

IMMS

JAHRESBERICHT

2023

- 3 Vorwort
- 5 Kooperation mit der TU Ilmenau
- 7 Stimmen aus Industrie und Forschung
- 11 Nachwuchsförderung am IMMS
- 17 Stimmen aus dem IMMS

- 21 Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme**
- 23 Highlights 2023
- 32 **Fachartikel:** SPAD-basierter CMOS-Zeilen-sensor-IC für den Nachweis von Chemilumineszenz in mikrofluidischen Kanälen
- 38 **Fachartikel:** Miniaturisierter CMOS-ISFET-Sensor für die Analytik und Diagnostik

- 45 Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme**
- 47 Highlights 2023
- 63 **Fachartikel:** Nachrüstbares Monitoring von Straßenlampen – smarte und kostengünstige Defekterkennung
- 69 **Fachartikel:** Ein preiswertes System zum echtzeitnahen Monitoring der Feinstaubbelastung
- 75 **Fachartikel:** Intelligente, vernetzte Kamerasysteme für mehr Sicherheit im mobilen Einsatz von Ladekränen
- 84 **Fachartikel:** Kompaktes Mixed-Signal-Testsystem zur Charakterisierung von Halbleiterspeichern

- 90 Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision**
- 92 **Fachartikel:** Unkonventionelle, laterale Messungen mit Laser-Fokus-Sensoren für Nanopositioniersysteme

- 99 Zahlen, Strukturen und Belege**
- 100 Das IMMS in Zahlen
- 102 Organisation
- 104 Lehrangebot
- 104 Veranstaltungen
- 108 Publikationen
- 115 Förderung
- 117 Abkürzungen
- 118 Impressum, Datenschutz



Vorwort

Martin Eberhardt und Ralf Sommer. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

2023 wurde das **IMMS** im Auftrag des Freistaats Thüringen durch die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen und der von ihr bestellten Gutachter umfassend **evaluiert**. Hierbei kamen die strategische Ausrichtung und Entwicklung, Forschungs- und Transferaktivitäten, Organisation, Ausstattung, Lehre, Kooperationen und Öffentlichkeitsarbeit auf den Prüfstand. Die Rolle des IMMS als aktiver, flexibel, schnell und auf Augenhöhe agierender Partner für KMU der Region wurde von der Begutachtungskommission als essenziell hervorgehoben und die Weichen, die wir uns mit unserer Strategie gestellt haben, als konsequent und sinnvoll erachtet. Um diese Ausrichtung zu stärken, hat die Kommission Empfehlungen zum Wachstum und zur Weiterentwicklung des IMMS erarbeitet. Nach Bewertung der Empfehlungen ab 2024 zusammen mit dem TMWWDG werden diese für die Umsetzung konkretisiert.

2023 war auch geprägt durch verstärkte **Recruiting**-Aktivitäten: Wir waren auf mehr Karrieremessen unterwegs, haben im Schulterchluss mit Thüringer Hochschulen die Langen Nächte der Wissenschaften in Ilmenau und Erfurt um Angebote zur Studienorientierung und Praktikumssuche erweitert, auf unserem YouTube-Kanal eine Karriere-Playliste mit studentischen Videointerviews bereitgestellt und eine Online-Bewerbungsplattform aufgesetzt.

www.imms.de/

jobs

Jahresbericht

© IMMS 2023

Zu unserer großen Freude erhielten 2023 unsere Mitarbeiter **Auszeichnungen** wie den Silicon Science Award sowie die iENA-Silbermedaille und es konnte eine aus IMMS-Forschungsprojekten entwickelte Dissertation erfolgreich verteidigt werden.

Das Jahr 2023 wurde intensiv genutzt, um in unseren drei Forschungsfeldern wichtige **Meilensteine in F&E-Projekten** und Industrienaufträgen zu erreichen. Eine Auswahl beleuchtet dieser Bericht. So haben wir u.a. einen miniaturisierten CMOS-ISFET-Sensor und hochsensitive SPAD-basierte Bildsensoren für die In-vitro-Diagnostik realisiert, intelligente Kommunikationslösungen zum Feinstaub- und Straßenlampendefekt-Monitoring und virtuelle Sicherheitszonen für LKW-Kräne erarbeitet, die Forschung für eine neuartige Technologieplattform mit Graphen-basiertem Feldeffekttransistor für In-vitro-Multiparameteranalytik mit der Entwicklung miniaturisierter Messtechnik unterstützt, ein kompaktes Mixed-Signal-Testsystem zur Charakterisierung von Halbleiterspeichern realisiert und neue Wege für unkonventionelle, laterale Messungen mit Laser-Fokus-Sensoren für Nanopositioniersysteme gefunden.

Für all diese und weitere Lösungen, für ihr Expertenwissen und ihre persönlichen Kompetenzen und für ihren Einsatz möchten wir uns bei unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bedanken. Sie sind es, die darüber hinaus Nachwuchskräfte fördern und sich in Verbänden, Clustern und Gremien engagieren. Grundlage dafür ist die institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen. Dafür bedanken wir uns herzlich im Namen des IMMS-Teams. Wir danken allen Forschungspartnern für Inspirationen zu unserer Forschung und Entwicklung, die wir in anwendungsnahe Lösungen für die Wirtschaft überführen.

All jenen, die uns bestärken und mit uns die Zukunft gestalten, danken wir herzlich für ihr Engagement und ihr Vertrauen. Was aus einigen gemeinsamen Projekten geworden ist, erfahren Sie in diesem Bericht. Weitere Ideen möchten wir gerne mit Ihnen entwickeln.

Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit, neue gemeinsame Wege und wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen



Ralf Sommer
Wissenschaftlicher Geschäftsführer



Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

4

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

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

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

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 2023 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

Quantum Hub Thüringen*: IMMS erforscht CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

Gemeinsam mit der TU Ilmenau und neun weiteren Thüringer Partnern forscht das IMMS 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.

www.imms.de/

qhub

thurAI*: Sensorik für Smart City und Methoden zur intelligenten Datenaufbereitung im Netz für KI-Auswertungen

In thurAI arbeiten die TU Ilmenau, die FSU 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 zusammen mit der Stadt ein „LivingLab“ in Ilmenau realisieren. Kern sind dabei Daten, die für unterschiedlichste KI-basierte Dienste im Smart-City-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.

www.imms.de/

thurAI

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.

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

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

Das IMMS gibt als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ Impulse zur Einführung von Digitalisierungslösungen 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.

www.imms.de/nanofab
www.imms.de/md

Das Leistungszentrum InSignA*

Ziel des Leistungszentrums „InSignA“ in Ilmenau ist es, mit einem beschleunigten Technologietransfer die regionale Wirtschaft zu stärken. Regionale Wertschöpfungsnetzwerke in den zukunftsorientierten Transferbereichen Signalanalyse- und Assistenzsysteme in Produktion, Energieversorgung und Robotik sollen aufgebaut und etabliert werden. Hierfür bündeln Fraunhofer-Einrichtungen in und um Ilmenau, die Forschungsprofilinien der TU Ilmenau und weitere Forschungseinrichtungen ihre Kompetenzen.

www.imms.de/insigna

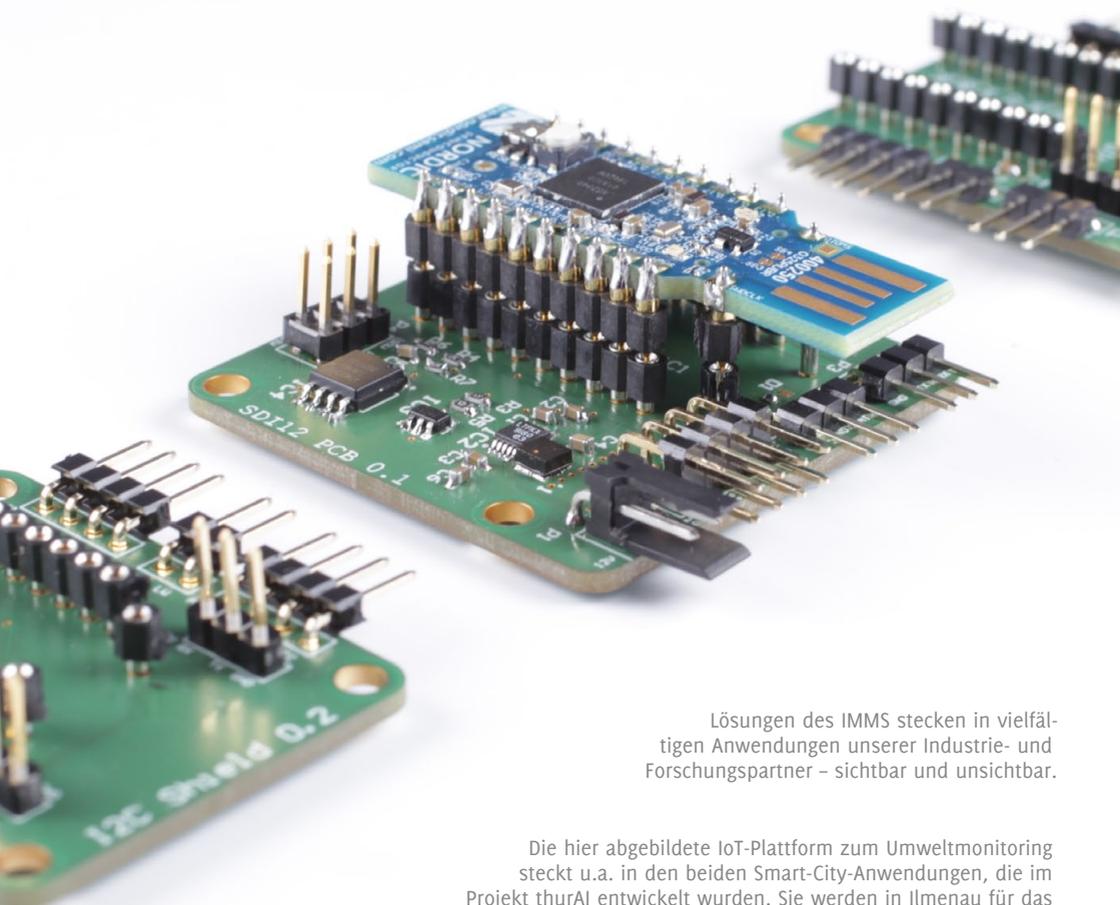
Gemeinsame Nachwuchsförderung

Das IMMS ergänzt nicht nur die Lehre an der TU durch umfangreiche Praxisangebote. 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 industrienahen Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika.

www.imms.de/angebote

STIMMEN AUS INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Alle Referenzen: www.imms.de/ref



Lösungen des IMMS stecken in vielfältigen Anwendungen unserer Industrie- und Forschungspartner – sichtbar und unsichtbar.

Die hier abgebildete IoT-Plattform zum Umweltmonitoring steckt u.a. in den beiden Smart-City-Anwendungen, die im Projekt *thurAI* entwickelt wurden. Sie werden in Ilmenau für das Feinstaub- und Lampenmonitoring eingesetzt und in diesem Bericht in zwei Fachartikeln vorgestellt. Foto: IMMS.

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

Freistaat
Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.



„Wir engagieren uns für zuverlässige Lösungen höchster Qualität zum Handling wertvoller Proben in der Life-Science-Forschung. Liquid Handling ist ein Kernprozess in praktisch jedem Life-Science-Labor. Darum ist es ein Kernbereich bei Eppendorf. Unsere absolut zuverlässigen Geräte und Verbrauchsmaterialien sind aus den Laboren nicht mehr wegzudenken. Egal, ob es um eine neue Technologie oder die Weiterentwicklung eines schon bestehenden Produkts geht – jedes Detail wird mit Blick auf die Erfordernisse der Anwender bedacht. Dafür stehen wir in engem Kontakt mit unseren Kunden und kennen daher ihre täglichen Problemstellungen.“

Für ein Produktpflegeprojekt eines Antriebs- und Messsystems haben wir die Expertise des IMMS hinzugezogen. Das IMMS hat das System nach kurzer Zeit tiefgehend verstanden und daher diverse Einflussfaktoren identifizieren und gründlich qualitativ aufarbeiten können. Dadurch konnten Potentiale für die weitere Optimierung der Antriebseinheit ermittelt werden. In weiteren Untersuchungen wurde ein Ansatz zur Kalibrierung einer dieser Störgrößen erarbeitet. Wir erwarten uns daraus noch höhere Genauigkeiten für unseren Regler, die sich für Weiterentwicklungen nutzen lassen. Die Ergebnisse sprechen für sich und auch mit der Art der Zusammenarbeit sind wir rundum zufrieden. Wir freuen uns auf die nächsten Themen!“

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

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



Dr. Daniel Schultheiß,
Oberbürgermeister
der Stadt Ilmenau,

Foto: ©SVI.

Dr. Daniel Schultheiß, Stadt Ilmenau

„Ilmenau ist ein modernes, innovatives und lebenswertes Mittelzentrum mit besonderer Dynamik. Mit der einzigen Technischen Universität im Freistaat Thüringen ist die Goethe- und Universitätsstadt Heimat von Wissenschaft und Forschung mit hoher Anziehungskraft sowohl für jüngere Menschen und Familien, als auch für innovative, technologieorientierte Unternehmen und Forschungsinstitute. Vor diesem Hintergrund hat sich die Stadt schon vor einigen Jahren dazu entschieden, sich auf den Weg hin zu einer Smart City zu begeben. Erst kürzlich mündeten diese Bestrebungen in dem Smart-City-Leitbild ‘Ilmenau – Smart City aus eigener Kraft’.

Im Rahmen dieser Aktivitäten sind auch die Smart-City-Projekte, die gemeinsam mit dem Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme im städtischen Reallabor umgesetzt wurden, einzuordnen. Nach anfänglicher Bedarfsanalyse konnten schließlich drei Anwendungen für den Einsatz intelligenter Sensorysysteme identifiziert werden, die reale kommunale Aufgabenstellungen vereinfachen.

Ein Projekt überwacht sensorisch die Funktion der Straßenlaternen des Ilmenauer Ortsteils Jesuborn. Damit kann das Beleuchtungsnetz permanent ohne Kontrollfahrten auf seine Funktion überprüft und Defekte zeitnah behoben werden. Die im Projekt entwickelte Lösung besteht aus energieautarken Sensorknoten, die nachträglich an beliebigen Lichtmasten montiert werden können.

Ein zweites Projekt misst in drei touristisch geprägten Ortsteilen die Luftgüte durch die Erfassung von Feinstaub in vier Granulatgrößen mittels eines optischen Sensors. Das Team des IMMS entwickelte dazu ein System, das mittels preiswer-

ter Sensorik eine kontinuierliche Feinstaubüberwachung an verschiedenen Standorten im jeweiligen Ortsteil ermöglicht, um damit Ursachen für Schwankungen bei der Feinstaubbelastung aufzuspüren und gegebenenfalls frühzeitig gegensteuernde Maßnahmen ergreifen zu können. Die aufbereiteten Messdaten werden der Tourismusverwaltung sowie den Bürgerinnen und Bürgern in Echtzeit grafisch und online bereitgestellt.

Beim dritten Projekt steht das Thema Lärmimmissionen im Mittelpunkt. Regelmäßig ist unsere Kommune dabei mit der Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte und Auflagen konfrontiert. Traditionell wird die Lärmbelastung in Stichproben mit qualifizierter Messtechnik nach den Vorgaben der einschlägigen gesetzlichen Normen vor Ort erfasst. Doch konventionelle Messtechnik ist teuer, erfordert Fachpersonal und ist zudem lediglich zur punktuellen Überwachung gedacht. Rückschlüsse aus einem flächendeckenden kontinuierlichen Monitoring können hingegen Systeme liefern, wie sie vom IMMS im Vorprojekt „StadtLärm“ entwickelt wurden. Das Lärm-Monitoring-System erfasst permanent und über verteilte Sensoren großflächig Schalldaten und soll den städtischen Behörden Pegel und Typ von Lärmereignissen liefern. Die Informationen sind hilfreich für zukünftige stadtplanerische und verkehrliche Entscheidungen sowie sicherheitsrelevante Abwägungen und Maßnahmen.

Über die gesamte Projektlaufzeit habe ich das IMMS immer als kompetenten, innovativen und lösungsorientierten Partner wahrgenommen, der sehr flexibel und pragmatisch mit den multiplen Herausforderungen beim Einsatz moderner Messtechnik im topografisch und klimatisch anspruchsvollen Umfeld umging. Als Stadtverwaltung schätzen wir aber auch die persönliche Zusammenarbeit mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die im angenehmen Austausch immer Lösungen finden. Schlussendlich veranschaulichen diese drei Praxisbeispiele den gelungenen Transfer von wissenschaftlichen Anstrengungen hin zu alltagstauglichem Nutzen. Deshalb bleiben die ausgebrachten Sensoren auch über das Ende der Projektlaufzeit hinaus im Einsatz und bieten damit nicht nur einen Mehrwert für die städtische Verwaltung, sondern auch für die Bürgerinnen und Bürger von Ilmenau.

Im Namen der Stadtverwaltung Ilmenau danke ich dem Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme für die angenehme Zusammenarbeit und freue mich auf viele weitere gemeinsame Projekte. Herzlichen Dank!





NACHWUCHSFÖRDERUNG AM IMMS

Alle Infos zu unseren studienbegleitenden
Angeboten: www.imms.de/angebote

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 können von uns bei Facharbeiten betreut werden.

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.

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

www.imms.de/
barcamp

Beteiligung an Karrieremessen verstärkt

Das IMMS hat 2023 auf drei Karrieremessen auf seine hochwertige und engagierte Nachwuchsförderung aufmerksam gemacht – im Juni an der Hochschule Schmalkalden, im Oktober zur inova in Ilmenau und im November zur Firmenkontaktbörse „Praxis trifft Campus“ an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena. Studentinnen und Studenten aus Fachrichtungen wie Biomedizintechnik, Elektrotechnik, Informatik, Maschinenbau, Mechatronik und verwandten Studiengängen informierten sich

IMMS-Team zur Karrieremesse an der Hochschule Schmalkalden im Juni 2023. Foto: IMMS.



über Angebote für Praktika, Bachelor-, Masterarbeiten und Nebentätigkeiten sowie weitere Möglichkeiten für einen Einstieg am Institut, z.B. auch über eine flexible Kombination von Masterstudium und Teilzeitstelle. Das studienbegleitende, langfristige Praxistraining mit anspruchsvollen Themen, individueller Betreuung und Ausstattung mit industriellem Standard befähigt für einen Berufsstart in der Industrie und der anwendungsnahen Forschung. Ziel ist es, die Unternehmen der Region auch über die Nachwuchsförderung am IMMS zu stärken.

Videointerviews von Studentinnen und Studenten am IMMS

2023 hat das IMMS sechs Video-Interviews mit Studentinnen und Studenten veröffentlicht, die über ihre Themen für unsere Forschung und Entwicklung und ihre Betreuung am IMMS berichten. Auf diesem Weg haben sie anderen etwas von ihren praktischen Erfahrungen am IMMS mitgeben können, was während des Studiums und danach weiterhilft: gute Betreuung, Anwendung der Theorie in der Praxis, Umsetzung eigener Projekte als Studienleistung, fachliche Weiterentwicklung und jede Menge Erfahrungen aus dem F&E-Berufsalltag. Drei der Studenten sind nach ihrem erfolgreichen Abschluss am IMMS geblieben, einer arbeitet momentan in Teilzeit parallel zum Masterstudium.



Vincent: <https://youtu.be/gZiZTS08RSk>



Marie: <https://youtu.be/lzw58LLS3xQ>



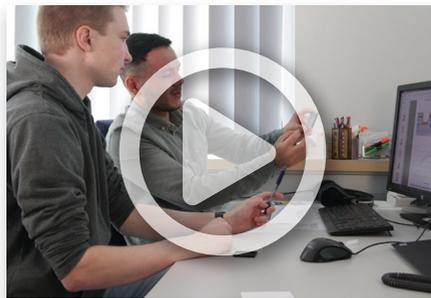
Nikita: <https://youtu.be/jXxSGT1f00g>



Laetitia: <https://youtu.be/jBxdaxkwqwQ>



Markus: <https://youtu.be/-YZsnXmj3Dg>



Ilmurat: <https://youtu.be/jzTNJQzHCZI>

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

> Inhalt

* Förderung

Wenige Klicks zum Praktikum – Bewerbungsplattform in Betrieb genommen

Mit der Umstellung auf die neue Bewerbungsplattform für reguläre Stellenausschreibungen im Herbst 2023 hat das IMMS auch sämtliche Themen für studentische Angebote in das neue System überführt. Somit können Studentinnen und Studenten nicht nur alle Themen für Praktika, Bachelor- oder Masterarbeiten bzw. Nebentätigkeiten schnell nach ihren Interessen filtern, sie können sich mit wenigen Klicks online bewerben unter www.imms.de/angebote.

www.imms.de/angebote

Lange Nächte – auch zur Berufsorientierung

Das IMMS hat die Langen Nächte der Wissenschaften in Erfurt am 23. Juni und in Ilmenau am 1. Juli genutzt, um auch über seine Angebote zur Nachwuchsförderung zu informieren und über Mitmachangebote mit Spaßfaktor schon die Kleinen für technische Inhalte zu begeistern. Für die Erfurter Wissenschaftsnacht hat das IMMS als Akteur des Forschungs- und Industriezentrums Erfurt e.V. (FiZ) die Koordination des Angebotspakets mit Partnern in Erfurt-Südost wesentlich gestaltet. So konnten die Technische Universität Ilmenau, die Ernst-Abbe-Hochschule Jena, die Hochschule



Eins der Mitmachangebote zur Langen Nacht der Wissenschaften.

Foto: IMMS.



Schmalkalden und die Hochschule Nordhausen dafür gewonnen werden, ihre Studienangebote zur Langen Nacht der Wissenschaften ergänzend zu den vielfältigen Einblicken in die Forschung, Entwicklung und Produktion am Standort Erfurt-Südost als möglichem späteren Arbeitsort für Erfurter Schülerinnen und

- 15
- > Integrierte Sensorsysteme
 - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - > Mag6D-nm-Direktantriebe
 - > Inhalt
 - * Förderung

Schüler zu präsentieren. Die Infostände der vier Hochschulen waren zu finden bei den Mitgliedern des FiZ: CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Fraunhofer-Zentrum für Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin MEOS, IMMS, Melexis Erfurt GmbH und X-FAB Global Services GmbH. Es kamen nach Aussagen der FiZ-Mitglieder deutlich mehr Gäste als sonst und das Gesamtangebot wurde gut angenommen.

Sommer-Angebot im Schülerforschungszentrum Ilmenau

Vom 3. – 5. Juli 2023 nahmen Schülerinnen und Schüler einer 6. Klasse kurz vor den Sommerferien an einem Workshop zur praktischen Einführung in die Schaltungstechnik in der Projektwoche an der Goethe-Schule in Ilmenau teil. Der Workshop war eines der vom Schülerforschungszentrum der Technischen Universität Ilmenau organisierten Angebote, um die Neugier von Kindern und Jugendlichen für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT) zu wecken. Betreut wurde er von Prof. Dr. Ralf Sommer, dem wissenschaftlichen Geschäftsführer des IMMS und Leiter des Fachgebiets Elektronische Schaltungen und Systeme an der TU Ilmenau, und vier seiner Studenten der Elektrotechnik und Informationstechnik.



Marius Schmidt, Richard Richter, Prof. Ralf Sommer und Lukas Haubensack im Workshop zu elektronischer Schaltungstechnik zur Projektwoche an der Goetheschule in Ilmenau. Foto: Ina Totzke, Goetheschule Ilmenau.



Eine der vielen Stationen zum Girls' Day am IMMS am 27.04.2023. Foto: IMMS.

Girls' Day am IMMS

Am 27.04.2023 kamen 15 Mädchen von Klasse 5 bis 8 zum Girls' Day ans IMMS, um zu erfahren, wie der Alltag als Ingenieurin aussieht, Chip-Strukturen unter die Lupe zu nehmen, eine eigene Taschenlampe zu löten, Experimente zu Schwingungen und einem Minimotor zu machen, jede Menge Knobelaufgaben zu lösen und um sich im Programmieren auszuprobieren. Auf der Plattform OpenRoberta mit dem System Calliope mini gab es spannende Programmieraufgaben zu lösen: LED-Schrift zum Laufen bringen, Licht durch Bewegung einschalten oder sich ein ganz genaues Bild von der Umwelt mit Sensoren machen. Der Tag wurde von Ingenieurinnen des IMMS mit studentischer Unterstützung gestaltet und Hand in Hand mit den Angeboten von Technischer Universität Ilmenau und Fraunhofer IDMT vorbereitet und als gemeinsames Campus-Angebot angekündigt.

Ilmurat Bazarov, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Seit Beginn meiner Tätigkeit am IMMS habe ich mich sowohl beruflich als auch persönlich weiterentwickelt. Ich begann als Masterstudent und stürzte mich in die komplizierte Welt der KI-Implementierung in der Mikrochip-Industrie. Diese prägende Studienzeit hat nicht nur meine Ziele beeinflusst, sondern mir auch ein Gefühl der Zugehörigkeit vermittelt, und ich wusste, dass ich meinen Weg in diesem innovativen Unternehmen fortsetzen wollte. Meine Zeit als Student hat mich somit dazu bewogen, meinen Weg in diesem Unternehmen fortzusetzen. Jetzt konzentriere ich mich im Themenbereich System Design auf die industrielle Prozessoptimierung, wo wir aktiv KI einsetzen, um die Industrie 4.0 zu gestalten.“

Was mich am IMMS am meisten antreibt, sind die greifbaren Auswirkungen unserer Arbeit auf die Gesellschaft. Die Brücke zwischen Forschung und Industrie ist der Ort, an dem unsere Bemühungen wirklich glänzen, da wir direkt zu realen Lösungen beitragen, die die Effizienz, Produktivität und Nachhaltigkeit verbessern. Diese Verknüpfung von Innovation und praktischer Anwendung spricht mich sehr an und bestärkt mich in meinem Bestreben, etwas zu bewirken. Ein Beispiel dafür ist unser laufendes Projekt zur Entwicklung von KI-basierten Steuerungssystemen für die ressourceneffiziente Prozessoptimierung in der industriellen Produktion. Durch den Einsatz modernster Algorithmen des maschinellen Lernens optimieren wir nicht nur

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

www.imms.de/embeddedai

www.imms.de/immsvoices



Ilmurat Bazarov, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich System Design.

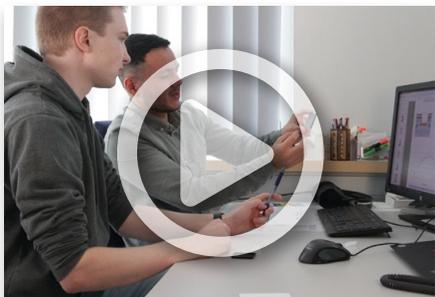
Foto: IMMS.

die Produktionsprozesse für maximale Effizienz, sondern reduzieren auch den Ressourcenverbrauch und verbessern somit die Umweltverträglichkeit. Dieser doppelte Schwerpunkt auf Produktivität und Umwelt unterstreicht unser Engagement für verantwortungsvolle Innovationen.

Meine Zeit am IMMS hat entscheidend dazu beigetragen, dass ich mich zu einem ergebnisorientierten Forscher entwickelt habe. Ich hatte das Privileg, von den Besten zu lernen und an topaktuellen Anwendungen von KI in industriellen Szenarien zu arbeiten. Das Unternehmen hat mir eine einzigartige Plattform geboten, um mich als Wissenschaftler zu entwickeln, und mir den Spagat zwischen Wissenschaft und Industrie ermöglicht. Ich habe viel über die Bedeutung von Zusammenarbeit, Innovation und Kreativität gelernt und bin dankbar für die Möglichkeiten, die ich hatte, meine Fähigkeiten und mein Fachwissen zu entwickeln. Was ich am meisten schätze, ist das dynamische und unterstützende Umfeld. Meine Kollegen unterstützen mich auf wunderbare Weise, sind immer offen für neue Ideen, helfen mir gerne und fördern meine persönliche Entwicklung. Das Unternehmen ist außerdem ein Schmelztiegel der Sprachen und Kulturen und bietet einen reichen Austausch von Ideen und Perspektiven. Diese Vielfalt hat nicht nur meinen beruflichen Horizont erweitert, sondern auch mein Privatleben bereichert.“

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

www.imms.de/
[immsvoices](#)



Ilmurat Bazarov (rechts), M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich System Design, zu seiner Zeit als Masterand am IMMS mit seinem Betreuer Florian Kögler. Über diese Zeit berichtet er auch in einem Videointerview unter <https://youtu.be/7zTNJQzHCZI>.

Foto: IMMS.

Ilmurat: <https://youtu.be/7zTNJQzHCZI>



Vincent Haude, B.Sc.,
Masterstudent und
wissenschaftlicher
Mitarbeiter im
Themenbereich
Industrielle Elektro-
nik und Messtechnik.

Foto: IMMS.

Vincent Haude, B.Sc., Masterstudent und wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Auf das IMMS machte mich Prof. Sommer während meines Grundstudiums der Elektro- und Informationstechnik an der TU-Ilmenau aufmerksam. Darauf folgte eine zwei-jährige studentische Assistenzstelle im Themenbereich Industrielle Elektronik und Messtechnik in Ilmenau. In diesem Rahmen konnte ich bereits wertvolles praktisches Wissen sammeln, das mir dabei half, die theoretischen Erkenntnisse aus meinem Studium zu verstehen und mit der Praxis zu verknüpfen. Auch wurde mir der Umgang mit verschiedenstem Messequipment beigebracht, was im Studium nur begrenzt vermittelt wird und mir bei einigen Praktika an der TU sehr nutzte.

2022 wechselte ich an den Institutsteil des IMMS in Erfurt, um mein Fachpraktikum dort durchzuführen. In diesem Rahmen entwickelte ich eine Probecard für den Finaltest eines Sensor-ICs. Hierbei war die Herausforderung, eine Kontaktanordnung zu entwickeln, die das kleine Rastermaß und die kleine Größe der Kontakte zuverlässig aufnehmen konnte. Bei der Entwicklung dieser Probecard kam mir vor allem die Möglichkeit verschiedener 3D-Druck-Technologien am IMMS zugute. An das Fachpraktikum knüpfte 2023 direkt meine Bachelorarbeit an. In dieser Arbeit entwickelte ich Schaltungen, die es ermöglichen, LEDs im Nanosekundenbereich zu pulsen. Derartig kurze Pulse werden für die Technologie der zeitaufgelösten Fluoreszenz in der medizinischen Diagnostik benötigt. Bei der Durchführung meiner Messungen war es notwendig, Photonen im Nanosekundenbereich zu erfassen. Hierbei kam mir das State-of-the-art-Messequipment am IMMS zugute. Für die Forschung am Thema



Vincent Haude (links), B.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich Industrielle Elektronik und Messtechnik, zu seiner Zeit als studentischer Assistent am IMMS mit seinem Betreuer Tom Reinhold. Über diese Zeit berichtet er auch in einem Videointerview unter <https://youtu.be/gZlZTS08RSk>. Foto: IMMS.

