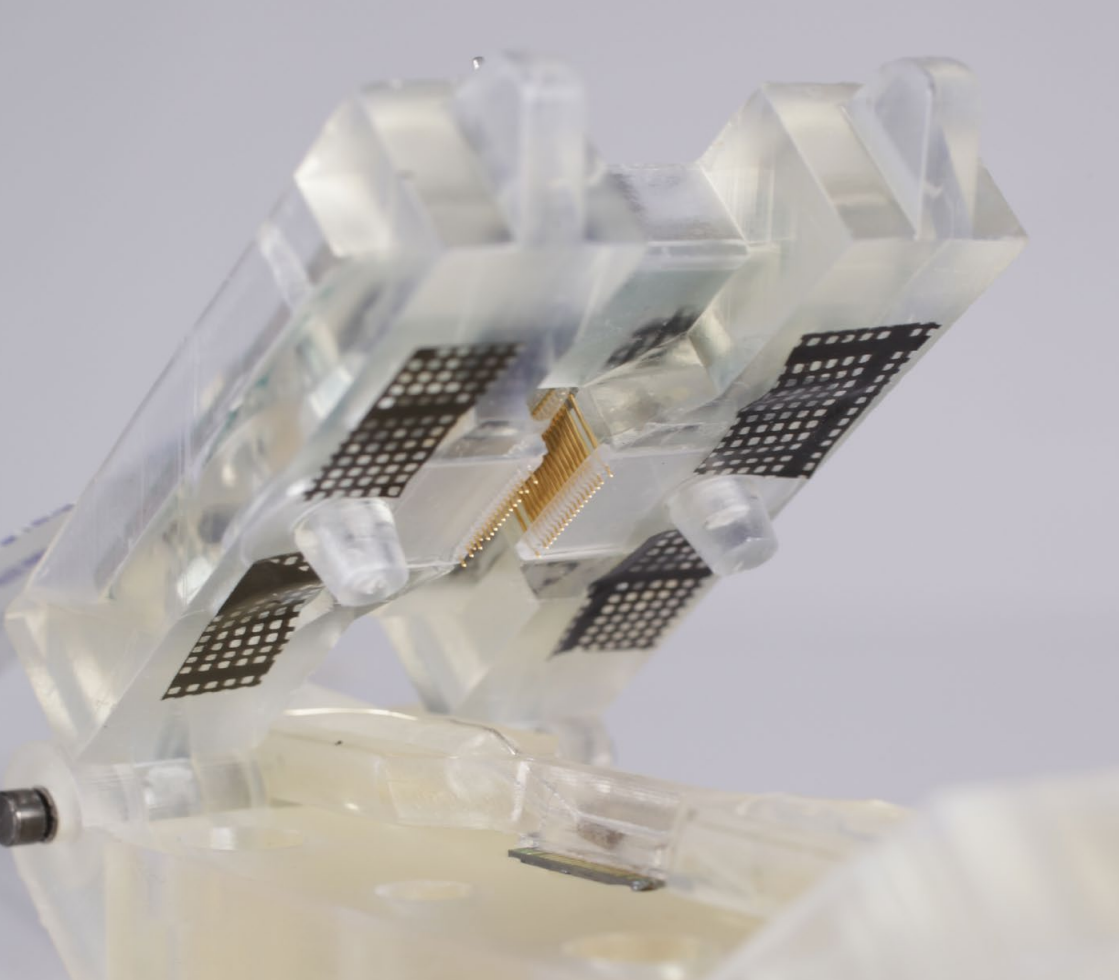




IMMS

JAHRESBERICHT

2025



IMMS

INSTITUT FÜR MIKROELEKTRONIK- UND
MECHATRONIK-SYSTEME GEMEINNÜTZIGE GMBH

Leitbild und strategische Schwerpunkte

Mission

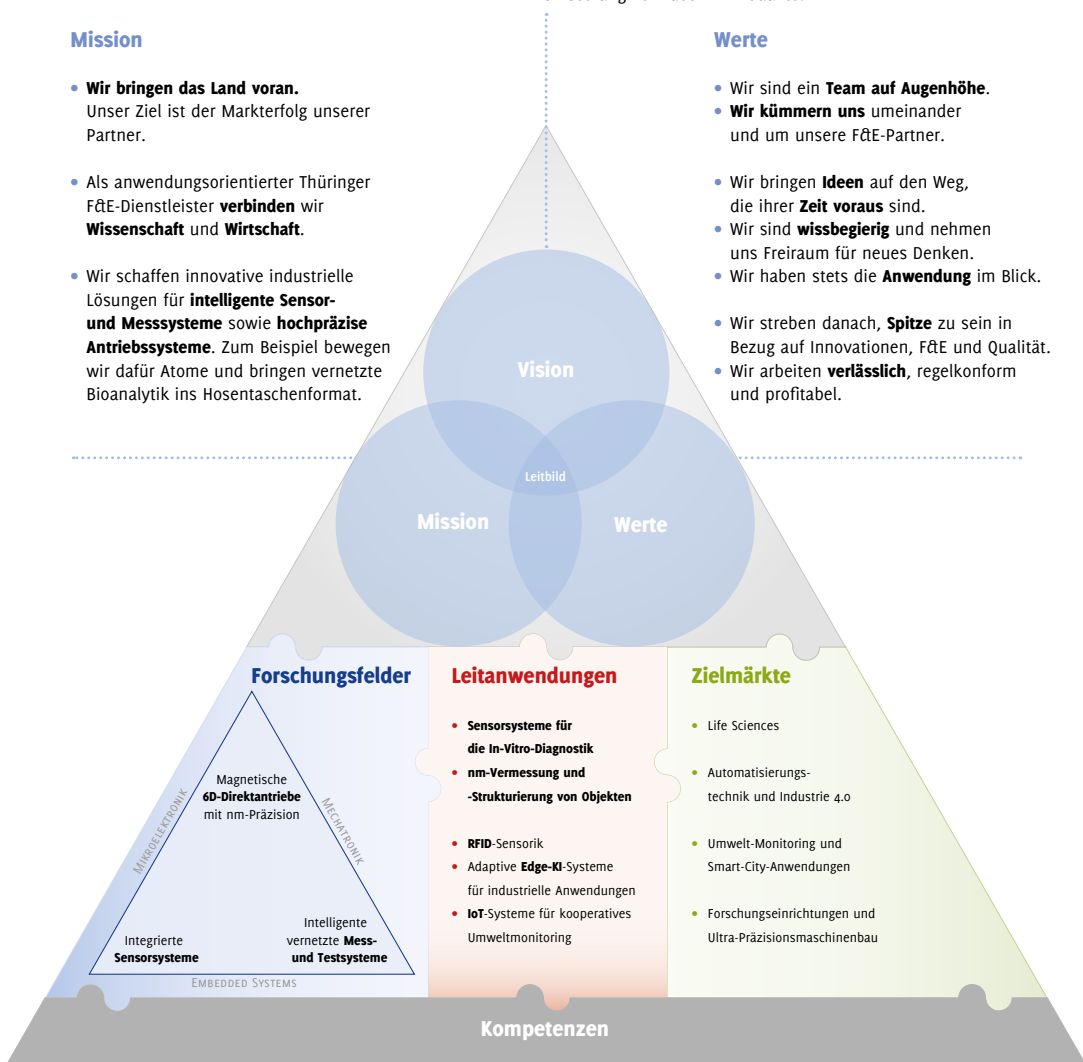
- **Wir bringen das Land voran.**
Unser Ziel ist der Markterfolg unserer Partner.
- Als anwendungsorientierter Thüringer F&E-Dienstleister **verbinden** wir **Wissenschaft** und **Wirtschaft**.
- Wir schaffen innovative industrielle Lösungen für **intelligente Sensor- und Messsysteme** sowie **hochpräzise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

Vision

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

Werte

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



WIR VERBINDEN DIE DIGITALE

...

MIT DER ANALOGEN WELT.

2 Leitbild und strategische Schwerpunkte

4 Vorwort

6 Ralf Sommer verlässt das IMMS

7 Interne Forschungsgruppe VirtuSen

11 Kooperation mit der TU Ilmenau

13 Stimmen aus Industrie und Forschung

21 Nachwuchsförderung am IMMS

29 Stimmen aus dem IMMS

32 Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

34 **Highlights 2025** im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

42 **Fachartikel:** Hochsensitive Fluoreszenzbildgebung für quantitative Lateral-Flow-Tests

50 **Fachartikel:** Generatorbasierter Entwurf für Ultra-Low-Power-Mixed-Signalschaltungen

59 Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

61 **Highlights 2025** im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

100 **Fachartikel:** KI-basierte Optimierung von Spritzgießprozessen

108 Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

109 **Highlights 2025** im Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

116 **Fachartikel:** Forschung an virtueller Temperatursensorik in hochpräzisen Systemen

122 **Fachartikel:** Physikalisch reduzierte thermische Simulation der Spulenbaugruppe eines Nanopositioniersystems

129 **Fachartikel:** In-situ-Topografie-Charakterisierung der Spiegel eines Nanopositioniersystems

140 Zahlen, Strukturen und Belege

141 Das IMMS in Zahlen

143 Organisation zum 31.12.2025

145 Lehrangebot

145 Veranstaltungen

150 Publikationen

159 *Förderung

163 Abkürzungen

164 Impressum, Datenschutz

3

› Integrierte Sensorsysteme

› Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

› nm-präzise 6D-Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Vorwort

- › Integrierte
Sensorsysteme
- › Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
- › nm-präzise 6D-
Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung



Martin Eberhardt, Geschäftsführer des IMMS. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

Forschung zeigt ihren Wert dort, wo aus wissenschaftlichen Erkenntnissen Lösungen für Industrie und Gesellschaft werden. Dieses Verständnis prägt die Arbeit des IMMS seit der Gründung – und hat unserer Tun auch 2025 bestimmt.

Das Geschäftsjahr 2025 war von anspruchsvollen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geprägt. Die wirtschaftliche Lage in Thüringen und Deutschland blieb angespannt. Gleichzeitig fiel die institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen niedriger aus. Diese Mittel sind für den Grundbetrieb und die wissenschaftliche Vorlaufforschung des IMMS von hoher Bedeutung. Entsprechend groß war die Herausforderung, die entstandene Finanzierungslücke zu schließen.

Durch die deutliche Steigerung der industriellen Auftragsforschung konnten wir die Finanzierungslücke kompensieren. Neben der positiven wirtschaftlichen Entwicklung 2025 zeigt dies: Unsere Forschung trifft die aktuellen Herausforderungen der Industrie und KMU. Mit unserer Transferkompetenz entwickeln wir gemeinsam mit unseren Partnern passgenaue Lösungen mit unmittelbarem Nutzen.

Diese Entwicklung bestätigt den Weg, den wir in den vergangenen Jahren eingeschlagen haben. Wir konzentrieren unsere wissenschaftliche Arbeit auf Themen mit hoher

technologischer und wirtschaftlicher Relevanz und verbinden wissenschaftliche Exzellenz mit einem konsequenten Transfer in die Anwendung. Mit zahlreichen neuen Forschungs- und Entwicklungsprojekten konnten wir unsere drei strategischen Forschungsfelder weiter stärken und unsere Zusammenarbeit mit Unternehmen und wissenschaftlichen Partnern weiter ausbauen.

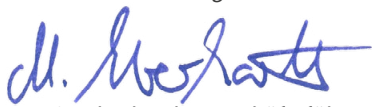
Ein besonderer Meilenstein war 2025 der Aufbau der vom Freistaat Thüringen geförderten Nachwuchs-Forschungsgruppe VirtuSen. Sie verbindet Kompetenzen aus mehreren Forschungsbereichen des IMMS und eröffnet neue Möglichkeiten, die Präzision hochgenauer Positioniersysteme durch KI-basierte virtuelle Sensorik weiter zu steigern. Daneben konnten wir in vielen weiteren Projekten wichtige Fortschritte erzielen. Einige Beispiele stellen wir Ihnen in diesem Jahresbericht vor.

Wissenschaftlicher Erfolg ist immer das Ergebnis gemeinsamer Arbeit. Deshalb freue ich mich besonders über die Auszeichnungen, die Nachwuchswissenschaftler des IMMS im vergangenen Jahr für ihre Forschungsleistungen erhalten haben. Sie stehen stellvertretend für das hohe Engagement und die Kompetenz unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

2025 brachte zugleich personelle Veränderungen mit sich. Neue Kolleginnen und Kollegen verstärken heute unser Institut, andere haben sich beruflich neu orientiert. Besonders danken möchte ich meinem langjährigen Geschäftsführer-Kollegen Prof. Dr. Ralf Sommer, der das IMMS im Herbst verlassen hat und sich wieder vollständig seinen Aufgaben als Hochschullehrer an der TU Ilmenau widmet. Für die persönlich vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit danke ich ihm herzlich und wünsche ihm für seinen weiteren Weg alles Gute.

Mein Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IMMS, unseren Fördergebern, Auftraggebern sowie unseren Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Ihr Vertrauen, ihre Ideen und ihr Engagement bilden die Grundlage unseres gemeinsamen Erfolgs.

Ich freue mich auf gemeinsame Wege und wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen


Martin Eberhardt, Geschäftsführer

5

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

www.imms.de/virtusen

www.imms.de/jahresberichte



Martin Eberhardt, Jessica Völlger, Andreas Rohwer, Dr. Mandy Kandler, Dr. Gabriel Kittler, Prof. Dr. Ralf Sommer, Prof. Dr. rer. nat. Ingolf Voigt, Dr. Sebastian Stark und Dr. Tobias Sawada bei der Verabschiedung von Prof. Dr. Ralf Sommer zur Aufsichtsratssitzung am 20.11.2025. Foto: IMMS.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer verlässt das IMMS zum 30.09.2025

Zum 30. September 2025 scheidet Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer nach 19-jähriger Tätigkeit als wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS aus.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer hatte nach dem Gründungsprofessor Dr.-Ing. Gerd Scarbata die wissenschaftliche Geschäftsführung des IMMS im September 2006 übernommen, nachdem er über die Stationen TU Braunschweig und Kaiserslautern für das Fraunhofer-Institut „Techno- und Wirtschaftsmathematik“ sowie die Infineon Technologies AG tätig war.

