forschungsvorhaben **thurAI** wird durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen **2021 FGI 0008** gefördert.

- Die Arbeiten im Forschungsvorhaben **Quantum Hub Thüringen** werden durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen **2021 FGI 0042** gefördert.
 - Die **interne KI-Forschungsgruppe** wird durch Mittel des Freistaats Thüringen finanziert.
-

API *Application Programming Interface, Anwendungsprogrammierschnittstelle*

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

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

CRS *cytokine release syndrome, Zytokin-Freiset- zungssyndrom*

DNA *Desoxyribonukleinsäure*

DOF *degree of freedom, Freiheitsgrad*

EDA *Electronic Design Automation, rechnerge- stützte Entwurfsautomatisierung*

FET *Feldeffekttransistor*

FFT *Fast Fourier Transform, Algorithmus*

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

GKK *Gewichtskraftkompensation*

HF *Hochfrequenz*

I²C *Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus*

IC *Integrated Circuit, integrierte Schaltung*

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

IoT *Internet of Things, Internet der Dinge*

KI *Künstliche Intelligenz*

KMU *Kleine und mittlere Unternehmen*

LAU *lifting and actuating unit*

LIF *Laserinterferometer*

LoC *Lab-on-Chips*

LQ *linear-quadratisch*

MEMS *Mikroelektromechanische Systeme*

ML *Maschinelles Lernen*

PCB *Printed Circuit Board, Leiterplatte*

PCR *Polymerase-Kettenreaktion*

PID *Proportional-Integral-Derivativ-Regler*

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

REST *Representational State Transfer, Paradig- ma zur Softwarearchitektur verteilter Systeme*

RFID *Radio-Frequency Identification*

RMS *Root Mean Square, quadratisches Mittel*

SiCer *Silizium-(Si)-Keramik-(Cer)-Verbundsub- strat*

SPAD *Single Photon Avalanche Diodes, Einzel- photonendetektoren*

SPARCL[®] *Spatial Proximity Analyte Reagent Capture Luminescence, Technologie zur Mini- mierung von Assays für das Hochdurchsatz- Screening*

TSV *Through-Silicon-Vias, Silizium-Durchkon- taktierungen*

ULP *Ultra Low Power*

USB *Universal Serial Bus*

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver- netzte Mess- u. Testsysteme

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 verlinkten Inhalte nutzen wir Matomo (ehem. Piwik) für die anonymisierte Analyse und die Verbesserung unseres Jahresberichts. Die Open-Source-Software Matomo folgt den geltenden

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

Externe Links

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

Lektorat

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

Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Druck: www.BRANDTDRUCK.de

Alle Rechte sind vorbehalten.

Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

> *Integrierte*

Sensorsysteme

> *Intelligente ver-*

netzte Mess- u.

Testsysteme

> *Mag6D-nm-*

Direktantriebe

> *Inhalt*

* *Förderung*

Datenschutz-

erklärung auf

www.imms.de.

Impressum

und rechtliche

Hinweise auf

www.imms.de.

Ansprech-

partner auf

www.imms.de.