Vincent: <https://youtu.be/gZlZTS08RSk>

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

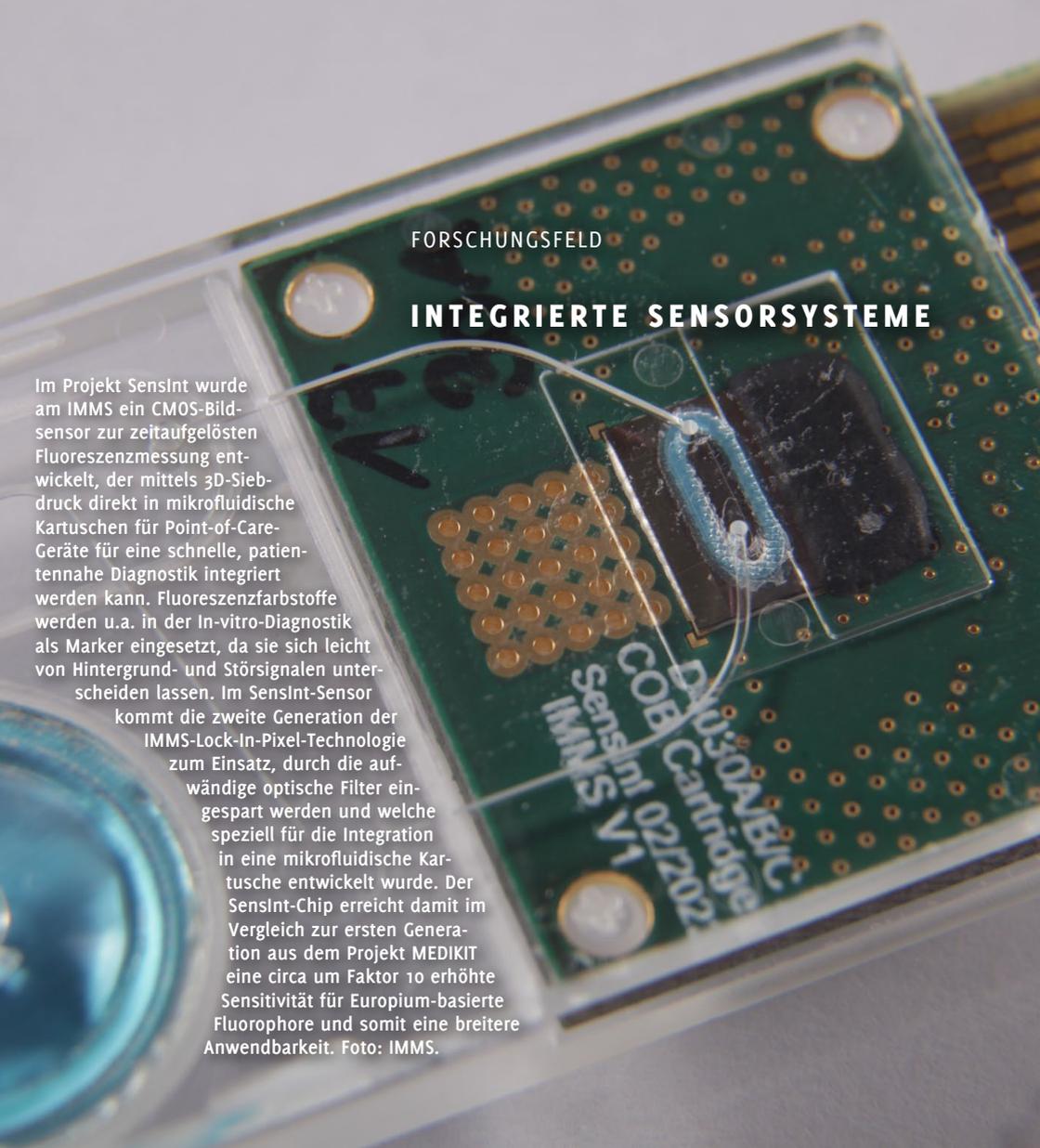
meiner Arbeit war es notwendig, dass ich mich mit verschiedenen Bereichen der Wissenschaft wie Festkörperphysik, Optoelektronik und Elektrotechnik beschäftige, um LEDs bestmöglich zu verstehen und das Thema so gut wie möglich zu bearbeiten. Hierbei half mir das tiefe Verständnis der Kollegen am IMMS, die jede noch so komplizierte Frage einordnen und beantworten konnten. Am Ende meiner Arbeit standen Schaltungen, mit denen es möglich ist, die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung kostengünstig und platzsparend in Geräten einzusetzen. Um die Ergebnisse aus meiner Bachelorarbeit weiter zu verfolgen, wurde ich nach dem Abschluss meines Bachelors als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf Teilzeit am IMMS angestellt. Dabei gefällt mir insbesondere die Vereinbarkeit meines Studiums mit dieser Teilzeitstelle. Dadurch kann ich bereits während meines Masterstudiums wertvolle Praxiserfahrung bei der Bearbeitung von Forschungsprojekten sammeln, die mir einen leichteren Start in das Berufsleben ermöglichen wird.

Ich schätze die Arbeitsatmosphäre am IMMS sehr. Das Team ist sehr aufgeschlossen und es steht einem immer jede Tür offen, um Fragen zu stellen oder Ideen einzubringen. Die offenen Gespräche und den Austausch mit den Kollegen, auch in den Mittagspausen, schätze ich sehr. Auch findet ein monatlicher Austausch zwischen den verschiedenen Abteilungen in den Institutskolloquien statt. Dabei werden Forschungsschwerpunkte der einzelnen Abteilungen vorgestellt, sodass jeder auch über den eigenen Tellerrand seines Fachgebiets hinausschauen kann.

www.imms.de/
[immsvoices](#)

Auch schätze ich die vielfältigen Aufgaben und Assistenz-, Praktikums- und Abschlussarbeitssthemen am IMMS sehr. In den drei Jahren, die ich nun am IMMS arbeiten durfte, konnte ich an vielen verschiedenen Themen arbeiten und mich mit 3D-Konstruktion, Leiterplattenkonzeption, -entwurf und -aufbau, Vermessung und Charakterisierung von Schaltungen und vielen weiteren Tätigkeiten beschäftigen.“

www.imms.de/
[angebote](#)



FORSCHUNGSFELD

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Im Projekt SensInt wurde am IMMS ein CMOS-Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung entwickelt, der mittels 3D-Siebdruck direkt in mikrofluidische Kartuschen für Point-of-Care-Geräte für eine schnelle, patientennahe Diagnostik integriert werden kann. Fluoreszenzfarbstoffe werden u.a. in der In-vitro-Diagnostik als Marker eingesetzt, da sie sich leicht von Hintergrund- und Störsignalen unterscheiden lassen. Im SensInt-Sensor kommt die zweite Generation der IMMS-Lock-In-Pixel-Technologie zum Einsatz, durch die aufwändige optische Filter eingespart werden und welche speziell für die Integration in eine mikrofluidische Kartusche entwickelt wurde. Der SensInt-Chip erreicht damit im Vergleich zur ersten Generation aus dem Projekt MEDIKIT eine circa um Faktor 10 erhöhte Sensitivität für Europium-basierte Fluorophore und somit eine breitere Anwendbarkeit. Foto: IMMS.

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



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.

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.

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

www.imms.de/sensor-ics

www.imms.de/biosensors

www.imms.de/ulp

www.imms.de/aidesigntest

www.imms.de/ivd

[Jahresbericht](#)



Im Projekt SensInt am IMMS entwickelte Module: Links: Sensorchip, der in einen mikrofluidischen Chip integriert ist, der in die Anschlussplatine gesteckt wird; Rechts: minimalistische Ausleseelektronik, optimiert für den Einsatz in Point-of-Care-Geräten. Foto: IMMS.

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

Highlights 2023 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

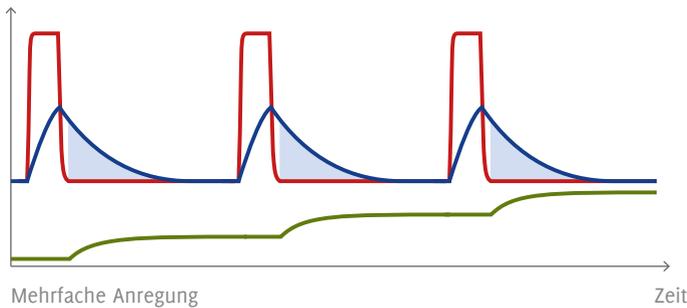
Projektabschluss SensInt*: CMOS-Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzdetektion für die direkte Integration in mikrofluidische Kartuschen mittels 3D-Siebdruck

Im Projekt SensInt wurde am IMMS ein CMOS-Bildsensor zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung entwickelt, der mittels 3D-Siebdruck direkt in mikrofluidische Kartuschen für Point-of-Care-Geräte für eine schnelle, patientennahe Diagnostik integriert werden kann. **Fluoreszenzfarbstoffe** werden u.a. in der In-vitro-Diagnostik als Marker eingesetzt, da sie sich leicht von Hintergrund- und Störsignalen unterscheiden lassen. Für viele diagnostische Fragen sind quantitative Aussagen zu Konzentrationen und Verhältnissen notwendig anstatt einfacher Ja-Nein-Aussagen, die Streifentests liefern. Gängige Kombinationen aus mobilen Reader-Systemen und Streifentests mit klassischen Farbstoffpartikeln wie Gold sind dafür nicht empfindlich genug. Neue Kombinationen mit Fluoreszenzfarbstoffen wie Europium bieten weitaus höhere Ausleseempfindlichkeiten. Ein im Vorprojekt MEDIKIT entwickelter Imager lieferte bereits die für die dortige Anwendung notwendige Empfindlichkeit zur Diagnostik von Krebs- und Herzerkrankungen. Durch das Lock-In-Prinzip des Chips können aufwändige optische Filter eingespart werden.

www.imms.de/ivd

Im SensInt-Sensor kommt die **zweite Generation** der **IMMS-Lock-In-Pixel-Technologie** zum Einsatz, welche speziell für die Integration in eine mikrofluidische Kartusche entwickelt wurde und im Vergleich zur ersten Generation aus dem Projekt MEDIKIT eine circa um Faktor 10 erhöhte Sensitivität für Europium-basierte Fluorophore und somit eine breitere Anwendbarkeit erreicht. Nicht erst durch die SARS-CoV-2-Pandemie ist die Nachfrage nach Point-of-Care-Lösungen sowie dichte Testregimes stark angewachsen. Die Mikrofluidik hat sich bereits seit Jahren als die Schlüsseltechnologie in diesem Bereich etabliert, mit der sehr genaue Ergebnisse auf molekularbiologischer

www.imms.de/trf



Anregungslicht

Emissionslicht

Ladung

integrierte Ladung

Im SensInt-Chip realisierte Lock-In-Pixel-Technologie, durch die keine optischen Filter zum Ausblenden des Anregungslichts benötigt werden: Sobald das Anregungslicht abgeklungen ist, wird das emittierte Fluoreszenzlicht gemessen, bis auch dieses abgeklungen ist. Das kann mehrfach wiederholt werden. Das Fluoreszenzemissionslicht wird Zyklus für Zyklus akkumuliert, wodurch das Ausgangssignal verstärkt wird. Grafik: IMMS.

Basis, wie z.B. per PCR, erzielt werden können. Um solche Systeme kleiner, portabler und perspektivisch preiswerter anbieten zu können, werden zunehmend Sensoren zur Detektion in solche Mikrofluidik-Kartuschen integriert.

Der Fluoreszenzfarbstoff wird bei beiden Chips durch eine Lichtquelle optisch angeregt und emittiert Photonen, die von dem Chip detektiert werden. Bei der zeit aufgelösten Fluoreszenzmessung wird diese Emission gemessen, nachdem das Anregungslicht abgeklungen ist und wird über mehrere Beleuchtungszyklen akkumuliert. Dadurch lassen sich selbst sehr schwache Fluoreszenzen quantitativ erfassen und somit höhere Empfindlichkeiten des Sensors erreichen.

Video, in dem das Lock-In-Prinzip erklärt wird, mit dem für beide Chips aufwändige optische Filter eingespart werden. Quelle: IMMS.

UV light source ...

Europium-marked analyte ...

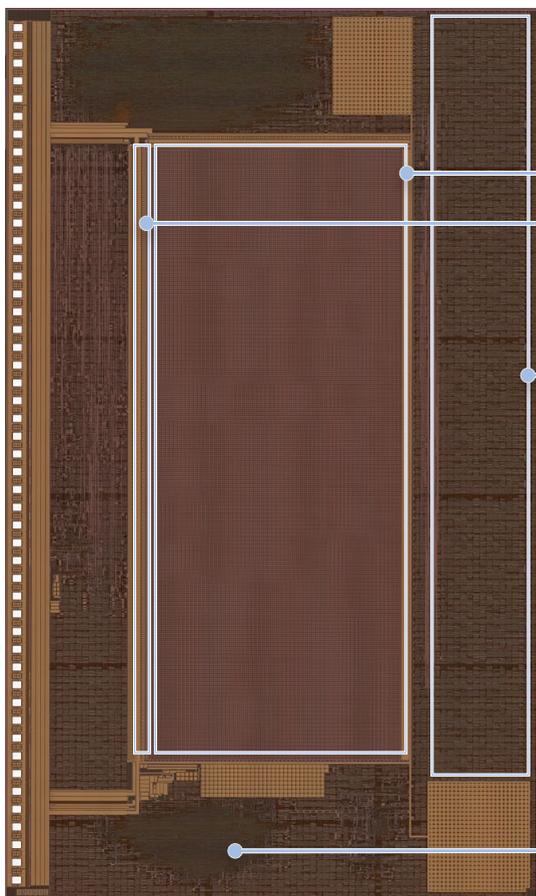
pixel

CMOS image sensor platform
for time-resolved fluorescence measurements with europium

<https://youtu.be/pEXdMNZZKPA>

Der Fokus lag bei der neuen Chip-Generation auch auf einer Steigerung des Integrationsgrads und einer Vereinfachung der notwendigen externen Hardware. So hat der Chip einen SRAM als Bildspeicher erhalten und verfügt neben einer I²C-Schnittstelle nun auch über ein QSPI-Interface.

Für die Anwendung zielte die Zusammenarbeit mit Industriepartnern darauf ab, eine nahtlose Integration des Bildsensors in die fluidische Kartusche zu ermöglichen, um so die Herstellung von Point-of-Care-Tests zu beschleunigen und kosteneffizienter zu gestalten. Das Sensorlayout ist speziell für das Aufbringen einer Silikon-Dichtung durch den 3D-Siebdruckprozess des Projektpartners Axenoll optimiert. Von dem Projektpartner Microfluidic ChipShop wurde der Sensor exemplarisch in eine mikrofluidische Kartusche integriert, die es ermöglicht, eine PCR in Echtzeit direkt über dem Bildfeld des Sensors durchführen zu können.



Eigenschaften des SensInt-Chips:

- Lock-in-Pixel mit dppd-Fotodioden
• Pixelgröße: 15 µm x 15 µm
• Bildfeldgröße:
128 Zeilen x 310 Spalten
- zeilenweiser Single-Slope-ADC:
erweiterte Funktionen zur
Verbesserung der Genauigkeit
wie Ramp-Buffer und Bias-
Sampling
- 82kB SRAM zur Pufferung
eines vollständigen Bildes
- frei konfigurierbare Bildauf-
nahme über programmier-
baren Sequenzer
- einfache Schnittstellen-
anbindung über I²C & QSPI
- zentriertes Pixelarray für
maximale fluidische
Dichtungsfläche
- XSo18-CMOS-Technologie
- Gesamtchipgröße:
6800 µm x 4075 µm

Foto: IMMS.



Georg Gläser (rechts) und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer (links), Doktorvater, wiss. Geschäftsführer des IMMS und Professor an der TU Ilmenau, nach der Disputation am 14.06.2023. Foto: IMMS.

Dissertation zu neuen Methoden für die Automatisierung beim Entwurf integrierter Schaltungen

Zuverlässige und schnellere Chip-Designs durch invasive und parametrische Simulationsmethoden

Georg Gläser, Spezialist für die Integration von KI-Methoden in die Entwurfsautomation am IMMS, hat am 14.06.2023 erfolgreich seine Dissertation “Invasive and Parametric Simulation Methods for Integrated Circuit Analysis” in Ilmenau verteidigt. Seine am IMMS entstandene Arbeit setzt am Grundproblem beim Entwurf analoger und gemischt analog-digitaler integrierter Schaltungen an: Diese Chips, die in jedem Smartphone stecken oder IoT-Anwendungen erst möglich machen, werden trotz Electronic Design Automation (EDA) in Teilen manuell entworfen und dann simuliert. Fehlerursachen werden auf der Basis von Erfahrungen gesucht und beseitigt, bevor die teure und zeitaufwändige Halbleiterfertigung startet. Ziel von Georg Gläsers Methoden ist es, diese Fehlersuche durch innovative EDA-Methoden zu unterstützen. Hauptidee seiner Arbeit ist es, automatisierte Modellverfeinerungen für die Entwicklung integrierter Schaltungen zu verwenden, um problematische Effekte einzubeziehen und zu verstehen. Das gelingt über gezielte Änderungen von Parametern und Strukturen, mit denen bisher unbekannte Informationen über eine integrierte Schaltung gefunden, zusammengeführt und zur Verbesserung des Schaltungsentwurfs genutzt werden können. Alle Methoden wurden in Chip-Entwicklungen des IMMS erprobt. Die Ergebnisse werden in verschiedenen Forschungs- und industriebetriebenen Chip-Design-Projekten verwendet und weiterverfolgt und sind die Grundlage für die am IMMS erforschte KI-basierte Entwurfs- und Testautomatisierung.

www.imms.de/eda

„Im Chip-Entwurf kommen Probleme oft erst sehr spät zum Vorschein – z.B. erst beim Layout, also dem Bauplan, der am Ende für die Fertigung entwickelt wird. Dann stellt man im Extremfall auf einmal fest, dass z.B. Leitungen zu nah beieinander liegen und durch Übersprechen die Performance beeinträchtigen oder im Zusammenspiel mit anderen Effekten einen Chip sogar zerstören können“, erklärt Georg Gläser. Um Fehlerursachen vom einzelnen Transistor, von denen Millionen in einer Schaltung enthalten sein können, bis zum komplexen Gesamtsystem Entwurfsebene für Entwurfsebene durchzuspielen, brauche es viel Zeit, da all diese Ebenen im Detail mit Modellen zu beschreiben und zu simulieren seien, so Georg Gläser weiter. „Das Hauptproblem ist aber, dass die Modelle bislang viele Effekte gar nicht zeigen können. Denn oft arbeitet man mit vereinfachten Makromodellen, die Rauschen, parasitäre Kopplungen oder ungünstige Effekte tieferliegender Entwurfsebenen in der Regel nicht abbilden.“ Hier halfen bislang oft nur Erfahrungen weiter. Vorhandene Methoden setzen meist auch auf nur einer Entwurfsebene an. Zudem werden die Systeme und somit die dafür notwendigen Simulationen immer komplexer, da immer mehr Funktionalität und somit Schaltungselemente auf möglichst immer kleinerer Chip-Fläche untergebracht werden sollen.

Methoden liefern mehr Wissen zur Schaltung und senken Entwurfskosten

Die Methoden machen es zum einen möglich, störende Effekte in die Modelle zu integrieren, um sie in komplexeren Simulationsszenarien abbilden zu können. Zum anderen liefern sie Erkenntnisse darüber, in welchen Bereichen die Modelle, Schaltungen und Systeme funktionieren und wo nicht. Darüber hinaus ist es mit den Methoden möglich, die Entwurfsunsicherheiten früh abzuschätzen und Iterationen im Entwurf und damit Kosten zu verringern. Eine Methode, die Symmetriesuche für parasitäre Elemente, lieferte z.B. für die Entwicklung eines Kontaktbildsensor-Chips am IMMS nach lediglich 6 Stunden Rechenzeit 223 mögliche Problemstellen als Ergebnis, die man sonst hätte von Hand finden müssen. Eine weitere Methode zum Aufzeigen von problematischen Kopplungen im Layout wurde schon vor Veröffentlichung der Dissertation industriell von Partnern des IMMS erfolgreich eingesetzt.

In der Dissertation werden fünf Methoden vorgestellt, die auf jeder Entwurfsebene bzw. am Übergang zur nächsten einsetzbar sind. Das ist im Vergleich zu anderen Arbeiten, die sich meist auf eine Ebene im Entwurfsprozess beschränken, ein deutlicher Vorteil. Beispielhaft werden hier einige beschrieben.

In der Arbeit lassen sich über eine invasive Analyse Systemmodelle dynamisch anpassen, um Erkenntnisse über mögliche oder vorhandene Störeinflüsse zu erhalten, wie z.B. Verkopplungen von Leitungen. Das dafür entwickelte Framework mit mehreren 10.000 Code-Zeilen ist für sehr komplexe Systeme geeignet und kann den Programmcode von Verhaltensmodellen analysieren, die Modelle entsprechend anpassen und den Simulator ansprechen. Zum Beispiel werden auf diesem Weg parasitäre Elemente eingefügt bzw. entfernt oder Prüf- und Beobachtungsmodule eingesetzt.

Parasitäre Symmetrieanalyse und Akzeptanzregionen

Viele Probleme sind oft erst im Layout sichtbar, z.B. wenn Kopplungen durch nah beieinander liegende Leitungen entstehen und somit Signalwege ermöglichen, die ungewünschte Effekte zur Folge haben. Bislang geschieht eine Fehlersuche nach dem Layout per Trial and Error mit vielen manuellen Simulationen, um zu erkennen, woher der Fehler kommt, z.T. auch mit statistischen Methoden. Eine Systematik für die Analyse von Mixed-Signal-Systemen vor dem Layout fehlte.

Ausgangspunkt des neuen Ansatzes der Symmetrieanalyse ist, dass Symmetrie ein Kernkonzept im Schaltungsentwurf selbst ist. Die Idee dahinter ist, störende Betriebsbedingungen zu finden, die symmetrisch sind, sich daher gegenseitig aufheben und somit aus der weiteren Fehlersuche eliminiert werden können, ähnlich wie bei Kopfhörern mit Active Noise Cancelling, die Störgeräusche mit genau entgegengesetzten Signalen gleicher Stärke aufheben können, damit sie nicht mehr als störend empfunden werden.

Um diese Störgrößen, die im Schaltplan nicht vorhanden sind, trotzdem mit der Methode abbilden und analysieren zu können, wird die Methode der Akzeptanzregionen genutzt. Mit ihr können Symmetrien sichtbar gemacht und als Grundlage für den Suchalgorithmus hergeleitet werden. Dahinter stecken komplexe Algorithmen, die alle möglichen Symmetriepaare mit maximalen Werten untersuchen. Die Methode klassifiziert den Parameterraum in Segmente, die zeigen, wo das System funktioniert und wo nicht. Der Vorteil der Methode ist, dass man das Layout nicht kennen muss.



Georg Gläser und Mitglieder der Prüfungskommission nach der Disputation am 14.06.2023 zu seiner Dissertation "Invasive and Parametric Simulation Methods for Integrated Circuit Analysis": v.l.n.r.: Dr.-Ing. Dirk Nuernbergk, Georg Gläser, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, Prof. Dr.-Ing. Eckhard Hennig, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hannes Töpfer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Giovanni Del Galdo; im Vordergrund der Doktorhut mit KI-basierter Audioausgabe als Ideengenerierungsassistenzsystem. Foto: IMMS.

Grundlage zur Erforschung KI-basierter Entwurfs- und Testautomatisierung am IMMS

Dass die Arbeit ein wichtiger Beitrag auf dem Weg zur weiteren Entwurfsautomatisierung von analogen und Mixed-Signal-Schaltungen ist, neue Optimierungspotenziale im Schaltungsentwurf erschließt und den Stand der Technik in der EDA maßgeblich erweitert, wurde Georg Gläser bereits bei der Verleihung des EDA Achievement Awards durch das edacentrum lange vor der Einreichung seiner Dissertation bescheinigt. Dem könne sich Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer uneingeschränkt anschließen. Der Doktorvater von Georg Gläser und wissenschaftliche Geschäftsführer des IMMS sowie Leiter des Fachgebiets Elektronische Schaltungen und Systeme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau fügt hinzu: „Georg Gläser hat mit seinen Methoden auch die Weichen für die Forschung zu KI-basierter Entwurfs- und Testautomatisierung am IMMS gestellt, die er maßgeblich prägt und für die er in den letzten Jahren systematisch ein Expertenteam aufgebaut hat, um das Thema weiter voranzutreiben.“ Auch seien unter seiner Federführung Forschungsgruppen und -projekte zum Know-how-Ausbau auf diesem Gebiet akquiriert und bearbeitet sowie auf dieser Grundlage ein Dienstleistungsangebot für die methodische Unterstützung von Industriekunden aufgebaut worden. Zudem habe er weitere Dissertationen auf dem Gebiet in seinem Team angestoßen, die sehr vielversprechend seien, so Sommer weiter. „Wir sind gespannt, was die Zukunft bringt. Georg Gläser hat einen großen Beitrag geleistet, auf den wir sehr stolz sind.“

www.imms.de/awards

www.imms.de/eda



Die Erfinder Benjamin Saft (links) und Georg Gläser (rechts), IMMS, erhielten eine Silbermedaille im Wettbewerb der Erfindermesse iENA 2023. Foto: IMMS.

iENA-Silbermedaille für Latch-basierten aktiven Ultra-Low-Power-Pull-Up-Emulator

Energieeffizienz für serielle Inter-Chip-Kommunikation mit kommerziellen drahtlosen Sensoren

Das IMMS wurde am 12.12.2023 im Wettbewerb der Erfindermesse iENA zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON – Landespatentzentrum Thüringen an der Technischen Universität Ilmenau für die Entwicklung „Schaltungsanordnung zur Bereitstellung der Ladeenergie für einen Pegelwechsel auf einem Signalbus, Verfahren zur Kalibrierung und Signalübertragungssystem“ mit einer Silbermedaille geehrt. Ende Oktober hatte das PATON stellvertretend für die Erfinder Georg Gläser und Benjamin Saft die Arbeit auf der iENA in Nürnberg in den Wettbewerb eingebracht. Mit dem Latch-basierten aktiven Ultra-Low-Power-Pull-Up-Emulator lassen sich kommerzielle Sensoren leichter für neue Anwendungen nutzen: Aktive drahtlose Sensoren, wie z.B. Zigbee-Sensoren, können länger per Batterie genutzt werden. Passive drahtlose Sensoren ohne eigene Batterieversorgung, z.B. RFID-Sensoren, können mit größerer Reichweite arbeiten. Die Schaltung ist generell für unterschiedliche Bussysteme und beliebige Signalfrequenzen geeignet. Für die am Bus angeschalteten herkömmlichen Systemkomponenten sind keine Anpassungen erforderlich. Daher lässt sich die Schaltung leicht in herkömmliche Bussysteme integrieren.

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

Herkömmliche Kommunikation für Ultra-Low-Power-Anwendungen energetisch ungünstig

Standardisierte Kommunikationsprotokolle zwischen verschiedenen Elektronikchips sind eine Grundvoraussetzung für den Aufbau moderner Elektroniksysteme. Etablier-

Jahresbericht
© IMMS 2023

te Protokolle, die von den meisten kommerziellen Chips unterstützt werden, gehen häufig mit einem relativ hohen Energiebedarf während der Kommunikation einher.

Die Signalübertragung zwischen elektronischen Systemkomponenten wird häufig über einen seriellen Signalbus abgewickelt. Dabei werden unterschiedliche Kommunikationsprotokolle eingesetzt, wie z.B. SMBus, I²C, 1-wire oder SPI. Viele dieser Protokolle benötigen Pull-Up-Widerstände, die einen definierten High-Pegel auf dem Signalbus schaffen, der zur Signalisierung auf Low-Pegel gezogen werden kann. Der dabei andauernde Stromfluss über die Pull-Up-Widerstände trägt wesentlich zum Energieverbrauch bei, wenn solche Signalbusse in Ultra-Low-Power- und batteriebetriebenen Systemen eingesetzt werden, wie z.B. in RFID-Sensor-Transpondern.

31

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

Energieeffizienz durch aktiven Pull-Up-Emulator anstelle von Widerständen

Im neuartigen Schaltungskonzept wird auf Pull-Up-Widerstände verzichtet und die Ladeenergie für einen für Signalübertragungen notwendigen Pegelwechsel durch einen aktiven Pull-Up-Emulator sehr energieeffizient bereitstellt.

„Ein permanenter Stromfluss über Pull-Up-Widerstände ist während einer Pull-Down-Phase mit unserer Lösung nicht notwendig“, erklärt Georg Gläser, Team Lead Digital IC Design and Design Methodology am IMMS. „Anstelle von Pull-Up-Widerständen verwenden wir Latches als Zustandsspeicher, Schalter und eine Logikschaltung, die diese Schalter steuert. Während des Pull-Downs durch einen Kommunikationsteilnehmer werden die Latches mit definierten kleinen Ladungsmengen versucht zurückzusetzen – und zwar periodisch statt permanent und das so lange, bis der Pull-Up erfolgreich war. Die dafür benötigte Energie ist um ein Vielfaches kleiner als bei Pull-Up-Widerständen.“ Durch das neue Schaltungskonzept kann der Energiebedarf eines aktiven oder passiven Sensorsystems aus kommerziellen Sensoren und Auswertelektronik verringert werden. Damit lässt sich die Betriebsdauer batteriebetriebener Systeme verlängern bzw. die Anwendbarkeit der Protokolle auf alternative Versorgungskonzepte wie z.B. Energy-Harvesting erweitern.

Deutsches Patent: DE 10 2016 119 927 B4, IP verfügbar, Patentanmelder/-inhaber: IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), Erfinder: Georg GLÄSER, Benjamin SAFT

www.imms.de/patent

SPAD-basierter CMOS-Zeilensensor-IC

für den Nachweis von Chemilumineszenz in mikrofluidischen Kanälen



Das Bild zeigt die anwendungsspezifische Halterung zur Ausrichtung des Mikrofluidik-Chips direkt über dem Sensor-IC. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Durch chemische Reaktionen kann Licht entstehen. Diese Chemilumineszenz oder auch Chemolumineszenz zeigt sich wenige Sekunden als Lichtblitz oder als Glühen über viele Minuten bis zu Stunden. Chemilumineszenz bringt nicht nur Glühwürmchen und Knicklichter zum Leuchten, sie ermöglicht auch in der Biochemie und der medizinischen Diagnostik beispielsweise den sicheren Nachweis von Enzymen in sehr geringen Konzentrationen bis hin zu einzelnen Molekülen. Mit sogenannten Chemilumineszenz-Immunoassays (CLIA) können kleinste Konzentrationen von Antikörpern oder Antigenen bestimmt werden, weshalb das Verfahren häufig für hochsensitive Laboranalytoren eingesetzt wird.

Um das Chemilumineszenzlicht nachzuweisen, werden hochempfindliche Lichtsensoren benötigt. Hierfür kommen typischerweise Photomultiplier Tubes (PMTs) zum Einsatz, die durch ihre sehr hohe Empfindlichkeit kleinste Lichtmengen bis hin zu einzelnen Photonen nachweisen können. PMTs haben eine sehr geringe Dunkelzählrate (DCR), d.h. sie zählen nur sehr wenige Ereignisse, die nicht durch eintreffende Photonen, sondern durch die thermische Ladungsträgergeneration ver-

ursacht werden. PMTs sind Stand der Technik für Low-Light-Sensing, insbesondere für Laboranalytoren und die Geräteinfrastruktur in Zentrallaboren. Verglichen mit integrierten CMOS-Sensoren sind sie jedoch groß und teuer. Sie lassen sich schlecht miniaturisieren und mit komplexer Elektronik oder Mikrofluidik integrieren. Aus diesem Grund sind Chemilumineszenz-basierte Point-of-Care-Tests in kostensensitiven Anwendungen eher die Ausnahme, obwohl sich mit ihnen eine hohe Sensitivität und Testgüte erreichen lässt.