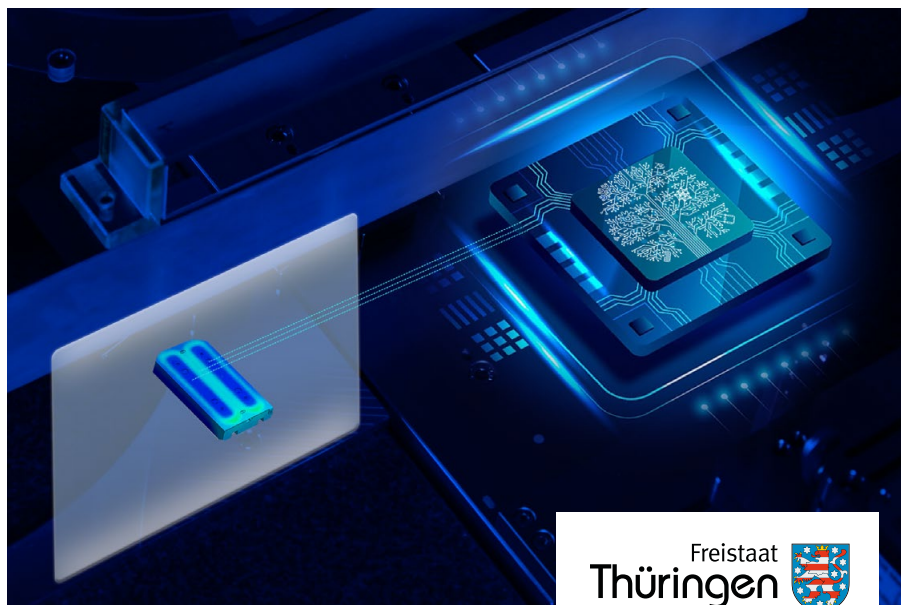
Aufsichtsrat und Gesellschafter danken Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer für sein Engagement und die geleistete Arbeit am IMMS.

Das Berufungsverfahren für die Neubesetzung der Position als wissenschaftliche Geschäftsführerin bzw. wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS bei gemeinsamer Berufung auf eine Universitätsprofessur (W3) „Integrierte Schaltungen für Sensorsysteme“ an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

Das IMMS wird daher bis zur Berufung einer Nachfolgerin oder eines Nachfolgers der wissenschaftlichen Geschäftsführung durch den kaufmännischen Geschäftsführer Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt vertreten.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer ist ab dem 01. Oktober 2025 über das Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau erreichbar.

Für den Aufsichtsrat: Dr. Sebastian Stark, AR-Vorsitzender



Freistaat
Thüringen



In VirtuSen wird angestrebt, wenige physische Sensoren zu nutzen, um virtuelle Sensoren über KI-Methoden zu generieren. Fotos/Grafiken: IMMS/Pixabay (u_8t3emw1yia).

Interne Forschungsgruppe VirtuSen* gestartet – virtuelle Sensorik und KI zur Erfassung und Kompensation von Störeinflüssen auf komplexe mechatronische Systeme

Monitoring-Sensorik oft limitiert

Beim Monitoring von Maschinen oder anderen komplexen mechatronischen Systemen geht es neben der Überwachung von Istzuständen der Systeme und Themen wie vorbeugender Wartung auch immer darum, auf Basis der erfassten Informationen neue Systemlösungen mit verbesserten Leistungsparametern realisieren zu können. Neben Systemparametern sind störende Einflüsse wie Temperatur, Feuchte oder mechanische Spannungen sowie deren räumliche Verteilung wichtig. Oft lässt sich an den für eine umfassende Bewertung notwendigen Messpunkten aufgrund funktionseller und räumlicher Beschränkungen keine physische Sensorik platzieren. In der Praxis werden die Störgrößen daher nur an wenigen Stellen durch eine begrenzte Anzahl von Sensoren erfasst. Damit ist der Einsatz geeigneter Gegenmaßnahmen jedoch auch nur eingeschränkt möglich.

www.imms.de/virtusen

In der Forschungsgruppe VirtuSen arbeitet das IMMS daran, das Monitoring von Systemen mithilfe KI-basierter virtueller Sensorik deutlich zu verbessern. Mit KI-Ansätzen lässt sich komplexes Systemverhalten auf Basis weniger Eingangsgrößen abbilden. Das soll in VirtuSen genutzt werden, um mit wenigen Informationen aus realen Sensoren eine räumliche Verteilung bewerten zu können. Ziel ist, durch zusätzliche KI-basierte virtuelle Sensoren für die Störgrößen das Verhalten des Gesamtsystems vorherzusagen, um anschließend gezielte Gegenmaßnahmen ermitteln und ergreifen zu können.

Anwendung zur effektiven Präzisionssteigerung von Positioniersystemen

Besonders relevant ist dies für hochpräzise Positionier- und Messsysteme. Kleinste Umwelteinflüsse wie z.B. Temperaturschwankungen und damit einhergehende Materialausdehnung können die zu erreichenden Genauigkeiten im sub-Nanometerbereich erheblich verfälschen. Für Hochpräzisionsanwendungen ist es besonders wichtig, auch die räumliche Verteilung von Störgrößen zu kennen. Umgebungseinflüsse auf solche Systeme sollen sich mithilfe der Ergebnisse aus VirtuSen genauer quantifizieren lassen, um perspektivisch deren Wirkung auf die Positioniergenauigkeit reduzieren zu können.

Drei Promotionen für modellbasierte thermische Charakterisierung, physikalisch fundierte KI-Modelle und die Generalisierungsfähigkeit von KI-Modellen

Das Projekt wird bis Ende 2027 in enger Zusammenarbeit zwischen dem IMMS und der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt. Das IMMS stellt Betreuung, Infrastruktur und finanzielle Unterstützung bereit, während Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung, Fachgebietsleiter für Produkt- und Systementwicklung an der Fakultät für Maschinenbau, und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Florian Römer, Fachgebietsleiter für Signalverarbeitung für Intelligente Sensorsysteme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, wissenschaftliche Beratung und akademische Betreuung über die TU Ilmenau leisten. Die Forschungsaktivitäten gliedern sich in drei Promotionsthemen, die jeweils einen komplementären Aspekt der Vorhersage thermischer Störungen und der KI-basierten virtuellen Sensorik für hochpräzise Systeme behandeln.



VirtuSen-Team am Versuchsaufbau des Antriebs NPS6D100 im Labor des IMMS: Amin Suaad, Ahmed Rahat, Ina Naujokat und Parastoo Salimitari (v.l.n.r.). Foto: IMMS.

Ina Naujokat schloss ihr Diplomstudium im Fach Maschinenbau im März 2025 ab und arbeitet seitdem am IMMS im „VirtuSen“-Projekt, während sie unter der Betreuung von Prof. Husung promoviert. Ihre Forschung konzentriert sich auf physikalisch fundierte thermische Charakterisierung, numerische Simulationsansätze und Modellreduktionsmethoden für Präzisionssysteme.

Ahmed Rahat stieß nach Abschluss seines Studiums der Informatik und Datenwissenschaft im Juli 2025 als wissenschaftlicher Mitarbeiter zum Projekt und promoviert dort unter der Betreuung von Prof. Römer. Seine Arbeit konzentriert sich auf physikalisch informierte neuronale Netze (PINNs) für Präzisions- und Nanopositionierungssysteme, insbesondere für die Vorhersage von Temperaturfeldern und die virtuelle Sensorik auf der Grundlage weniger Messdaten.

Amin Suaad erwarb seinen B.Sc. in Elektrotechnik und Elektronik und schloss später einen Master in Data Science ab. Derzeit promoviert er unter der Betreuung von Prof. Römer und arbeitet seit Januar 2025 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS. Seine Forschung konzentriert sich auf die Verallgemeinerung und Übertragbarkeit von KI-basierten virtuellen Sensoren auf verschiedene Systeme. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Vorhersage von Umgebungsstörgrößen unter eingeschränkten Messbedingungen.

Neben der Koordination der gesamten Forschungsaktivitäten trägt **Dr.-Ing. Parastoo Salimitari** zu Untersuchungen über Materialeffekte im thermischen Verhalten bei, wobei der Schwerpunkt auf Mineralgussstrukturen als Alternative zu Granitsockeln in Präzisionssystemen liegt. Ihre Arbeit unterstützt die experimentellen und simulationsbasierten Aktivitäten über die einzelnen Promotionsthemen hinweg und bildet eine gemeinsame Grundlage für die Entwicklung und Validierung der vorgeschlagenen Methoden.

Ausblick

Fokus des IMMS ist es, mit den Ergebnissen aus VirtuSen die Präzision der am IMMS erforschten Positioniersysteme zu steigern, um zukünftige industrielle Bedarfe abdecken zu können. Auf dieser Grundlage wird als Fernziel angestrebt, die Ansätze auf vielfältige Maschinen, Messtechnik, mechatronische Systeme etc. zu übertragen und deren Performance und Kosteneffizienz erheblich zu steigen.

Zusätzlich sollen die entwickelten Methoden genutzt werden, um neue Automatisierungslösungen für Industrieanwendungen erforschen und entwickeln zu können, für die sich Prozesse und Anlagen gezielter analysieren sowie besser steuern und regeln lassen.

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 2025 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.

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

Ausgewählte gemeinsame Projekte

ProQuaOpt*: Optimierung des Spritzgießprozesses durch KI für mehr Effizienz

Um KI-Methoden für die automatisierte Produktivitäts- und Qualitätsoptimierung des Spritzgießprozesses zu erschließen, wurde ein Produkt-Prozess-Qualitätsregelkreis aus einer Regelstrecke an der Spritzgießmaschine, einem Messglied zur Qualitätsprüfung und einem KI-basierten Regler entwickelt. Damit werden Reaktionen auf veränderte Umgebungsbedingungen und eine kontinuierliche Optimierung des Prozesses in Bezug auf Ressourceneffizienz möglich. Das IMMS entwickelte die KI-basierte Regelung, die den Prozess inline und autonom optimieren hilft – beim Einstellen der Maschine und bei der Reaktion auf Störungen.

www.imms.de/proquaopt

Zum Fachartikel in diesem Bericht

Waldmonitor*: Robuste Kommunikationslösungen und energieautarke Sensoren

Um Folgen des Klimawandels zu begegnen, wird im Projekt Waldmonitor ein Sensorsystem entwickelt, das kontinuierlich Informationen zu Jungbäumen sammelt, ohne dass Förster vor Ort sein müssen. Ein stationäres Gesamtsystem als Pilotinstallation evaluiert dazu verschiedene optische und klassische Sensorprinzipien. Die Ergebnisse fließen in eine optimale Auswahl von Sensorsystemen für ein angepasstes Monitoringsystem ein, das später auch auf mobilen Plattformen einsetzbar sein soll. Das IMMS trägt adaptive energieautarke Sensorsysteme und die Datenanbindung bei, um das Monitoring von Standortfaktoren im forstlichen Umfeld zu erschließen und einen stetigen Datenstrom von den Untersuchungsflächen im Wald zu einer zentralen Auswertung sicherzustellen.

www.imms.de/waldmonitor

Jahresbericht
© IMMS 2025

Bis 2026 arbeiten 13 Doktoranden, darunter einer am IMMS, in Phase 3 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 Messungen und Bearbeitungen von Objekten mit Nanometer-Präzision ermöglichen soll.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

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

Das IMMS gibt als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ Impulse zur Einführung von KI- und 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 Forschungsprofillinien der TU Ilmenau und weitere Forschungseinrichtungen ihre Kompetenzen. Im iHUB-Projekt des Landes Thüringen begleiten die Partner (Aus-)Gründungen im Bereich intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme.

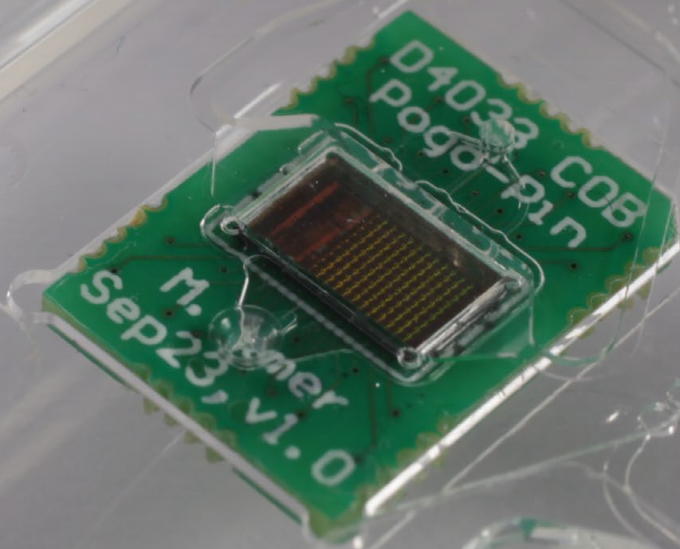
- www.imms.de/insigna
- Mehr zu iHub in diesem Bericht

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.

STIMMEN AUS INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Alle Referenzen: www.imms.de/ref



Mit Chip-Entwicklungen wie denen im Projekt „FluoResYst“ für das direkte DNA-Spotting mit anschließender Fluoreszenzdetektion wird oft das Potenzial für weitere gemeinsame Transferprojekte deutlich. Mehr dazu erfahren Sie in den folgenden Referenzschreiben.

Das Projekt FluoResYst wurde im Rahmen des Förderprogramms Photonik-Forschung vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert (Förderkennzeichen 13N15807).

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

„Wir bei DITABIS verstehen uns als Partner auf Augenhöhe – für unsere Kunden sind wir der OEM-Ansprechpartner, wenn es um Medizintechnik, Diagnostik und Life Sciences geht. Unsere Teams bringen Know-how aus Mechanik, Elektronik, Software und Regulatory Affairs zusammen – alles unter einem Dach. Vom ersten Machbarkeits-Check bis hin zur Serienproduktion nach ISO 13485 begleiten wir unseren Kunden als echten Co-Entwickler: agil, partnerschaftlich und mit jahrzehntelanger Erfahrung.“



Dr. Christof Steiner, Head of Business Development, DITABIS Digital Biomedical Imaging Systems AG. Foto: DITABIS.

Das IMMS habe ich im Rahmen unseres gemeinsamen BMFTR-Projekts „FluoRe-sYst“ kennengelernt. Während das IMMS dort den Chip fürs direkte DNA-Spotting mit anschließender Fluoreszenzdetektion entwickelt, übernehmen wir bei DITABIS die Systemintegration in ein Gesamtgerät. In der Zusammenarbeit mit Benjamin Saft und Eric Schäfer wurde schnell klar: Das IMMS kann weit mehr als „nur“ Chip-Entwicklung – besonders im Bereich Photonik und Sensorik. Das merkt man sowohl an den vielseitigen Mitarbeiter:innen als auch an der richtig gut ausgestatteten Labor- und Messtechnik.

Mit diesem Eindruck im Gepäck fiel uns die Entscheidung leicht, das IMMS auch für die Entwicklung einer Optikbaugruppe für eines unserer Seriengeräte mit hohen Stückzahlen ins Boot zu holen. Das Ergebnis: 15 Prototypen, in denen Hardware, Firmware, Optik und Mechanik perfekt zusammenspielen – und die unsere hohen Erwartungen sogar noch übertroffen haben.

Was uns besonders gefallen hat: Das IMMS-Team hat sich schnell und flexibel in unser Netzwerk aus DITABIS-Entwicklern und externen Partnern eingebunden – mit vielen Ideen und einem echten Teamgeist.

Nach dieser rundum positiven Erfahrung würden wir jederzeit wieder mit dem IMMS zusammenarbeiten – selbst wenn uns über 300 Kilometer trennen.“

www.imms.de/fluoresyst

www.imms.de/dl

www.imms.de/ref



Andrea Kulik,
Geschäftsführerin /
CEO der FRIZ Bio-
chem GmbH.

Foto:
FRIZ Biochem GmbH.