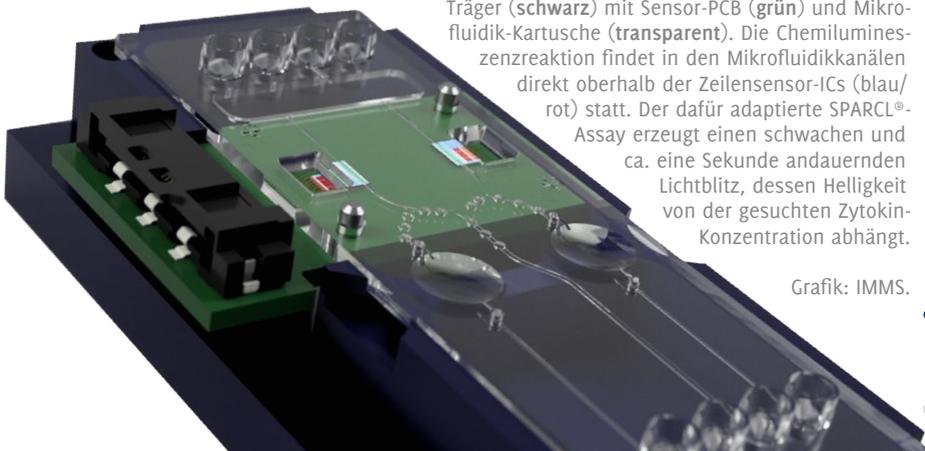
Das IMMS forscht daher an alternativen Sensorkonzepten für Low-Light-Sensing auf Basis von CMOS-SPADs. Eine Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) wird oberhalb der Durchbruchspannung betrieben und kann damit ebenfalls einzelne Photonen auflösen. Die Vorteile von CMOS-SPADs sind, dass diese sich leichter miniaturisieren und integrieren lassen, beispielweise in Form von Bildsensoren, und in Masse sehr günstig herstellbar sind. Mit PMTs sind dagegen nur Scanning-Verfahren zur räumlichen Auflösung realisierbar, was wiederum komplexe mechanische Komponenten nach sich zieht.

Im Projekt KODIAK hat das IMMS mit seinen fünf Thüringer Partnern – der X-FAB Global Services GmbH, der Lucas Instruments GmbH, dem Fraunhofer-Zentrum für Mikroelektronische und Optische Systeme für die Biomedizin (MEOS) und der Cis Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH – an einem Point-of-Care-Testsystem (siehe Abbildung 1) für die schnelle Diagnostik des Zytokin-Freisetzungssyndrom (CRS) geforscht und dafür einen SPAD-basierten CMOS-Zeilensensor-IC für den Nachweis von Chemilumineszenz in mikrofluidischen Kanälen entwickelt.

Abbildung 1:

Aufbaukonzept für das Nachweissystem: Träger (schwarz) mit Sensor-PCB (grün) und Mikrofluidik-Kartusche (transparent). Die Chemilumineszenzreaktion findet in den Mikrofluidikkanälen direkt oberhalb der Zeilensensor-ICs (blau/rot) statt. Der dafür adaptierte SPARCL[®]-Assay erzeugt einen schwachen und ca. eine Sekunde andauernden Lichtblitz, dessen Helligkeit von der gesuchten Zytokin-Konzentration abhängt.

Grafik: IMMS.



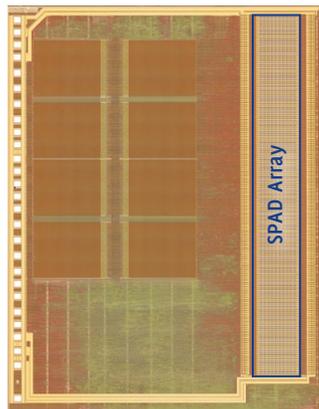
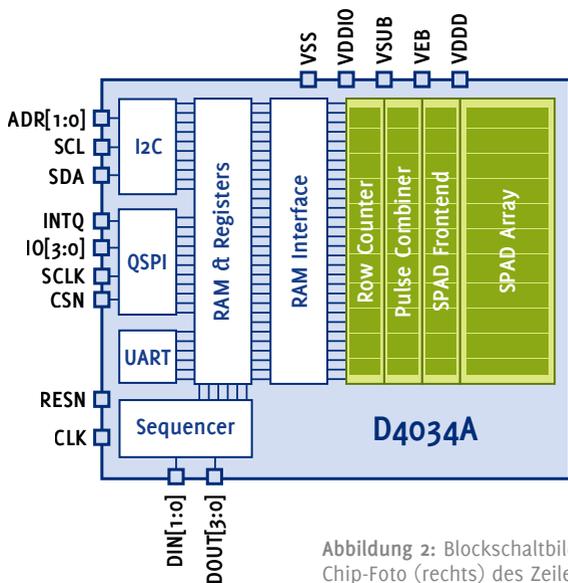


Abbildung 2: Blockschaltbild und Pin-Bezeichnungen (links) sowie Chip-Foto (rechts) des Zeilensensor-ICs. Grafik/Foto: IMMS.

Aufbau des Zeilensensor-ICs

Die Herausforderung bei der Entwicklung des Zeilensensor-ICs bestand darin, sowohl die SPADs von X-FAB als auch deren am IMMS zu entwickelnden Ausleseschaltungen sorgfältig zu entwerfen, um einen hohen Füllfaktor und eine niedrige Dunkelzählrate (DCR) zu erreichen.

Der Zeilensensor-IC besteht aus einem SPAD-Array mit einer Länge von 3,4 mm in Richtung des Kanals und einer Breite von 0,35 mm, siehe Abbildung 2. Entlang des Mikrofluidikkanals ist das Array in 192 Sensorreihen unterteilt. Jede Reihe besteht aus 20 SPADs, die maximal dicht gepackt sind und nur minimale Abstände aufweisen. Jede Reihe ist außerdem mit einzelnen Schaltern zum Aktivieren/Deaktivieren jeder einzelnen SPAD, einer gemeinsamen aktiven Quenching-Schaltung zum Löschen des Lawinendurchbruchs und Rücksetzen der SPADs mit zwei programmierbaren analogen Timern für die Lösch- und Ladezeit sowie einem After-Pulsing-Filter und einem 16-bit-Zähler ausgestattet. Weiterhin enthält jede Reihe eine Pull-up-Stromquelle, um hohe DCRs aufgrund von Leckströmen in der Quenching-Schaltung zu verhindern. Neben den SPAD-Reihen, dem Zeilenregister und Zeilenmultiplexer zu deren Auswahl enthält der Zeilensensor-IC einen programmierbaren Sequenzer zur Steuerung der Bildaufnahme (μ C Control Engine) und eine Recheneinheit (ALU), die eine speicherschonende bfloat16-Kodierung auf die erfassten Sensordaten anwen-

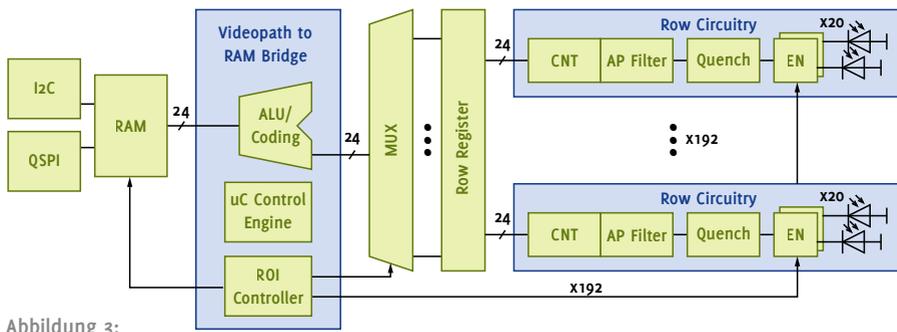


Abbildung 3:

Signalpfad des Zeilensensor-ICs mit optischen Eingängen (SPADs) auf der rechten Seite und digitalen Ausgängen (I²C und QSPI) auf der linken Seite. Grafik: IMMS.

den kann, siehe Abbildung 3. Ein 64-kB-SRAM dient zur Pufferung der Zählerwerte von vollständigen Messungen. Konfiguriert und ausgelesen wird der IC über die I²C- und QSPI-Schnittstellen.

Optimierung der Empfindlichkeit

Insgesamt wurden 12 Varianten des Zeilensensor-ICs gefertigt, die sich lediglich in den verwendeten SPADs unterscheiden. X-FAB hat dafür jeweils sechs optimierte SPAD-Layouts von zwei SPAD-Bauelementen entworfen. Die DCRs der einzelnen 3.840 SPADs jedes SPAD-Arrays unterscheiden sich aufgrund von Fertigungstoleranzen stark zueinander, weshalb einige SPADs eine geringe DCR und andere eine hohe DCR aufweisen. Die DCR-Schwankungen zwischen der besten und der schlechtesten SPAD im Array können bis zu vier Größenordnungen betragen. Da sich die 20 SPADs jeder Reihe eine Quenching-Schaltung teilen, wird die SPAD mit der höchsten DCR auch die DCR der gesamten Reihe bestimmen. Um die effektive Empfindlichkeit des Zeilensensors zu maximieren, wurden daher auch Algorithmen zur gezielten Deaktivierung von SPADs mit schlechter Leistung, sogenannte Screamer mit hoher DCR, implementiert. Diese funktionieren beispielsweise wie folgt: Zunächst wird die DCR aller SPADs im Sensorarray einzeln gemessen und ein Histogramm erstellt. Anschließend wird ein bestimmter Prozentsatz der am schlechtesten abschneidenden SPADs, die Screamer, deaktiviert. So kann beispielsweise die Deaktivierung der 20% schlechtesten SPADs den DCR-Mittelwert des Sensorarrays um mehr als die Hälfte reduzieren.

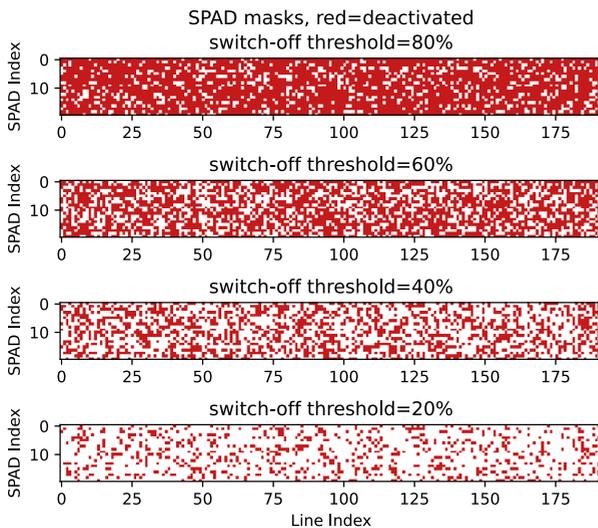


Abbildung 4:

Verteilung der abgeschalteten SPADs (Screamer) über dem SPAD-Array in Abhängigkeit von der Abschaltsschwelle. Der Line Index steht für die Reihenummer und der SPAD Index bezeichnet die SPAD innerhalb der Reihe. Je höher die Abschaltsschwelle, umso mehr SPADs werden deaktiviert. Bei einer Abschaltsschwelle von 80% sind nur noch die 20% DCR-besten SPADs aktiviert. Abgeschaltete SPADs sind in rot dargestellt.

Quelle: IMMS.

Messergebnisse

Abbildung 4 zeigt, welche SPADs innerhalb des Arrays als Screamer klassifiziert und deaktiviert wurden. Bei höheren Abschaltsschwellen (die oberen Diagramme in Abbildung 4) reduziert sich die effektive DCR weiter, siehe Abbildung 5, wobei aufgrund der homogenen Verteilung der Screamer über den Array die räumliche Auflösung des Arrays erhalten bleibt.

Durch zusätzliche Messungen mit dem Zeilensensor-IC bei Beleuchtung mit sehr schwachem Licht aus einer LED konnte gezeigt werden, dass es für die Detektion von sehr geringen Lichtleistungen vorteilhaft ist, sogar nur die 20% – 30% der SPADs mit der besten DCR zu verwenden, siehe Abbildung 5.

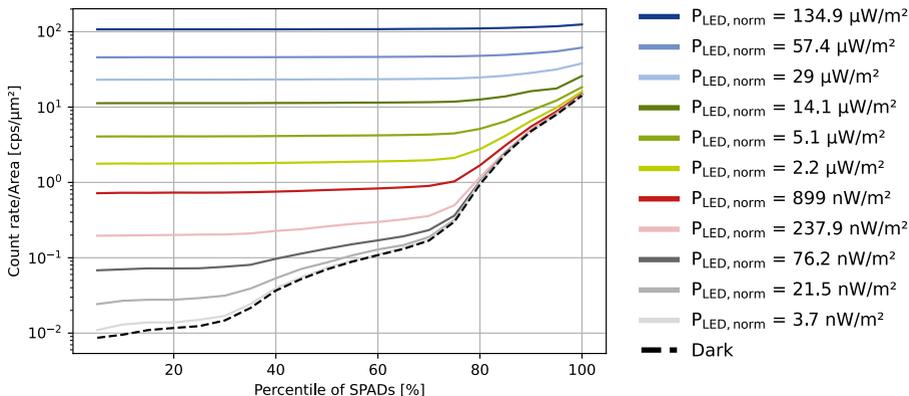


Abbildung 5: Flächennormierte Zählrate der besten Chipvariante in Abhängigkeit des Perzentils der aktivierten SPADs (Perzentil = 100% – Abschaltsschwelle) unter verschiedenen Beleuchtungsstärken. Bei hohen Perzentilen (geringer Abschaltsschwelle) wird die Zählrate von der DCR dominiert. Geringe Beleuchtungsstärken können dann noch detektiert werden, wenn nur die 20% – 30% der SPADs mit dem geringsten DCR verwendet werden. Quelle: IMMS.

Der Zeilensensor-IC erreicht im besten Fall eine DCR von ca. 0,01 Zählungen pro Sekunde pro Quadratmikrometer, was ein sehr guter Wert ist. Damit erreicht der Sensor zwar nicht die DCR von kommerziellen PMTs, die ca. zwei Größenordnungen geringer ausfällt. Er hat jedoch für viele Anwendungen eine ausreichend hohe Sensitivität und ist dabei wesentlich günstiger als PMTs.

Die Projektpartner aus KODIAK haben mit dem vorgestellten Zeilensensor-IC erste Chemilumineszenz-Messungen zum Nachweis des Zytokins Interleukin-1 β innerhalb des mikrofluidischen Kanals durchgeführt und die grundsätzliche Machbarkeit des Nachweiskonzeptes (Abbildung 1) erbracht. Derzeit laufen tiefergehende Untersuchungen zur erreichbaren Empfindlichkeit des Gesamtsystems aus Chemilumineszenz-Assay, Mikrofluidik und SPAD-basiertem Zeilensensor-ASIC.

Zum 01.08.2024 startet außerdem das Projekt „ScoreChip – Modulare Plattform zur PoC-Diagnostik am Beispiel der Sepsis-Diagnostik“, in dem das IMMS an die bisherigen Entwicklungen anknüpft und einen Chemilumineszenz-Scanner für mikrofluidische Kartuschen entwickeln wird.

Kontakt: Benjamin Saft, M.Sc., benjamin.saft@imms.de

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



Das Projekt KODIAK („Komponenten und Module für die verbesserte optische Diagnostik“) 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.

www.imms.de/

kodiak



Miniaturisierter CMOS-ISFET-Sensor für die Analytik und Diagnostik

Das IMMS hat eine Sensor-Plattform auf Basis von miniaturisierten pH-Sensoren (ISFETs) entwickelt, die im kostengünstigen, massenkompatiblen Standard-CMOS-Prozess gefertigt werden. Sie ist bei pH-Auflösung und Drift bis zu 10-fach bzw. 1.400-fach besser als vergleichbare CMOS-ISFET-Chips nach dem Stand der Technik. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Die molekulare Diagnostik zum Nachweis von Viren und Bakterien sowie spezifischen Tumorarten erfolgt heute mit sehr präzisen, aber auch sehr großen und komplexen Messsystemen¹. Dabei führt ausschließlich geschultes Personal die oft auf Fluoreszenz basierenden langwierigen Verfahren mit Systemen durch, die teure optische Komponenten wie Linsen, Spiegel und Filter benötigen. Das IMMS hat eine Sensor-Plattform auf Basis von miniaturisierten pH-Sensoren, sogenannten ionensensitiven Feldeffekttransistoren (ISFETs) entwickelt, die im kostengünstigen, massenkompatiblen Standard-CMOS-Prozess gefertigt werden.

Mit dieser nicht-optischen Detektion der pH-Wertänderung kann in Zukunft eine schnelle, präzise und kostengünstige molekulare Diagnostik mittels miniaturisierter Analysesysteme für z.B. Point-of-Care- und In-vitro-Diagnostikanwendungen ermöglicht werden. Darüber hinaus eröffnet diese Plattform viele weitere diagnostische und analytische Applikationen.

www.imms.de/

ivd

Jahresbericht

© IMMS 2023

¹ POPP, Jürgen; BAUER, Michael: *Modern techniques for pathogen detection*. John Wiley & Sons, 2015, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527687978>

Bereits Piet Bergveld arbeitete seit den 1970er Jahren daran, mit dem ISFET Ionen in elektrochemischen und biologischen Umgebungen nachzuweisen.² Aufgrund der Eigenschaft, Wasserstoffionen (H^+ -Ionen) an seiner Oberfläche reversibel binden zu können, durch seine präzise Signalwandlung vom chemischen in ein elektrisches Signal, seine robuste, miniaturisierte Bauweise, Lagerbeständigkeit und Wiederwendbarkeit galt der ISFET lange Zeit als ultimative Folgetechnologie der pH-Glaselektrode. Insbesondere die Größe und Zerbrechlichkeit sowie die wartungsintensive Lagerung von pH-Glaselektroden verlangten nach Alternativen z.B. für die Lebensmittelherstellung oder in Kathetern der Medizintechnik.

Es dauerte jedoch 40 Jahre, bis Jonathan Rothberg dem ISFET in CMOS-Technologie zum kommerziellen Erfolg verhalf und die nicht-optische DNA-Sequenzierung revolutionierte.³ Dabei wird der Effekt genutzt, dass bei der Basenpaarbildung während des Sequenzierungsprozesses H^+ -Ionen frei werden, die mit dem pH-sensitiven ISFET nachgewiesen werden können. Die hierzu verwendeten ISFET-Sensor-Arrays, die in CMOS-Technologie hergestellt werden, basieren jedoch auf komplexen kundenspezifischen Verfahren, die mit hohen Entwicklungskosten verbunden sind. Daher ist diese Technologie bisher einem kleinen Anwenderkreis vorbehalten und wird hauptsächlich in der Forschung eingesetzt. Vor allem in der Corona-Pandemie hat diese Technologie durch die Sequenzierung zahlreicher SARS-CoV-Varianten aber auch vieler anderer Viren und Bakterien ihre Bedeutung und ihr Potenzial unter Beweis gestellt.

Aufbau und Funktion des IMMS-CMOS-ISFETs

Um die miniaturisierten pH-Sensoren mehr Menschen für mehr Anwendungen zur Verfügung zu stellen, hat das IMMS eine ISFET-Plattform entwickelt und mit einem ISFET-Sensor-Array-Chip in Standard-CMOS-Technologie demonstriert. Basis dieser Plattform bildet der CMOS-ISFET, der in Abbildung 1 dargestellt ist.

Grundlegendes Bauelement ist der darunterliegende Metall-Oxid-Halbleiter-Feld-effekttransistor (MOSFET). Vereinfacht entspricht er einem regelbaren elektrischen

www.imms.de/
ivd

² BERGVELD, Piet. Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 1970, Nr. 1, S. 70-71.

³ ROTHBERG, Jonathan M., et al. An integrated semiconductor device enabling non-optical genome sequencing. *Nature*, 2011, 475. Jg., Nr. 7356, S. 348-352.

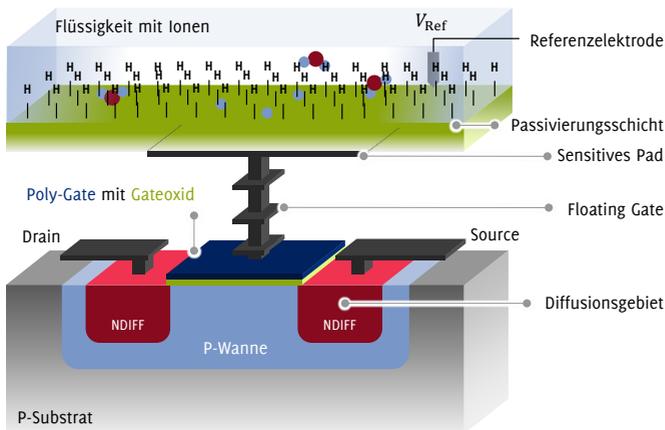


Abbildung 1:

CMOS-ISFET mit Standard-Passivierung als ionensensitive Schicht, erweiterter Gate-Elektrode für die Signalwandlung und dem darunter befindlichen MOSFET.

Grafik: IMMS.

Widerstand und besteht aus drei elektrischen Kontakten: Gate, Drain und Source. Je nach Größe des elektrischen Potentials am Gate-Anschluss fließt ein entsprechend großer Strom zwischen den Anschlüssen Drain und Source. Der ISFET in CMOS-Technologie unterscheidet sich zum ISFET in einem Spezialprozess durch das Design des Gate-Terminals. Es entspricht einer im Stapelaufbau des CMOS-Prozesses erweiterten Gate-Elektrode (Floating Gate) und ist mit der Passivierungsschicht verbunden, die für Wasserstoff-Ionen (H^+) sensitiv ist. Die Anlagerung oder das Lösen von H^+ ändert das Gate-Potential, wodurch sich der Stromfluss zwischen Source und Drain ändert. Dementsprechend kann eine zu den an der Oberfläche gebundenen H^+ -Ionen proportionale elektrische Signaländerung gemessen werden.

ISFETs in einem Standard-CMOS-Prozess können zwar preiswerter als in einem anpassbaren Spezialprozess entwickelt und hergestellt werden. Allerdings ergeben sich damit auch eine Reihe von Nachteilen: Zum einen ruft die Standard-Passivierung als ionensensitive Schicht eine verringerte Sensitivität bezüglich der maximalen Steilheit nach Nernst von 59 mV/pH bei 25 °C und eine verstärkte Signaldrift hervor. Des Weiteren treten Arbeitspunktverschiebungen der ISFETs sowie eine Schwächung bei der Wandlung des chemischen in ein elektrisches Signal aufgrund des Stapelaufbaus sowie Fertigungsablaufs des CMOS-Prozesses auf. Um dem zu begegnen, hat das IMMS ISFET-modellierungs-, -dimensionierungs- und -schaltungstechnische Lösungen gefunden, die gezielt die Standard-Prozessmodule der CMOS-Technologie der X-FAB nutzt. So können beispielsweise gefangene Ladungen am Gate-Anschluss des Transistors durch eine integrierte Tunnelprogrammierschaltung entfernt werden. Dadurch können die Arbeitspunkte der ISFETs auf die des elektronischen Basisbauelements, dem MOSFET, angeglichen und negative Referenzspannungen vermieden werden. Außerdem entscheiden u.a. designtechnische Aspekte und Größenverhält-

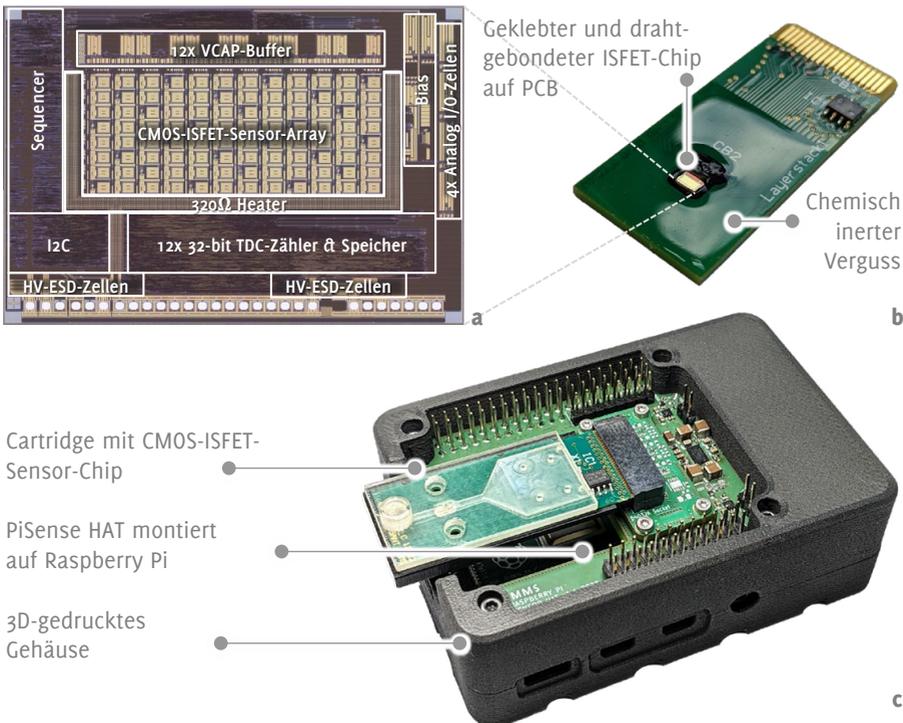
nisse zwischen Gate-Elektrode und MOSFET über die Stärke der Signalschwächung, die für eine maximal mögliche Signalkopplung und -übertragung optimiert wurden.

Aufbau von Chip, Cartridge und System

Nach der Entwicklung eines idealen ISFET-Sensordesigns in einem ersten Testchip wurde ein komplexer 3,9 mm x 3,1 mm großer Mixed-Signal-ASIC mit einem 2,6 mm x 1,2 mm großen und aus 72 ISFET-Sensoren bestehendem Array entwickelt (Abbildung 2a), gefertigt, aufgebaut und getestet. Neben der Zielstellung, möglichst sensitive CMOS-ISFETs in der Standardtechnologie zu entwickeln, implementierte das IMMS zusätzliche schaltungstechnische Lösungen, um gefangene Ladungen vom Gate des ISFETs zu entfernen und somit eine vereinfachte Arbeitspunktprogrammierung sowie eine automatisierte Sensorkalibrierung zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde eine direkte Messwertdigitalisierung mit Hilfe des integrierten pH-zu-Zeit-Konverters im Chip realisiert. Eine standardisierte digitale I²C-Schnittstelle garantiert die einfache Programmierung des ISFET-Arrays und das Auslesen der Sensorwerte. Durch den ein-

Abbildung 2 (Fotos/Grafik: IMMS):

- (a) CMOS-ISFET-Chip und funktionale Blöcke;
- (b) Geklebter und drahtgebondeter Chip mit chemisch inertem Verguss auf einem PCB;
- (c) Miniaturisiertes Messsystem auf Raspberry-Pi-Basis in 3D-gedrucktem Gehäuse.



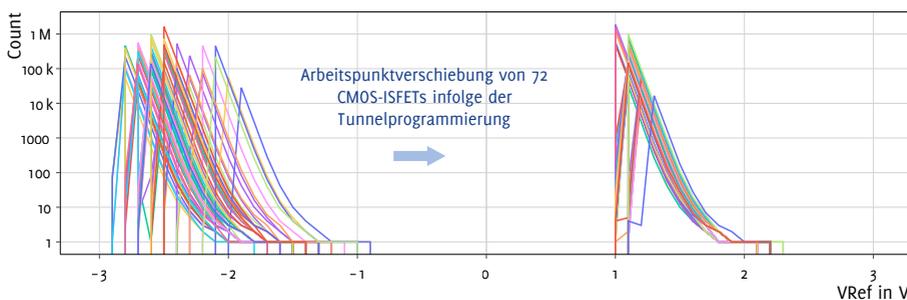
gebauten Sequenzer können einfache Messroutinen direkt auf dem Chip ausgeführt werden. Um den Umgang und die Funktionalität der ISFET-Chips auch in flüssigen Medien mit stark unterschiedlichem pH-Wert zu ermöglichen, entwickelte das IMMS ein Packaging-Konzept. Es beinhaltet insbesondere ein geeignetes Verkapselungsmaterial, um freiliegende elektrische Kontakte des Chips zu isolieren und diesen vor dem Angriff auch von starken Säuren und Basen zu schützen (Abbildung 2b).

Der Sensor-ASIC wurde vor dem Verguss auf eine 54 mm x 22 mm große Cartridge geklebt und drahtgebonded. Für eine möglichst vielseitige und variable Charakterisierung wurde die Messumgebung zunächst mit modularen, aber sehr sperrigen Messinstrumenten durchgeführt. Durch die intelligente Integration einer Vielzahl von Funktionen in den ISFET-Chip konnte die Messperipherie auf ein Minimum reduziert werden: Der kleine, preiswerte Raspberry-Pi-basierte Messaufbau (Abbildung 2c) mit PiSense HAT wird per USB-C mit Energie versorgt, beinhaltet Low-Drop-Spannungsregler (LDOs) für die analoge und digitale Versorgung des ISFET-Sensor-ASICs, Spannungsregler für die ISFET-Programmierung sowie digitale Schnittstellen wie I²C, UART und GPIOs.

Charakterisierungsergebnisse

Für die Charakterisierung der CMOS-ISFETs und zur Ermittlung der Leistungswerte wurden kommerziell erhältliche pH-Kalibrierpuffer 4, 7 und 10 und eine Silber-/Silberchlorid-Referenzelektrode verwendet. Vor der pH-Wechselmessung wurde die erfolgreiche ISFET-Programmierung bei pH4 durchgeführt, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Infolge der Programmierung rutschen die zuvor deutlich verteilten Sensorwerte (Abbildung 3, links) erstens stark zusammen und zweitens in den positiven Referenzspannungsbereich (Abbildung 3, rechts).

Abbildung 3:
Kalibrierung und Arbeitspunkteinstellung der CMOS-ISFETs mittels Tunnelprogrammierung.
Quelle: IMMS.



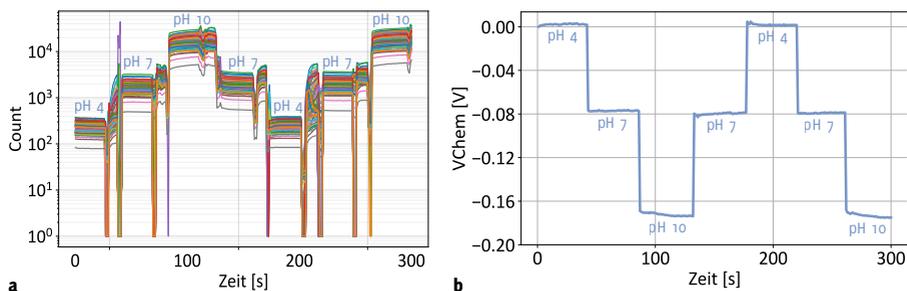


Abbildung 4:

(a) pH-Wechselmessungen mit den pH-Puffern 4, 7 und 10: Sensor-Chip-Messwerte (Count) für alle 72 CMOS-ISFETs; (b) umgerechneter und gemittelter Spannungsverlauf aller ISFETs infolge der pH-Wertänderung über der Zeit. Quelle: IMMS.

In Abbildung 4 sind pH-Wechselmessungen mit den pH-Puffern 4, 7 und 10 zu sehen. Abbildung 4a zeigt die Sensor-Chip-Messwerte (Count) für alle 72 CMOS-ISFETs. In Abbildung 4b ist der umgerechnete und gemittelte Spannungsverlauf aller ISFETs dargestellt, wobei Signalsprünge aufgrund der pH-Wechsel und Reinigungsvorgänge rausgefiltert wurden. Charakteristisch sind die Treppenstufen entsprechend der pH-Sensitivität der CMOS-ISFETs.

Außerdem wurden Drift und Rauschen des ISFET-Arrays bestimmt. Im Mittel erreicht der ISFET-Sensor-ASIC eine Sensitivität von ca. 33 mV/pH, ein pH-Auflösung von 0,01 pH und eine Drift von ca. 1,8 mV/h. Insbesondere in puncto pH-Auflösung und Drift ist das entwickelte CMOS-ISFET Sensor-Array des IMMS bis zu 10-fach bzw. 1.400-fach besser als vergleichbare CMOS-ISFET-Chips nach dem Stand der Technik.⁴

Mögliche Anwendungen und Ausblick

Eine der vielversprechendsten Anwendungen ist die Molekulardiagnostik, da die Technologie dafür prädestiniert ist, jeglichen biologischen Träger von Nukleinsäuren zu identifizieren. Viren, Bakterien und Krebszellen sind nur einige wenige Beispiele, die nachgewiesen werden könnten. Insbesondere durch große ISFETs-Arrays, die in CMOS-Technologie sehr einfach umgesetzt werden können, wären Nachweise multipler Krankheitserreger mit Erbgut, sogenannte Multiplex-Tests, realisierbar. Die Veterinärmedizin könnte davon profitieren, um infizierte Tierbestände schnell

www.imms.de/
ivd

⁴ LIU, Yan; CONSTANTINO, Timothy G.; GEORGIU, Pantelis. Ultrafast large-scale chemical sensing with CMOS ISFETs: A level-crossing time-domain approach. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2019, 13. Jg., Nr. 6, S. 1201-1213.

und kostengünstig von gesunden zu unterscheiden und voneinander zu trennen. Während epi- oder pandemischen Notlagen könnten molekulare Schnelltests mit CMOS-ISFETs die Lücke zwischen ungenauen, preiswerten Antigen-Schnelltests und langwierigen, hochpräzisen PCR-Tests schließen. Deshalb arbeitet das IMMS derzeit daran, synthetische Nukleinsäuren mit Hilfe von kommerziell erhältlichen RT-LAMP-PCR-Testkits und mit der auf dem CMOS-ISFET-Chip integrierten Heizung nachzuweisen. Zudem können bei CMOS-ISFET-Arrays Bereiche mit Schichten modifiziert werden, durch die es möglich wird, zusätzlich zu H^+ auch andere Ionen wie Na^+ , K^+ oder Ca^{2+} nachzuweisen. Das sogenannte Multi-Ionen-Imaging könnte im Umweltmonitoring, der Agrarwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und der Wasseranalytik genutzt werden. Außerdem bieten die Bereiche „Organ-on-Chip für weniger Tierversuche“ und die „Biosynthese von Nukleinsäuren, Proteinen und Zellen“ weitere Anwendungsfelder für CMOS-ISFETs. Insbesondere für die Nutzung in Bioreaktoren, wo eine Vielzahl von Messsonden z.T. einmalig genutzt und Parameter ermittelt werden müssen, arbeitet das IMMS daran, weitere Sensorarten wie Temperatursensoren und optische Sensoren für optische Dichte oder Streulichtmessung auf einem Chip zu vereinen, um damit Kosten einzusparen. In Zukunft könnten bei Bedarf mit Hilfe des Edelmetallprozesses der X-FAB weitere elektrochemische Sensormodalitäten für z.B. die Leitwert-, Flussraten-, O_2 -, RedOx-, Impedanzmessung etc. in das Portfolio der CMOS-Sensor-Arrays des IMMS aufgenommen werden.

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



Hier hat Zukunft Tradition.

Die Ergebnisse wurden in der internen Forschungsgruppe **SenpH** (Potentiometrisches Sensorsystem zur pH-Wert- bzw. Ionenkonzentrationsbestimmung) erarbeitet. SenpH wird über den Freistaat Thüringen gefördert.



Silicon Science Award

FORSCHUNGSFELD

INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME

Jakob Hampel wurde 2023 mit dem Silicon Science Award für seine Arbeit zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung ausgezeichnet.

Sie ist die Grundlage für das mit der X-FAB im Projekt QuantumHub Thüringen entwickelte SPAD-Evalkit. Dieses basiert auf dem Verfahren der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung und ermöglicht Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Pikosekunden. Damit lassen sich Quanten-basierte Anwendungen erforschen und neue Lösungen für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschließen. Foto: IMMS.



Die Arbeiten im Forschungsvorhaben Quantum Hub Thüringen wurden durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen 2021 FGI 0042 gefördert.

Freistaat
Thüringen 
Hier hat Zukunft Tradition.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

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

Für immer leistungsfähigere Sensoren bearbeiten wir folgende Forschungsfragen:

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

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

Mit unseren Lösungen adressieren wir folgende Anwendungen:

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

www.imms.de/
vernetzmessen

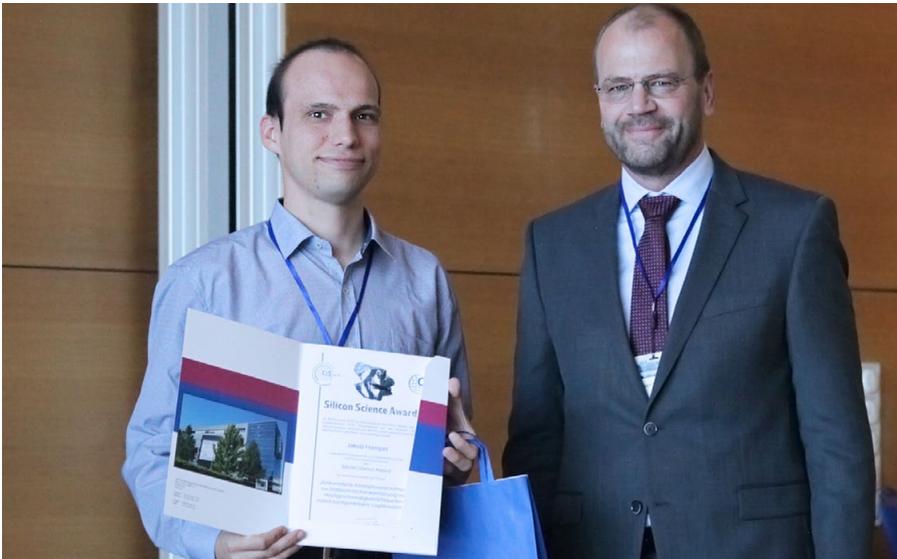
Im Bereich Echtzeit-Datenverarbeitung und -kommunikation optimieren wir eingebettete Systeme für die Signalverarbeitung und Datenübertragung in Echtzeit, damit etwa vernetzte, räumlich verteilte Edge-KI-Systeme reibungslos kommunizieren können. Darüber hinaus erarbeiten wir Konzepte und Implementierungsarchitekturen 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 2023 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

Silicon Science Award geht an Nachwuchsforscher von IMMS und TU Ilmenau:
Arbeit zu zeitkorrelierter Einzelphotonenzählung für Messungen im Pikosekundenbereich ausgezeichnet

Jakob Hampel, Ingenieurinformatiker und Forscher am IMMS, wurde am 04.09.2023 zum Ilmenauer Wissenschaftlichen Kolloquium IWK „Engineering for a Changing World“ an der Technischen Universität Ilmenau mit dem Silicon Science Award für seine von IMMS und TU Ilmenau betreute Masterarbeit „Zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung zur Zeitbereichscharakterisierung von Hochgeschwindigkeitslichtquellen mittels kon-

Jakob Hampel (IMMS) und Geert Brokmann (CiS e.V.) bei der Preisverleihung des Silicon-Science-Awards des CiS am 04.09.2023 an der TU Ilmenau. Foto: IMMS.





SPAD-Evalkit, das mit X-FAB im Projekt QuantumHub Thüringen entwickelt wurde. Es baut auf den Arbeiten von Jakob Hampel zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung auf, für die er 2023 mit dem Silicon Science Award ausgezeichnet wurde. Foto: IMMS.

figurierbarer Logikbausteine“ ausgezeichnet. Der von CiS e.V. und CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH ausgelobte Preis würdigt seine anspruchsvolle und auf sehr hohem Niveau ausgeführte Forschungsarbeit mit sehr hohem praktischen Nutzen. Die Ergebnisse fließen am IMMS bereits in Anwendungsentwicklungen für Point-of-Care-Geräte ein, die besonders empfindliche Analysen für medizinische und biochemische Untersuchungen ermöglichen werden. Zudem ist die entwickelte Hardware-Software-Auswerteeinheit zur Bestimmung von Impulsantworten schneller Lichtquellen ein wichtiger Beitrag zur Erforschung von Quantentechnologien im Projekt QuantumHub Thüringen.

Schnelle Lichtimpulse mit klassischen Verfahren nicht ausreichend charakterisierbar

„Für viele Anwendungen werden schnelle Lichtimpulse benötigt, oft bis in den Nano- oder Pikosekundenbereich. Ein Beispiel sind fluoreszenzbasierte Bioanalytik-Verfahren in der Medizintechnik“, erklärt Jakob Hampel, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS. Lichtquellen, die diese Impulse wie die für eine Fluoreszenz erzeugen, seien daher zu charakterisieren. Nur so könne die Reaktion eines optischen Systems zuverlässig bewertet werden. Klassischerweise ließen sich für so etwas schnelle Photodioden nutzen und deren Signale mit einem Oszilloskop bis in den Nanosekundenbereich bewerten, umreißt Hampel weiter. „Allerdings besitzt jedes Oszilloskop ein Grundrauschen, welches die Ergebnisse verzerrt.“ Viel genauer ginge

eine Bewertung dagegen mit einem anderen Verfahren, der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung: „Stark vereinfacht gesagt, wird die Lichtquelle angeregt, um dann die einzelnen Photonen und die zeitlichen Verzögerungen der Impulsantworten zu betrachten. Diese werden durch wiederholte Anregung und statistische Bewertung der Ergebnisse hunderttausend- bis millionenfacher Messungen zu einem Histogramm angehäuft. Dieses beschreibt dann das Verhalten der Lichtquelle über die Zeit.“ Die Idee dieses Verfahrens ist nicht neu, war aber lange nur mit relativ sperriger Hardware mit großem Leistungsbedarf möglich. Genau das wollte Hampel ändern.

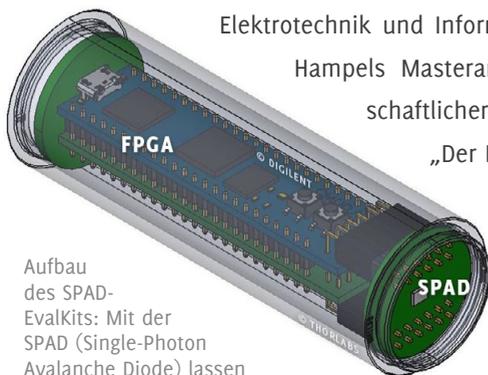
Forschungsergebnis ist ein handflächengroßes USB-Gerät, das neue Anwendungen erschließt

In seiner Masterarbeit hat Jakob Hampel die Hardwarebeschreibung sowie die Auslesesoftware zur Umsetzung der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung durch einen konfigurierbaren Logikbaustein entwickelt. Zusammen mit einer Single-Photon Avalanche Diode (SPAD) als Lichtsensor und weiteren am IMMS realisierten analogen Komponenten hat er damit ein kostengünstiges System aufgebaut, das Lichtimpulse mit einer Auflösung von 20 Pikosekunden genau messen kann und in ein nur 100 mm x 25 mm kleines Rohr passt.

„Jakob Hampel hat das Aufkommen kommerziell erhältlicher halbleiterbasierter Einzelphotonendetektoren in den letzten Jahren sowie die immer leistungsfähigeren konfigurierbaren Logikbausteine gezielt dafür genutzt, um in seiner Arbeit aktuelle Forschungsfragen an immer empfindlicheren Sensorsystemen in vorbildlicher Weise zu adressieren,“ sagt Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil Hannes Töpfer, Dekan der Fakultät

Elektrotechnik und Informationstechnik und Betreuer von Jakob Hampels Masterarbeit. Diese sei nicht nur aus wissenschaftlicher Sicht hervorzuheben, so Töpfer weiter:

„Der Beitrag ist ein weiterer Beleg dafür, dass wir an der TU Ilmenau mit unserer Forschung ganz nah an den praxisrelevanten Themen dran sind. Mit dieser Lösung wurde ein wichtiger Schritt für ein altbekanntes Verfahren gemacht, das jetzt miniaturisiert nutzbar ist und so viele neue Anwendungen erschließen kann.“



Aufbau des SPAD-EvalKits: Mit der SPAD (Single-Photon Avalanche Diode) lassen sich einzelne Photonen detektieren. Deren Signale werden in vielen Durchläufen gemessen und vom freiprogrammierbaren Logikbaustein (FPGA) als Impulsantwort der Lichtquelle ausgewertet. Grafik: IMMS/Digilent/Thorlabs.

Die Relevanz der Arbeit zeige sich auch darin, dass sie bereits in Weiterentwicklungen wie die zur Erforschung von Quantentechnologien im Projekt **Quantum-Hub** Thüringen gemündet ist. Dort geht es am IMMS u.a. darum, halbleiterbasierte Einzelphotonendetektoren für den Einsatz in Quantenkommunikationssystemen zu charakterisieren.

„Ich bin sehr stolz auf den Preis. Besonders freue ich mich, dass damit ein Thema ausgezeichnet wurde, für das Forschung und Industrie gleichermaßen Interesse zeigen“, sagt Jakob Hampel. Er habe sich gleich in eine auf seiner Masterarbeit aufbauende Produktentwicklung mit der X-FAB in Form des SPAD-EvalKits einbringen können, mit dem sich SPAD-Chips charakterisieren lassen. Zudem habe er im Projekt **FluoResYst** mit einem weiteren, prinzipiell ähnlich funktionierenden Messsystem schnelle Laserlichtquellen charakterisiert. Dadurch habe sich die Machbarkeit zur Entwicklung eines SPAD-basierten anwendungsspezifischen Mikroelektronik-Chips erfolgreich bewerten lassen, der zusammen mit mikrofluidischen Systemen der Partner in ein Point-of-Care-Gerät zur Diagnose von Tuberkulose einfließen werde.

Mix aus Theorie und Praxis als Sprungbrett für Nachwuchskräfte in der Forschung und Entwicklung

„Durch die Betreuung am IMMS und die Möglichkeiten, immer Neues und nah an Anwendungen zu lernen, konnte ich mich vom Anfängerlevel zu einem Kenntnisstand entwickeln, auf welchem erfolgreich ein praxisnahes Forschungsthema in einer Masterarbeit bearbeitet werden kann und mit dem ich am IMMS nahtlos weiterarbeiten konnte“, bedankt sich Hampel für seine gute Betreuung. Dank der Nähe zur TU Ilmenau sowie anderen Instituten werde man immer wieder mit neuen, spannenden Aufgaben konfrontiert und könne sich stets weiterentwickeln, führt Hampel weiter aus. Töpfer zieht als sein Betreuer folgendes Fazit: „Die Arbeit von Herrn Hampel ist nicht nur auf fachlicher Ebene hervorzuheben. Sie illustriert auch eindrucksvoll, wie der theoretisch fundierten Ausbildung an der TU Ilmenau mit praxisorientierten Betreuungsangeboten wie denen am IMMS eine beachtliche Schlagkraft verliehen wird. Mit dieser lassen sich nicht nur Forschungsergebnisse in die Praxis transferieren, sondern auch der Nachwuchs hervorragend mit all dem notwendigen Rüstzeug für die Innovationen von morgen fördern.“



Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutzaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF

Industrielle
Gemeinschaftsforschung

Voruntersuchungen zur Entwicklung einer Messumgebung an einem Sensorchip mit 15 Graphen-Feldeffekttransistoren. Foto: IMMS.

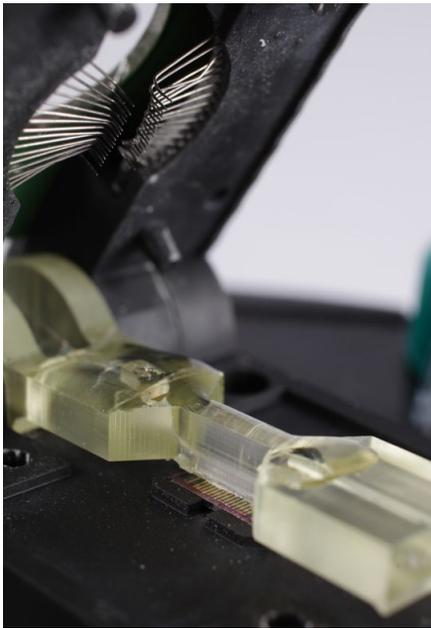
Projektabschluss ViroGraph*: Multiplex-Detektionssystem zum Nachweis von Viren auf Basis von Graphen-Feldeffekttransistoren

Im Projekt ViroGraph sind Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines mobilen mehrkanaligen hochsensitiven und hochselektiven Sensorsystems durchgeführt worden. Es wurde gezeigt, dass ein speziell optimierter graphenbasierter Sensor durch spezielle Fängermoleküle so modifiziert werden kann, dass spezifische Analyt-Konzentrationen im femtomolaren Bereich detektiert werden können. Das wird durch verschiedene entwickelte Assays zur spezifischen Bindung von Antigenen, RNA und Antikörpern des SARS-CoV-2-Virus in Kombination mit einer mehrkanaligen Elektronik zur parallelen zeitdiskreten Erfassung der Sensorparameter erreicht. Abschließend fließen die erzielten Forschungsergebnisse in die Entwicklung eines Demonstrationsaufbaus ein.

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

Das IMMS hat eine Umgebung zur messtechnischen Untersuchung der entstandenen Graphen-Feldeffekttransistoren (GFET) entwickelt und einen portablen Aufbau zur Demonstration der Funktionalität des erforschten Sensorsystems realisiert. Dabei wurden zwei Herausforderungen bei der Entwicklung einer geeigneten Messumgebung gelöst: Zum einen müssen alle GFET eines Chips reversibel elektrisch kontak-

Jahresbericht
© IMMS 2023



Klappfassung zur Untersuchung des GFET-Sensorchips mit Sondennadeln zur elektrischen Kontaktierung und Flusszelle zur Medienzuführung. Foto: IMMS.

tiert und mit Probenflüssigkeit versorgt werden. Zum anderen sollen sich alle 15 GFET gleichzeitig stimulieren und messen lassen, aber auch Einzelmessungen pro GFET möglich und das System flexibel erweiterbar sein.

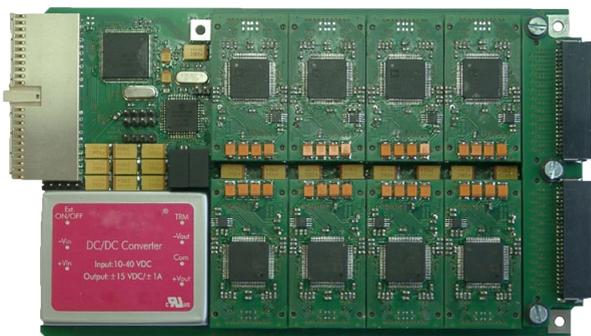
Elektrische Kontaktierung und Adaption einer Flusszelle

Die bereitgestellten Sensorchips enthielten jeweils 15 GFET, die es gleichzeitig zu messen und damit anzutasten gilt. Für deren reversible elektrische Kontaktierung wurden, angelehnt an klassische Cantilever-Probecards aus dem Halbleitertest, Sondennadeln eingesetzt. Sie bieten den Vorteil einer sicheren

elektrischen Verbindung, die jedoch einflussarm wieder gelöst werden kann, um den Sensorchip weiter zu bearbeiten oder einen weiteren Chip in derselben Messumgebung zu untersuchen. Gleichzeitig musste das flüssige Probenmedium an die Oberfläche der GFET geleitet werden, um hier den sensorischen Nachweis zu ermöglichen. Entscheidend dabei war das Design einer Reaktionskammer, die über Ein- und Auslässe für den Medienstrom verfügt und keinen seitlichen Medienaustritt in Richtung der elektrischen Kontakte erlaubt. Auch diese Komponente sollte eine reversible Verbindung mit dem Sensorchip herstellen, was mithilfe einer flexiblen Dichtlippe gelang. Am Ende des Entwicklungsprozesses stand eine Klappfassung mit Sondennadeln und Flusszelle aus 3D-Druck-Komponenten. Sie ermöglicht das Einsetzen, Ausrichten und Kontaktieren der Sensorchips.

Messelektronik

Den zweiten Bestandteil der Messumgebung bildet die **Elektronik**, mit der die elektrischen Kennwerte der GFET aufgenommen werden. Sie ermöglicht die gleichzeitige Stimulation und Messung von mindestens 15 GFET. Um eine flexibel erweiterbare Lösung zu erhalten, wurde die Entwicklung auf Basis eines Grundmoduls mit vier

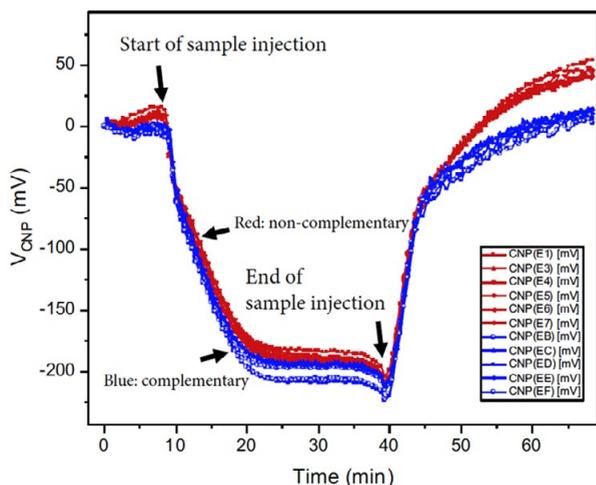


32-kanalige Mess-
elektronik zur zeitauf-
gelösten Erfassung der
CNP-Spannung der GFET.

Foto: IMMS.

Messkanälen gestartet, die jeweils als Vier-Quadranten-Quelle ausgelegt sind. Hierdurch wurden Strommessungen mit einer Genauigkeit von 1 nA ermöglicht. Für die angestrebte Messelektronik im Projekt ViroGraph werden insgesamt acht dieser Module eingesetzt. Damit steht ein 32-kanaliges System zur Verfügung, das eine potenzialunabhängige Messung jedes einzelnen GFET erlaubt.

Ergänzend zur Hardware wurde eine **Software** entwickelt, die einen automatisierten Messablauf sicherstellt. Dabei besteht das Ziel, den Charge-Neutrality-Point (CNP) jedes GFET über der Zeit zu monitorieren. Die Variation dieses Kennwerts steht in Korrelation mit der Konzentration des Analyten innerhalb des Probenmediums. Durch die Nutzung der entwickelten Messumgebung in Kombination mit den Forschungsarbeiten der Partner FSU Jena, IPHT und fzmb konnten Untersuchungen zur Empfindlichkeit des Sensorsystems auf SARS-CoV-2-Viren in idealen Medien durchgeführt werden. Im Ergebnis zeigte sich eine sehr hohe Sensitivität im einstelligen femtomolaren Bereich.



Die FSU Jena hat mit der Messumgebung Proben in Echtzeit überwacht. Dargestellt ist im Beispiel der zeitliche Verlauf der CNP (Charge Neutrality Points, d.h. Spannungen bei minimalem Strom) für 11 Transistoren auf einem GFET-Array während der Injektion einer Zielprobe. 5 GFET sind mit einem komplementären Fänger-molekül (blau) und 6 GFET mit einem nicht-komplementären Referenzmolekül (rot) versehen. Anhand der unterschiedlichen Verläufe lässt sich die Konzentration des Stoffes in der Probe ableiten.

Grafik: FSU Jena/AG Turchanin.

Demonstratoraufbau zur Bestimmung der SARS-CoV2-Viren-Konzentration mit Hilfe von GFET-Sensorchips.

Foto: IMMS.

Demonstratoraufbau

Um die Anwendbarkeit der erforschten Ergebnisse darzustellen, wurde ein Demonstrator entwickelt, der alle Einzelkomponenten und

-prozesse vereint. In das kleine Tischgerät sind neben Reservoiren für Reagenzien und Probe auch die Bestandteile der Messumgebung integriert.

Zusätzlich wurden fluidische Bauteile wie Ventile und Mikropumpen ergänzt und in die Steuerung einbezogen. Durch 3D-gedruckte mechanische Teile entstand ein kompakter portabler Aufbau, der durch ein speziell entwickeltes Programm die Durchführung anpassbarer Analyseprotokolle erlaubt.





Am IMMS entwickelter Sensor zur Messung des Fruchtwachstums zur Optimierung von Bewässerungsmaßnahmen. Solche und weitere Sensoren werden Teil des digitalen Zwilling, den das IMMS im Projekt MIRO erarbeiten wird. Foto: IMMS.

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

55

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

MIRO*-Projektstart: Zukunftssicherer regionaler Obstbau durch systematische Datenerhebung (Digitaler Zwilling) und Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette

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

Ein sich rasch wandelndes Klima, eine herausfordernde Fachkräfte- und Wettbewerbssituation sind zentrale Zielkonflikte in der Landwirtschaft, v.a. im Obstbau. Das Ziel des Projekts MIRO ist, die Zukunftssicherheit der gesamten Wertschöpfungskette Obst von Anbau, Weiterverarbeitung bis Vermarktung in der Region Mitteldeutschland zu stärken und Gestaltungsoptionen für bekannte Herausforderungen zu erarbeiten.

Hierfür werden sieben Anwendungsfälle von unterschiedlichen Partnern im Detail beleuchtet. Dabei werden Vorarbeiten aus den beiden mitteldeutschen Experimentierfeldern EXPRESS und LANDNETZ aufgegriffen und auf regionaler Ebene mit weiteren Akteuren der Wertschöpfungskette verknüpft.

Das IMMS bearbeitet in MIRO zwei Anwendungsfälle. Der erste zielt auf den Datenaustausch zwischen den Akteuren in der Region und der zweite auf den gezielten Einsatz von Digitalisierung, um Feedback zu Sorteneigenschaften an unterschiedlichen Standorten entlang der Wertschöpfungskette zu analysieren.

Anwendungsfall Datenaustausch

Zentral für die Digitalisierung ist der Austausch bzw. das Zusammenführen von Daten aus unterschiedlichen Systemen bzw. von unterschiedlichen Akteuren. So ist es z.B. wünschenswert, wenn Daten zu Problemen bei der Verarbeitung, die sich

Jahresbericht
© IMMS 2023

durch angepasste Anbaumethoden vermeiden lassen, weitergegeben werden können. Ein solch übergreifender Datenaustausch auf regionaler Ebene funktioniert im Moment aber nur eingeschränkt, da es viele Einzellösungen gibt, deren Daten nicht automatisiert für andere Systeme bereitgestellt werden können.

Das IMMS wird untersuchen, welche Plattformen sich grundsätzlich für den Obstbau eignen und welche Schnittstellen dafür zu schaffen sind. Außerdem möchten wir im Konsortium betrachten, wie ein Gegenwert für eine Datenbereitstellung aussehen kann. Die entstandenen Konzepte werden in einen Leitfaden für Akteure einfließen und exemplarisch umgesetzt, um das Potenzial aufzuzeigen.

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

Anwendungsfall Digitaler Zwilling

Hier arbeitet das IMMS an einer digitalen Repräsentation von Obstsorten auf einem Standort, da diese Kombination den Ertrag und die Qualität der Früchte wesentlich beeinflusst, aufgrund der Lebensdauer der Bäume aber nur langfristig angepasst werden kann. Um eine zukunftssichere Planung vornehmen zu können, sind also Informationen über die Früchte, das Klima usw. wichtig. Eine solche Plattform existiert bisher nicht.

Wir werden dafür einige ausgewählte Obstsorten, wie z.B. bestimmte Apfel- oder Kirscharten, systematisch betrachten. Wir werden Standortbedingungen automatisiert sensorisch sowie Boniturdaten erfassen und hierfür eine App entwickeln. Darüber hinaus werden auch Eigenschaften der Sorte aus der Züchtung und dem Versuchswesen sowie Eigenschaften der Früchte und daraus produzierter Produkte erfasst. Somit entsteht eine umfassende Wissensbasis zu einer Sorte über verschiedene Standorte hinweg. Das ermöglicht die Analyse zukünftiger Szenarien und somit Reaktionen auf veränderte Klimabedingungen durch angepasste Sortenwahl und -züchtung, die zusammen mit den Akteuren erfolgen sollen.

www.imms.de/
monitoring



Voruntersuchungen für die Entwicklung adaptiver energieautarker Sensorsysteme für das Monitoring von Standortfaktoren im forstlichen Umfeld im Projekt Waldmonitor. Foto: IMMS.

Projekt Waldmonitor* gestartet: robuste Kommunikationslösungen und energieautarke Sensoren zur Überwachung abiotischer Faktoren im Waldumbau

www.imms.de/wald

Klimawandel erfordert smartes Frühwarnsystem für junge Bäume

Steigende Jahresmitteltemperaturen und veränderte Niederschlagsmuster machen einen nachhaltigen Waldumbau notwendig, das heißt andere Baumarten zu pflanzen und für die spätere Nutzung zu testen. Dazu kommt, dass große Freiflächen schnell aufgeforstet werden müssen und größere Jungbäume in Alleen dabei zeitnah als Windschutz fungieren. Diese Jungpflanzen sind sehr empfindlich gegenüber Stressfaktoren. Das Projekt Waldmonitor hat sich zum Ziel gesetzt, ein Sensorsystem als Frühwarnsystem für Stressindikatoren zu entwickeln. Es soll Vitalparameter und Wachstumszustand sowie biotische und abiotische Einflussfaktoren bestimmen.

Ansatz: Remote-Monitoring von Jungbäumen

Im Projekt Waldmonitor wird ein Sensorsystem entwickelt, das kontinuierlich Informationen zu Jungbäumen sammelt, ohne dass der Förster vor Ort sein muss. Ein stationäres Gesamtsystem als Pilotinstallation evaluiert dazu verschiedene optische und klassische Sensorprinzipien. Die Ergebnisse werden in einen Vorschlag für die optimale Auswahl von Sensorsystemen für ein angepasstes Monitoringsystem fließen, welches gleichzeitig das Potenzial bietet, später auch auf mobilen Plattformen eingesetzt zu werden.

www.imms.de/monitoring

Ziel des Teilvorhabens WaldSensCom des IMMS ist es, adaptive energieautarke Sensorsysteme für das Monitoring von Standortfaktoren im forstlichen Umfeld zu erschließen und einen stetigen Datenstrom von den Untersuchungsflächen im Wald zu einer zentralen Auswertung sicherzustellen.

Die Herausforderung ist dabei, dass eine flächendeckende Mobilfunkabdeckung im Wald nicht gegeben ist. Um trotzdem einen stetige Übertragung sicherzustellen werden Konzepte zur Unterbrechungstoleranz sowie der Einsatz von Multi-Hop-LoRa-Kommunikation zur Überbrückung von Lücken geprüft. Um die erforderliche Datenmenge effizient zu übertragen, werden zudem Konzepte zur Datenreduktion und lokalen Auswertung der erfassten abiotischen Standortparameter hinsichtlich forstlicher Gesichtspunkte untersucht. Ziel ist es dabei, einen Transport aller relevanten Daten sicherzustellen, auch wenn die Verbindung von den Versuchsflächen zum Server aufgrund von z.B. nicht verfügbarer Energie oder fehlender Kommunikationsinfrastruktur nicht dauerhaft aufgebaut bleiben kann.

Außerdem werden zusammen mit dem Projektpartner Orbit drahtlose Sensornetze konzipiert und umgesetzt. Das IMMS unterstützt hierbei mit der energieautarken und größenoptimierten Realisierung von Sensorknoten für abiotische Parameter und kümmert sich um die Auswertung der erfassten Daten.

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

www.imms.de/monitoring

Veranstaltungen und Infoangebote für KMU

Im Jahr 2023 wurden durch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IMMS im Rahmen der „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ insgesamt 11 Vorträge, 28 Online-Seminare, 12 Stammtische und 7 Fachworkshops sowie 56 Informations- und Werkstattgespräche zur Digitalisierung angeboten. Diese **Veranstaltungen** hatten zum Ziel, kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von Digitalisierungs- und KI-Lösungen zu unterstützen.