Andrea Kulik, FRIZ Biochem GmbH

„Wir entwickeln innovative molekulardiagnostische Lösungen für den standardisierten (Hochdurchsatz-) Einsatz im Labor, sowie für die direkte Anwendung am Point-of-Care. Unsere Produkte stehen für hohe Sensitivität, kurze Turnaround-Zeiten und anwenderfreundliche Abläufe.

Für unsere CYCLE®-Dx-Plattform, die multiparametrische, schnelle, hochsensitive und vollautomatisierte PCR-Analysen laborfrei direkt am Point of Care ermöglicht, haben wir IMMS als Entwicklungspartner beauftragt. Der gemeinsam mit IMMS entwickelte CMOS-Biochip zum Nachweis von DNA-Hybridisierungen auf elektrochemischen Sensorarrays wird künftig in die Analyseeinheit unserer PoC-Plattform integriert.

In vorangegangenen Forschungsprojekten haben wir die technologischen Grundlagen gelegt und die Leistungsfähigkeit unserer CMOS-Biochip-Ansätze validiert. Ziel der anschließenden Zusammenarbeit war es, diese Erkenntnisse gemeinsam mit IMMS in ein industriell verwertbares Produkt zu überführen. Besonders überzeugt hat uns die ausgewiesene Expertise in der Entwicklung analoger und digitaler integrierter Schaltungen und Systeme, insbesondere im Bereich der CMOS-Biosensorik.

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

Jahresbericht

Das Team von IMMS brachte umfassende Kompetenz in der eingesetzten CMOS-Technologie sowie in spezialisierten Fertigungsprozessen ein, darunter mikrosystem-technische Verfahren zur Integration von Edelmetallelektroden direkt auf dem Chip sowie TSV-Technologien zur bonddrahtfreien Einbindung in unsere Analyseeinheit. Die hierfür erforderlichen Prozessschritte wurden durch den langjährigen Partner X-FAB bereitgestellt und nahtlos in das Gesamtsystem integriert.

Beeindruckt hat uns insbesondere die Fähigkeit von IMMS, die Schnittstelle zwischen biochemischer Anwendung und elektronischer Signalverarbeitung ganzheitlich zu denken. Dadurch konnten unsere biochemischen und technischen Anforderungen präzise in mikroelektronische Konzepte übersetzt und flächeneffizient umgesetzt werden.

Neben der technologischen Exzellenz war die Zusammenarbeit jederzeit geprägt von Agilität, Transparenz und Verlässlichkeit. Abstimmungen erfolgten schnell und lösungsorientiert, alle Meilensteine wurden termingerecht und in hoher Qualität erreicht.

Wir bedanken uns ausdrücklich für die professionelle und vertrauensvolle Partnerschaft und freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit bei zukünftigen Innovationsprojekten.“

www.frizbiochem.de





Roland Haag, Teamleiter ASIC Design
bei Leuze electronic GmbH + Co. KG.
Foto: Constanze Lutz-Haag.

„Als mittelständisches Familienunternehmen mit Sitz im Großraum Stuttgart, direkt am Fuße der Burg Teck, gestalten wir mit innovativen Produkten und Lösungen aktiv die Zukunft der Industrie 4.0. Über 60 Jahre Erfahrung haben uns zu einem führenden Experten für innovative und effiziente Sensor- und Sicherheitslösungen in der Automatisierungstechnik gemacht. Unser Hightech-Portfolio umfasst ein breites Spektrum an Sensoren und Automatisierungslösungen: von schaltenden und messenden Sensoren über Identifikationssysteme bis hin zu Datenübertragungstechnologien und Bildverarbeitungssystemen.“

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

› nm-präzise 6D-

Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Das IMMS hat sich als äußerst wertvoller Partner in allen Forschungs- und Entwicklungsfragen erwiesen. Besonders hervorzuheben ist das ausgewiesene Know-how der Kolleginnen und Kollegen in den für uns zentralen Technologiefeldern. Sie unterstützen uns nicht nur bei der Evaluation innovativer Schaltungskonzepte, sondern tragen auch maßgeblich zur Entwicklung zukunftsweisender integrierter Schaltkreise (ICs) bei. Durch einen gemeinsamen Workshop mit dem IMMS erhielten wir wertvolle Einblicke in die Eigenschaften modernster CMOS-integrierter optoelektronischer Bauelemente und Schaltungen. Besonders hervorzuheben sind die fundierten Erklärungen zu deren Funktionsweise sowie die praxisnahen Anwendungsbeispiele, die uns nachhaltig inspiriert haben. Zudem schätzen wir die Zusammenarbeit mit dem IMMS bei der Layoutsynthese unserer digitalen Schaltungsteile, die stets durch großes Engagement, Agilität und eine außergewöhnlich kollegiale Arbeitsweise gekennzeichnet war. Das IMMS hat sich in unserer Zusammenarbeit als äußerst verlässlicher und kompetenter Partner erwiesen. Die hohe Qualität der Ergebnisse sowie die konstruktive und zielorientierte Zusammenarbeit haben uns überzeugt. Daher freuen wir uns darauf, das IMMS auch in zukünftigen Entwicklungsprojekten wieder einzubinden.“

www.imms.de/
asics

www.imms.de/
ref

„attocube entwickelt im Bereich Motion & Sensing nanometergenaue Positionier- und Sensorsysteme für industrielle Anwendungen in High-Tech-Märkten wie der Halbleiter- und der Quantentechnologie.

Gemeinsam mit dem IMMS konnten wir unser ultrapräzises Laserinterferometer IDS3010 erfolgreich in ein vom IMMS entwickeltes ultrapräzises Voice-Coil-Positioniersystem integrieren.

Ziel war es, eine reproduzierbare Positionierung bis in den Picometerbereich unter Vakuumbedingungen nachzuweisen und damit einen möglichen Use Case am aktuellen Stand der Forschung zu demonstrieren. Gleichzeitig konnten wir sowohl die Performance unseres Sensorsystems als auch dessen einfache Integration erfolgreich extern verifizieren.

Der Themenbereich Mechatronik des IMMS brachte hierbei seine umfassende Kompetenz in der Regelungstechnik und ultragenauen Positionierung ein. Besonders hervorzuheben ist die entwickelte Regelungslogik, die Positionierleistungen unterhalb der klassischen Sensorrauschgrenze ermöglicht. Gleichzeitig erlaubte das vom IMMS eingesetzte Rapid-Control-Prototyping-Framework eine schnelle und flexible Integration unseres Sensors in das Gesamtsystem und hielt die Time-to-Result sehr kurz.

Die Zusammenarbeit mit dem IMMS war jederzeit sehr professionell, unkompliziert und geprägt von offener sowie effizienter Kommunikation. Gemeinsam konnten wir zeigen, dass durch die Kombination unserer Systeme und Kompetenzen eine reproduzierbare Closed-Loop-Positionierung bis in den zweistelligen Picometerbereich unter Vakuumbedingungen möglich ist. Das Projekt hat nicht nur die Leistungsfähigkeit unseres Interferometers in einem innovativen Use Case bestätigt, sondern auch zu einem gemeinsamen Whitepaper als sichtbarem Ergebnis der erfolgreichen Kooperation geführt. Wir freuen uns darauf, künftig weitere gemeinsame Projekte im Bereich hochpräziser Sensorik und Aktorik für Anwendungen im Subnanometerbereich umzusetzen.“



Markus Øverland, Senior Manager R&D Actuators & Sensors, attocube systems GmbH. Foto: privat.



Marcus Cramer, Geschäftsführer
KHW Kunststoff- und Holzverarbeitungswerk
GmbH in Geschwenda. Foto: KHW.

Marcus Cramer, KHW Kunststoff- und Holzverarbeitungswerk GmbH

„Wir sind der weltweit marktführende Hersteller von Kunststoffschlitten – vom einfachen Kinderschlitten bis zum innovativen Hightech-Produkt. Seit Jahrzehnten garantieren wir als leistungsfähiger und kompetenter Partner in der Kunststoffverarbeitung eine ausgezeichnete Spritzgusskapazität und -qualität für unterschiedlichste Produkte, Teile und Anforderungen. Neben einer großen Produktvielfalt im Bereich Garten fertigen wir außerdem Kühlboxen, Mülltonnen oder Kunststoffpaletten. Das erreichen wir nicht nur durch modernste Maschinenteknik und zertifizierte Prozesse, sondern auch durch die ständige Weiterentwicklung unserer Materialien, Artikel und Abläufe. Beispielsweise setzen wir mit unserem Label KHW – ECO2MIND immer mehr auf biobasierte bzw. biologisch abbaubare Kunststoffe, achten auf energieeffiziente Prozesse und viele unserer Artikel bestehen schon jetzt aus recycelten Kunststoffen. Für diese breite Palette aus Produkten und Materialien ist es notwendig, Maschinen flexibel auf die jeweils optimalen Parameter einzustellen, um in möglichst kurzen Fertigungszyklen qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erhalten.“

Im gemeinsamen Projekt ProQuaOpt hat das IMMS KI-Methoden dafür erschlossen, Produktivität und Qualität des Spritzgießens automatisiert zu optimieren. Das IMMS-Team ist schnell und tiefgründig in die Spritzgießprozesse eingetaucht und hat in beeindruckender Weise aufgezeigt, welches Potential KI für die Optimierung unserer Prozesse und für mehr Ressourceneffizienz bietet. Über die KI-basierte Optimierung des IMMS auf Basis eines Surrogate-Modells und eines NSGA-II-Algorithmus lässt sich je nach Eingabeparametern die Spritzgießmaschine optimal einstellen, ohne die Qualität zu beeinträchtigen, und es kann auch auf externe Störungen reagiert werden. Im Testbetrieb in einer unserer Fertigungslinien ist es somit gelungen, die Zykluszeit deutlich zu senken und dabei Fehler zu vermeiden.

Mit seiner Expertise zu KI-Algorithmen im industriellen Kontext hat das IMMS einen essenziellen Beitrag zum Gelingen des Projekts geleistet. Das IMMS-Team hat proaktiv und absolut zielorientiert gearbeitet. Gleichzeitig ist es flexibel auf Änderungen im Projektverlauf eingegangen. Die Zusammenarbeit war reibungslos sowie kollegial und das IMMS hat stets das Gesamtziel aller fünf Partner im Blick gehabt und unterstützt. Wir freuen uns, wenn in Zukunft weitere gemeinsame Projekte möglich sind, in denen wir an die erfolgreiche Kooperation anknüpfen können.“

www.khw-geschwenda.de



20	
> Integrierte	Sensorsysteme
> Intelligente ver-	netzte Mess- u.
Testsysteme	
> nm-präzise 6D-	Direktantriebe
> Inhalt	
* Förderung	

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

*Zum Fach-
artikel in
diesem Bericht*

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

Jahresbericht

© IMMS 2025



NACHWUCHSFÖRDERUNG AM IMMS

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

Wissenschaftlicher Nachwuchs hat am IMMS höchste Priorität. Betreut werden vor allem Studentinnen und Studenten der Ingenieurwissenschaften und verwandter Fachrichtungen bei Fachpraktika, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotionen. Für den Nachwuchs bietet die Vernetzung des IMMS 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. Wissenschaftler des Instituts halten auch Lehrveranstaltungen u.a. für die Grundlagenausbildung an der Technischen Universität Ilmenau. Zudem bietet das IMMS Trainingskurse und Firmenbesichtigungen an. Auch Schülerinnen und Schüler bekommen bei Events und Praktika Einblicke in die Arbeiten oder können bei Facharbeiten betreut werden.

Das IMMS begleitet auch Angebote zur Sommeruni der TU Ilmenau und organisiert regelmäßig BarCamps zum Thema elektronische Designautomatisierung. An diesen interaktiven und offenen Forschungstreffen nehmen auch Studentinnen und Studenten teil. Die international wettbewerbsfähige Infrastruktur nach industriellem Standard für Entwurfsunterstützung und Labortechnik für elektronische und mechanische Systeme steht auch für studentische Forschungsarbeiten zur Verfügung.

> *Integrierte Sensorsysteme*
> *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
> *nm-präzise 6D-Direktantriebe*
> *Inhalt*
* *Förderung*

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

Beteiligung an Karrieremessen

Das IMMS hat sich 2025 auf vier Karrieremessen an der TU Ilmenau, der FH Erfurt, der Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg und der TU Chemnitz präsentiert. Studentinnen und Studenten aus Fachrichtungen wie Elektrotechnik, Mechanik, Informatik und verwandten Studiengängen informierten sich über Angebote

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



Das IMMS hat 2025 wie hier an der FH Erfurt an drei weiteren Hochschulen über Praktika und Abschlussarbeiten sowie zu Möglichkeiten für einen Einstieg am Institut informiert.

Foto: IMMS.

Jahresbericht

© IMMS 2025



Am IMMS betreute Master-Studentinnen und -Studenten der Lehrveranstaltung „Optoelektronische Systeme“ bei Prof. Dr. Alexander Richter, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena, zu Besuch am IMMS Erfurt. Foto: IMMS.

für Praktika, Abschlussarbeiten und Nebentätigkeiten und weitere Möglichkeiten für einen Einstieg am Institut. 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. Auf seine hochwertige und engagierte Nachwuchsförderung hat das Institut außerdem in weiteren verschiedenen Formaten aufmerksam gemacht.

www.imms.de/angebote

Begleitung einer Lehrveranstaltung der EAH Jena

Die Master-Studentinnen und -Studenten der Lehrveranstaltung „Optoelektronische Systeme“ bei Prof. Dr. Alexander Richter, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena, wurden auch am IMMS betreut. In Projekten wurden über das Sommersemester kleine Designaufgaben aus dem Gebiet der Optoelektronik in Zusammenarbeit mit dem IMMS bearbeitet, z.B. zu miniaturisierten optischen Komponenten oder zu optoelektronischen Empfängern und deren Eigenschaften. Dazu gab es einen Besuch am IMMS in Erfurt mit Einblicken in aktuelle Forschungsprojekte und mit einem Rundgang durchs Labor mit vielfältiger Messtechnik für mikroelektronische Lösungen.



<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7333125118602235906>

Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Konferenz der Medizintechnik-Fachschaften (KOMET) auf ihrer Exkursion nach Erfurt-Süd-Ost mit den Stationen X-FAB, CiS Institut für Mikrosensorik und IMMS. Foto: IMMS.

Besuch von der Konferenz der Medizintechnik-Fachschaften (KOMET) am IMMS

Im Mai 2025 war die Konferenz der Medizintechnik-Fachschaften (KOMET) am IMMS in Erfurt zu Gast. Die 30 Studentinnen und Studenten verschiedener technischer Hochschulen aus dem deutschsprachigen Raum, wie von der TU Darmstadt, der FAU Erlangen, der TU Graz, der TU Ilmenau, der EAH Jena oder der TH Lübeck kamen für vier Tage an die TU Ilmenau, um das Medizintechnik-Studium kontinuierlich zu verbessern – unter anderem durch die Vernetzung mit der Industrie. Exkursionen wie die vom Mai 2025 zu X-FAB, ans CiS Institut für Mikrosensorik und ans IMMS, die vom FiZ Forschungs- und Industriezentrum Erfurt e.V. organisiert wurde, gehören zu jeder KOMET dazu. Am IMMS wurde anhand vieler Praxisbeispiele deutlich, wie viel das Medizintechnik-Studium mit Chipdesign zu tun hat. Es gab etliche Demonstratoren für integrierte Sensor-Systeme für die In-vitro-Diagnostik aus aktuellen Projekten zu sehen. In all diesen Lösungen stecken auch studentische Arbeiten, die am IMMS intensiv betreut werden.