Zusätzlich nahmen die Mitarbeitenden der Modellfabrik an 31 regionalen Veranstaltungen von Branchennetzwerken und regionalen Messen teil. Zudem wurden mit dem bundesweiten Netzwerk „Mittelstand-Digital“ weitere 29 Aktivitäten durchgeführt. Die Angebote werden in enger Zusammenarbeit mit den Partnern TU Ilmenau, an der die Geschäftsstelle und die „Modellfabrik Vernetzung“ angesiedelt sind, der Ernst-Abbe-Hochschule Jena als „Modellfabrik Virtualisierung“ und der Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V. in Schmalkalden als „Modellfabrik Prozessdaten“, entwickelt und umgesetzt.

Das „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ setzt neben den aus den Modellfabriknamen ersichtlichen fachlichen Schwerpunkten auf Nachhaltigkeit, Plattformökonomie und KI. Das IMMS widmet sich darin als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ vor allem den Themen Retrofit, vorausschauende Wartung, smarte Sensorsysteme, Diagnoselösungen und KI-basierte Sensordatenauswertung. So können z.B. für Maschinen Nachrüstlösungen bereitgestellt werden, mit denen der Maschinenzustand automatisch erfasst und visualisiert wird. Eine weitere Kernkompetenz liegt in der praktischen Umsetzung von smarten Sensorsystemen, mit denen z.B. Werkzeugmaschinen mittels künstlicher Intelligenz überwacht werden. Außerdem zeigen Demonstratoren digitale Diagnoselösungen, die beispielsweise mit mobilen Messgeräten kostenintensive Leckagen in Druckluftsystemen finden. Fragestellungen der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) rund um den Einsatz von KI werden durch die KI-Trainer bei allen Partnern des Zentrums behandelt.

Parallel zu den Veranstaltungen entstanden verschiedene **News-Beiträge** und andere **Veröffentlichungen**, z.B. über die Zusammenarbeit mit Unternehmen in Projekten oder zu Demonstratoren, die auf den Webseiten des Zentrums, über Newsletter und über die Sozialen Medien an Interessenten verteilt werden.

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

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

[www.imms.de/
i40](http://www.imms.de/i40)

Klimamonitoring in Transportbehältnissen: Digitalisierungslösung, entwickelt vom „Mittelstand-Digital Zentrum Smarte Kreisläufe“, SGT GmbH, DUX Lederwaren, dem Sächsischen Textilforschungsinstitut in Chemnitz und dem IMMS im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“.

Foto: Dirk Zschenderlein, STFI.



60

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

Neue Demonstratoren und Digitalisierungsprojekte

Neben den verschiedenen Veranstaltungen wird in der „Modellfabrik Smarte Sensoren“ am IMMS auch an Demonstrations- und Umsetzungsprojekten gearbeitet.

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

Klimamonitoring in Transportbehältnissen

Besonders sensible Güter benötigen spezielle klimatische Bedingungen bei Lagerung und Transport, wie zum Beispiel eine bestimmte Luftfeuchtigkeit oder Temperatur. Das betrifft insbesondere den Transport im Frachtraum von Flugzeugen oder auf Containerschiffen. Schäden an der Ware können sowohl finanzielle als auch ökologische Konsequenzen haben, die vermieden werden sollten. Das „Mittelstand-Digital Zentrum Smarte Kreisläufe“ hat mit den zwei Unternehmen SGT GmbH und DUX Lederwaren sowie mit seinem Partner, dem Sächsischen Textilforschungsinstitut in Chemnitz, und dem „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ ein passendes Lösungskonzept erarbeitet. Sensorik in den Transportbehältnissen misst Temperatur, Feuchtigkeit, relative Luftfeuchte und Bewegung. Eine drahtlose Schnittstelle überträgt die Messwerte dann an eine App auf dem Smartphone, die es dem Anwender ermöglicht, darauf zu reagieren. Während des gesamten Transports werden die klimatischen Umgebungsbedingungen somit digital überwacht, ohne direkten Zugang zur Ware haben zu müssen.

[www.imms.de/
i40](http://www.imms.de/i40)



Bei der eitech GmbH installierter Sensorvorhang und Mini-PC als Datensammler zur kontinuierlichen Erfassung von Umweltbedingungen in der Fertigung. Foto: eitech GmbH.

In einer Werkhalle des Unternehmens wurden Klimasensoren, Tür- und Fensterkontakte sowie ein Sensorvorhang installiert, um Daten zu erfassen und drahtlos zu übertragen. Ein Mini-PC fungiert als Datensammler, während die Datenaufzeichnung und Auswertung auf einem entfernten Serversystem erfolgt. Die Daten werden in einer Zeitreihendatenbank gespeichert, was nachträgliche Auswertungen ermöglicht. Ein Dashboard mit der Software Grafana visualisiert die aufgezeichneten Daten zu Kontroll- und Demonstrationszwecken.

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. Themen waren Bedarfe der Unternehmen, der Ausbau und die zielgruppengerechte Ausgestaltung der Unterstützungsangebote. Das IMMS hat sich darüber hinaus auch regelmäßig mit Thüringer Netzwerken und Initiativen

Sensorik zur automatisierten Optimierung der Produktivität und Qualität im Spritzgießverfahren

Zusammen mit der eitech GmbH wurde das Mikroklima im unmittelbaren Maschinenumfeld in Werkhallen erfasst und überwacht. Zur automatisierten Optimierung der Produktivität und Qualität im Spritzgießverfahren werden Umweltbedingungen wie Lufttemperatur und Zustände von Fenstern und Türen überwacht. Sensoren an der Spritzgießmaschine liefern zusätzliche Messwerte. Langfristiges Ziel ist die Anpassung der Maschinenparameter an veränderte Umgebungsbedingungen. In einer Werk-

ausgetauscht, 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) und dem Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR).

Darüber hinaus bildet das Ilmenauer Zentrum gemeinsam mit dem in Chemnitz, dem ScaDS.AI (Center for Scalable Data Analytics and Artificial Intelligence) Dresden/Leipzig und weiteren Partnern den KI-Hub Sachsen-Thüringen.

Der KI-Hub widmet sich dem Transfer von Ergebnissen der KI-Grundlagenforschung aus dem ScaDS.AI und den Partnern über die Mittelstand-Digital-Zentren in die Unternehmen. Zugleich bündeln die Mittelstand-Digital-Zentren die Anforderungen der KMU, damit diese in der Grundlagen- und angewandten Forschung Berücksichtigung finden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mittelstand-
Digital

Mittelstand-Digital
**Zentrum
Ilmenau**



*ki-hub-sachsen-
thueringen.de*

*www.imms.de/
md*

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

*digitalzentrum-
chemnitz.de*

scads.ai

Nachrüstbares Monitoring von Straßenlampen —

smarte und kostengünstige Defekterkennung

Prototypischer Sensorknoten, der im Ilmenauer Stadtgebiet zur testweisen automatischen und funkbasierten Lampenüberwachung als erster Smart-City-Testaufbau des IMMS im Projekt thurAI installiert wurde. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Die Instandhaltung flächendeckender Straßenbeleuchtung ist für Kommunen mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Ein oft noch ungelöstes Problem ist die zeitnahe und automatische Erfassung defekter Straßenlampen im gesamten Verantwortungsbereich einschließlich umliegender Gemeinden. Defekte oder flackernde Lampen werden über nächtliche Kontrollen durch kommunales Personal festgestellt oder meist spät über die Bürgerschaft gemeldet.

Mit einem automatischen Monitoring lassen sich nicht nur Defekte schneller erkennen, sondern auch Tourenplanungen für Wartungsfälle optimieren. Am Markt verfügbare LED-basierte smarte Lampen überwachen und melden zwar ihren Status selbst und beinhalten oft auch weitere Funktionalitäten, wie z.B. WLAN-Hotspots oder Elektroladesäulen. Doch vielen Gemeinden ist es finanziell unmöglich, großflächig oder gar vollständig darauf umzustellen; dies geschieht bestenfalls allmählich. Gleichzeitig wollen in einer zunehmend vernetzten Welt auch Kommunen verstärkt auf das Internet der Dinge (IoT) setzen, um Daten zu sammeln und effektive Analysen durchzuführen.

Am IMMS wurde daher im Forschungsprojekt thurAI eine Lösung zum Monitoring von Straßenlampen entwickelt, aufgebaut und mit Langzeitmessungen in Ilmenau

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

Jahresbericht
© IMMS 2023

und umliegenden Gemeinden evaluiert, die als kostengünstigere Alternative nachgerüstet werden kann. Diese realisiert die Defekterkennung mit optischen Sensoren in Funksensorknoten, die sich leicht an Lampenmasten ohne Eingriff in die Elektrik der Lampe installieren lassen. Das System aus batteriebetriebenen und aus der Ferne parametrierbaren Funksensorknoten und einem Gateway kommuniziert über die Low-Power-Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN. Durch diese energieeffiziente Kommunikationstechnologie können unterschiedlichste Sensoren eingesetzt und damit vielfältige Lösungen realisiert werden. Kommunen können somit jede vorhandene Straßenlampe smart machen, deren Zustand und Defekte zeitnah erkennen, Wartungseinsätze planen und Bürgerinnen und Bürger über eine Webseite informieren.

Gesamtsystem mit modularer Plattform für IoT-Systeme

Die am IMMS in Zusammenarbeit mit der Stadt Ilmenau entwickelte Lösung zum Monitoring von Straßenlampen realisiert die Defekterkennung mit optischen Sensoren in Funksensorknoten, die an Lampenmasten installiert werden. Durch die nicht-invasive Montage ist kein Eingriff in die Elektrik der Lampe erforderlich und die Nachrüstung somit leicht möglich. Das System aus Funksensorknoten und einem Gateway kommuniziert per Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN. Die Sensorknoten sind dabei batteriebetriebenen und aus der Ferne parametrierbar. Die Defekte werden serverseitig aus den Messdaten erkannt und die Ergebnisse in Dashboards visualisiert.

Neben den reinen nachrüstbaren Sensoren an der Lampe hat das IMMS das gesamte System vom Sensor bis zur



Abbildung 1:

Entwickelte Sensor-
knoten zur Installation
an Lichtmasten. Foto: IMMS.

Visualisierung für städtische Stellen entwickelt. Dieses ist auf Basis der am IMMS entwickelten modularen Plattform für IoT-Systeme entstanden. Mit ihr lassen sich Sensoren, Datenbank- und Analyse-Tools sowie Visualisierungsoptionen flexibel anpassen, um anwendungsspezifische Lösungen schnell umsetzen zu können.

Konfigurierbare Sensorknoten mit autarker Energieversorgung für heterogene Lampentypen und Leuchtmittel

Für die vorgestellte Lösung wurden spezielle Sensorknoten entwickelt, die an Lampen montiert werden, um dort per optischer Lichtintensitätsmessung der Lampe sowie des Umgebungslichts die notwendigen Daten zum Monitoring der Lampenfunktion zu erfassen (Abb. 1). Die Werte werden per LoRaWAN periodisch an ein eigenes Gateway mit dem ChirpStack als Implementierung des LoRaWAN-Protokoll-Stacks übertragen und von dort qualitätsgeprüft in einer InfluxDB-Datenbank abgelegt. Die Auswertung erfolgt momentan serverseitig über einen speziell entwickelten Algorithmus, der die beiden Werte je Lampe in Bezug setzt und so auch auf Fehlerfälle der Lampen, wie z.B. sehr helles Umgebungslicht, das Dämmerungsschalter an Lampen stört, aufmerksam machen kann. Das Ergebnis der Bewertung wird anschließend wieder in der Datenbank abgelegt und mit der Software Grafana auf einer Karte visualisiert.

Herausforderungen bei der Umsetzung des Projekts waren die Vielzahl an unterschiedlichen physischen Lampentypen (Mast- und Lampenform), eine Vielzahl heterogener Leuchtmittel mit unterschiedlichen Fehlerbildern und der Betrieb ohne

Abbildung 2: Sensorknoten an Lichtmasten im Ilmenauer Ortsteil Jesuborn. Foto: IMMS.



Integration mit der Lampenelektrik, um Installations- und Wartungsaufwand zu minimieren. Die ersten beiden Punkte erfordern eine gewisse Anpassbarkeit bzw. Konfigurierbarkeit der Sensorknoten an den Lampen, während der letzte Punkt einen energieeffizienten Betrieb mittels autarker Energieversorgung erfordert. Letzteres wird durch den Einsatz von Batterien realisiert, die bei einem Messintervall von 30 Minuten in der Nacht für eine avisierte Lebensdauer von mindestens zwei Jahren ausgelegt sind. Um die anderen Punkte zu realisieren, hat das IMMS zwei grundsätzliche Varianten der Sensorknoten entwickelt.

Standard-Sensorknoten für Tag-Nacht-Unterscheidung der Messungen

Die Standardvariante verfügt über zwei Lichtsensoren und misst sowohl das Lampenlicht als auch das Umgebungslicht und ermöglicht so einen direkten Vergleich der beiden Werte. Dadurch wird der Unterschied zwischen Tag und Nacht deutlich. Um Energie zu sparen, wird der Sensor für das Lampenlicht nur bei Dunkelheit verwendet; erst wenn das Umgebungslicht einen konfigurierbaren Schwellwert unterschreitet, wird der zweite Sensor aktiviert. Dies ermöglicht zudem eine automatische Erkennung der Tageslänge im Jahresverlauf. Der zweite Sensor wird so positioniert, dass er dem Leuchtmittel abgewandt ist und möglichst wenig Licht von diesem einfängt.

Vereinfachter Sensorknoten mit indirekter Zuordnung der Messzeiträume

Ist dies aufgrund der Lampengeometrie nicht möglich, kommt die zweite Variante mit nur einem Sensor zum Einsatz. Dieser misst lediglich das Lampenlicht. Serverseitig

Abbildung 3: Statusvisualisierung in Dashboards, hier mit einem Statusverlauf über 90 Tage. Quelle: IMMS.

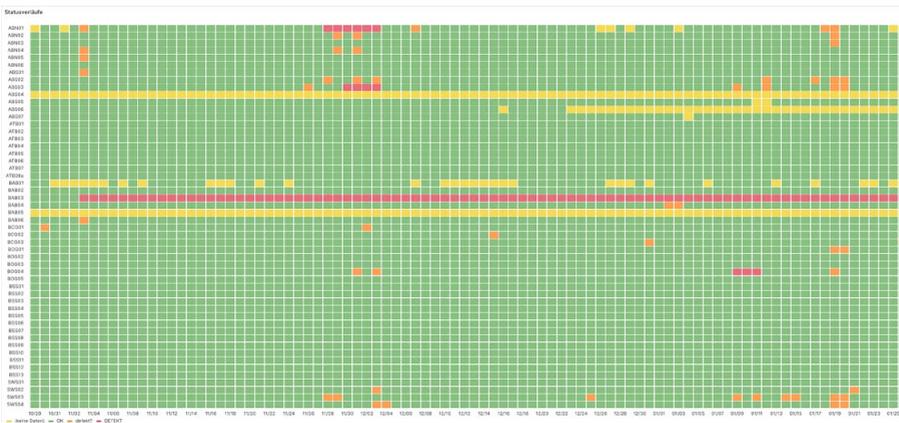




Abbildung 4: Statusvisualisierung in Dashboards: Oben aktueller Status auf einer Karte des Ortsteils. Quelle: IMMS auf der Basis von OpenStreetMap (CC BY-SA 2.0).

wird dieser Lampe dann ein anderer Sensor für die Bewertung des Umgebungslichts zugeordnet, der Beginn der Messzeiträume (Tag/Nacht) tagesaktuell ermittelt und anschließend der Sensorknoten entsprechend konfiguriert.

Fernkonfigurierbarkeit für Spezifika

Um auf unterschiedliche Leuchtmittel eingehen zu können, hat das IMMS eine Möglichkeit geschaffen, die Knoten über Nachrichten im Rückkanal (LoRaWAN Downlink) aus der Ferne zu konfigurieren. Dies ermöglicht neben der Anpassung des Messbereichs der Sensoren auch den Start von vorab definierten Spezialmessungen, z.B. um später Flackern zu erkennen.

Funktionsnachweis und Ausblick

Das entwickelte System ist seit August 2023 im Ilmenauer Ortsteil Jesuborn flächendeckend in der Erprobung (Abb. 2). Dieser Ortsteil verfügt über insgesamt ca. 50 Straßenlampen einiger unterschiedlicher Typen. Die Sensoren wurden entsprechend unter den Lampen relativ hoch am Mast mit Hilfe eines Hubsteigers installiert.

Während der bisherigen Erprobung konnten mit Hilfe des Systems erfolgreich erste Defekte an Lampen erkannt werden (Abb. 3 und 4). So wurden Defekte durch Bauarbeiten und einen Unfall, bei dem ein Mast beschädigt wurde, erkannt.

Außerdem zeigen die Daten eine Intensitätsänderung der Lampen, wenn ein Leuchtmittel ausgetauscht wurde, und damit neben der aktuell möglichen Zustandserkennung auch ein weiteres Potenzial eines solchen Systems: Langfristig kann damit ein Datenbestand zur Analyse von Wartungszyklen aufgebaut werden, der dann auch für KI-Modelle genutzt werden kann.

Neben diesen Funktionen wurden auch verschiedene Verdachtsfälle für Flackern identifiziert, die aber nur mit einer speziellen Messung, die in kürzeren Intervallen erfolgt, geklärt werden können. Das System ist bereits in der Lage, solch eine Messung auszuführen. Die Auswertung auf der Server-Seite oder, sobald ausreichend Daten vorliegen, per KI ist jedoch noch offen und soll als nächster Schritt angegangen werden.

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



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

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

68

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

Ein preiswertes System zum echtzeitnahen Monitoring der Feinstaubbelastung



Das IMMS hat im Projekt thurAI ein kompaktes energieautarkes System für das kontinuierliche Feinstaubmonitoring entwickelt, das sich in bestehende Infrastruktur mit Low-Power-Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN einbinden lässt und das für Messungen in den Ilmenauer Ortsteilen und Urlaubsorten Frauenwald, Manebach und Stützerbach installiert wurde. Foto: Marco Götz, IMMS.

Motivation und Überblick

Feinstaub als Hauptschadstoff der Luftverschmutzung ist für etwa 300.000 vorzeitige Todesfälle pro Jahr und für einen kritisch überhöhten Nährstoffeintrag in derzeit zwei Dritteln der Ökosystemgebiete in der EU mitverantwortlich. Daher gibt es gesetzliche Grenzwerte für die Feinstaubbelastung, die zu kontrollieren und einzuhalten sind und die durch die aktuell überarbeitete Luftqualitätsrichtlinie der EU deutlich verschärft werden. Im Vergleich zu Städten gelten bereits heute besonders für staatlich anerkannte Kur- und Erholungsorte strengere Auflagen. Für eine Zertifizierung zum Kurort erfolgen in Abständen mehrerer Jahre Messungen durch den Deutschen Wetterdienst, bei denen Staubsammler an neuralgischen Punkten ausgebracht und nach Zeiträumen von einer bis mehreren Wochen wieder eingesammelt und im Labor analysiert werden. Das Ergebnis sind akkumulierte Messwerte zur Feinstaubbelastung über den gesamten betrachteten Zeitraum. Ein Rückschluss auf ursächliche Ereignisse oder Schwankungen innerhalb des Zeitraums ist nicht möglich.

Gäbe es ein preiswertes und flexibel an potenziell repräsentativen Standorten ausbringbares System zur kontinuierlichen, zeitlich höher aufgelösten Feinstaubüberwachung, ließen sich Rückschlüsse auf Verursacher ziehen, andere Abhängigkeiten erkennen und gegebenenfalls frühzeitig gegensteuernde Maßnahmen ergreifen.

Hier setzen vorhandene Citizen-Science-Ansätze (z.B. AirRohr von LuftDaten.Info) an und nutzen kostengünstige Hard- und Software, um eine kontinuierliche Messung zu ermöglichen. Die so entstehenden Systeme messen Feinstaub, aber die verwendeten Sensoren sind sehr groß. Zu Beginn der Betrachtungen waren zudem bereits bessere Sensoren verfügbar, als sie im AirRohr-Design zu diesem Zeitpunkt verwendet wurden.

Das IMMS hat im Forschungsprojekt *thurAI* ein kompaktes energieautarkes System für das kontinuierliche Feinstaubmonitoring entwickelt, das sich in bestehende Infrastruktur mit Low-Power-Weitbereichsfunktechnologie LoRaWAN einbinden lässt. Dafür wurde eine eigene Hardware samt Gehäuse mit integrierter Solarzellenhalterung entwickelt. Das System kann zum kontinuierlichen Monitoring an verschiedenen Stellen installiert werden. Neben der Erfassung der unterschiedlichen Partikelgrößen und Mikroklimaparameter erfolgt eine autonome Feuchtekorrektur der Feinstaubmesswerte. Diese werden mit Dashboards visualisiert, wobei unterschiedliche Darstellungen von Zeitreihen bis hin zu Grenzwert-Ampeln sowie Anpassungen an spezifische Bedürfnisse eines Anwendungsfalls möglich sind. Über das Kurklima-Monitoring hinaus eignet sich die Lösung auch zum Monitoring von Feinstaub im Allgemeinen, z.B. im städtischen Raum.

Systemaufbau

Die am IMMS in Zusammenarbeit mit der Stadt Ilmenau entwickelte Lösung zum Monitoring von Feinstaubbelastungen setzt auf ein optisches Messprinzip. Die Sensoren sind Bestandteil von Funksensorknoten, die zudem die Mikroklimaparameter Lufttemperatur und -feuchtigkeit messen und drahtlos an ein Gateway in Reichweite übertragen. Von dort werden die Daten zu einem zentralen Server übertragen, gespeichert und in Dashboards visualisiert.

Abbildung 1:

Sensorknoten: links zusammengebaut, rechts Innenleben.

Foto: IMMS.



Zur Vermeidung von Wartungsaufwänden wurden die Funksensorknoten energieautark konzipiert: Über ein kleines Solarpanel laden sie eine Pufferbatterie, die ihnen auch über mehrwöchige Phasen mit wenig Sonnenschein hinweg einen Betrieb ermöglicht.

Sensoren und Elektronik sind in einer für Mikroklima-Sensorik üblichen „Wetterhütte“ untergebracht (Abb. 1). Eine eigens entworfene 3D-gedruckte Innenkonstruktion fixiert die Komponenten dabei. Der Sensorknoten eignet sich für die Montage an Masten, das Solarpanel für die Energieversorgung wird darüber installiert.

Der verwendete optische Staubsensor von Sensirion detektiert Staubpartikel in der Luft über einen Laser, ähnlich einer Lichtschranke. Dazu wird in regelmäßigen Abständen über einen Lüfter Außenluft durch das Innere der Sensoreinhausung geblasen. Durch die Verdunklung des Laserstrahls werden Partikel erkannt und in vier Größenklassen gezählt. Diese reichen von Grobstaub der Klasse PM₁₀ mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer über PM₄ bis zum eigentlich Feinstaub mit PM_{2,5} und PM₁, also 2,5 bzw. 1 Mikrometer Partikelgröße.

Korrekturrechnungen für Luftfeuchte-Einflüsse

Das optische Messprinzip wird durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Ist diese hoch, wird sie von den Partikeln aufgenommen und sie erscheinen dem Sensor größer als sie eigentlich sind. Um das zu kompensieren, gibt es aus einschlägigen Veröffentlichungen verschiedene Ansätze zur Korrekturrechnung, von denen im IMMS-System



Abbildung 2: Sensor an einem Lichtmast am Kurpark in Stützerbach. Foto: Marco Götze, IMMS.

einer umgesetzt wurde.¹ Auch hierfür wurde die lokale Mikroklima-Messung mit Temperatur und Luftfeuchte in das System integriert.

Sind die mikroklimatischen Bedingungen nahe am Taupunkt, nähert sich das Ergebnis der Korrekturrechnungen exponentiell dem Nullwert. In solchen Situationen, die etwa in Tallagen von Mittelgebirgen auch häufiger auftreten, sind die Messwerte entsprechend quantitativ weniger belastbar. Das ist jedoch ein bekanntes Problem für die optische Feinstaubmessung. Lösbar ist das derzeit nur in den gängigen großen Messstationen.² Der dort gesammelte Feinstaub wird über das Gewicht bestimmt und daher vorher getrocknet.

Funktionsnachweis

Das entwickelte System wurde ab Juni 2023 sukzessive in den Ilmenauer Ortsteilen Stützerbach (Kurort), Manebach und Frauenwald (beides Erholungsorte) mit jeweils mehreren Sensorknoten ausgebracht (Abb. 2) und ist seither dort in Erprobung. Die Momentanwerte und Messwertverläufe werden der Stadt und den Kurverwaltungen mittels Dashboards in Grafana visualisiert (Abb. 3).

Im Zuge der Erprobung war mangels Referenz bislang kein quantitativer Vergleich mit DWD-Messungen möglich: In den betrachteten Orten gibt es keine öffentlichen

¹ Soneja, S.; Chen, C.; Tielsch, J.M.; Katz, J.; Zeger, S.L.; Checkley, W.; Curriero, F.C.; Breyse, P.N.: Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2014, 11, 6400-6416. <https://doi.org/10.3390/ijerph110606400>

² LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011. Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator. Karlsruhe 2017. <https://pd.lubw.de/90536>

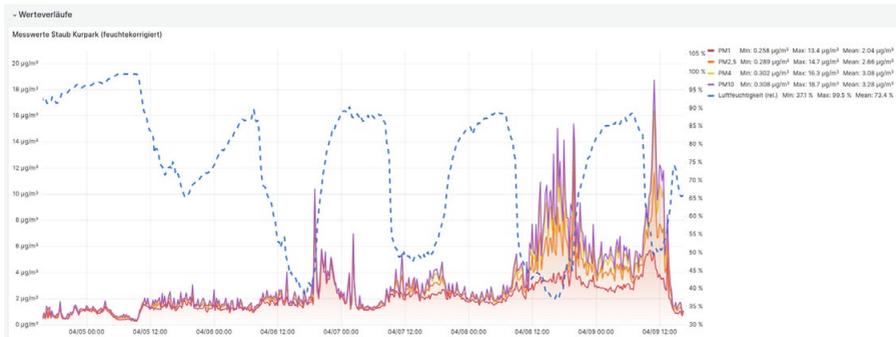
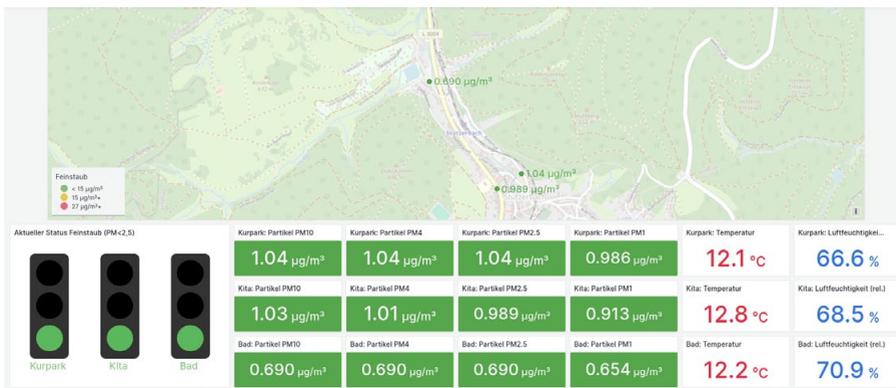


Abbildung 3: Statusvisualisierung in Dashboards: Oben aktueller Status auf einer Karte des Ortsteils Stützerbach sowie Grenzwertampeln, unten Messwertverläufe, die (rechts) die Phase erhöhter Belastung durch Saharastaub im April 2024 zeigen. Quelle: IMMS.

Messstellen und die über öffentliche Quellen wie das Umweltportal Thüringen beziehbaren Messdaten sind zeitlich geringer aufgelöst. Es konnten jedoch qualitative Korrelationen mit erwarteten oder großräumig gemeldeten Anstiegen verzeichnet werden, z.B. ein deutlicher Peak nach Mitternacht Silvester, die Wochen mit Saharastaub im Frühjahr 2024 und weitere Phasen mit deutschlandweit erhöhter Feinstaubbelastung. In Manebach wurde ein Sensor aufgrund der örtlichen Bedingungen an einem interessierenden Installationsort unterhalb der Höhe benachbarter Schornsteine ausgebracht – in der Folge ließen sich bei bestimmten Wetterlagen Heizperioden erkennen.

Die Messwerte zum Feinstaubmonitoring in den Ilmenauer Ortsteilen sollen zukünftig auch auf Bürgerinformationsseiten dargestellt werden.

Zudem soll mit der kontinuierlichen Feinstaubmessung mit vergleichsweise hoher zeitlicher Auflösung längerfristig betrachtet werden, inwieweit die Messwerte mit DWD-Messungen korrelieren und welche Rückschlüsse auf die Ursachen für Schwankungen im Jahresverlauf und punktuelle Ausschläge möglich sind.

Da Feinstaub zwar für Kur- und Erholungsorte in besonderem Maße, aber auch für Städte im Allgemeinen aufgrund gesetzlicher Vorgaben relevant ist, eignet sich die Lösung auch für ein breiteres Anwendungsspektrum. In der aktuell überarbeiteten Luftqualitätsrichtlinie der EU wird der Jahresgrenzwert für den Hauptschadstoff Feinstaub (PM_{2,5}) um mehr als die Hälfte gesenkt. Somit kann von einer Ausweitung der Mess-Stationen ausgegangen werden und der Bedarf an kostengünstigeren Lösungen wie dieser könnte perspektivisch steigen.

Die erhobenen Daten können zudem die Grundlage für systematische Korrelationsbetrachtungen und Analysen (auch per KI), Ursachenforschung und auch die Überprüfung der Wirksamkeit ergriffener Maßnahmen bilden.

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



Hier hat Zukunft Tradition.

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

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

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



Intelligente, vernetzte Kamerasysteme für mehr Sicherheit im mobilen Einsatz von Ladekränen

Im Projekt EdgeCam wurde eine Lösung erarbeitet, um Sicherheitszonen um mobile Kräne mit vernetzten Kameras aufzubauen. Foto: ArtisticOperations/Pixabay.

Motivation: Unfallprävention in mobilen Gefahrenbereichen mit anonymen Personen

Sicherheitszonen sollen dafür sorgen, dass sich keine Personen im Gefahrenbereich von Maschinen aufhalten, wenn diese in Betrieb sind. Das betrifft sehr viele Anwendungsbereiche von Fertigungszellen über Lagerhallen mit autonom fahrenden Gabelstaplern bis hin zu Ladekränen an LKWs. Ziel ist es, jeweils einen sicheren Betrieb zu garantieren und beim Bedienen der Maschine zu warnen, wenn eine potenzielle Gefährdung besteht, bzw. das System in einen sicheren Zustand zu bringen.

www.imms.de/edgecam

Während es bereits sehr gute und restriktive Lösungen für Fertigungszellen gibt, bei denen der Roboter nur dann gestartet werden kann, wenn die Zelle frei von Hindernissen und Personen ist, ist das bei Anwendungen mit mobilen Maschinen schwieriger. Auch hier gibt es verschiedene Lösungen, die in Lagerhallen oder auf abgeschlossenen Firmengeländen genutzt werden können. Technisch erfolgt das mit Lichtschranken oder speziellen Tags, die Personen, die ebenfalls im Bereich arbeiten, bei sich tragen und so vom System erkannt werden können.

www.imms.de/i40

Jahresbericht

© IMMS 2023

Eine solche Lösung ist allerdings nicht für Einsatzorte außerhalb eines Firmengeländes einsetzbar, da Passanten in der Regel nicht vorab mit Tags ausgestattet werden können und die Bedeutung von Lichtschranken ggf. nicht bekannt ist oder diese gar nicht wahrgenommen werden. Hier wird eine Alternative benötigt, die den Gefahrenbereich selbstständig überwachen kann und auch ggf. nicht einsehbare Hindernisse erkennt und entsprechend warnt. Der Fokus liegt auf der Vermeidung von Unfällen, die mit Personen im Gefahrenbereich und durch Kontakt mit Hindernissen entstehen können.

Lösung zur virtuellen Sicherheitszone im Überblick

Im Projekt EdgeCam hat sich das IMMS daher mit der Realisierung einer virtuellen Sicherheitszone befasst, die um beliebige Fahrzeuge aufgespannt werden kann. Damit soll es möglich sein, diese an jedem beliebigen Einsatzort sicher zu betreiben, wie z.B. einem LKW mit Ladekran. Um das zu erreichen, hat das IMMS zusammen mit dem Partner emsys GmbH spezielle Multikamera-Knoten entwickelt, die sich selbstständig drahtlos miteinander vernetzen und mithilfe der Bilder aller Kameras eine lückenlose virtuelle Sicherheitszone um den LKW bilden. Das System überwacht selbstständig kontinuierlich die Sicherheitszone um den Kran und kann so den Kranführer frühzeitig vor möglichen Gefahren warnen, auch wenn diese sich außerhalb seines Sichtbereichs befinden sollten. Die erfassten Bilddaten bleiben dabei im System und werden nicht an eine dritte Instanz übertragen, um Datenschutzanforderungen zu genügen. Um dieses System zu entwickeln, haben emsys und IMMS zunächst eine modulare Hardwareplattform entworfen, die mit unterschiedlichen Kameras und Kommunikationsmodulen aufgebaut wird.

Ziel ist es, aus den verfügbaren unterschiedlichen Kommunikationsoptionen intelligent diejenige auszuwählen, die am jeweiligen Einsatzort und für die aktuelle Aufgabe am geeignetsten ist. Außerdem kann das System so um weitere Kameras am Kran selbst oder am Ablageort ergänzt werden, um die Sicherheit weiter zu erhöhen.

Das entwickelte System ist dabei nicht nur flexibel an den Anwendungsfall LKW mit Kran anpassbar. Auch andere Anwendungen wie z.B. das Zählen von wartenden Menschen an Haltestellen sind mit der Hardware umsetzbar.

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

www.imms.de/
edgecam

www.imms.de/
iot

www.imms.de/
monitoring

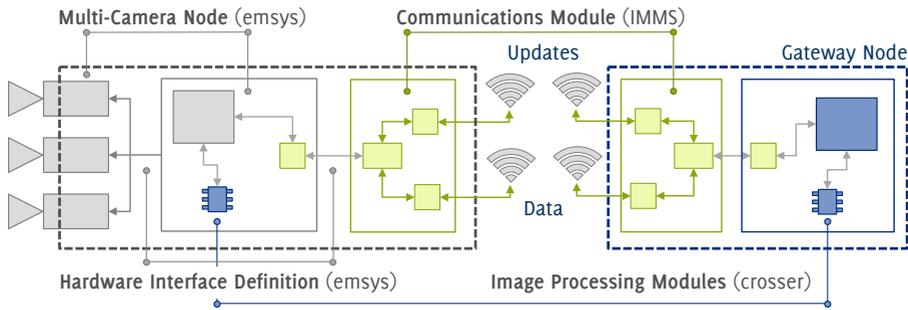


Abbildung 1: Schematischer Systemaufbau. Grafik: IMMS.

Gesamtsystemarchitektur

Das EdgeCam-System repräsentiert eine Gesamtsystemarchitektur für mobile Überwachungsaufgaben im Feld und besteht aus Multikameraknoten, welche mit mehreren Kameramodulen ausgestattet werden können, einem Gateway-Knoten, einem Mensch-Maschine-Interface (HMI) als Feedback an den Kranführer sowie einer flexiblen Kommunikationsunterstützung zwischen den beteiligten Knoten und ggf. dem Internet. Außerdem ermöglicht das System die Verteilung der Berechnungsaufgaben zwischen den beteiligten Knoten, um eine Lastverteilung zu erzielen. Für den Austausch der benötigten Informationen wird der Industriestandard OPC UA eingesetzt. Abbildung 1 zeigt den schematischen Systemaufbau.

Das Gateway unterscheidet sich von den anderen Knoten durch eine Reihe von zusätzlichen Funktionen. Dazu gehört die Konfiguration und Qualitätsüberwachung des lokalen drahtlosen Kommunikationsnetzwerkes mit den vorhandenen Multikamera-Knoten sowie die Kommunikation mit dem HMI. Außerdem ist das Gateway für das Management der Ergebnisse des EdgeCAM-Systems verantwortlich. Die Ergebnisdaten der Multikamera-Knoten müssen eingesammelt, aufbereitet und nachbearbeitet werden. Die finalen Ergebnisdaten müssen periodisch zum HMI weitergeleitet werden. Auftretende Gefahrensituationen (z.B. „Menschen im Arbeitsbereich“) müssen innerhalb der geforderten Zeit signalisiert werden. Das Gateway kann als dediziertes Gateway ohne Kamera oder als Knoten mit integrierter Kamera realisiert werden.

Hardware für EdgeCam-Multikameraknoten

Als Basishardware für alle Knotentypen dient die Plattform „Variscite DART MX8M PLUS“. Das Modul bietet Schnittstellen für bis zu zwei Kameras und ermöglicht es, z.B. über PCIe flexibel Funkmodule anzuschließen. Damit ist es für den Aufbau von



Abbildung 2: Hardware für Multikamera-Knoten. Foto: IMMS.

Multikamera-Knoten mit mehreren Funkmodulen, die parallel genutzt werden können, ideal. Ziel war es, eine kompakte Bauform zu realisieren, die alle vorgesehenen drahtlosen sowie auch verschiedene andere Schnittstellen integriert, um einen möglichst flexiblen Einsatz der Hardware zu gewährleisten. Das Layout der Platine wurde in enger Absprache mit dem Projektpartner emsys realisiert. Abbildung 2 zeigt das fertige Board.

Adaptives WLAN-basiertes EdgeCam-Netzwerk

Das EdgeCam-System operiert autark, d.h. es baut am Einsatzort zunächst ein stabiles und zuverlässiges WLAN-Netzwerk zwischen den Systemkomponenten auf. Das Gateway koordiniert dies und stellt sicher, dass alle Knoten des EdgeCAM-Systems nahtlos in das Netzwerk eingebunden werden und miteinander kommunizieren können. Dazu fungiert es als Access Point eines WLAN-Infrastrukturnetzwerkes, in das die anderen Knoten und das HMI direkt eingebunden werden. Um an beliebigen Orten ein solches Netz aufzubauen, muss der verwendete Kanal flexibel ausgewählt werden können. Dazu führt das Gateway nach dem Start des Systems eine Scan-Prozedur auf allen verfügbaren WLAN-Kanälen durch und wählt auf Basis der Ergebnisse anschließend einen freien WLAN-Kanal aus.

Da die **WLAN-Kanäle** aufgrund ihrer Bandbreite **überlappend** sind, d.h. ein WLAN-Signal auf Kanal n kann Kanal $n+1$ noch stören, wird ein freier, von anderen WLAN-Signalen ungestörter, nicht-überlappender Kanal gesucht. Das geschieht mit Hilfe eines gleitenden Fensters (Sliding Window), welches sicherstellt, dass der im jeweiligen Frequenzband notwendige Kanalabstand eingehalten wird. Der erste freie ungestörte WLAN-Kanal wird dann für den Aufbau des EdgeCAM-WLAN-Netzwerkes ausgewählt.

Da nicht sichergestellt werden kann, dass ein Kanal, der zu Beginn als frei erkannt und ausgewählt wurde, das über den gesamten Einsatzzeitraum auch bleibt, wurden **Monitoring- und Kanalwechselfunktionen** ergänzt, die es dem System ermöglichen, auch nachträglich den Kanal zu wechseln. Zur Evaluierung der Qualität des aktuellen Kanals bzw. der Verbindungsparameter fordert das Gateway die anderen Knoten periodisch auf, einen Scan nach vorhandenen fremden WLAN-Aktivitäten durchzuführen. Anschließend informieren die Knoten das Gateway über gefundene weitere WLAN-Netzwerke auf dem aktuellen EdgeCAM-WLAN-Kanal. Werden dabei Probleme erkannt, initiiert das Gateway einen Wechsel zu einem verfügbaren freien Kanal. Dieser Wechsel kann im Idealfall per WLAN-Feature Channel Switch Announcement (CSA) geschehen, das erstmalig im IEEE-802.11h-Standard spezifiziert worden ist. Dieses Feature erfordert allerdings Unterstützung durch die eingesetzte WLAN-Hardware sowie vollständige Unterstützung durch die dazugehörigen Linux Treiber auf den eingesetzten Knoten.

Dynamische Lastverteilung

Damit die **Latenz** bei der Berechnung der Videoströme minimiert werden kann, wurden im Projekt verschiedene Plattformen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht und ein Konzept zur dynamischen Lastverteilung umgesetzt. Es erlaubt Multikameraknoten, einen Teil oder die gesamte Verarbeitung der aufgezeichneten Bilddaten auszulagern. Realisiert wird das über ein Framework zur verteilten Abarbeitung von Bildverarbeitungsalgorithmen basierend auf openCV. Das Framework besteht aus einer Client-Einheit auf einem Multikamera-Knoten und einem Verarbeitungs-Server, welcher auf einem anderen Knoten im EdgeCAM-Verbund läuft.

www.imms.de/
realtime

Die **Überwachung** einer Sicherheitszone wurde als mehrstufige Bildverarbeitungs-aufgabe in openCV exemplarisch implementiert. Nach jeder Stufe kann die Verarbeitung auf Clientseite gestoppt und die restlichen Schritte auf dem Server abgearbeitet werden. Über eine Kommandoschnittstelle kann die Abarbeitung des Skriptes auf dem aktuellen Knoten an verschiedenen Stellen angehalten werden, wenn z.B. die Rechenleistung des Knotens nicht ausreicht. In diesem Fall werden die Bilddaten bzw. bereits errechnete Zwischenergebnisse und der noch verbleibende Teil des Verarbeitungsskriptes an den Verarbeitungs-Server weitergeleitet. Der Punkt, an dem die Bearbeitung des Skriptes aufgeteilt wird, kann dynamisch im laufenden Betrieb verändert werden.

www.imms.de/
monitoring

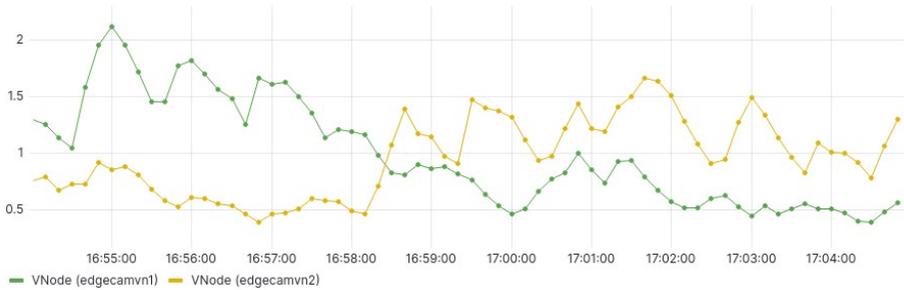


Abbildung 3: Änderung der Rechenlast nach Verlagerung der Bildverarbeitung an einem Multikamera-Knoten. Quelle: IMMS.

Somit ist eine einfache Lastverteilung zwischen den Knoten des Systems gegeben. Das folgt im Wesentlichen den vom schwedischen Partner Mid Sweden University entwickelten Konzepten zum Intelligence Partitioning und zeigt somit eine praktische Realisierung dieser Konzepte.

Für die Steuerung und die Ergebnisübertragung der verteilten Bildverarbeitung wurde im Projekt OPC UA (Open Plattform Communications Unified Architecture) eingesetzt. Damit lässt sich die Verbindung von Bildverarbeitungsclient und -server über OPC UA dynamisch auf- und abbauen (falls z.B. neue Knoten im Netz registriert werden) und die Verarbeitung der Bilddaten zwischen Client und Server dynamisch verschieben. Damit wurde die Grundlage geschaffen, abhängig von der aktuellen Lastsituation des Gesamtsystems die Bildverarbeitungsaufgaben dynamisch unter den Knoten zu verteilen.

OPC-UA-basierter Informationsaustausch

Um die notwendigen Informationen zur Kommunikation und der zu verarbeiteten Daten sowie die Ergebnisse der Überwachung untereinander auszutauschen, wurde OPC UA verwendet. OPC UA ist ein sehr universelles, Service-orientiertes Kommunikationsprotokoll und bietet eine gute Ausgangsbasis für die Vernetzung in Industrie-4.0-Installationen. Mit der Companion Specification for Machine Vision (OPC 40100-1) existierte zudem bereits eine Spezifikation für Komponenten zur Bilderkennung, welche verschiedene Aspekte des EdgeCAM-Anwendungsbereiches abdecken und so eine bereits standardisierte Schnittstelle bereitstellen.

Jeder Knoten im EdgeCam-Netzwerk implementiert einen **OPC-UA-Server**, welcher in seinem Informationsmodell alle relevanten Statusinformationen des Knotens bereitstellt. Über Methoden im Informationsmodell kann die Funktion des Knotens

gesteuert werden. Events und Alarmer dienen der Weiterleitung von Ereignissen. Mittels OPC-UA-PubSub-Kommunikation können zudem Bilddatenströme der Multikameraknoten an andere Knoten im Verbund zur Weiterverarbeitung übertragen werden.

Der OPC-UA-Server des Gateways verbindet sich mittels Server-zu-Server-Kommunikation zu allen **Multikameraknoten** und verfügt somit über den Gesamtstatus des Systems inklusive aller Alarmer und Events. In seiner Funktion als Server stellt er wiederum die Schnittstelle zur jeweiligen EdgeCAM-Installation bereit.

Auf dem Gateway läuft zudem ein **Local Discovery Server (LDS)**, der als Registrierungsstelle der Kameraknoten dient. Den letzten Teil der OPC-UA-Kommunikationskomponenten bildet der **Gateway-Client**. Dieser agiert sowohl als Client in Bezug zu den Kameraknoten als auch als Server in seiner Rolle als Schnittstelle zu einer möglichen Verwaltung in der Cloud.

Der Gateway-Client baut eine Verbindung zu allen Kameraknoten des Systems auf, sammelt deren Parameterinformationen und stellt eine Schnittstelle bereit, womit die Kameraknoten gesteuert werden können. Außerdem baut er eine Verbindung zu einer Zeitreihendatenbank auf, über die alle Informationen aus dem EdgeCAM-Verbund aufgezeichnet werden können.

Die **Implementierung** erfolgte auf Basis des OPC-UA-OpenSource-Stacks open62541. Dieser definiert als Basis verschiedene Datentypen, welche mit ihren Objekten, Attributen und Methoden als API für den Zugriff auf den Kameraknoten dienen. Zu

Abbildung 4: Demo-Setup im Foyer des IMMS mit Multikameraknoten und zusätzlich markierter Sicherheitszone. Foto: IMMS.



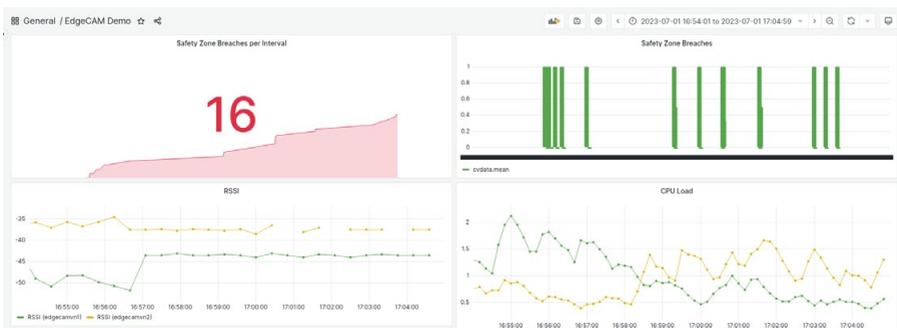


Abbildung 5: Screenshot der Grafana-basierten Visualisierung der Demo zur Langen Nacht der Wissenschaften in Ilmenau mit der Anzahl der Verletzungen der Sicherheitszone (oben), Empfangsstärke der Multikamera-Knoten (unten links), der Änderung der Rechenlast (unten rechts). Quelle: IMMS.

dieser Schnittstelle können sich sowohl lokale Komponenten verbinden, um z.B. den anderen Knoten im EdgeCAM-Verbund Parameter-Updates zur Verfügung zu stellen oder zu erhalten, als auch der Gateway-Client, welcher die Kommunikation und Steuerung mit allen Kameraknoten übernimmt. Der Ablauf für die Initialisierung der Kommunikation über OPC UA in einem EdgeCAM-Verbund ist wie folgt: Zuerst startet der Discovery-Server auf dem Gateway. Zu diesem verbindet sich der Gateway-Client, welcher ebenfalls auf dem Gateway läuft. Auf Kameraknoten im System wird nun ein OPC-UA-Server gestartet, welcher sich beim Local-Discovery-Server des Gateways registriert. Diese Registrierung benachrichtigt automatisch den Gateway-Client, welcher nun eine Verbindung zum jeweiligen Server des Kameraknotens aufbaut. Die Verwaltung der Kameraknoten erfolgt hierbei dynamisch. Das heißt, über verschiedene Mechanismen wird die Verbindung zu den Knoten überwacht. Sollte sie verloren gehen, wird der Kameraknoten automatisch aus dem Verbund entfernt.

Demoaufbau

Um die Funktionsweise des EdgeCAM-Systems zeigen zu können, wurde ein Demonstrator aufgebaut. Dieser besteht aus einem Multikameraknoten, einem Gateway und einem Laptop als HMI mit Visualisierung des Kamerabildes, der Ergebnisse der Detektion sowie einer Schnittstelle zum Steuern des Systems für Tests.

Als Bildverarbeitungsaufgabe wurde ein einfacher **Bildverarbeitungsalgorithmus** ausgewählt, der in einem ausgewählten Bildbereich eines Live-Videostroms Veränderungen erkennen und anzeigen kann. Dies kommt dem Szenario einer virtuellen Sicherheitszone sehr nahe. Hierzu wird das Kamerabild erfasst und über mehrere Schritte, wie z.B. Blurring, wird mit dem Frame der vorhergehenden Aufnahme ein

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

> Inhalt

* Förderung

Differenzbild errechnet. Über eine Kantenerkennung und eine entsprechende Filterung der Ergebnisse können so Bewegungen im gewünschten Bildausschnitt detektiert werden. Abbildung 4 zeigt einen installierten Multikamera-Knoten und die im Bildbereich befindliche Sicherheitszone. Für Testzwecke wurde diese zusätzlich am Boden markiert. Diese Markierung ist aber für die Funktion nicht notwendig.

Die **Visualisierung** der aufgezeichneten Daten des EdgeCAM-Demoaufbaus erfolgt mithilfe von Grafana (vgl. Abbildungen 3 und 5). Das eröffnet eine äußerst leistungsfähige Methode, um umfassende Einblicke in den Betrieb des Systems zu gewinnen. Grafana bietet auch die Möglichkeit, Alarmer und Benachrichtigungen einzurichten, um auf kritische Ereignisse oder Abweichungen von festgelegten Schwellwerten aufmerksam gemacht zu werden. Das kann über unterschiedliche Kanäle erfolgen, wozu das System den entsprechenden Alarm an einen externen Dienst weitergibt. Betroffen ist jedoch nur die Erkennung von Gefahren, nicht das eigentliche Videobild.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Demo konnte gezeigt werden, dass das im Projekt entwickelte System in der Lage ist, auch mit einfachen Algorithmen der klassischen Bildverarbeitung eine leistungsfähige Sicherheitszone ohne Zusatzhardware zu realisieren. Das System ist zudem so gestaltet, dass es flexibel an verschiedene Situationen angepasst werden kann und auch für andere Anwendungen wie z.B. Fahrgastzählung an Haltestellen genutzt werden könnte. Von Vorteil ist dabei jeweils, dass die Bildinformationen der Kameras das System nicht verlassen und somit die Privatsphäre sichergestellt ist. Das IMMS hat in diesem Projekt seine Kompetenzen im Umgang mit Kommunikationsnetzwerken und -protokollen eingesetzt, um ein System zu entwickeln, dass sich adaptiv an gegebene Funksituationen anpassen kann. Darüber hinaus wurden Konzepte zur Verteilung von Bearbeitungsaufgaben und der dynamischen Lastverteilung für kleine eingebettete Systeme entwickelt und erfolgreich getestet.

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

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

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt EdgeCam wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen KK5048101GRo gefördert.

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

Jahresbericht



Kompaktes Mixed-Signal-Testsystem

zur Charakterisierung von Halbleiterspeichern

Abbildung 1: Das neue Testsystem PTK 4.0 mit Analog-Mixed-Signal-Fähigkeit ermöglicht ohne zusätzliches Equipment, Schaltkreise zu testen, zu messen und sogar zu charakterisieren. Darüber hinaus ist es zu dem am IMMS entwickelten modularen System AMS ASIC Scope kompatibel. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Das IMMS hat ein neues Standalone-Gerät für Betrieb, Test und Charakterisierung von Teststrukturen mit Halbleiterspeichern sowie Mixed-Signal- und Schaltungen mit digitaler Ansteuerung im Auftrag der X-FAB Global Services GmbH entwickelt. Mit der Größe eines klassischen Milch-Tetrapacks ist das "Programmer Toolkit" der Version 4, das PTK 4.0, ideal für den mobilen Einsatz oder als platzsparende Ergänzung für etablierte Messplätze geeignet. Für die meisten Anwendungen wird kein zusätzliches Testequipment gebraucht, denn alle benötigten digitalen und analogen Funktionen werden vom PTK 4.0 bereitgestellt. Messaufgaben werden in Verbindung mit einem Laptop zur Ansteuerung und Datenverarbeitung automatisiert ausgeführt.

Kernkomponente ist ein Messmodul mit acht analogen und acht digitalen Messkanälen. Neben der Implementierung des internen seriellen Protokolls „XSTI“ der X-FAB sind auch standardisierte serielle Schnittstellen wie SPI oder I²C ansteuerbar. Die digitalen Spannungspegel sind dabei zwischen 0,65 V und 3,6 V einstellbar.

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

Jahresbericht

© IMMS 2023

Zusätzlich können die analogen Messkanäle Spannungen (-6 V bis $+16\text{ V}$) und Ströme (-50 mA bis $+50\text{ mA}$) bereitstellen sowie mit einer hohen Genauigkeit ($\pm 1\text{ nA} / 2\text{ mV}$) erfassen. Durch einen Sequenzer besteht die Möglichkeit, Messabläufe zu programmieren und zu wiederholen, sodass auch Stress- und Langzeituntersuchungen erfolgen können.

Hardware des PTK 4.0

Zum Betrieb verfügt das PTK 4.0 über eine USB-Schnittstelle und einen Eingang für ein Netzteil. Testobjekte lassen sich über acht digitale sowie acht analoge Kanäle anschließen, die als Ein- und Ausgabe konfigurierbar sind. Ein Teil der digitalen Kanäle ist für die Datenübertragung zum Testobjekt mit einem Bussystem vorgesehen.

Für das System wurden zwei Teile entwickelt: die Modulplatine, die dem Gerät die eigentliche Funktion gibt, und der Modultreiber, der die USB-Schnittstelle in einen QSPI-Bus (Quad Serial Peripheral Interface) zur Datenübertragung adaptiert. Per FPGA und mit analogen Schaltungskomponenten werden analoge und digitale Funktionen implementiert. Als Modul mit dem Formformat einer Europakarte ist dieser Teil des Testsystems zusätzlich kompatibel zum AMS ASIC Scope des IMMS.¹

Modulplatine

Die Grundfunktion des PTK 4.0 befindet sich auf der Modul-Platine. Diese bietet analoge Quell- und Messkanäle zur Versorgung und digitale Kanäle zur Ansteuerung von Test-Chips. Dafür stehen acht digitale IOs im Spannungsbereich zwischen $0,65\text{ V}$ und $3,6\text{ V}$ zur Verfügung. Diese werden von einem FPGA gesteuert und ermöglichen die Implementierung für verschiedenste Digitalprotokolle.



Abbildung 2:

PTK 4.0 –
Modulplatine.

Foto: IMMS.

¹ <https://www.elektroniknet.de/messen-testen/testsysteme/validierung-ki-basierter-simulationsmethoden-im-chip-entwurf.213109.html>

Die Spannungen der digitalen Signale werden zu je vier Signalen miteinander durch zwei der insgesamt acht analogen Kanäle vorgegeben. Das bedeutet, dass die acht digitalen Kanäle in zwei Gruppen aufgeteilt sind, die jeweils vier Digital-Kanäle beinhalten. Jede Gruppe kann unabhängig von der anderen in ihrem digitalem Spannungspegel variiert werden.

Die acht analogen Kanäle sind Vierquadrantenquellen mit gleichzeitiger Messfunktionalität aus dem ATE-Bereich (Automatic Test Equipment). Diese sind in der Lage, je Kanal Spannungen oder Ströme zwischen -6 bis 16 V und ± 50 mA zu erzeugen bzw. zu senken. Die Genauigkeit für die Ausgabe analoger Spannungen entspricht ca. ± 2 mV. Für Ströme werden, je nach konfigurierbarem Bereich, Genauigkeiten von bis ± 1 nA erreicht.

Die gleichzeitige Messfunktionalität ermöglicht die Messung von Betriebsparametern des zu untersuchenden Schaltkreises (DUT, Device Under Test) mit mV-Spannungs- und nA-Stromauflösung. Das ermöglicht beispielsweise die Untersuchung der Stromaufnahme eines Testobjektes.

Für eine große absolute Genauigkeit der analogen Komponenten erfolgt zuvor ein Abgleich und eine Feinjustage mit Hilfe kalibrierter Messgeräte. So wird sichergestellt, dass die angestrebte Messgenauigkeit des Testgerätes erreicht wird.

Modultreiber

Der Modultreiber stellt die Verbindung zwischen dem Modul und einer Nutzerschnittstelle dar. Dafür beinhaltet der Modultreiber einen Protokollwandler von USB 2.0 auf QSPI. Ein Netzteil, welches am Modultreiber angeschlossen wird, dient als Spannungsversorgung des Gerätes.

Ein weiterer Vorteil des Modultreibers ist die Kompatibilität zum modularen System – dem AMS ASIC Scope. Komponenten dieses Modulare Systems können so mit dem Modultreiber als Standalone-Geräte betrieben werden. Andererseits ist die Modulplatine des PTK 4.0 auch im AMS ASIC Scope einsetzbar.



Abbildung 3: Standalone-Modul-Treiber für PTK-4.0- und AMS-ASIC-Scope-Module. Foto: IMMS.

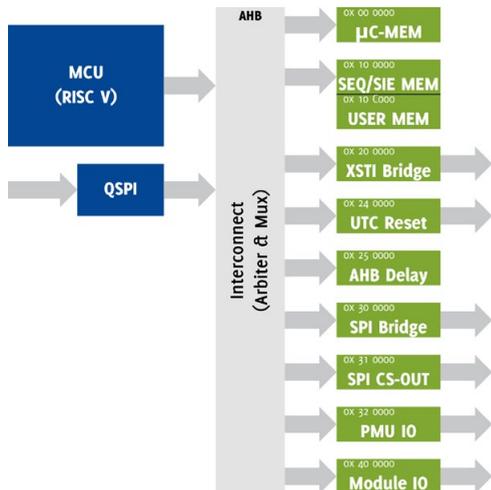


Abbildung 4: Schematische Darstellung des im FPGA implementierten Adressbus-Systems. Grafik: IMMS.

Das FPGA

Als Steuerelement des PTK 4.0 ist ein FPGA verbaut. Dieser beinhaltet eine Microcontroller-ähnliche Struktur mit internem Adressbus-System – der AHB (Advanced High-Performance Bus).

Dieses Bussystem beinhaltet zwei steuernde Komponenten (Bus-Master). Diese sind in Abbildung 4 blau dargestellt. Ein Prozessorkern mit RISC-V-Befehlssatz ermöglicht beim Einschalten des Moduls die Initialisierung der Modulkomponenten sowie eine Programm-

ablaufsteuerung zur Durchführung automatisierter Testabläufe. Der Datenzugriff und die Ansteuerung erfolgt in Form eines QSPI. Dieses stellt den Zugang zur Programmierung von Messabläufen und der direkten Ansteuerung von Hardwarekomponenten der Modulplatine zur Verfügung.

Die Slave-Komponenten des AHB (in Abbildung 4 grün dargestellt) beinhalten Datenspeicher, GPIO-Module und Digitale Bus-Interfaces wie SPI zur Kontrolle der Analogkanäle.

Eine der Slave-Komponenten ist ein Kommunikationscontroller, welcher ein spezielles Kommunikationsprotokoll implementiert – das X-FAB Serial Test Interface (XSTI). Dieses wurde nach Kundenspezifikation im FPGA implementiert und zeigt, dass die Modularität der Architektur auch die Ergänzung proprietärer, anwendungsspezifischer Schnittstellen ermöglicht.

Mikrocontroller

Der im FPGA integrierte Mikrocontroller in Form eines RISC-V-Cores implementiert eine Initialisierungssequenz, ein Interface zur Systemsteuerung sowie einen Sequenzer. Bei der Initialisierung erfolgt ein Funktionscheck der analogen Komponenten und die Kalibrierdaten werden geladen. Der Status dieser Initialisierung wird durch die LEDs am Frontpanel wiedergegeben. Somit ist nach Einschalten des Gerätes direkt sichtbar, ob die Hardware einsatzbereit ist oder ein Fehler oder Defekt erkannt wurde.

Danach steht der Mikrocontroller für die Ausführung komplexerer Operationen zur Verfügung und stellt eine Ablaufsteuerung in Form eines Sequenzers bereit. Dadurch können automatisierte Testabläufe vorgegeben und programmiert werden. Zusätzlich existieren Sequenzerbefehle für komplexere Operationen, welche die Auslastung des Sequenzers reduzieren und gleichzeitig dessen Nutzerfreundlichkeit verbessern. Ein Beispiel hierfür ist die Ansteuerung des ADC, welcher auf den entsprechenden Analog-Kanal konfiguriert wird, eine Messung startet und das Ergebnis im Anschluss zurücklikt.

Bei Ausführung eines Sequenzerprogramms ist für den Nutzer durch die LEDs am Frontpanel ersichtlich, in welchem Zustand sich dieser befindet. Somit ist einfach erkennbar, ob dessen Ausführung noch im Gange ist oder ob der Ablauf erfolgreich beendet bzw. mit einer Fehlermeldung unterbrochen wurde.

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

PC-Ansteuerung

Das PTK 4.0 wird durch eine auf einem verbundenen PC auszuführende Software gesteuert. Dafür existiert eine objektorientierte C++-API, welche die Steuerung komplexer Operationen auf einer hohen Abstraktionsebene ermöglicht. Gleichzeitig wird aber die Arbeit auf niedrigerer Abstraktionsebene nicht verwehrt, sodass der für die Anwendung gewünschte Abstraktionsgrad nutzbar ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem PTK 4.0 ist ein neues Testsystem mit Analog-Mixed-Signal-Fähigkeit entstanden. Es ist kompatibel zu dem am IMMS entwickelten modularen System AMS ASIC Scope. Im Formfaktor eines mobilen Gerätes kombiniert das PTK 4.0 analoge und digitale Funktionen. Es ist ausgerichtet für den Test von Schaltkreisen mit digitalem seriellen Interface. Dafür können Versorgungsspannungen erzeugt und digitale Kommunikationsprotokolle bedient werden. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, analoge Parameter zu messen, wie Stromfluss und/oder Spannungen.