Martin Grabmann hielt im August 2025 zur International Summer School on Microelectronics (ISSOM25) an der Leibniz Universität Hannover die Vorlesung “Before It Hits the Chip: A Gentle Introduction to Mixed-Signal IC Verification”. Foto: Leibniz Universität Hannover.

Vorlesung zur International Summer School on Microelectronics an der Leibniz Universität Hannover

Im August 2025 haben wir uns zur International Summer School on Microelectronics (ISSOM25) an der Leibniz Universität Hannover mit der Vorlesung “Before It Hits the Chip: A Gentle Introduction to Mixed-Signal IC Verification” von Martin Grabmann eingebracht und in der begleitenden Ausstellung über unsere Themenangebote und Betreuung informiert. An der ISSOM 2025 nahmen Studentinnen und Studenten teil, die den gesamten Lebenszyklus eines Chips vom Konzept bis zur realisierten Schaltung erkunden wollten. Beiträge dazu gab es von den Partnern Leibniz Universität Hannover, TU Braunschweig, RWTH Aachen, TU Wien und FMD - Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland sowie Unterstützung über das Netzwerk Chipdesign Germany, das vom BMFTR gefördert wird.



Dr.-Ing. Georg Gläser bot im Wintersemester 2025/2026 die Vorlesung „Entwurf von digitalen und Mixed-Signal Systemen“ am IMMS in Ilmenau an. Die Prüfungsleistung wird für die TU Ilmenau erbracht. Foto: IMMS.

Vorlesung zum Chipdesign am IMMS

Zum Wintersemester 2025 startete die Vorlesung „Entwurf von digitalen und Mixed-Signal Systemen“ von Dr.-Ing. Georg Gläser für Studentinnen und Studenten der TU Ilmenau, um den Kompetenzaufbau zur Entwicklung integrierter Schaltungen zu fördern und so das Thüringer Halbleiter-Ökosystem gezielt zu stärken. In den am IMMS Ilmenau durchgeführten Veranstaltungen kann man vertiefte Kenntnisse im systematischen Entwurf digitaler und gemischt analog-digitaler Systeme auf Chip-Ebene erwerben und lernen, komplexe Systemfunktionen in modularisierte, implementierbare Funktionsblöcke zu zerlegen und deren Eigenschaften wie Fläche und Latenz frühzeitig abzuschätzen. Zentral ist dabei die Analyse realer Chip-Architekturen und typischer Designfehler, über die ein praxisorientiertes Verständnis für bewährte Entwurfsmuster und strategische Entscheidungen im Mixed-Signal-Design möglich wird. Am Ende der Vorlesung stand eine Designaufgabe mit Dokumentation und kurzer Abschlusspräsentation als Prüfungsleistung.

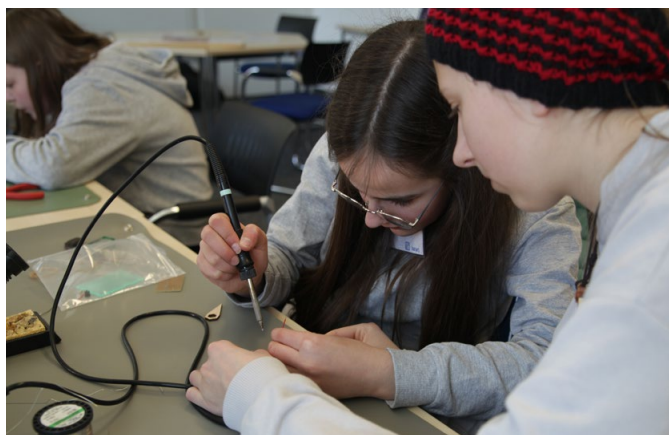
www.imms.de/angebote

Für September 2025 wurde erneut zum edaBarCamp aufgerufen. Beim Gastgeber IBM Böblingen wurden mit Unterstützung von edacentrum, IMMS und DLR Institut Systems Engineering für zukünftige Mobilität an zwei Tagen in neun Session die Beiträge von 50 Teilnehmerinnen und Teilnehmern von Bosch, Infineon Technologies, Fraunhofer-Gesellschaft, LUBIS EDA, Intrinex GmbH, TU München, Universität Stuttgart, Uni Tübingen und vielen weiteren lebhaft diskutiert. In dem offenen BarCamp-Format wurde zu Verifikations-Herausforderungen, KI-Anwendungen, Open-Source-Mindset, EDA-Flows, aktuellen Trends in der Mikroelektronik, KI und Robotik bis hin zur System Performance Evaluation und COCOTB-basierten Verifikation Fragen gestellt, Antworten gefunden und Ideen für künftige Innovationen in der Entwurfsautomatisierung ausgelotet.

In der von edacentrum, OFFIS und IMMS 2016 initiierten und organisierten Veranstaltungsreihe werden regelmäßig interaktive und offene Forschungstreffen nach dem BarCamp-Prinzip auf die Beine gestellt. Teilnehmen können Interessierte aus dem universitären Umfeld von Studium bis Professur, aus der Industrie und dem öffentlichen Dienst sowie alle, die sich für Elektronik-Design-Automation (EDA), Mikroelektronik und Systemdesign interessieren. Die edaBarCamp-Reihe hat ihren Ursprung in den institutsübergreifenden Doktorandenseminaren des Projektes ANCONA, an dem das IMMS maßgeblich beteiligt war.



<https://edabar-camp.de>



Zum Girls'Day 2025 am IMMS betreute Lötarbeiten.

Foto: IMMS.

Girls'Day 2025

Fraunhofer IDMT, IMMS und TU Ilmenau haben zum Girls'Day im April 2025 Mädchen ab Klasse 5 erste Einblicke in Wissenschaft, Forschung und Entwicklung gegeben. Zu dieser bundesweit organisierten Berufs- und Studienorientierung lernen Mädchen Berufe oder Studienfächer kennen, in denen der Frauenanteil unter 40 Prozent liegt, wie z.B. in Naturwissenschaften, Technik und Informatik. Diese Gelegenheit nutzten am IMMS 13 Mädchen der Klassen 5 und 7, um herauszufinden, was Schwingungen vermögen und wie sie sichtbar gemacht werden können, um Programmcode auf der Plattform Open Roberta mit dem System Calliope mini zu schreiben, kleine und große knifflige Fragen in der Knobel-Ecke zu lösen und eine eigene Taschenlampe zu löten. Die Schülerinnen von den Gymnasien aus Ilmenau, Arnstadt und Suhl und von der Reformschule „Franz von Assisi“ waren mit viel Spaß bei der Sache und wurden mit ebenso viel Freude von einem Team aus zwei Ingenieurinnen und einer Mathematikerin des IMMS sowie studentischer Unterstützung betreut.

Open-Roberta-Workshop im Rahmen der Begabtenförderung im Ilm-Kreis

Im Rahmen der Begabtenförderung des Ilm-Kreises gestaltete das IMMS für 18 Schülerinnen und Schüler der Klasse 4 über den Open Roberta Coding Hub, dem Kooperationsverbund zwischen der Technischen Universität Ilmenau, dem Fraunhofer IDMT und des IMMS, einen Nachmittag in der Ziolkowski-Grundschule. Nach einer kurzen Einführung konnten die Kinder mit Hilfe der Open-Roberta-Plattform selbstständig Programmcode schreiben, auf die calliope-Platine übertragen, um anschließend den Fahrroboter calli:bot in Bewegung zu setzen.

Dr.-Ing. Alexander Hofmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Technik und Biochemie zu kombinieren und mit der daraus resultierenden neuen Qualität Menschen zu helfen, motiviert meine Arbeit auch nach 14 Jahren am IMMS. Das IMMS ermöglichte mir hierfür die Erforschung der noch jungen CMOS-Biochip-Technologie. Ihr stark interdisziplinärer Charakter führte mich durch verschiedene Teilgebiete der Wissenschaft und Industrie aus (Mikro-) Elektronik, Biochemie, Material- und Elektroniktechnologie, System-, Prozessentwicklung sowie -validierung und mündete im Abschluss meiner Promotion. Der stets hilfsbereite, konstruktive und kollegiale Umgang am IMMS half mir dabei, auch herausfordernde Zeiten und Aufgaben zu meistern.

Nach Abschluss dieser umfangreichen Ausbildung und Qualifizierung bietet mir das IMMS zudem die Möglichkeit, neugesteckte Ziele und einen weiteren, persönlich gesetzten, sinnstiftendem Aspekt meiner Arbeit zu verwirklichen: neu erforschte und entwickelte CMOS-Biochips in die Anwendung und industrielle Verwertung zu überführen. Aktuelle und z.T. international geprägte Industrieprojekte für unterschiedliche Bereiche in den Lebenswissenschaften verdeutlichen zum einen den Bedarf solcher Lösungen und das Wachstumspotenzial über die wissenschaftlich geprägte Forschung hinaus. Zum anderen erweitere ich dadurch meine Fähigkeiten in

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

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

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



Dr.-Ing. Alexander Hofmann, Spezialist für elektrochemische CMOS-Sensoren im Themenbereich Mikroelektronik am IMMS.

Foto: IMMS.

Kommunikation, Projektmanagement, -vorbereitung und -akquise. Der Kontakt mit industriellen Partnern verschafft mir dabei einen tiefgründigen Einblick in die durch Anwendungen definierten Bedarfe und Problemstellungen, für die das IMMS-Team immer maßgeschneiderte Lösungen erarbeitet. Außerdem bildet die Schnittstelle zur Industrie die Grundlage weiterführender Forschungstätigkeiten am IMMS, die wiederum neuen Mehrwert für Life-Science-Anwendungen kreieren.

Interessierten mich zu Beginn meiner Arbeiten am IMMS vor allem die Entwicklung und Optimierung biosensorischer analoger integrierter Schaltungen, verlagerte sich mein Schwerpunkt auf die ganzheitliche Betrachtung und Erforschung von CMOS-Biochip-Systemen. Derzeitig sogar gesamte Wertschöpfungsketten auf diesem Gebiet aufbauen, organisieren und mitgestalten zu können, erweitert erneut meinen Horizont und erfüllt mich. Bezüglich Vielfalt, Umfang, Freiheit und Förderung der eigenen Entwicklungsmöglichkeiten bietet das IMMS somit ein ideales Umfeld für die persönliche Verwirklichung.“

Manuel Jirsak, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Im Sommer 2022 hatte ich durch ein dreimonatiges Praktikum während meines Studiums das erste Mal die Möglichkeit, am IMMS aktiv zu werden. Darauf folgten einige Monate als studentische Hilfskraft, die im Frühling 2023 in meiner Bachelorarbeit gipfelten, in deren Rahmen ich auch mein erstes Paper schreiben und veröffentlichen konnte. Während meines Masterstudiums gab das IMMS mir die Möglichkeit,



Manuel Jirsak, M.Sc.,
Spezialist für
Design-Methodik
im Themenbereich
Mikroelektronik
am IMMS.

Foto: IMMS.

neben dem Studium auf Teilzeit zu arbeiten. Darüber hinaus unterstützte das IMMS mich bei meiner Masterarbeit, die ich im Sommer 2025 auch durch die sehr gute interne Betreuung überaus erfolgreich abschließen konnte. Besonders dankbar bin ich für die Gleitzeitregelung sowie die Möglichkeit, gelegentlich im Homeoffice arbeiten zu können. Das erleichtert auch stressigere Phasen.

Seit Beginn meiner Tätigkeit bin ich hauptsächlich im Bereich der elektronischen Design-Automatisierung (EDA) unterwegs. Dabei ist mein Ziel stets die Unterstützung der Digitalschaltungsentwicklung, sowohl bezüglich der Verifikation von Schaltungen als auch die Optimierung hinsichtlich Fläche, Geschwindigkeit und Energiebedarf. Der Entwicklungsprozess dieser Schaltungen ist sehr komplex und umfangreich, so dass jede Form der Automatisierung eine willkommene Erleichterung für die Schaltungsentwickler ist. Bei meinem Einstieg in die Forschung und Entwicklung war das lediglich eine kleine Software, die Schaltungen so modifiziert, dass sie weniger Energie benötigen, wenn bestimmte Teile der Schaltung inaktiv sind. Im weiteren Verlauf konnte ich verschiedene Mechanismen zusätzlich implementieren, die hohes Anwendungspotential in der Digitalschaltungsentwicklung besitzen oder Gegenstand aktueller Forschung sind. Dabei reicht das Einsatzgebiet von Features, die die Verifikation vereinfachen, bis hin zu komplexen Algorithmen zur Schaltungsoptimierung. Das alles habe ich nutzerfreundlich verpackt in einer handlichen Python-Software, deren Quellcode im Internet frei verfügbar ist, um den Nutzen für die Wissenschaft und Industrie zu maximieren.