Der Zugriff auf alle Messfunktionalitäten erfolgt über die USB-Schnittstelle. Zusätzlich existiert die Möglichkeit, den Test durch die Verwendung des Sequenzers automatisiert auszuführen und ihn somit stark zu beschleunigen.

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

Dieses Tischgerät ermöglicht ohne zusätzliches Equipment, Schaltkreise zu testen, zu messen und zu charakterisieren. Es bringt großes Potenzial mit sich, denn den gleichen Funktionsumfang gibt es sonst nur in sehr teuren und großen Messgeräten, die wiederum so universell sind, dass sehr viel Arbeit in die Testentwicklung investiert werden muss. Das PTK 4.0 hingegen ist direkt darauf ausgerichtet, digitale und Mixed-Signal-Schaltkreise zu betreiben. Das Testsetup ist einfach, da alle Signale an einem Gerät angeschlossen werden und für die Programmierung mit C++-Schnittstelle werden benötigte Funktionen direkt bereitgestellt. Dadurch eignet sich das PTK 4.0 sowohl für ein komplettes Testsetup als auch für Ad-hoc-Aufgaben.

Ähnlich wie für das PTK 4.0 können am IMMS speziell auf Kundenwünsche angepasste Setups für weitere Messaufgaben entwickelt werden, beispielsweise zur Automatisierung, Miniaturisierung oder Flexibilisierung von Messaufgaben.

Kontakt: Tom Reinhold, M.Sc., tom.reinhold@imms.de

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

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

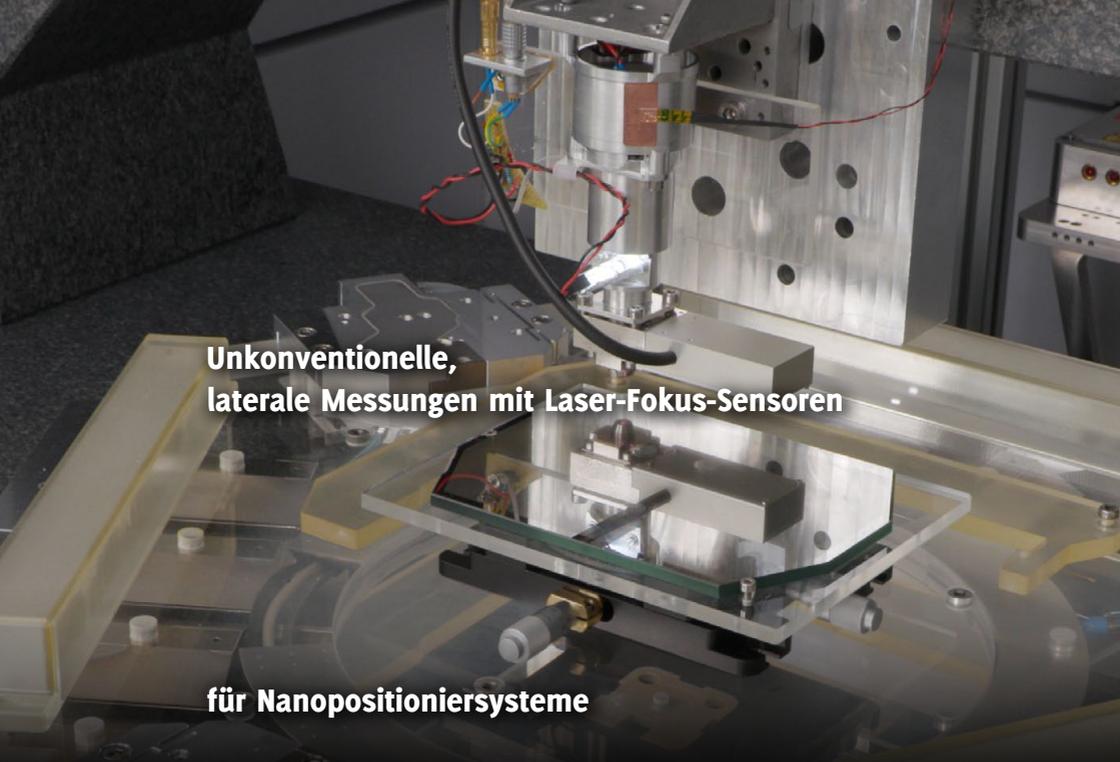


FORSCHUNGSFELD

**MAGNETISCHE 6D-DIREKTANTRIEBE
MIT NANOMETER-PRÄZISION**

Die fortschreitende Miniaturisierung technischer Produkte führt in vielen Industrie-bereichen 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 Nano-meter 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 Bewegungsberei-che. Mit unseren hochdynamischen Mehrkoordinaten-Direktantriebssystemen kön-nen Objekte in Arbeitsbereichen von mehreren hundert Millimetern in kürzester Zeit mit Nanometer-Präzision positioniert werden. Unsere Lösungen eignen sich für den Einsatz im Vakuum, in Reinräumen und an Orten mit besonderen Anforderungen hinsichtlich thermischer Isolation und Entkopplung von Vibrationen.



Unkonventionelle, laterale Messungen mit Laser-Fokus-Sensoren

für Nanopositioniersysteme

Das IMMS hat am Beispiel seines Positioniersystems NPS6D200 nachgewiesen, dass ein Laser-Fokus-Sensor zur lateralen Distanzmessung als Alternative zu optischen Mikroskopen oder Linear-Encodern zur Charakterisierung von Nanopositioniersystemen genutzt werden kann. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Hochgenaue Nanopositioniersysteme sind wichtige Komponenten für die Produktion moderner nanotechnologischer Geräte. Die Messung und Kalibrierung solcher Nanopositioniersysteme mithilfe zwei- oder eindimensionaler Probennormale ist mit verschiedenen Messsystemen möglich. Üblicherweise werden dafür optische Mikroskope oder lineare Encoder genutzt. Alternativ kann aber auch ein Laserfokussensor (LFS) verwendet werden. Diese wurden eigentlich zur Ermittlung vertikaler Abstände zwischen einem Messobjekt und ihrem Objektiv entwickelt. Mit ihnen lassen sich aber auch laterale Positioniersystembewegungen mithilfe spezieller Probennormale über das folgende Funktionsprinzip charakterisieren: Der LFS emittiert einen runden Laserpunkt, dessen Reflexion anschließend bezüglich seiner Form beobachtet wird, die sich abhängig von der vertikalen Positionsänderung verzerrt. Zusammen mit einem Quadrantendetektor werden so für vertikale Messungen LFS-Auflösungen im Nanometerbereich erreicht. Alternativ lässt sich das Intensitätssignal des reflektierten Laserpunktes auswerten und mit lateralen Bewegungen korrelieren. Hierfür

www.imms.de/
nanofab

Jahresbericht

© IMMS 2023

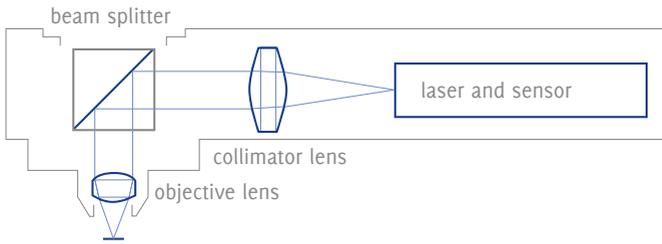


Abbildung 1:

LFS-Prinzip.
Diagramm: IMMS.

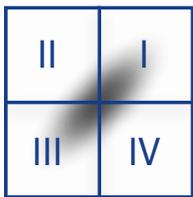
werden unterschiedliche Materialien durch ihre individuellen Reflexionseigenschaften auf einem Kreuzraster aus Glas mit aufgetragenen Chrom-Linien detektiert.

Funktionsprinzip eines LFS-Systems

Ein LFS ist ein präzises metrologisches System zur Messung vertikaler Abstände in einem kleinen Bereich um seinen Fokuspunkt mit einem typischen Messbereich von $3 \mu\text{m}$. In Abbildung 1 ist ein Design eines LFS mit einem einzelnen kollimierten Laserstrahl dargestellt, welcher von einem Strahlteiler auf die Probe gelenkt wird. Dieser Laserstrahl wird von einem Objektiv verformt und interagiert mit der Probe. Anschließend läuft er den gleichen Weg zurück zu einem Quadrantendetektor.

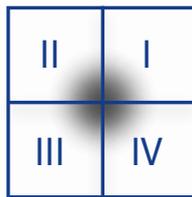
Vertikale Messungen mit Quadrantendetektor

Auf dem optischen Weg wird der Strahl transformiert. Ist der Strahl auf der Probe fokussiert, entsteht auf dem Quadrantendetektor ein runder Punkt. Ist die Probe aber nicht im Fokus, erscheint auf dem Quadrantendetektor eine Ellipse, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Orientierung der Ellipse ist abhängig davon, ob die Probe näher oder weiter entfernt ist als die Fokallänge des Sensors. Durch geeignete Auswertung des Detektors können diese Unterschiede ermittelt werden.



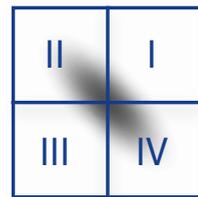
$$(II + IV) - (I + III) < 0$$

sehr nah an der Probe



$$(II + IV) - (I + III) = 0$$

im Fokus



$$(II + IV) - (I + III) > 0$$

weit weg von der Probe

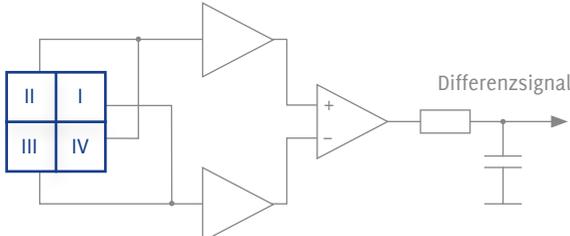


Abbildung 2:

oben: Spotform in
Abhängigkeit von der Entfer-
nung des Objekts vom Fokus;
unten: Blockschaltbild der
Auswerteelektronik des LFS-
Differenzsignals. Grafik: IMMS.

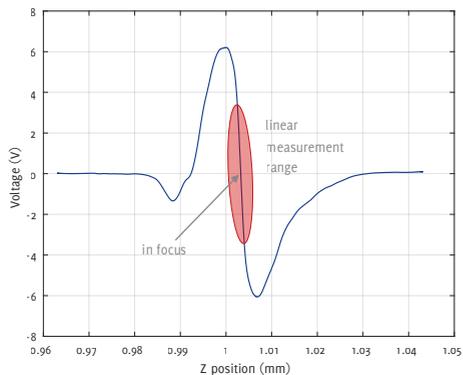


Abbildung 3:

Differenzsignal ermittelt bei Vertikalbewegung bezogen auf die Probe. Der zentrale Nulldurchgang zeigt die Fokusposition.

Diagramm: IMMS.

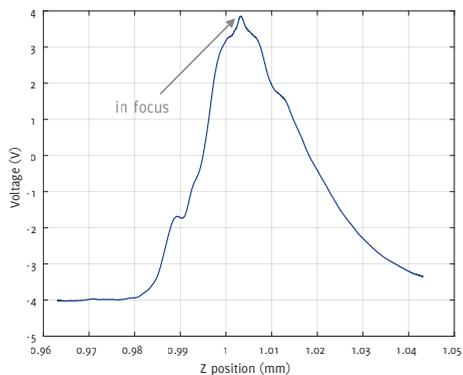


Abbildung 4:

Summensignal, aufgenommen während einer Vertikalbewegung der Probe – Erreichen des Maximums, sobald der Fokus erreicht ist.

Diagramm: IMMS.

Der LFS stellt zwei Messsignale aus der Reflexion des Lasers von der Probe zur Verfügung. Das Differenzsignal wird aus der Differenz der diagonalen Quadranten ermittelt und ist proportional zur Vertikalposition (Abbildung 3) innerhalb des Sensor-Messbereiches. Um den Zusammenhang zwischen Vertikalposition und ermittelter Spannung aus dem Differenzsignal zu charakterisieren, ist eine vertikale Bewegung im Bereich nahe dem Fokus zu realisieren sowie die Probe an eben dieser vertikalen Bewegungsachse auszurichten. Wenn der Abstand der Probe nahe dem Fokus ist, verbleibt die Signalintensität ungefähr konstant.

Zusammen mit dem oben genannten Differenzsignal stellt der LFS auch ein Summensignal aller Quadrantensignale zur Verfügung, was im Blockschaltbild in Abbildung 2 durch einen Austausch des Differenzblocks durch einen Summenblock erreicht wird. Dieses Summensignal gibt einen Eindruck über die Strahlintensität, dargestellt etwa in Abbildung 4. Innerhalb des Messbereiches stellt die Intensitätsspitze den optimalen Fokus dar. Außerhalb der Spitze ist eine Signalreduktion erkennbar, da die Größe des Lichtpunktes die Detektorfläche überschreitet. Entsprechend verringert sich die Intensität bis auf ein verbleibendes Minimum.

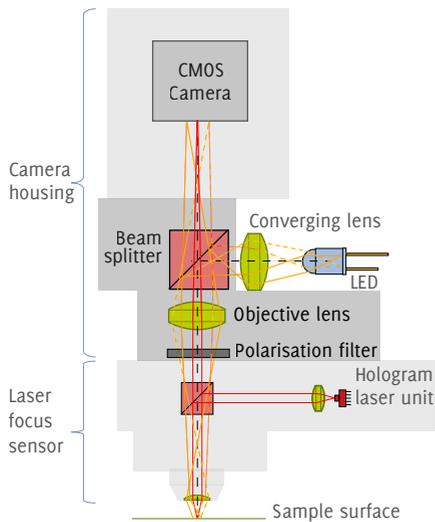


Abbildung 5: Berührungsloses Antastsystem aus LFS und Kameramikroskop. Grafik: IMMS.

Das hier verwendete Kreuzraster besteht aus einem Glas-Substrat mit aufgebrachtem Chrom wie dargestellt in Abbildung 6. Im zugehörigen chemischen Mikrofabrikationsprozess definiert eine Maske, wo die Chromschicht durch Ätzen entfernt wird, was in der physikalischen Ausbildung von Linien und Quadraten resultiert.

In dieser Untersuchung wird der LFS genutzt, um laterale Abstände zwischen den Strukturen eines Kreuzrasters mit 40- μm -Periode zu vermessen. Die Bewegung des Kreuzrasters relativ zum LFS wird durch ein 6D-Nanopositioniersystem realisiert. Dieses Nanopositioniersystem NPS6D200 (dargestellt in Abbildung 7) mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden realisiert mittels elektromagnetischer Direktantriebe einen planaren Bewegungsbereich des Läufers von \varnothing 200 mm. Als Feedbacksystem werden hochpräzise Differenz-Interferometer genutzt. Drei Hubmodule erweitern die Bewegungsfähigkeit des Läufers um drei weitere Bewegungsfreiheitsgrade. Die Stabilität der vertikalen Bewegung wird dabei durch drei aero-statische Planarlager gesichert. Insgesamt wird durch diese Kombination von Technologien und Präzisions-Engineering ein 6D-Positioniersystem realisiert, welches die aktuellen Grenzen von Präzisions-Messungen und -Kalibrierungen zu verschieben vermag.

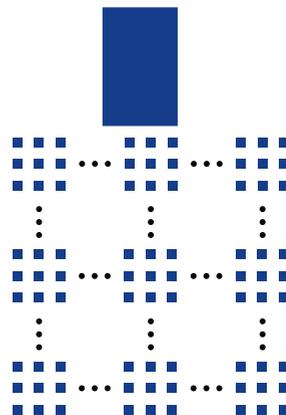


Abbildung 6: Beispiel eines Kreuzrasters, worin die blauen Anteile das Glas-Grundsubstrat und die weißen Anteile die Chromschicht darstellen. Diagramm: IMMS.

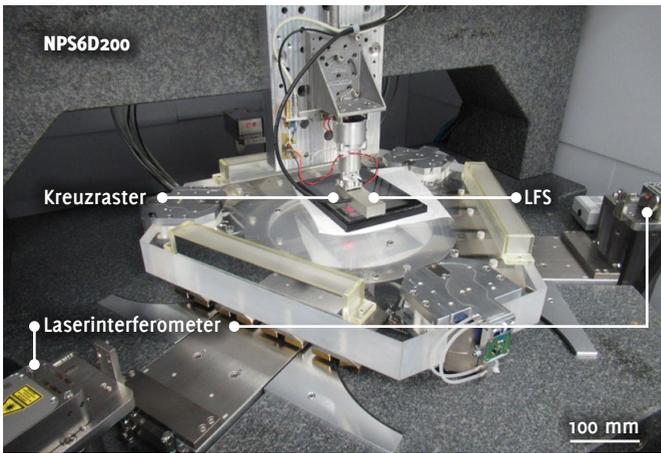
Versuchsbeschreibung

In Versuchen wurde eine CMOS-Kamera mit dem LFS kombiniert, womit Strukturen in der interessierenden Region besser gefunden und dargestellt werden können. Die Kamera ist oberhalb des LFS montiert und verbessert durch zusätzliche Beleuchtung die Bildhelligkeit.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems aus Nanopositioniermaschine und LFS wird als Probe ein Kreuzraster genutzt. Dieses Proben-normal stellt verschiedene Schichten mit annähernd konstantem lateralen

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

Abbildung 7:



Laser-Fokus-Sensor-Baugruppe (LFS) zusammen mit dem Positioniersystem NPS6D200 zur Vermessung inkrementeller Kreuzraster.

Foto: IMMS.

LFS als Sensor zur Kantenerkennung

Aufgrund der unterschiedlichen Materialien des Kreuzrasters – Glas und Chrom – und des Abstands der beiden Schichten unter $1,5 \mu\text{m}$ ergibt sich für das Summensignal des LFS die Form einer Rechteckwelle während linearer Bewegung, wie dargestellt in Abbildung 8. Das Differenzsignal zeigt einige nicht-lineare Übergänge (Peaks in Abbildung 8) an den Kanten, welche für die geplante Kantendetektion nicht sinnvoll nutzbar sind. Folglich ist das Differenzsignal für die laterale Vermessung anhand detektierter Kanten nicht einsetzbar. Aus den Nulldurchgängen der Summen- bzw. Intensitäts-Signale des LFS können jedoch mit den Laserinterferometer-Daten die Kantenpositionen ermittelt werden, womit der LFS als Kantendetektor eingesetzt werden kann.

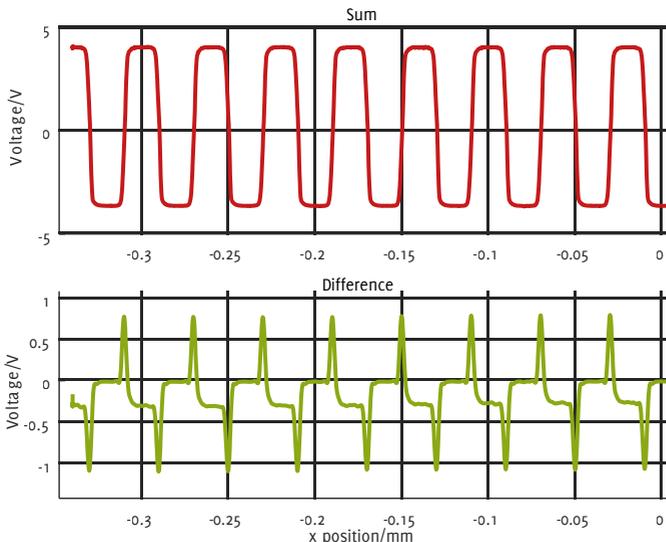


Abbildung 8:

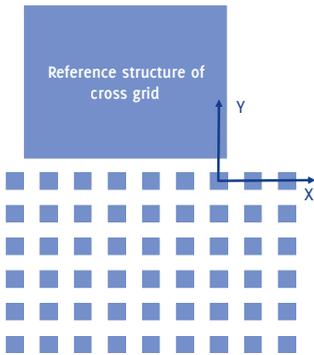
Summen- (Intensität) und Differenzsignal (vertikaler Abstand vom Fokus) während einer Bewegung in Richtung einer der Hauptachsen des Kreuzrasters.

Diagramm: IMMS.

Abbildung 9:

Koordinatensystem zur Messung der Kreuzraster-Abstände.

Diagramm: IMMS.



Vorgehen

Ausgehend vom Koordinatensystem aus Abbildung 9 wird der Abstand zwischen jedem Quadrat des Kreuzrasters jeweils von Mittelpunkt zu Mittelpunkt berechnet. Jeder Quadrat-Mittelpunkt wird aus den jeweiligen Kanten errechnet.

Jeder Messzyklus läuft zwischen Null-Position und -4 mm und wird 10-mal jeweils in X- und Y-Richtung wiederholt. Zur Evaluierung der Reproduzierbarkeit wird diese Prozedur an fünf unterschiedlichen Tagen wiederholt. Eine Brechzahl-Korrektur wurde nicht angewandt. Aus der Instrumentenverzerrung wird anschließend die Standardabweichung des Messsystems ermittelt (Abbildung 10 und 11).

97

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

Instrumentenverzerrung (Instrumental bias – IB)

$IB = \text{Mittelwert (Nominalwert – Referenzwert)}$

- Der Nominalwert ist der theoretische Wert, welcher aus den akkumulierten Kreuzraster-Abständen ermittelt wird.
- Der Referenzwert ist der Quadrat-Mittelpunkt, welcher durch die Laserinterferometer-Werte ermittelt wird.

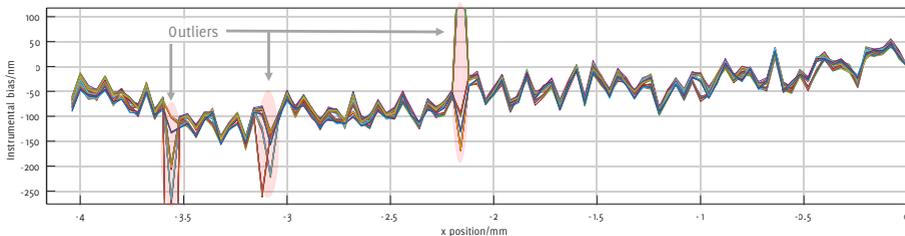


Abbildung 10: Kleine Abweichungen innerhalb der Kreuzraster-Messungen mittels LFS in X-Richtung an 5 unterschiedlichen Tagen – insgesamt 40 Messungen. Ausreißer (Verunreinigungen) wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Diagramm: IMMS.

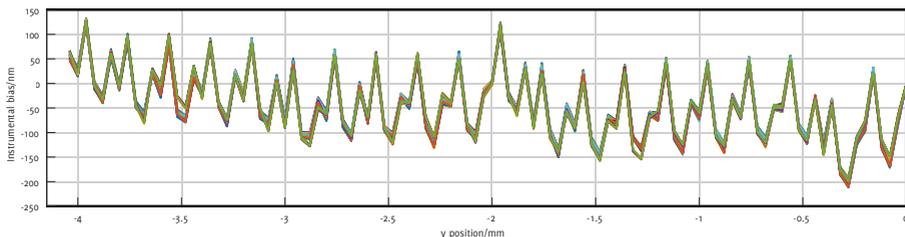


Abbildung 11: Kleine Abweichungen innerhalb der Kreuzraster-Messungen mittels LFS in Y-Richtung an 5 unterschiedlichen Tagen – insgesamt 40 Messungen. Diagramm: IMMS.

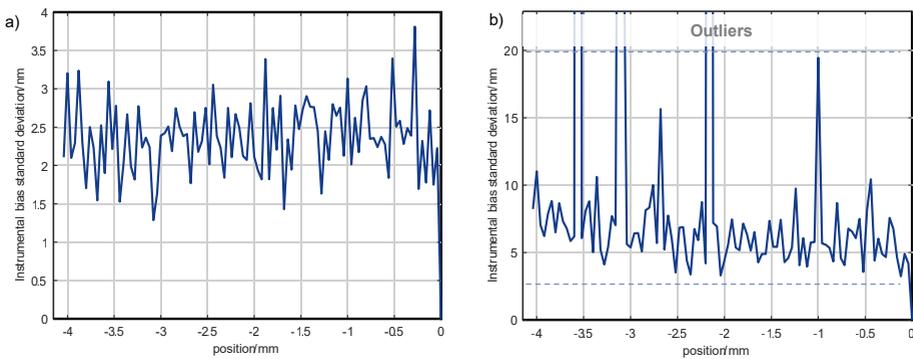


Abbildung 12: Gute Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen (unter Vernachlässigung der Ausreißer) – dargestellt ist das Worst-Case-Szenario:

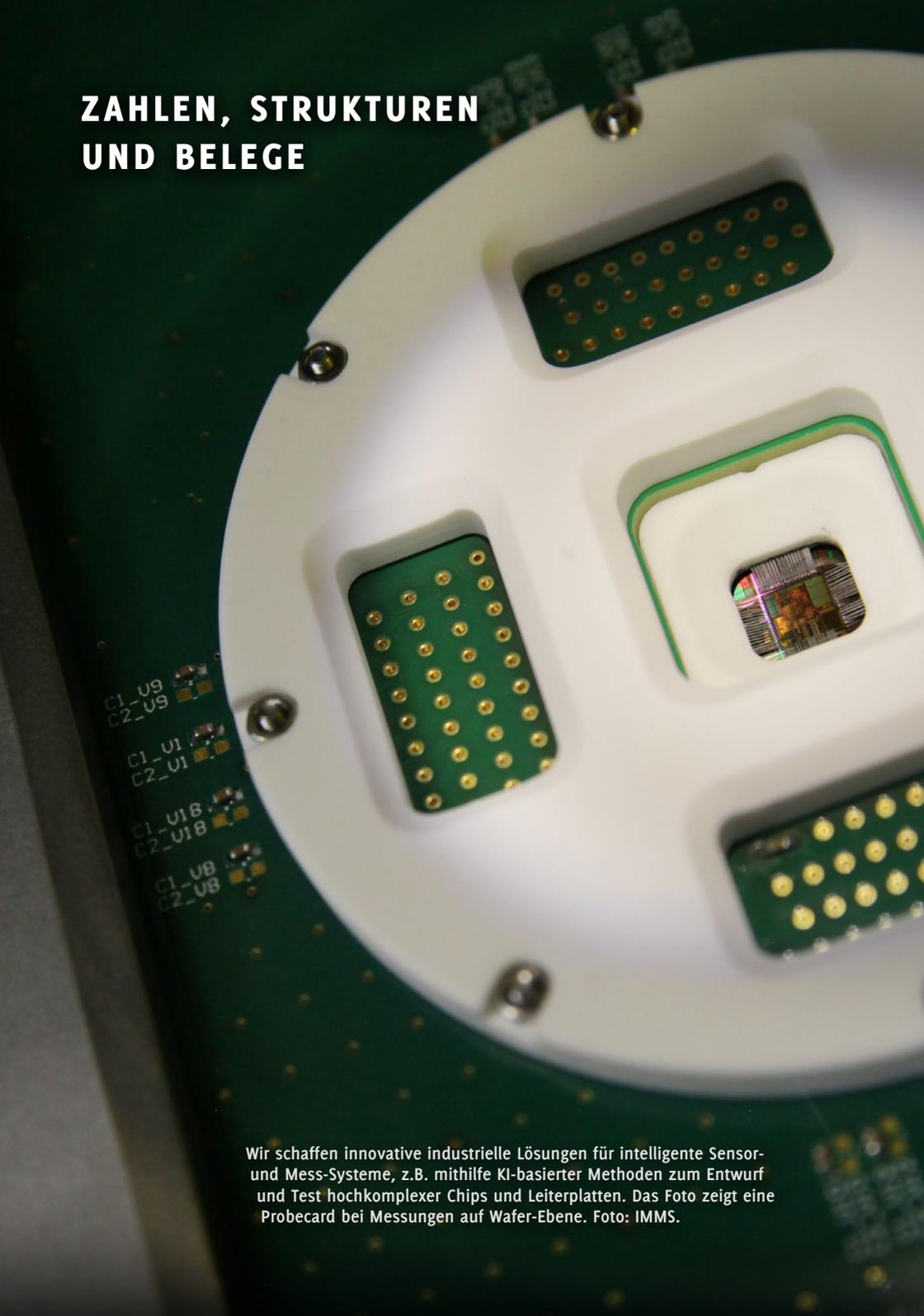
a) Kurzzeit: 10 Messungen (1 Tag); b) Langzeit: 40 Messungen (5 Tage). Diagramm: IMMS.

Ergebnisse

Wie in Abbildung 12a dargestellt, konnten mit dieser Kombination aus LFS und NPS6D200 über einen kurzen Zeitraum Standardabweichungen kleiner 4 nm für die Mittelpunkt-Abstandsmessung über einen Bereich von 4 mm in X- und Y-Richtung erreicht werden. Wie in Abbildung 12b dargestellt, konnten für lange Zeiträume bei normalen Innenraum-Umgebungsbedingungen sowie ohne weitere Umweltkorrekturen kleiner 20 nm Standardabweichung ermittelt werden. Höhenmessungen sind mit dem LFS gleichzeitig möglich, die unterschiedlichen Reflexivitäten der Kreuzraster-Materialien reduzieren aber die Genauigkeit. Der LFS ist sehr sensibel gegenüber Verunreinigungen, welche die Ausreißer der Langzeit-Standardabweichung (Abbildung 12b) mit der Instrumentenverzerrung für die gleiche Konfiguration (Abbildung 10) kombinieren. Diese Ausreißer wurden entsprechend nicht mit ausgewertet. Diese Resultate zeigen, dass ein LFS zur lateralen Distanzmessung genutzt werden kann und somit eine Alternative zu optischen Mikroskopen oder Linear-Encodern zur Charakterisierung von Nanopositioniersystemen darstellt.

Kontakt: Davi Anders Brasil, M.Sc., davi-anders.brasil@imms.de

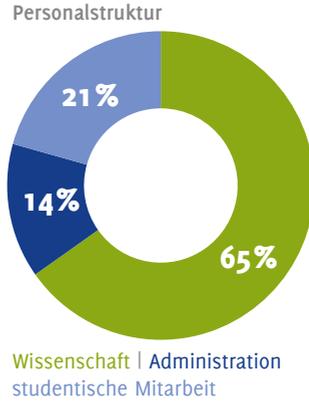
ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE



Wir schaffen innovative industrielle Lösungen für intelligente Sensor- und Mess-Systeme, z.B. mithilfe KI-basierter Methoden zum Entwurf und Test hochkomplexer Chips und Leiterplatten. Das Foto zeigt eine Probecard bei Messungen auf Wafer-Ebene. Foto: IMMS.

Das IMMS in Zahlen

Am IMMS waren zum Ende des Geschäftsjahres 2023 92 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** verschiedenster Nationalitäten und Fachrichtungen tätig.¹ Hiervon waren 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 19 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 86 % aller Beschäftigten. Darüber hinaus waren fünf von 13 der Administration zugeordneten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter direkt wissenschaftsunterstützend eingesetzt.



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

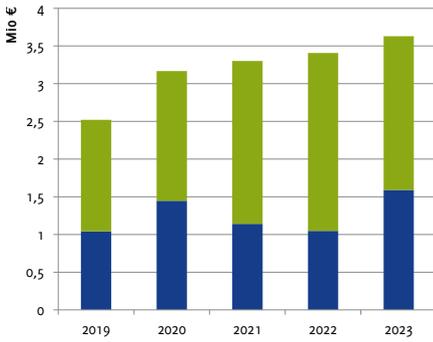
Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr 2023 am IMMS insgesamt 40 Studentinnen und Studenten betreut, darunter sieben Bachelorarbeiten und drei Masterarbeiten. Neun Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben.