Seit dem ersten Tag genieße ich die angenehme Arbeitsatmosphäre und den stets freundlichen und konstruktiven Umgang unter den Kollegen. Im gegenseitigen Austausch mit anderen Mitarbeitern konnte ich bereits viel lernen, sowohl theoretisches Hintergrundwissen als auch praktische Tipps und Kniffe. Die Forschungsthemen sind realitätsnah und praxisrelevant, was eine besondere Motivation für mich ist. Als Mitarbeiter am IMMS arbeite ich dadurch aktiv an der Brücke zwischen Forschung und Anwendung mit. Das bereitet mir jeden Tag aufs Neue viel Freude. Ich arbeite gern am IMMS!“

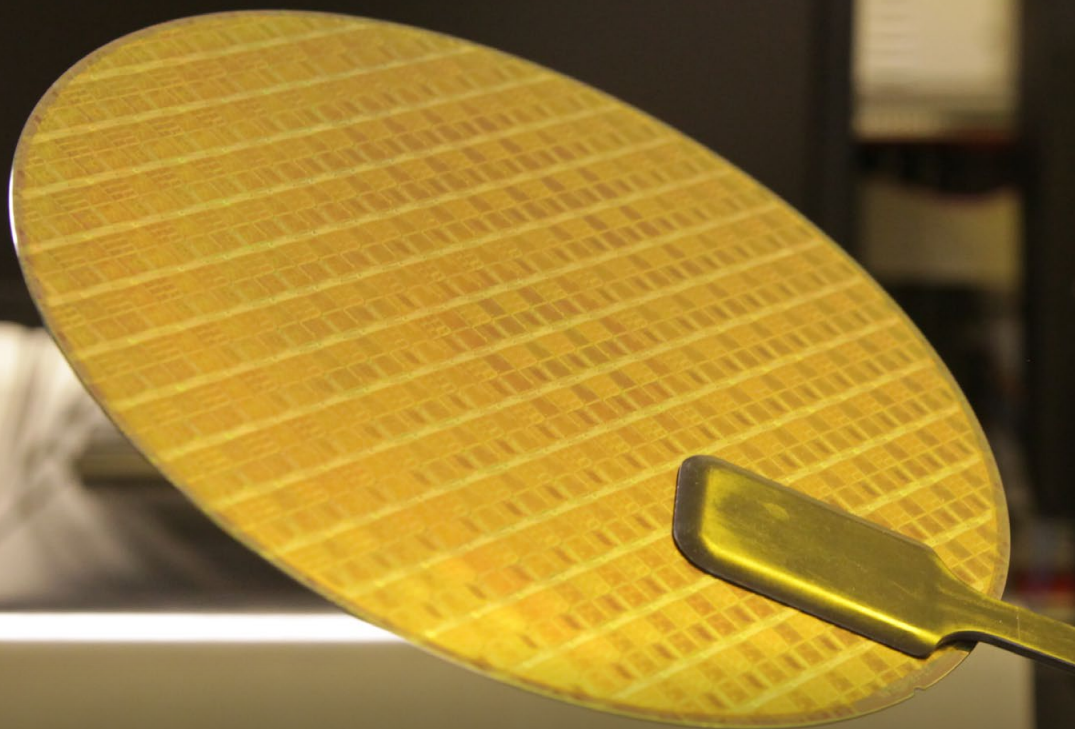
- 31
- › Integrierte Sensorsysteme
 - › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - › nm-präzise 6D-Direktantriebe
 - › Inhalt
 - * Förderung

Zur zugehörigen Publikation auf www.imms.de.
Software „Netlist Carpentry“ auf GitHub

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

FORSCHUNGSFELD

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME



Im Projekt PANDIA wird neuartige integrierte Sensorik für Spektorradiometer entwickelt, um Licht künftig mit höherer Empfindlichkeit, kürzeren Messzeiten und größerem Dynamikbereich für zahlreiche Anwendungen deutlich besser und effizienter zu analysieren. Foto: IMMS.



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Freistaat
Thüringen 

Die Interdisziplinäre Partnerschaft für innovative Spektorradiometer aus Thüringen (PANDIA) wird über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund unter der Verbundvorhabensnummer 1004537 gefördert, das Thema „Entwicklung und Erforschung von Zeilensensor-ICs für Spektorradiometer“ des IMMS unter der Vorhabensnummer 2025 VFE 0027.

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.

33 

Integrierte Sensorsysteme

Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

nm-präzise 6D-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

© IMMS 2025

PANDIA*-Projektauftritt: Innovative Spektroradiometer zur besseren Analyse von Licht

Mit einem Auftakttreffen am 23.09.2025 in Erfurt haben die Projektpartner IMMS, JETI Technische Instrumente GmbH und X-FAB Global Services GmbH die Arbeiten für das im September gestartete dreijährige Verbundvorhaben „PANDIA – Interdisziplinäre Partnerschaft für innovative Spektroradiometer aus Thüringen“ begonnen. Das vom Freistaat Thüringen geförderte und von der Europäischen Union kofinanzierte Projekt bringt die Kompetenzen in Optik und Photonik aus Jena mit denen in der Mikroelektronik und Sensorik aus Erfurt enger zusammen. Ziel ist die Entwicklung neuer Generationen von Spektroradiometern mit höherer Empfindlichkeit, kürzeren Messzeiten und größerem Dynamikbereich, um Licht für zahlreiche Anwendungen deutlich besser und effizienter zu analysieren.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

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

Spektroradiometer – Universaltools mit Limits

Spektroradiometer sind unverzichtbare Werkzeuge in vielen wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen, die eine präzise Analyse der spektralen Eigenschaften von Licht erfordern. Sie werden weltweit in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt – von der HDR-Display- und Projektorherstellung und Beleuchtungsindustrie über die Photovoltaik, Materialwissenschaft und Umwelttechnik bis hin zur Lebensmittelindustrie, pharmazeutischen Qualitätskontrolle, medizinischen Forschung und Diagnostik.

In Bezug auf Schnelligkeit, Messgenauigkeit, Dynamikbereich und Stabilität erfüllt der weltweite Stand der Technik in einigen Anwendungen jedoch nicht die ökonomischen und technischen Anforderungen, etwa weil die Messungen die Produktion zu lange aufhalten, Umwelteinflüsse wie z.B. hohe Temperaturen die Ergebnisse verfälschen können und dann neue Referenzmessungen und Neukalibrierungen für weitere Verzögerungen sorgen. Grund ist, dass die Geräte bislang auf zugekaufte Detektoren setzen. Zudem werden Komponenten wie mechanische Shutter und für anspruchsvollere Messungen gekühlte Sensoren oder optische Aufbauten genutzt, die eine kompakte Integration in kleine Messgeräte verhindern.

Neuartige integrierte Sensorik für Spektroradiometer

In PANDIA entwickeln die Partner daher erstmals anwendungsspezifische Zeilensen-
sor-Chips. Diese beinhalten zwei neue Sensorkonzepte, die in die Mikroelektronik-

Jahresbericht
© IMMS 2025

Chips integriert werden. Zum einen werden Photodioden-basierte Zeilensensoren mit integrierter elektronischer Dunkelreferenz entwickelt. Diese ersetzen Lösungen mit dem derzeit üblichen mechanischen Shutter, was die Messzeit halbiert und die Robustheit steigert. Zum anderen werden mit der Entwicklung von SPAD-basierten Zeilensensoren Single-Photon-Avalanche-Dioden (SPADs) genutzt, die einzelne Photonen detektieren und so selbst extrem schwache Lichtquellen erfassen können.

Zusätzlich sind in beiden Sensorkonzepten integrierte Analog-Digital-Wandler und Temperatursensoren vorgesehen, was die Messgenauigkeit erhöht und die Systemintegration erleichtert.

X-FAB, JETI und IMMS bündeln Expertise

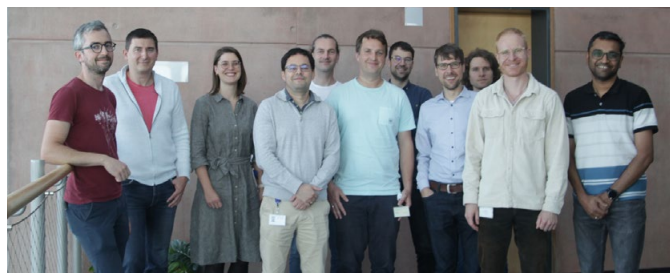
Das Projekt vereint die Stärken dreier Thüringer Partner: Das IMMS koordiniert das Projekt, entwickelt die mikroelektronischen Sensor-Chips vom Schaltplan über Layout und Simulation bis zur Inbetriebnahme und unterstützt bei der Integration in die Spektroradiometer. JETI bringt seine Erfahrung in der Entwicklung und Vermarktung von Spektroradiometern ein und integriert die neuen Sensoren in Demonstratoren für Eignungstests sowie in Labormuster, die anwendungsnah unter realen Bedingungen evaluiert werden. X-FAB stellt die Halbleitertechnologie XSo18 bereit und liefert optimierte Photodioden und SPADs. Mit dieser engen Zusammenarbeit wird die regionale Wertschöpfungskette von der Halbleiterfertigung über die Forschung bis zum Endprodukt geschlossen.

Beitrag zur technologischen Souveränität

Mit PANDIA wird Thüringen unabhängiger von außereuropäischen Zulieferern für kritische Sensorkomponenten. Die neue Generation von Spektroradiometern wird schneller, empfindlicher und robuster sein und so die internationale Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Partner stärken. Gleichzeitig trägt das Projekt zur wirtschaftlichen Entwicklung der Region bei, indem es die Innovationskraft der zwei Thüringer Schlüsselbranchen Optik/Photonik und Mikroelektronik vernetzt.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

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



Vertreterinnen und Vertreter der Projektpartner X-FAB, JETI und IMMS des im September 2025 gestarteten Projekts PANDIA zum Auftakt-treffen am 23.09.2025 in Erfurt.

Foto: IMMS.

Jahresbericht

© IMMS 2025



v.r.n.l.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer (Betreuer, Leiter des Fachgebiets Elektronische Schaltungen und Systeme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau sowie bis September 2025 wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS), Alexander Hofmann (Spezialist für CMOS-Biosensoren am IMMS) und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Seidl (Gutachter, Universität Duisburg-Essen) nach der Disputation am 23.04.2025 zu Alexander Hofmanns Dissertation „CMOS-Biochip-System zur optischen Detektion und Quantifizierung von Analyten“. Foto: IMMS.

Halbleiterbasierte Biosensoren zur Vor-Ort-Diagnostik – realistische Alternative zu Labornachweisen

Dissertation zu optischem Sensorsystem für die In-vitro-Diagnostik verteidigt

Am 23.04.2025 hat Alexander Hofmann, Spezialist für CMOS-Biosensoren am IMMS, seine Dissertation „CMOS-Biochip-System zur optischen Detektion und Quantifizierung von Analyten“ erfolgreich an der Technischen Universität Ilmenau verteidigt. Die am IMMS entstandene Arbeit zeigt, wie sich die Vorteile mobiler Schnelltests mit der hohen Genauigkeit etablierter Labordiagnostik verbinden lassen. Kern des Systems ist ein optoelektronischer CMOS-Chip, der auf standardisierter Halbleitertechnologie basiert und sich kosteneffizient sowie skalierbar fertigen lässt. Das System wurde mit zwei bioanalytischen Verfahren validiert. Beide Nachweise belegen, dass sich mit CMOS-basierten Lösungen molekulare sowie proteinbasierte Analyten präzise und digital erfassen lassen. Damit werden Messleistungen erzielt, wie sie bislang nur in spezialisierten Labors möglich waren. Die Arbeiten sind die Grundlage für die Entwicklung von Sensorsystemen zur In-vitro-Diagnostik, mit denen das IMMS Anwendungen für ein individuelles, dezentrales Gesundheitsmonitoring mit elektronischen Schnelltests erschließt.

www.imms.de/biosensors

„Wir haben hier eine stark interdisziplinäre, hervorragende Dissertation mit hoher Anwendungsrelevanz präsentiert bekommen“, sagt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Seidl, Gutachter der Dissertation und Professor für Medizintechnik an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen. Die Arbeit vereine CMOS-basierte Biosensorik und Optoelektronik mit Anwendungen für Molekultests und Immunoassays. Und das sei entscheidend, wenn es schnell gehen muss, aber so genau wie im Labor sein soll, so Karsten Seidl weiter.

Denn hochpräzise diagnostische Systeme zum Nachweis von Infektionen und Krankheiten sind komplex, groß und teuer. Sie werden vor allem in zentralisierten Laboren mit geschulten Fachkräften eingesetzt. Ergebnisse ziehen oft Warte- und Wegezeiten von Tagen nach sich.

Sind jedoch schnelle Testergebnisse wichtig, wie z.B. bei Notfällen im Rettungswagen, sind Point-of-Care-Tests eine Option. Diese Schnelltests haben den Vorteil, dass sie einfach vor Ort zu handhaben, klein und preiswert sind. Allerdings weisen sie für viele Anwendungen eine zu geringe Sensitivität auf oder sind nicht digitalisiert – oder beides.

www.imms.de/ivd

„Alexander Hofmann hat mit seiner Dissertation zentrale Grundlagen für eine innovative Klasse von Point-of-Care-Diagnostiksystemen geschaffen, die Präzision auf Laborniveau mit der Kompaktheit und Kosteneffizienz elektronischer Schnelltests verbinden. Seine Arbeit ist ein beeindruckendes Beispiel dafür, wie sich CMOS-Technologie und bioanalytische Verfahren zu einer leistungsfähigen Plattform für dezentrales Gesundheitsmonitoring integrieren lassen“, erklärt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, Betreuer und wissenschaftlicher Geschäftsführer des IMMS sowie Leiter des Fachgebiets Elektronische Schaltungen und Systeme an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau. „Die entwickelten Konzepte eröffnen neue Perspektiven für elektronische Schnelltests – von molekularen Nachweisen bei Infektionskrankheiten über personalisierte Gesundheitschecks bis hin zu Tests auf Allergene, Nährstoffe oder Verunreinigungen in Lebensmitteln und Trinkwasser. Durch die Kombination optischer und ionensensitiver Nachweismechanismen lassen sich künftig noch breitere bioanalytische Anwendungen abdecken, ohne dabei auf Laborausstattung angewiesen zu sein.“



Alexander Hofmann mit einem optoelektronischen CMOS-Biochip auf einer Cartridge und einem zugehörigen Testsystem für Untersuchungen zu seiner Dissertation "CMOS-Biochip-System zur optischen Detektion und Quantifizierung von Analyten".

Foto: IMMS.

CMOS-Biochip-System zur optischen Detektion und Quantifizierung von Analyten

Die Dissertation liefert den Nachweis, dass sich über Lichtabsorptionsmessungen mit einem entwickelten optoelektronischen CMOS-Biochip-System die Vorteile von präziser Labortechnik mit denen von Schnelltests kombinieren lassen. „In dem untersuchten CMOS-Biochip-System werden Proben direkt auf einen optischen Sensorchip gegeben und die biochemische Reaktion ohne Abstände zwischen Probe und Lichtdetektor gemessen“, erklärt Alexander Hofmann. „Für die dafür notwendige Funktionalisierung der Chip-Oberfläche haben Partner von uns Protokolle, also Rezepte entwickelt.“ Damit könne man biochemische Reaktionen nachweisen, bei denen je nach Konzentration des gebundenen Analyten Licht unterschiedlich stark absorbiert wird, so Alexander Hofmann weiter. „Und das kann man dann als Helligkeitsunterschiede optoelektronisch messen.“

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

In der Arbeit hat er untersucht, wie sich der Abstand von Proben bzw. nachzuweisenden Analyten zum Detektor auf die maximal erreichbare Sensitivität auswirkt, Vor- und Nachteile im Vergleich zu klassischen optischen Ansätzen diskutiert und Ansätze zum Contact Sensing und Contact Imaging bezüglich der erreichbaren Sensitivität gegenübergestellt. Zudem hat er ein Konzept zur Modellierung der optischen, biochemischen und elektronischen Systemanteile des CMOS-Biochip-Systems entwickelt. Damit lassen sich erreichbare Leistungsparameter abschätzen wie Sensitivität, Signalauflösung, Signal-zu-Rausch-Verhältnis, Dynamikbereich, Konzentrationsmessbereich sowie Nachweisgrenze.

Das System wurde mit zwei ausgewählten bioanalytischen Verfahren validiert. Zum einen wurde erstmals DNA mit Lichtabsorptionsmessungen auf CMOS-Biochips und ohne Biomarker nachgewiesen. Eingesetzt wurde dazu synthetische Ziel-DNA. Diese wurde durch eine DNA-Hybridisierung lokalisiert auf den Photodioden des entwickelten CMOS-Biochip-Systems hochsensitiv nachgewiesen. Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messreihen legen nahe, dass nicht nur ein hochgenauer, sondern ein PCR-freier molekularer Nachweis mit einem solchen System umgesetzt werden kann.

Zum anderen konnte mit einem immunologischen Verfahren am Beispiel des Nachweises des prostataspezifischen Antigens (PSA) erstmals gezeigt werden, dass das entwickelte CMOS-Biochip-System in den Leistungsparametern den Schnelltest-standard LFA übertrifft und auf dem Niveau sowie zum Teil besser als der Laborstandard ELISA ist.

www.imms.de/biosensors

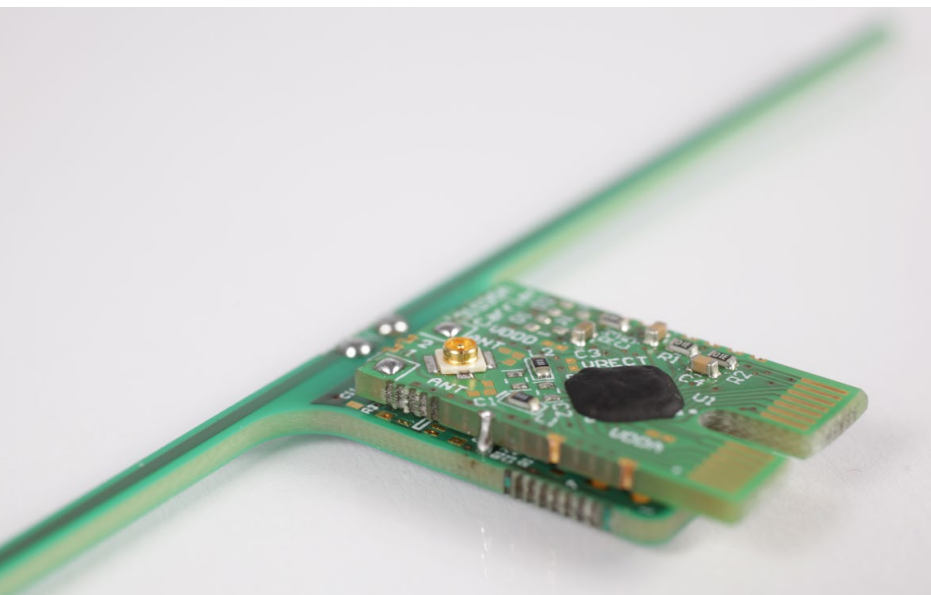
Forschung am IMMS für Sensorsysteme zur In-vitro-Diagnostik

„Alexander Hofmann hat mit seiner Dissertation nicht nur eine hervorragende wissenschaftliche Arbeit vorgelegt, sondern auch die Entwicklung weiterer bioelektronischer Diagnostiksysteme am IMMS inhaltlich und methodisch entscheidend mit-gestaltet. Besonders wertvoll ist sein Beitrag zur Erweiterung der bioanalytischen Nachweistechnologien um ISFET-basierte, ionensensitive Verfahren – ein wichtiger Schritt, der die am IMMS etablierten optischen Plattformen sinnvoll ergänzt. Durch seine interdisziplinäre Arbeitsweise, seine Projektleitungen und seinen Innovations-geist hat er den technologischen Kompetenzaufbau in diesem strategisch wichtigen Forschungsfeld maßgeblich vorangetrieben“, fasst Prof. Sommer zusammen.

www.imms.de/ivd

Damit erstreckt sich die Forschung des IMMS im Bereich CMOS-basierter Biosensoren auf optische Analyseverfahren, wie z.B. mittels Einzelphotonendetektoren (SPADs), und auf ladungsbasierte Analysen, wie z.B. über ionensensitive Feldeffekttransisto-ren (ISFET). Gemeinsam mit Partnern erforscht das IMMS, wie sich diese nutzen las-sen, um weitere physikalische, chemische und biologische Parameter digitalisieren zu können. Zudem arbeitet das IMMS daran, integrierte Schaltungen mit anderen diagnostischen Technologien zu kombinieren, wie z.B. mikrofluidische Lab-on-Chip-Systeme.

Jahresbericht



Testaufbau für Voruntersuchungen im Projekt NeAixt zur Erforschung von UHF-RFID-Sensor-Transponder-ICs mit neuartiger Speichertechnologie für smarte Sensorik-Anwendungen in der Logistik. Foto: IMMS.

NeAixt*-Projekt gestartet: UHF-RFID-Sensor-Transponder-ICs für smarte Sensorik

Erweiterung der IMMS UHF-RFID-Sensor-Technologie für smarte Logistikanwendungen

Das IMMS erweitert seine Ultra-Hochfrequenz-RFID-Sensor-Technologie mit einer neuartigen, besonders energiesparenden Speichertechnologie. Ziel ist es, künftig intelligente Identifikations- und Sensorlösungen für Industrie und Logistik bereitzustellen, die energieeffizient arbeiten und neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnen, wie z.B. die Überwachung von Kühlketten- oder Materialintegrität. Im Projekt liefert das IMMS einen leistungsfähigen UHF-RFID-Transponder-IC, der beim Projektpartner microsen-sys in einen Sensorknoten auf Basis von Bluetooth Low Energy (BLE) integriert wird. Dieser Sensorknoten soll über bestehende RFID-Infrastrukturen aufgeweckt werden und anschließend Datenverarbeitung und Kommunikation ausführen – ein Ansatz, der die Energieeffizienz deutlich erhöht und die Batterielaufzeit verlängert.

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

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

microsensys plant den Einsatz der Sensorknoten in sich schnell bewegendem Objekten, die von stationärer Infrastruktur ausgelesen werden sollen, etwa in der Betriebsmittelüberwachung. In solchen dynamischen Szenarien sind hohe Reichweiten und besonders schnelle Reaktionszeiten für ein zuverlässiges Wake-Up-Verhalten entscheidend, um eine schnelle und präzise Datenerfassung zu gewährleisten.

Neuartige Speichertechnologie als technologische Basis

Die Grundlage bildet die bewährte UHF-Transponder-Technologie des IMMS aus den Projekten StorAlge und HoLoDEC. Ergänzt wird sie durch eine neuartige FeRAM-Speicher-IP vom Projektpartner X-FAB, die ebenfalls im Projekt NeAixt entwickelt wird. Diese Speicherlösung zeichnet sich durch einen extrem niedrigen Energieverbrauch aus und wird eine zentrale Rolle im neuen Chipdesign spielen. Darüber hinaus wird das IMMS weitere Ansätze zur Beschleunigung des Wake-Up-Vorgangs erforschen und in Prototypen evaluieren. So entsteht eine zukunftsweisende Lösung für die digitale Logistik.

www.imms.de/
neaixt



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Freistaat
Thüringen



Ministerium für Wirtschaft,
Landwirtschaft
und Ländlichen Raum

Hochsensitive Fluoreszenzbildgebung für quantitative Lateral-Flow-Tests



Das IMMS hat einen Chip mit optimierter Lock-in-Pixel-Technologie und dafür einen kompakten Fluoreszenz-Reader zur quantitativen Auswertung von Lateral-Flow-Teststreifen für Point-of-Care-Anwendungen entwickelt. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick: Quantitative Lateral-Flow-Tests mit Fluoreszenzmarkern

Lateral-Flow-Assay-Teststreifen (LFA-Tests) haben sich als kostengünstige und einfach anwendbare Diagnostikplattform etabliert. Klassische Streifentests auf Basis von Goldnanopartikeln als farbgebende Komponente liefern jedoch meist nur qualitative Ja-/Nein-Aussagen und stoßen hinsichtlich Sensitivität und Quantifizierbarkeit schnell an ihre Grenzen. Für viele medizinische Fragen sind jedoch quantitative Aussagen über Biomarker-Konzentrationen entscheidend, beispielsweise zur Früherkennung von Herzinfarkten mithilfe von Troponin oder zur Verlaufsbeobachtung von Infektions- und Entzündungsprozessen. Gerade bei niedrigen Konzentrationen diagnostisch relevanter Biomarker reichen klassische Schnelltests häufig nicht mehr aus.

Fluoreszenzmarker wie Europium(III)-Komplexe ermöglichen gegenüber Goldnanopartikeln deutlich empfindlichere Messungen und eröffnen Perspektiven für quantitative Point-of-Care-Diagnostik mit einer Sensitivität, die sich klassischen Laborverfahren annähert. Dadurch können zeitkritische diagnostische Entscheidungen direkt vor Ort getroffen werden, ohne Proben zunächst in zentrale Labore transportieren zu müssen. Das reduziert die Zeit bis zum Ergebnis erheblich und kann insbesondere in Notfallsituationen oder ressourcenarmen Regionen von großem Vorteil sein. Darüber hinaus ermöglichen fluoreszenzbasierte Verfahren perspektivisch auch Multiplex-Tests, bei denen mehrere Biomarker gleichzeitig analysiert werden können.

www.imms.de/
ivd

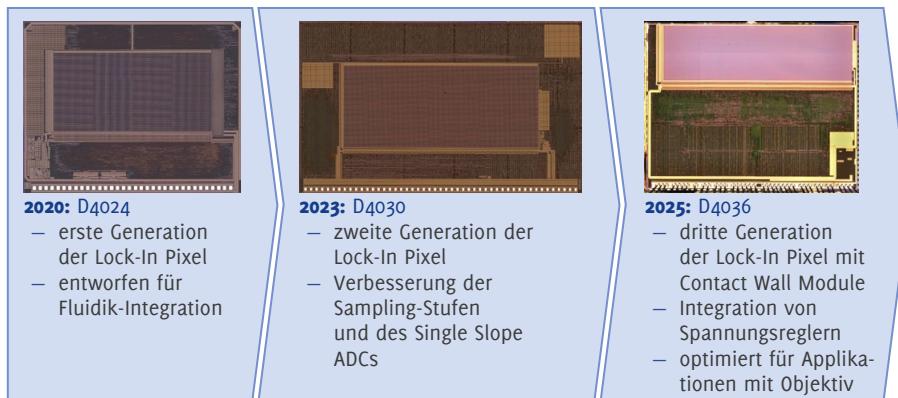


Abbildung 1: Entwicklungsschritte der Chips über die Projekte am IMMS. Chipfotos/Grafik: IMMS.

In der Forschungsgruppe TIRELESS wurden am IMMS die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Vorgängerprojekten MEDIKIT, Ovutinin und SensInt zusammengeführt, um ein optimiertes Lesegerät für fluoreszenzbasierte LFA-Tests sowie eine neue Generation von Lock-In-Pixel-Sensoren zu entwickeln. Ziele waren insbesondere die weitere Verbesserung der Nachweisgrenze sowie die Vereinfachung und Miniaturisierung des Gesamtsystems.

Kernstück des am IMMS realisierten Systems ist ein speziell entwickelter CMOS-Bildsensor für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung. Dabei wird der Fluoreszenzfarbstoff zunächst durch gepulstes UV-Licht angeregt. Die eigentliche Messung erfolgt erst nach dem Abklingen des Anregungslichts. Durch dieses Lock-In-Prinzip kann das deutlich schwächere Fluoreszenzsignal elektronisch vom Anregungslicht getrennt und über viele Beleuchtungszyklen akkumuliert werden. Dadurch lassen sich auch sehr geringe Konzentrationen quantitativ erfassen.

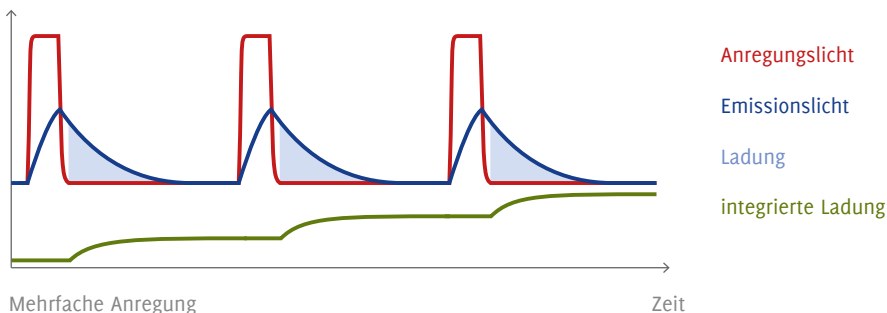
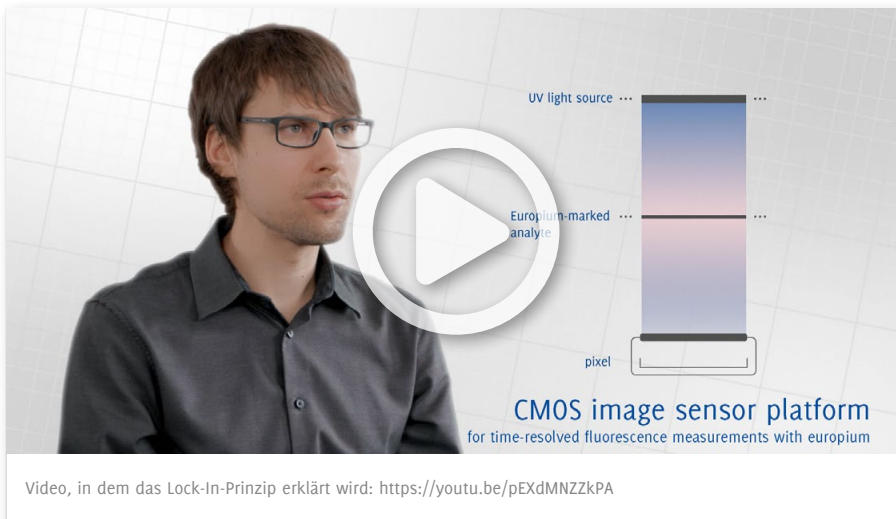


Abbildung 2: Lock-In-Pixel-Technologie: Sobald das Anregungslicht abgeklungen ist, wird das emittierte Fluoreszenzlicht gemessen, bis auch dieses abgeklungen ist. Das kann mehrfach wiederholt werden. Das Fluoreszenzemissionslicht wird Zyklus für Zyklus akkumuliert, wodurch das Ausgangssignal verstärkt wird. Eine Trennung über optische Filter ist somit nicht notwendig. Grafik: IMMS.

www.imms.de/
ivd

www.imms.de/trf



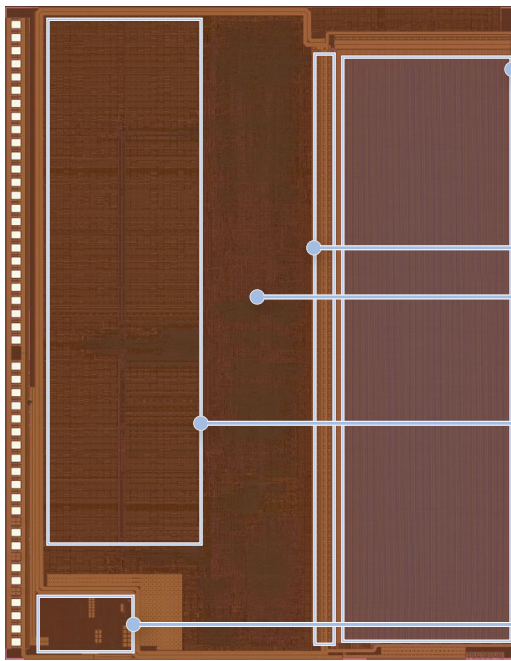
UV light source ...
 Europium-marked analyte ...
 pixel
CMOS image sensor platform
 for time-resolved fluorescence measurements with europium

Video, in dem das Lock-In-Prinzip erklärt wird: <https://youtu.be/pEXdMNZZkPA>

Herausforderungen: Anregungslicht, schwache Fluoreszenzsignale und Störeinflüsse

Die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung stellt hohe Anforderungen an die Unterdrückung des optischen Anregungslichts. Obwohl die eigentliche Messung erst nach dem Abschalten der UV-Anregung erfolgt, können bereits geringe parasitäre Lichtanteile innerhalb der Pixel des Bildsensors die Messdynamik und damit die erreichbare Sensitivität deutlich begrenzen. Besonders kritisch ist das bei sehr schwachen Fluoreszenzsignalen und langen Akkumulationszeiten über viele Belichtungszyklen hinweg.