Trotz des immer herausfordernder werdenden Wettbewerbs um die hervorragenden Köpfe konnten im Jahr 2023 noch weitere Forscherinnen und Forscher für die Mitarbeit im IMMS gewonnen werden. Trotz vielfältiger Aktivitäten zur Anwerbung neuer Talente konnte jedoch der geplante Bedarf an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nicht vollständig gedeckt werden.

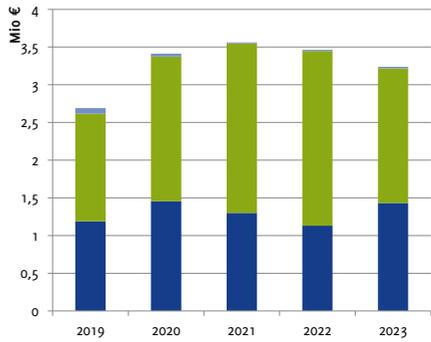
Das Geschäftsjahr war wie in den Vorjahren von der Durchführung öffentlicher Forschungsprojekte und durch den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie (industrielle Auftragsforschung und Dienstleistungen) geprägt. Das Wachstum der Vorjahre konnte nahtlos fortgesetzt werden, so sind die **Drittmittelträge** (Projekt-erträge) 2023 gegenüber dem Vorjahr um insgesamt rd. 6 % gestiegen. Hier wirkten sich besonders die sehr hohen Industrieerträge positiv aus (+52 %). Aufgrund der begrenzten Personalkapazität standen deshalb weniger Arbeitsstunden für öffentlich geförderte Projekte (Förderprojekte) zur Verfügung. Dies führte zu einem Rückgang der Erträge aus Förderprojekten (-14 %). Es wurden im Geschäftsjahr zwei öffentlich

¹ Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2023 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit vorherigen Berichten ist daher nur bedingt möglich.

Projekterträge
 Industrieprojekte / Förderprojekte



Projekteinnahmen:
 Industrieprojekte / Förderprojekte / Sonstige



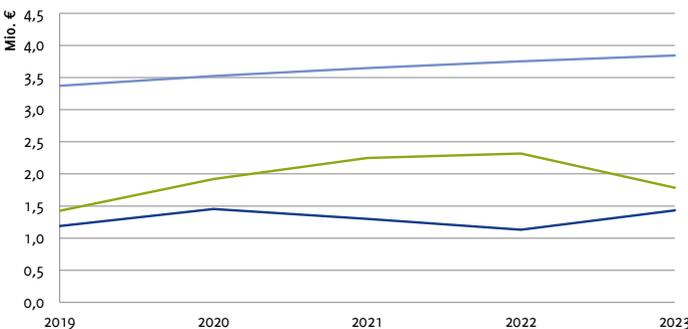
- 101**
- > Integrierte Sensorsysteme
 - > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - > Mag6D-nm-Direktantriebe
 - > Inhalt
 - * Förderung

geförderte Forschungsprojekte begonnen. Dagegen waren die industrielle Auftragsforschung und Dienstleistungen unverändert durch eine Vielzahl vom Umfang her kleiner Aufträge der kleinen und mittleren Unternehmen Thüringens geprägt (rd. 34%).

Die **Drittmittleinnahmen** (Projekteinnahmen) lagen insgesamt rd. 7% unter dem Vorjahreswert. Die Verteilung der gesamten Projekteinnahmen auf Einnahmen aus Förderprojekten und Einnahmen aus der industriellen Auftragsforschung und Dienstleistungen entspricht – wie im Vorjahr – im Wesentlichen auch der Verteilung der Erträge.

Die vom Freistaat Thüringen geförderten **internen Forschungsgruppen** haben auch im Geschäftsjahr 2023 wesentliche Forschungsthemen für die strategische Weiterentwicklung des Instituts verfolgt. Die finanzielle Grundlage für die Forschungstätigkeit des IMMS bildete auch 2023 die **institutionelle Förderung** des Freistaats Thüringen. Diese lag im Geschäftsjahr 2023 auf dem Niveau des Vorjahres. Die allgemeinen Kostensteigerungen konnten jedoch durch die gestiegenen Industrieerträge kompensiert werden.

www.imms.de/
 funding



Finanzierungssäulen

Grundfinanzierung
 (institutionelle Förderung)

Projektförderung

Industrieeinnahmen



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

www.imms.de/org

Aufsichtsrat*

- **Vorsitzender:** Herr ¹Sebastian STARK, Referatsleiter Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau ¹Dr. Mandy KANDLER, Stellvertretende Referatsleiterin Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- Herr Dr. Gabriel KITTLER, CEO X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, CEO X-FAB MEMS Foundry GmbH, CEO X-FAB Global Services GmbH, Kuratoriumsmitglied Fraunhofer IISB Erlangen
- Herr Andreas ROHWER, Referatsleiter Thüringer Finanzministerium
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe SATTLER, Präsident Technische Universität Ilmenau, Mitglied Verwaltungsrat TÜV Thüringen e.V.
- Herr Prof. Dr. rer. nat. Ingolf VOIGT, Stellvertretender Institutsleiter Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
- Frau Cathrin WILHELM, CEO Buchheim GmbH, CEO BillCapital GmbH, Vice Chair Business Unit Defense ASD Europe, Kuratoriumsmitglied Fraunhofer IDMT

* zum 31.12.2023

- **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, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät II Department für Informatik, Abteilung Eingebettete Hardware-/Software-Systeme, Vorstandsvorsitzender edacentrum e.V.
- 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
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› Mag6D-nm-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
org

* zum 31.12.2023

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
- Elektromagnetisches Feld, Vorlesung
- Technische Elektrodynamik, Vorlesung
- Supraleitung in der Informationstechnik, Vorlesung
- Projektseminar TET

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

Veranstaltungen

Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

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

- 21.02.2023 – **KI-Stammtisch** Energiemanagement, *Vortrag, Organisation, Moderation*, Ilmenau
- 26.02.2023 – **TuZ 2023** 35. ITG / GMM / GI-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, Erfurt
- 12.03.2023 – **16th Photonics Workshop**, *Vortrag*, Kopaonik, Serbien
- 22.03.2023 – **KI-Frühling 2023** KI in der Produktion – Sensorik, Daten, Anwendungen, 2 *Vorträge, Organisation*, Online
- 22.03.2023 – **IID 2023** Industrie-Innovationsdialog: Neue Pfade in der Mikroelektronik – Diversifizierung für mehr Resilienz, *Vortrag*, Erfurt
- 26.04.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 1: Cloud und IT-Sicherheit für den Mittelstand, *Vortrag, Organisation*, Erfurt
- 27.04.2023 – **Experimentierfelder-Konferenz 2023** Konferenz des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) zu 14 Experimentierfeldern zur Transformation der Digitalisierung im Agrarbereich, *Vortrag*, Berlin
- 08.05.2023 – **edaWorkshop23**, *Vortrag*, Hannover
- 09.05.2023 – **CPS-IoT Week Workshops '23**, *Vortrag*, San Antonio, TX, USA

Jahresbericht
© IMMS 2023

31.05.2023 – **ENC 2023** European Navigation Conference, *Vortrag*, Noordwijk, Zuid-Holland

07.06.2023 – **IID ISAS 2023** „Industrie-Innovationsdialog: Intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme“, *Vortrag, Messestand mit Demonstratoren*, Ichtershausen

12.06.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 2: „Digitale Geschäftsmodelle – Methodische Entwicklung und Praxisbeispiele“, *Vortrag, Organisation*, Saalfeld

14.06.2023 – **5. Thüringer Transformations-Werkstatt Automotive**, Thema KI, *Vortrag, Messestand mit Demonstrator*, Ilmenau

03.07.2023 – **SMACD 2023** International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design, *3 Vorträge, Funchal/Madeira, Portugal*

09.07.2023 – **IFAC 2023** The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control, *Vortrag*, Yokohama, Japan

18.07.2023 – **SAS 2023** IEEE Sensors Applications Symposium, *Vortrag*, Ottawa, Canada

23.08.2023 – **Thüringer Haselnusstag 2023** Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau, *Vortrag*, Erfurt

24.08.2023 – **Industrieforum Smarte Fertigung** – Bildverarbeitung und KI-basierte Datenauswertung, *Vortrag, Organisation*, Wutha-Farnroda

04.09.2023 – **ISC 2023** 60th Ilmenau Scientific Colloquium Engineering for a Changing World, *Vortrag*, Ilmenau

04.09.2023 – **FGSN 2023** 20. Fachgespräch Sensornetze, *Vortrag*, Potsdam

07.09.2023 – **IEEE IDAACS 2023** 12 th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, *Vortrag*, Dortmund / hybrid

14.09.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 3: Fachkräftegewinnung & Digitalisierung vereinen: Mitarbeiter finden, binden & effizient planen, *Vortrag, Organisation*, Ilmenau

26.09.2023 – **CIS-Workshop 2023** Workshop Simulation & Design am CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik, *2 Vorträge*, Erfurt

17.10.2023 – **elmug4future 2023** Technologiekonferenz „Sensorsysteme der Zukunft – vom Messwert zur Information“, *Vortrag, Messestand mit Demonstrator*, Friedrichroda

23.10.2023 – **Netzwerktreffen** des Lean-Production-Netzwerks Thüringen, *Vortrag, Demonstratoren*, Ilmenau

- 23.10.2023 – **MST 2023** MikroSystemTechnik-Kongress 2023, *Vortrag*, Dresden
- 06.11.2023 – **MetroAgriFor 2023** International IEEE Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, *1 Vortrag, 1 Fachposter*, Pisa, Italy
- 14.11.2023 – **Industrieforum Smarte Fertigung** – Automatisierung in der Produktion, *Vortrag, Organisation*, Seebach
- 20.11.2023 – **Digitalgipfel der Bundesregierung**, *Vortrag, Messestand mit Demonstrator*, Jena
- 28.11.2023 – **euspen SIG 2023** euspen Special Interest Group Meeting: Micro/Nano Manufacturing, *Fachposter*, Ilmenau
- 05.12.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 4: Sensorik / Smarte Sensorsysteme, *3 Vorträge, Organisation, Moderation, Demonstrator*, Ilmenau

106 ○

> Integrierte
Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Workshop-Angebote / IMMS als Gastgeber / Veranstalter / Mitinitiator

- 21.02.2023 – **KI-Stammtisch** Energiemanagement, *Vortrag, Organisation, Moderation*, Ilmenau
- 22.03.2023 – **KI-Frühling 2023** KI in der Produktion – Sensorik, Daten, Anwendungen, *2 Vorträge, Organisation*, Online
- 26.04.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 1: Cloud und IT-Sicherheit für den Mittelstand, *Vortrag, Organisation*, Erfurt
- 27.04.2023 – **Girls' Day 2023**, Veranstaltung am IMMS mit *Programmierworkshop, Lötstationen, Experimenten und Demonstratoren*, IMMS Ilmenau
- 12.06.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 2: „Digitale Geschäftsmodelle – Methodische Entwicklung und Praxisbeispiele“, *Vortrag, Organisation*, Saalfeld
- 23.06.2023 – **Lange Nacht der Wissenschaften Erfurt**, Veranstaltung am IMMS mit *Demonstratoren, Führungen und Mitmachangeboten*, IMMS Erfurt
- 01.07.2023 – **Ilmenauer Wissenschaftsnacht**, Veranstaltung am IMMS mit *Demonstratoren, Führungen und Mitmachangeboten*, IMMS Ilmenau
- 24.08.2023 – **Industrieforum Smarte Fertigung** – Bildverarbeitung und KI-basierte Datenauswertung, *Vortrag, Organisation*, Wutha-Farnroda
- 14.09.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 3: Fachkräftegewinnung & Digitalisierung vereinen: Mitarbeiter finden, binden & effizient planen, *Vortrag, Organisation*, Ilmenau

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

05.12.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 4: Sensorik /
Smarte Sensorsysteme, 3 Vorträge, Organisation, Moderation, Demonstrator,
Ilmenau

Messen und Ausstellungen

31.03.2023 – **KI-Frühling 2023** Abschlussveranstaltung „KI live erleben“, Messestand
mit Demonstrator, Erfurt

24.04.2023 – **ETD 2023** Erfurter Technologiedialog, Messestand mit Demonstrator,
Erfurt

07.06.2023 – **IID ISAS 2023** „Industrie-Innovationsdialog: Intelligente Signalanalyse-
und Assistenzsysteme“, Vortrag, Messestand mit Demonstratoren, Ichtershausen

08.06.2023 – **Karrieremesse Schmalkalden** Kontaktbörse für akademische Berufs-
orientierung, Messestand mit Demonstrator, Schmalkalden

14.06.2023 – **5. Thüringer Transformations-Werkstatt Automotive**, Thema KI, Vortrag,
Messestand mit Demonstrator, Ilmenau

29.06.2023 – **InnoCON Thüringen 2023** Hochtechnologie als Zukunftsfaktor, inno-
vationspolitische Leitveranstaltung des Freistaats Thüringen, 2 Messestände mit
Demonstratoren, Erfurt

27.09.2023 – **Thüringer Maschinenbautag**, Messestand mit Demonstrator, Erfurt

17.10.2023 – **elmug4future 2023** Technologiekonferenz „Sensorsysteme der Zu-
kunft – vom Messwert zur Information“, Vortrag, Messestand mit Demonstrator,
Friedrichroda

25.10.2023 – **inova 2023** Karriereforum an der TU Ilmenau, Messestand mit Demons-
trator, Ilmenau

16.11.2023 – **Praxis trifft Campus** Karrieremesse der Ernst-Abbe-Hochschule Jena,
Messestand mit Demonstrator, Jena

20.11.2023 – **Digitalgipfel der Bundesregierung**, Vortrag, Messestand mit Demonstra-
tor, Jena

22.11.2023 – **Thüringer KI-Forum**, Messestand mit Demonstrator, Erfurt

05.12.2023 – **Digitalisierung im Mittelstand 2023** Thementage, Teil 4: Sensorik /
Smarte Sensorsysteme, 3 Vorträge, Organisation, Moderation, Demonstrator,
Ilmenau

Begutachtete Veröffentlichungen

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

A Modular Platform to Build Task Specific IoT Network Solutions for Agriculture and Forestry, Silvia KRUG^{1,2}. Marco GOETZE¹. Sören SCHNEIDER¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), Pisa, Italy, November 06-08, 2023, pp. 820-825, DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424104>*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University Sundsvall, Sweden.

Plot-specific drought stress simulation in vineyards using a microclimatic monitoring system in combination with a radiation and water balance model, Rikard GRAß¹. Hannah BOEDEKER¹. Marco HOFMANN². Martin SCHIECK³. Silvia KRUG⁴. Tino HUTSCHENREUTHER⁴. Hannes MOLLENHAUER¹. *2023 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), Pisa, Italy, November 06-08, 2023, pp. 343-347, DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424113>*.

¹Department Monitoring and Exploration Technologies, Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Leipzig, Germany. ²Department of General and Organic Viticulture, Hochschule Geisenheim University, Geisenheim, Germany. ³Information Systems Institute, Leipzig University Leipzig, Germany. ⁴IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Weighted Pruning with Filter Search to Deploy DNN Models on Microcontrollers, Rick PANDEY¹. Sebastian UZIEL¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Silvia KRUG^{1,2}. *2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, September 07-09, 2023, pp. 1077-1082, DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348867>*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden.

Robust Adaptive Tracking Control for Highly Dynamic Nanoprecision Motion Systems, Alex S. HUAMAN¹. Johann REGER². *in Engineering for a Changing World: Proceedings; 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 04-08, 2023, Ilmenau. DOI: doi.org/10.22032/dbt.58700*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Control Engineering Group, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, Germany.

Towards Multi-hop BLE-Based Communication Using a Custom Routing Approach, Florian JUNG¹. Silvia KRUG¹. *Proceedings of the 20th GI/ITG KuVS Fachgespräch Sensornetze (FGSN 2023), Potsdam, Germany, September 04, 2023, DOI: <https://doi.org/10.26127/BTUOpen-6637>.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

A Circuit Designer's Perspective to MOSFET Behaviour: Common Questions and Practical Insights, Ralf SOMMER^{1,3}. Carsten Thomas GATERMANN². Felix VIERLING¹. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 8, no. 4, pp. 41-59 (2023), DOI: [dx.doi.org/10.25046/aj080406](https://doi.org/10.25046/aj080406)* ¹Technische Universität Ilmenau, Electrical Engineering and Information Technology, Electronic Circuits and Systems Group, Ilmenau, 98693, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Electrical Engineering and Information Technology, Power Systems Group, Ilmenau, 98693, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Optimizing the IoT Performance: A Case Study on Pruning a Distributed CNN, Eiraj SAQIB¹. Isaac Sánchez LEAL¹. Irida SHALLARI¹. Axel JANTSCH². Silvia KRUG^{3,1}. Mattias O'NILS¹. *2023 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Ottawa, ON, Canada, July 18-20, 2023, pp. 1-6, DOI: doi.org/10.1109/SAS58821.2023.10254054.* ¹Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden. ²TU Wien, Vienna, Austria. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Robust Adaptive Tracking Control of a 3D Vertical Motion System for Nanometer Precision Applications, Alex S. HUAMAN¹. Johann REGER². *22nd IFAC World Congress, Yokohama, Japan, July 9-14, 2023, IFAC-PapersOnLine, Volume 56, Issue 2, 2023, Pages 5332-5339, ISSN 2405-8963, DOI: doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.177.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Control Engineering Group, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau, P.O. Box 10-05-65, D-98684, Ilmenau, Germany.

SHUT OFF! – Hybrid BICMOS Logic for Power-Efficient High Speed Circuits, Christoph W. WAGNER¹. Niklas BRÄUNLICH¹. Kevin E. DRENKHAHN². Georg GLÄSER³. *2023 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Funchal, Portugal, July 03-05, 2023, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD58065.2023.10192217.* ¹Technische Universität Ilmenau, Institute for Information Technology, Ilmenau, Germany. ²Fraunhofer IIS, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, Ilmenau, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

109 
> Integrierte Sensornetze
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> Mag6D-nm-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
publ

Jahresbericht
© IMMS 2023

Hot Fuzz: Assisting verification by fuzz testing microelectronic hardware, Henning SIEMEN¹. Jonas LIENKE¹. Georg GLÄSER¹. *2023 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Funchal, Portugal, July 03-05, 2023, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD58065.2023.10192176.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige

GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Under Cover: On-FPGA Coverage Monitoring by Netlist Instrumentation, Manuel JIRSAK¹. Henning SIEMEN¹. Jonas LIENKE¹. Martin GRABMANN¹. Eric SCHÄFER¹. Georg GLÄSER¹. *2023 19th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Funchal, Portugal, July 03-05, 2023, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD58065.2023.10192205.* ¹IMMS Insti-

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

LO and Calibration Signal Distribution in a Multi-Antenna Satellite Navigation Receiver, Uwe STEHR¹. Syed N. HASNAIN¹. Björn BIESKE². Marius BRACHVOGEL³. Michael MEURER^{3,4}. Matthias A. HEIN¹. *In Proceedings of the European Navigation Conference 2023, Noordwijk, Zuid-Holland, May 31 – June 2, 2023, Eng. Proc. 2023, 54, 23.*

DOI: <https://doi.org/10.3390/ENC2023-15447>. ¹Thuringian Center of Innovation in Mobility, RF &

Microwave Research Group, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und

Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³Chair of Navigation, RWTH

Aachen University, Aachen, Germany. ⁴Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR),

Oberpfaffenhofen, Germany.

Tip-based nanofabrication below 40 nm combined with a nanopositioning machine with a movement range of \varnothing 100 mm, Jaqueline STAUFFENBERG¹. Michael REIBE¹.

Anja KRÖTSCHL². Christoph REUTER². Ingo ORTLEPP^{1,2}. Denis DONTSOV³. Steffen

HESSE⁴. Ivo W. RANGELOW^{1,5}. Steffen STREHLE². Eberhard MANSKE¹. *Micro and*

Nano Engineering, Volume 19, 2023, 100201, ISSN 2590-0072, DOI: doi.org/10.1016/j.

mne.2023.100201. ¹Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Production and Precision

Measurement Technology Group, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, Ilmenau 98693, Thuringia,

Germany. ²Institute of Micro- and Nanotechnologies, Microsystems Technology Group, Technische Universität Ilmenau,

Max-Planck-Ring 12, Ilmenau 98693, Thuringia, Germany. ³SIOS Meßtechnik GmbH, Am Vogelherd 46, Ilmenau 98693,

Thuringia, Germany. ⁴IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau,

Germany. ⁵nano analytik GmbH, Ehrenbergstraße 3, Ilmenau 98693, Thuringia, Germany.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-

Direktantriebe

* Förderung

> Inhalt

www.imms.de/

publ

Jahresbericht

Waist Tightening of CNNs: A Case study on Tiny YOLOv3 for Distributed IoT Implementations, Isaac SÁNCHEZ LEAL¹. Eiraj SAQIB¹. Irida SHALLARI¹. Axel JANTSCH². Silvia KRUG^{1,3}. Mattias O'NILS¹. *In Proceedings of Cyber-Physical Systems and Internet of Things Week 2023 (CPS-IoT Week ,23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, May 9-12, 2023, pp. 241-246, DOI: <https://doi.org/10.1145/3576914.3587518>*. ¹Mid Sweden University Sundsvall, Sweden. ²TU Wien Vienna, Austria. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Towards Deploying DNN Models on Edge for Predictive Maintenance Applications, Rick PANDEY¹. Sebastian UZIEL¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Silvia KRUG^{1,2}. *Electronics 2023, 12(3), 639; DOI: doi.org/10.3390/electronics12030639*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²Department of Computer and Electrical Engineering, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

Vortrag und Posterpräsentation

Unconventional, lateral measurements with laser focus sensors for nanopositioning stages, Davi Anders BRASIL¹. Michael KATZSCHMANN¹. Steffen HESSE¹. Ludwig HERZOG¹. T. FRÖHLICH². T. KISSINGER². *euspen Special Interest Group Meeting, „Micro/ Nano Manufacturing“, 28. – 29. November 2023, Ilmenau, Germany*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Technische Universität Ilmenau, Germany.

Mit smarten Sensorsystemen und KI zu nachhaltigerer Produktion, Wolfram KATTANEK¹. *Digital-Gipfel 2023, 20. November 2023, Jena*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

KODIAK: Components and modules for improved optical diagnostics, Michael SCHOLLES¹. Nicole ISSERSTEDT-JOHN². Dirk KUHLMIEIER³. Martin JAHN⁴. Martin REUTER⁵. Benjamin SAFT⁶. Eric SCHÄFER⁶. Mirjam SKADELL⁷. Alexander ZIMMER⁷. Ana LOPES⁸. *MikroSystemTechnik Kongress 2023, 23.-25. Oktober 2023, Dresden*.

¹Fraunhofer-Institut Für Photonische Mikrosysteme IPMS & Fraunhofer IPMS, Germany. ²Microfluidic ChipShop, Germany.

³Fraunhofer Institute for Cell Therapy and Immunology, Germany. ⁴CIS Forschungsinstitut für Mikrosensorik, Germany.

⁵LUCAS Instruments GmbH, Germany. ⁶IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ⁷X-FAB Global Services GmbH, Germany.

www.imms.de/
publ

Jahresbericht

Edge KI Systeme für die vorausschauende Instandhaltung, Sebastian UZIEL¹.

elmug4future, Technologiekonferenz, 17.-18. Oktober 2023, Friedrichroda, Thüringen.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Artificially Intelligent EDA, Georg GLÄSER¹. *CiS-Workshop „Simulation und Design“*,

26. September 2023, Erfurt, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme

gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Vibrometry in the Field of MEMS – Application Examples from Stress to Quality

Factor Identification, Steffen Michael¹. *CiS-Workshop „Simulation und Design“*, 26.

September 2023, Erfurt, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemein-

nützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Einbau und Nutzung von Bodenfeuchtesensoren für eine gezielte Bewässerungs-

steuerung, Silvia KRUG¹. Falk EISENREICH¹. *Thüringer Haselnuss-Tag 2023, 23. August*

2023, Erfurt. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße

27, 98693 Ilmenau, Germany.

Intelligentes Design: KI für EDA?, Georg GLÄSER¹. *edaWorkshop23, 8.-9. Mai 2023,*

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

Ilmenau, Germany.

Frostisikoerkennung mittels Knospenüberwachung im Obstbau, Silvia KRUG¹.

Experimentierfelder-Konferenz 2023, 27. – 28. April 2023, Berlin. ¹IMMS Institut für Mikroelek-

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

A compact pump-probe optically pumped magnetometer system, Theo SCHOLTES¹.

Jannis GRIXA¹. Jakob HAMPEL². Andreas CHWALA¹. Frank BAUER¹. Ronny STOLZ¹. *16th*

Photonics Workshop, 12th-15th March 2023, Kopaonik, Serbien. ¹Leibniz IPHT, Albert-

Einstein-Strasse 9, 07745 Jena, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige

GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Messumgebung für Lebensdauertests basierend auf dem Konzept der universellen Test-Chips (UTC), Björn BIESKE¹. Ingo GRYL¹. Pierre WENKE². Martin JÄGER³. Jörg STEINECKE². Xiao LIU². 35. ITG/GI/GMM-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2023), 26.-28. Februar 2023, Erfurt, Germany.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt, Germany. ³X-FAB Global Services GmbH, Erfurt, Germany.

Experimentierfeld zur datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft, Silvia KRUG¹. *Thüringer Obstbautag, 18. Januar 2023, Erfurt.* ¹IMMS

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

Fachartikel in Zeitschriften

Validierung KI-basierter Simulationsmethoden im Chip-Entwurf, Testbench in Hardware, Tom REINHOLD¹. *Elektronik, 25.2023, 29. November 2023, Seite 60-64, ePaper: <https://wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/ELE?catalogName=ELE2325D>.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Automatisiertes Testen mikroelektronischer Schaltungen – Fuzzing findet Bugs in Hardware, Henning SIEMEN¹. Jonas LIENKE¹. Georg GLÄSER¹. *Elektronik, 21.2023, 18. Oktober 2023, Seite 64 – 67, ePaper: <https://wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/ELE?catalogName=ELE2321D>.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

IC-Entwicklung: Effizientere Simulation mit KI-basierter Modellfehlerschätzung, Henning SIEMEN¹. Martin GRABMANN¹. Eric SCHÄFER¹. Georg GLÄSER¹. *Elektronik, 17-18/2023, 23. August 2023, Seite 66-69. ePaper: <https://wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/ELE?catalogName=ELE2317D>.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Vertikale Nanopositionierung mit bis zu 25 mm Verfahrenweg – Hubmodule für die hochgenaue Positionierung im Raum, Stephan GORGES¹. Steffen HESSE¹. Ludwig HERZOG¹. *Konstruktion (2023), 07-08, Sonderteil Antriebstechnik, Seite 28 – 31, VDI Fachmedien, ISSN 0720-5953, e-paper.vdi-fachmedien.de/konstruktion/2023.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany.

Characterizing Dynamics of MEMS Devices on Wafer Level Using Optical Measurement Techniques, Sebastian GIESSMANN¹. Steffen MICHAEL². Eric LAWRENCE³. Dr. Heinrich STEGER⁴. *Commercial Micro Manufacturing International Magazine (CMM Magazine)*, 08-2023, VOL 16 NO. 3, pp. 30-39. ¹MPI Corporation. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, 98693 Ilmenau, Germany. ³Polytec, Inc. ⁴Polytec GmbH.

Offengelegte Patente

Verfahren zum Erweitern und Verwenden eines Modells zum Simulieren einer elektronischen Schaltung, Georg GLÄSER. Martin GRABMANN. DE 10 2021 126 108 A1.

Erteilte Patente

Schaltungsanordnung zur Bereitstellung der Ladeenergie für einen Pegelwechsel auf einem Signalbus, Verfahren zur Kalibrierung und Signalübertragungssystem, Benjamin SAFT. Georg GLÄSER. DE 10 2016 119 927 B4.

Vorrichtung und Verfahren zur Analyse biologischer, chemischer und biochemischer Substanzen, Alexander HOFMANN. Andre JÄGER. Balazs NEMETH. Holger PLESS. Kristin EICHELKRAUT. DE 10 2018 218 122 B4.

* Förderung

- Das Projekt **Waldmonitor** wird vom Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) über den Projektträger Forschungszentrum Jülich (PTJ) unter dem Kennzeichen **03WIR3607A** gefördert.



- Das IMMS bringt sich in das **Leistungszentrum InSignA** ein, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft des Freistaats Thüringen gefördert wird.



- Das Projekt **EdgeCam** wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **KK5048101GR0** gefördert.



- Das Projekt **ViroGraph** wurde 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**.



- Die Arbeiten des IMMS als „Modellfabrik Smarte Sensorysysteme“ werden im „**Mittelstand-Digital-Zentrum Ilmenau**“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Kennzeichen **01MF21008C** gefördert.



– Die Förderung des Vorhabens **MIRO** erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Bekanntmachung über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern als Zukunftsbetriebe und Zukunftsregionen der Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie in vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten mit dem Förderkennzeichen **2822ZR0005**.

Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

116

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

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

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

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

Freistaat
Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition. 

– 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 Forschungsgruppe **SenPH** wird durch den Freistaat Thüringen gefördert.

– Die interne Forschungsgruppe **NextGenPos** wird durch den Freistaat Thüringen 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.

REACT-EU – Als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie finanziert.
EFRE 
EUROPA FÜR THÜRINGEN
EUROPÄISCHER FONDS FÜR REGIONALE ENTWICKLUNG



EUROPÄISCHE UNION

– 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.

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

Jahresbericht

© IMMS 2023

ADC Analog-Digital-Konverter

AHB Advanced High-Performance Bus

ALU Arithmetisch-logische Einheit

AMS Analog-Mixed-Signal

API Application Programming Interface

ASIC Application-specific Integrated Circuit

ATE Automatic Test Equipment

CLIA Chemilumineszenz-Immunoassay

CMOS Complementary metal-oxide Semiconductor

CNP Charge Neutrality Point

CRS Zytokin-Freisetzungssyndrom

CSA Channel Switch Announcement

DCR Darc Cout Rate

DUT Device Under Test

EDA Electronic Design Automation

FPGA Field Programmable Gate Array

GFET Graphen-Feldeffekttransistor

GPIO General Purpose Input/Output

HMI Human-Machine Interface

I²C Inter-Integrated Circuit

IB Instrumental Bias

IC Integrated Circuit

IoT Internet of Things

ISFET Ionensensitiver Feldeffekttransistor

KI Künstliche Intelligenz

KMU kleine und mittlere Unternehmen

LDO Low-Drop-Spannungsregler

LDS Local Discovery Server

LFS Laserfokussensor

LFA Lateral Flow Assay

LoRaWAN Low-Power-Weitbereichsfunk-
technologie

MOSFET Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekt-
transistor

OPC UA Open Plattform Communications
Unified Architecture

PCB Printed Circuit Board

PCIe Peripheral Component Interconnect
Express

PCR Polymerase Chain Reaction

PMT Photomultiplier Tube

QSPI Quad SPI

RISC-V Reduced-Instruction-Set-Computers-
Befehlsarchitektur

RT-LAMP Reverse Transcription Loop-mediated
Isothermal Amplification

RFID Radio-Frequency Identification

SPAD Single-Photon Avalanche Diode

SPI Serial Peripheral Interface

UART Universal Asynchronous Receiver
Transmitter

ULP Ultra Low Power

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung



Herausgeber / Anbieterkennzeichnung

**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/imprint

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 für die anonymisierte Analyse und die Verbesserung unserer Webseite. Die Open-Source-Software Matomo folgt den geltenden Datenschutzbestimmungen und ist nach

den Empfehlungen des Unabhängigen Landeszentrums für Datenschutz (ULD) konfiguriert. Die Datenschutzerklärung finden Sie auf www.imms.de/privacy.

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

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

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

[Jahresbericht](#)