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass nicht nur die eigentliche Photodiode lichtempfindlich ist, sondern auch weitere Bereiche innerhalb der Pixel parasitäre Lichtsignale einfangen können. Hierzu zählt insbesondere der sogenannte Floating-Diffusion-Knoten (FD). Dieser stellt den zentralen Ladungsspeicherknoten innerhalb eines Pixels dar, auf den die von der Photodiode erzeugte elektrische Ladung übertragen und anschließend ausgelesen wird. Trifft Licht direkt oder indirekt auf diesen Bereich, entstehen parasitäre Ladungssignale, welche die eigentliche Fluoreszenzmessung verfälschen können. Das begrenzt die Effizienz der elektronischen Unterdrückung des Anregungslichts und damit letztlich die erreichbare Sensitivität des Gesamtsystems.



Lock-In-Pixel mit Pinned Photodioden:

- Pixelgröße 12,5 µm x 12,5 µm
- 100 Zeilen x 350 Spalten
- optisch isolierter FD-Knoten zur besseren Unterdrückung des Anregungslichts

Zeilenweiser Single-Slope-ADC

frei konfigurierbare Bildaufnahme über programmierbaren Sequenzer

- einfache Schnittstellenanbindung über I²C und QSPI

SRAM-Bildspeicher integriert für ein volles Bild

Supply-System mit integrierten Spannungsreglern

- XSo18-CMOS-Technologie
- Gesamtchipgröße 3800 µm x 4860 µm

Abbildung 3: Chipfoto: IMMS.

Chipentwicklung in neuer Lock-In-Pixel-Generation mit Contact-Wall-Technologie

Am IMMS wurden zwei Varianten eines neuen Bildsensor-Chips entwickelt. Beide besitzen ein Bildfeld mit ca. 100 x 350 Pixeln bei einer Pixelgröße von 12,5 µm x 12,5 µm und basieren auf der 180-nm-CMOS-Technologie XSo18 von X-FAB. Die Lock-In-Pixel-Technologie ermöglicht es, das Anregungslicht direkt im Pixel elektronisch auszublenden, während das deutlich schwächere Fluoreszenzsignal über viele Beleuchtungszyklen hinweg akkumuliert werden kann. Die Digitalisierung der Pixelwerte erfolgt spaltenweise über integrierte Single-Slope-ADCs. Zusätzlich besitzt der Sensor einen integrierten Bildspeicher sowie programmierbare Steuerlogik für die Bildaufnahme. Eine der beiden Sensorvarianten nutzt erstmals das sogenannte Contact-Wall-Modul (CTW) von X-FAB zur zusätzlichen optischen Abschirmung parasitär lichtsensitiver Bereiche innerhalb des Pixels. Ziel dieser neuen Pixelarchitektur war eine weitere Verbesserung der Unterdrückung des Fluoreszenz-Anregungslichts und damit eine höhere Sensitivität bei der zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung.

www.imms.de/
aidesigntest

Zusätzlich wurde der Chip hinsichtlich Systemintegration und externer Beschaltung optimiert. Ziel war es, die Anzahl notwendiger externer Komponenten weiter zu reduzieren und die Grundlage für kompakte sowie kosteneffiziente Reader-Systeme

Abbildung 4:

Platine mit dem entwickelten Chip und einer Linse für Anwendungstests in einem Lateral-Flow-Teststreifen-Lesegerät.

Foto: IMMS.



zu schaffen. Damit setzt TIRELESS die Integrationsstrategie der Vorgängerprojekte konsequent fort.

Hierfür wurden notwendige Spannungsregler und Referenzschaltungen direkt auf dem Chip integriert. Dadurch kann der Sensorchip im Idealfall bereits mit einer einzigen externen Versorgungsspannung betrieben werden, was den Hardware-Aufwand des Gesamtsystems deutlich reduziert.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer kosteneffizienten und zugleich schnellen LED-Ansteuerung für die gepulste UV-Anregung. Hierfür wurde am IMMS eine alternative Treibertopologie untersucht, welche die Restladungsträger der LEDs aktiv ausräumt und dadurch ein schnelleres Abschaltverhalten ermöglicht. Im Vergleich zur bisherigen Lösung konnten die Kosten der Treiberschaltung deutlich reduziert werden, ohne die Eignung für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung zu verlieren.

Verbesserte Unterdrückung des Anregungslichts

Ein besonderer Fokus der Entwicklung lag darauf, die Unterdrückung des optischen Anregungslichts weiter zu verbessern. Hierfür wurde der Floating-Diffusion-Knoten im neuen Pixel nahezu vollständig gegen seitlichen Lichteinfall abgeschirmt. Neben einer Metallabdeckung kommen spezielle Kontaktwände zum Einsatz, welche durch das CTW-Modul realisiert werden. Dadurch wird verhindert, dass parasitäres Anregungslicht in die empfindlichen Signalbereiche des Pixels einkoppelt und dort unerwünschte Ladung erzeugt.

Zur experimentellen Bewertung des CTW-Moduls wurden zwei unterschiedliche Pixelvarianten auf dem gleichen Chip integriert: eine Variante mit der neuen CTW-basierten Abschirmung sowie eine Referenzvariante mit der bisherigen Pixelarchitektur aus den Vorgängerprojekten. Erste Charakterisierungsmessungen zeigen, dass sich die Ausblendeﬃzienz des neuen Pixeltyps gegenüber der bisherigen Architektur um etwa den Faktor drei steigern ließ.

Kompakter Fluoreszenz-Reader für Point-of-Care-Anwendungen

Parallel zur Chipentwicklung wurde am IMMS ein vollständiges Lesegerät (Reader) für fluoreszenzbasierte LFA-Tests als Demonstrator aufgebaut. Das Gerät unterstützt die Aufnahme von RGB- und Fluoreszenzbildern, verfügt über WLAN- und Bluetooth-Anbindung sowie ein integriertes Display und kann einen kompletten Arbeitstag mit einer Akkuladung betreiben und per USB-C geladen werden. Die Identifikation der eingelegten LFA-Tests erfolgt über Barcode- bzw. QR-Code-Erkennung.

- > *Integrierte Sensorsysteme*
- > *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
- > *nm-präzise 6D-Direktantriebe*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

www.imms.de/
ivd

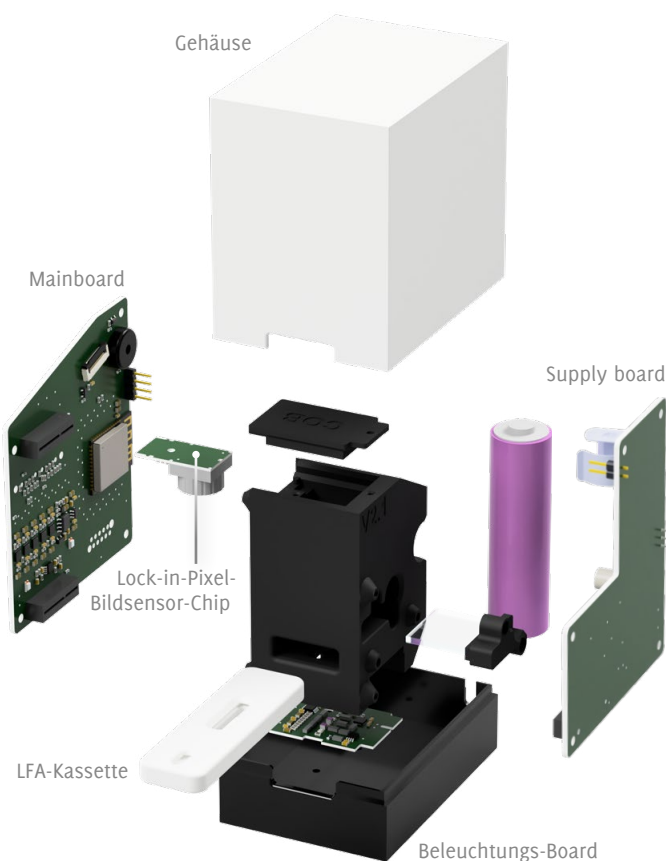


Abbildung 5:

Explosionszeichnung mit Komponenten des als Demonstrator aufgebauten Lesegeräts für fluoreszenzbasierte LFA-Tests. Die Beleuchtung erfolgt in einer Transmissionskonfiguration von unten.

Grafik: IMMS.

Durch das zweidimensionale Bildfeld des Sensors können mehrere Linien oder Spots innerhalb eines Tests gleichzeitig erfasst und quantitativ ausgewertet werden. Der entwickelte Reader eignet sich damit insbesondere für moderne **Multiplex-Tests** mit mehreren Biomarkern.

Besonders hervorzuheben ist der große **Dynamikbereich** des Sensorsystems, wodurch sowohl sehr schwache als auch starke Fluoreszenzsignale innerhalb einer Messung zuverlässig erfasst werden können. Dies eröffnet insbesondere Anwendungen im Bereich des quantitativen Nachweises von Biomarkern mit sehr niedrigen Konzentrationen.

Ein **Beispiel** hierfür ist kardiales **Troponin**, ein hochspezifischer Biomarker für Herzmuskelschäden und Herzinfarkte. Bereits geringe Konzentrationsänderungen können diagnostisch relevant sein und müssen zuverlässig detektiert werden. Fluoreszenzbasierte Lateral-Flow-Tests mit Europium-Markern bieten hier das Potenzial, deutlich empfindlichere Schnelltests bereitzustellen als klassische goldbasierte Teststreifen, die sich auch quantitativ auswerten lassen.

Auch das **optische System** des Readers wurde gegenüber den Vorgängersystemen überarbeitet. Ziel war eine homogenere Ausleuchtung der Teststreifen, eine höhere Robustheit gegenüber mechanischen Toleranzen sowie eine Verringerung der Sensorfläche. Dadurch konnte die Gesamtarchitektur des Geräts kompakter und fertigungsgerechter gestaltet werden.

Die **Gerätesoftware** wurde ebenfalls weiterentwickelt. Das System kann während der Messung automatisch geeignete Belichtungs- und Messparameter auswählen und dadurch unterschiedlich starke Fluoreszenzsignale robust erfassen. Die Elektronik- und Leiterplattenentwicklung wurde bereits hinsichtlich späterer Serienfertigungstauglichkeit und Fertigungskosten optimiert.

Hohe Sensitivität bei reduziertem Systemaufwand

Mit TIRELESS konnte eine leistungsfähige Plattform für quantitative Fluoreszenz-Lateral-Flow-Tests demonstriert werden. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial spezialisierter CMOS-Bildsensoren für kompakte und kosteneffiziente Point-of-Care-Diagnostiksysteme der nächsten Generation.

Der vollständig aufgebaute Demonstrator verdeutlicht, dass hochsensitive Fluoreszenzdiagnostik heute nicht mehr zwingend komplexe Laborgeräte erfordert, sondern perspektivisch auch in portable und anwenderfreundliche Point-of-Care-Systeme überführt werden kann.

Die Kombination aus spezialisierter CMOS-Sensorik, zeitaufgelöster Fluoreszenzmessung und optimierter Systemintegration ermöglicht quantitative Schnelltests mit einer Empfindlichkeit, die bislang überwiegend Laborgeräten vorbehalten war. Dadurch eröffnet TIRELESS neue Perspektiven für mobile Diagnostiksysteme in der patientennahen Versorgung.

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

49 

- › *Integrierte Sensorsysteme*
- › *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
- › *nm-präzise 6D-Direktantriebe*
- › *Inhalt*
- * *Förderung*



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**



Die interne Forschungsgruppe „Time-resolved fluorescence reader for lateral-flow tests“ (**TIRELESS**) wurde durch den Freistaat Thüringen gefördert.



Generatorbasierter Entwurf für Ultra-Low-Power-Mixed-Signal-Schaltungen

Arbeiten für die Implementierung der strukturierten, automatisierten Methodik Expert Design Plan (EDP) zur automatisierten Schaltungsauslegung, Simulation und Optimierung sowie zur Anwendung von Intelligent IP (IIP). Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Ultra-Low-Power-Schaltungen ermöglichen energieautarke Mikrosysteme

Ultra-Low-Power-(ULP-)Schaltungen sind eine zentrale Voraussetzung für energieeffiziente und energieautarke Mikrosysteme wie batterielose RFID-Sensoren. Diese sind beispielsweise für IoT-Anwendungen interessant, insbesondere wo aus ökologischen oder Kostengründen wartungsfreie Sensoren benötigt werden wie etwa im industriellen Umfeld. Der Entwurf solcher ULP-Schaltungen ist grundsätzlich anspruchsvoll, weil Funktion, Genauigkeit, Robustheit und Energieverbrauch auf Schaltungsebene eng miteinander verknüpft sind. Besonders komplex wird der Systementwurf, wenn solche Schaltungen in Systemen eingesetzt werden, die ihre Versorgung aus Energy Harvesting gewinnen. In diesen Fällen steht die Energie nicht wie bei einer stabil geregelten Versorgung dauerhaft und unabhängig vom Betriebszustand zur Verfügung. Vielmehr kann die Versorgungsspannung selbst zu einem dynamischen Signal werden, das vom Energieeintrag, vom Lastverhalten der Schaltung und vom Betriebsablauf des Gesamtsystems abhängt.

Bei passiven RFID-Systemen zeigt sich diese Kopplung besonders deutlich: Der Transponder gewinnt seine Energie aus dem elektromagnetischen Feld des Readers. Damit beeinflussen Abstand, Kopplung, Kommunikationszustand und momentaner Energiebedarf unmittelbar die verfügbare Versorgung. Gleichzeitig bestimmt der Energieverbrauch der integrierten Schaltungen, ob das System stabil arbeitet und welche Reichweite erzielt werden kann. Dadurch entstehen enge Wechselwirkungen zwischen Systemebene, Schaltungsentwurf und Energieversorgung.

Diese Kopplung führt dazu, dass klassische, streng hierarchische Entwurfsansätze an ihre Grenzen stoßen. Stattdessen erfordert der Entwicklungsprozess zahlreiche Iterationen entlang des V-Modells: Auf ein initiales Systemkonzept folgt der Schaltungsentwurf, anschließend Mixed-Signal-Simulationen, deren Ergebnisse wiederum Anpassungen am Systemkonzept notwendig machen. Gerade bei energieautarken ULP-Systemen sind diese Schleifen besonders ausgeprägt, da Energieverbrauch, Versorgungsverhalten und Systemfunktionalität direkt miteinander verknüpft sind. Für passive RFID-Sensortransponder hängt beispielsweise die realisierbare Reichweite unmittelbar vom Energiebedarf der integrierten Schaltungen ab. Eine frühe Modellierung und Simulation des Energieverhaltens ist deshalb entscheidend, um die geforderten Systemeigenschaften bereits vor der Fertigung abzusichern.

Klassischer Entwurf beschränkt notwendige Iterationen

Konventionelle Entwurfsprozesse unterstützen solche iterativen Abläufe jedoch nur unzureichend, da viele Schritte manuell durchgeführt werden müssen und entsprechend zeitaufwendig sind. Dies begrenzt die Anzahl möglicher Iterationen und erschwert systematische Parameterstudien oder Optimierungen. Generatorbasierte Entwurfsansätze adressieren diese Herausforderung, indem sie den Entwurfsprozess selbst formalisieren und automatisieren. Sie überführen Expertenwissen in ausführbare Designabläufe und ermöglichen damit eine schnelle, reproduzierbare Generierung und Anpassung von Schaltungen. Ziel ist es, die Iterationszyklen im V-Modell deutlich zu beschleunigen und so umfangreichere Designraumexplorationen sowie robustere Systemauslegungen zu ermöglichen.

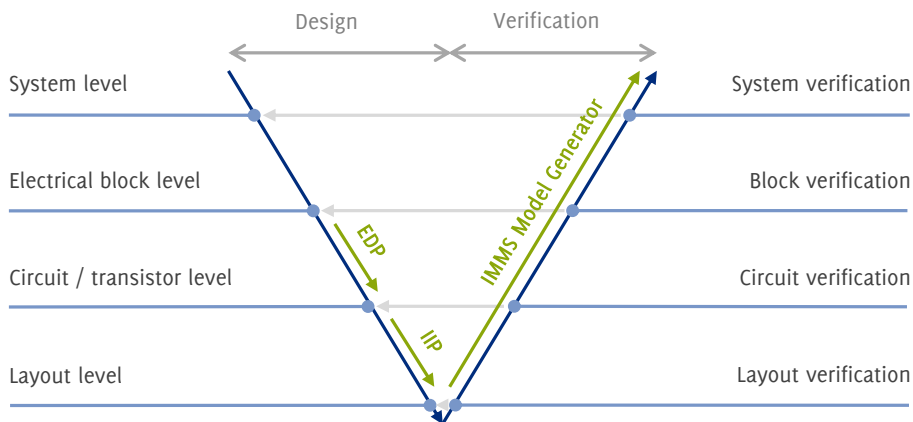


Abbildung 1: Einordnung generatorbasierter Implementierungsansätze und automatisierter Energie-Verhaltensmodelle in einen V-Modell-orientierten Entwurfsablauf. Grafik: IMMS.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

Generator-Methoden für effizientere Iterationen im Schaltungsentwurf

Im BMFTR-Verbundprojekt HoLoDEC wurden solche Ansätze gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung entwickelt und praktisch erprobt. Das IMMS untersuchte sie am Beispiel eines Ultra-Low-Power-RFID-Sensortransponders mit integriertem Analog-Frontend (AFE). Dabei nutzte das Institut zwei zentrale Generatoransätze aus dem Projektverbund: Die Expert-Design-Plan-(EDP-)Methodik wurde von der Hochschule Reutlingen eingebracht und gemeinsam mit dem IMMS für neue ULP-Schaltungen erweitert und angepasst. Die Intelligent-IP-(IIP-)Methodik stammte vom Fraunhofer IIS/EAS in Dresden und wurde ebenfalls gemeinsam mit den Partnern für die Anforderungen des konkreten Mixed-Signal-Entwurfs weiterentwickelt.

www.imms.de/holodec

Das IMMS trat damit sowohl als Anwender dieser Generatoransätze als auch als aktiver Entwicklungspartner auf. Ergänzend entwickelte das Institut eigene Methoden zur Energie-Verhaltensmodellierung, um den Übergang von der Systemebene zur Implementierung sowie die Rückkopplung über Verifikationsmethoden effizient zu unterstützen. Im Projekt wurden prozedurale Top-down-Ansätze für die Implementierung mit Bottom-up-orientierten Verifikationsmethoden entlang eines V-Modell-basierten Designflows verbunden, vgl. Abbildung 1.

Erarbeitung der Designstrategie auf Basis eines passiven ULP-Frontends

Im Mittelpunkt der Arbeiten des IMMS stand die Entwicklung eines Ultra-Low-Power-Analog-Frontends (AFE) zum Auslesen resistiver Sensoren für die Messung des elektrischen Widerstandes aufgrund von etwa Temperatur-, Druck- oder Feuchtigkeitsänderungen in einem passiven RFID-Transponder. Ziel war ein vollständig batterieloser Betrieb, bei dem der Transponder seine Energie ausschließlich aus dem elektromagnetischen Feld eines Readers gewinnt. Das AFE musste daher nicht nur die Sensorsignale zuverlässig erfassen, sondern vor allem mit extrem geringer Leistungsaufnahme arbeiten.

Das IMMS entwickelte zunächst eine klassische Schaltungstopologie für das AFE, um die funktionalen Anforderungen und die strengen Energiegrenzen zuverlässig zu erfüllen. Auf dieser Basis überführte das Team den Entwurf schrittweise in generatorbasierte Methoden. Ziel war es, die zugrundeliegende Designstrategie systematisch zu erfassen, zu konservieren und für zukünftige Anwendungen wiederverwendbar zu machen. Damit diente der Schaltungsentwurf nicht nur als Demonstrator für eine konkrete Anwendung, sondern zugleich als Praxistest für die im Projekt entwickelten Methoden.

Anpassung der EDP-Methodik an neue ULP-Schaltungen

Einen wesentlichen Schwerpunkt bildete der Einsatz der EDP-Methodik der Hochschule Reutlingen. Gemeinsam mit dem Projektpartner passte das IMMS diese Methodik an die Anforderungen neuer ULP-Schaltungen an und setzte sie für zentrale Blöcke des RFID-Sensor-Frontends ein. Das IMMS abstrahierte dafür den Entwurfsablauf eines operationsverstärkerbasierten Switched-Capacitor-Verstärkers in Form eines ausführbaren Generators. Dieser umfasste die automatische Schaltplanerzeugung, die initiale Dimensionierung auf Basis vorgegebener Spezifikationen sowie die anschließende Simulation und iterative Optimierung. Der EDP-Ansatz wandelte damit Expertenwissen in parametrisierbare Skripte um, die mit der Cadence-Entwurfsumgebung kommunizierten und wesentliche Schritte des analogen Entwurfsprozesses unterstützten.

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

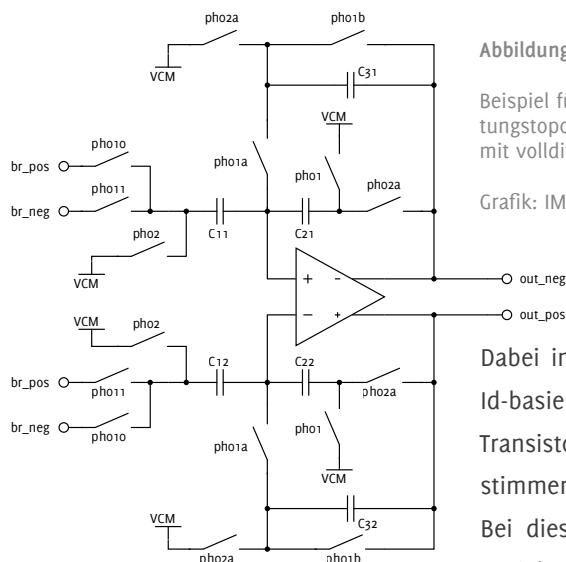


Abbildung 2:

Beispiel für eine mit EDP adressierte Schaltungstopologie: Switched-Capacitor-Verstärker mit vordifferenziellem Operationsverstärker.

Grafik: IMMS.

Dabei integrierte das IMMS gezielt gm/I_d -basierte Entwurfsmethoden, um die Transistorarbeitspunkte effizient zu bestimmen und systematisch anzupassen. Bei diesen Methoden wird die direkte Beziehung zwischen dem gewünschten

Verstärkungs- bzw. Bandbreitenverhalten eines Transistors und dem benötigten Stromverbrauch genutzt, um Stromeffizienz, Einfachheit, Skalierbarkeit und Konsistenz/Übertragbarkeit zu erreichen. Die initiale Dimensionierung berücksichtigte Spezifikationen wie Verstärkung, Abtastrate, Ein- und Ausgangsspannungshub, Genauigkeit und Linearität. Zusätzlich flossen Randbedingungen wie minimale und maximale Transistorabmessungen sowie Flächenbeschränkungen ein. Die Dimensionierungsparameter wurden anschließend in den Schaltplan zurückannotiert und simulativ überprüft.

Nach der Initialdimensionierung führte der Generator eine iterative Optimierung durch. Dazu wurden zunächst die DC-Arbeitspunkte analysiert und fehlerhafte Arbeitspunkte identifiziert. Großsignal-Arbeitspunkte wurden durch Anpassungen der Transkonduktanz-Effizienz gm/I_d oder der Gate-Source-Spannung korrigiert; Kleinsignalparameter wurden unter anderem durch Variation von Transistorlängen und gm/I_d -Werten angepasst. Anschließend folgten Stabilitäts- und AC-Analysen, um Kenngrößen wie Phasenreserve, Schleifenverstärkung und Bandbreite zu bewerten. Ergänzend wurde das transiente Verhalten untersucht, etwa die Sprungantwort und die Slew Rate.

Die Ergebnisse zeigten, dass die generatorbasiert erzeugten Schaltungen die geforderten Spezifikationen zuverlässig erfüllten. Beim Operationsverstärker waren Amplituden- und Phasenverlauf sowie die Sprungantwort des EDP-generierten Entwurfs

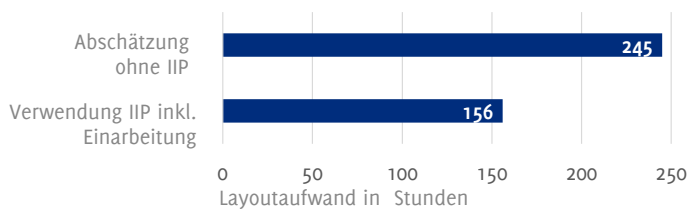


Abbildung 3:
Die Statistik zum benötigten Layoutaufwand mit und ohne Verwendung von IIP zeigt eine Zeitersparnis von ca. 36% Grafik: IMMS.

mit dem manuell entwickelten Referenzdesign vergleichbar. In einzelnen Parametern, etwa der Bandbreite, erreichte der Generator sogar leicht bessere Werte. Für den gesamten Switched-Capacitor-Verstärker betrug die Ausführungszeit des EDP etwa zehn Minuten. Damit zeigte das Projekt, dass sich künftige Schaltungen mit gleicher oder ähnlicher Topologie deutlich schneller erzeugen und an geänderte Anforderungen anpassen lassen.

Anpassung der Intelligent-IP-Methodik für die automatisierte Layoutgenerierung

Ergänzend arbeitete das IMMS mit der Intelligent-IP-Methodik des Fraunhofer IIS/EAS in Dresden. Die IIP-Methodik stellt Generatoren für häufig verwendete Transistorstrukturen wie Stromspiegel oder Differenzpaare bereit, bei denen über parametrisierbare Eingaben Symbol, Schaltplan (Schematic) und Layout dieser Blöcke flexibel und konsistent erzeugt werden. Gemeinsam mit dem Projektpartner wurde diese Methodik für die automatisierte Layoutgenerierung im konkreten Anwendungsfall angepasst und eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeiten entwickelten das IMMS und Fraunhofer IIS/EAS gemeinsam ein IIP für ein Kapazitätsarray, das die automatisierte physikalische Umsetzung eines zentralen analogen Schaltungsbestandteils unterstützte. Die IIP-Werkzeuge unterstützten damit die physikalische Umsetzung der zuvor entwickelten Schaltungen und ergänzten die EDP-basierten Ansätze auf Layout-Ebene. Im Zusammenspiel entstand ein durchgängigerer Entwurfsablauf, der nicht nur die Dimensionierung und Schaltplanerzeugung, sondern auch Schritte der physischen Implementierung adressiert.

Verfahren zur automatisierten Energie-Verhaltensmodellierung für Mixed-Signal-Schaltungen

Ein weiterer wesentlicher Beitrag des IMMS war die Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Energie-Verhaltensmodellierung für Mixed-Signal-Schaltungen. Ziel war es, den Energieverbrauch bereits frühzeitig auf Systemebene bewerten zu

können, ohne zeitintensive Simulationen auf Transistorebene durchführen zu müssen. Dieser Ansatz ergänzte die top-down-orientierten Generatoren als bottom-up-orientierte Verifikationsmethode.

Gerade ULP-Schaltungen stellten die Modellierung vor besondere Herausforderungen. Sie weisen typischerweise sehr unterschiedliche Strombereiche auf: Im Standby-Modus fließen extrem kleine Ströme, wogegen während einer Messung deutlich höhere Ströme auftreten können. Für die Energiebilanz ist zudem nicht nur der Momentanwert relevant, sondern das Integral über die Zeit. Fehler in lange anliegenden Betriebszuständen können daher erhebliche Auswirkungen auf die Gesamtaussage des Modells haben. Außerdem beeinflussen digitale Steuersignale wie Enable- oder Start-of-Conversion-Signale den Stromverbrauch stark, sodass der Zusammenhang zwischen Eingängen, Zuständen und Stromaufnahme hochgradig nichtlinear ist.

Das IMMS entwickelte hierzu einen methodischen Workflow, der die automatische Generierung geeigneter Testbenches, die Validierung der entstehenden Datensätze sowie die anschließende Modellbildung umfasste. Für die Datengenerierung setzte das Team unter anderem reduzierte und robuste Stichprobenmethoden wie Latin Hypercube Sampling ein, um den Eingangsraum effizient und möglichst gleichmäßig abzudecken. Dadurch konnte der Trainingsdatensatz gezielt verbessert werden, ohne den Simulationsaufwand unkontrolliert anwachsen zu lassen.

Für die eigentliche Modellbildung evaluierte das IMMS verschiedene Regressionsansätze und setzte schließlich lineare Entscheidungsbäume ein. Diese kombinierten die Fähigkeit klassischer Entscheidungsbäume, diskrete Steuerzustände abzubilden, mit linearen oder polynomialen Regressionsfunktionen in den einzelnen Blättern. Dadurch eigneten sie sich besonders für Mixed-Signal-Schaltungen, bei denen kontinuierliche Größen wie Versorgungsspannung, Temperatur oder Referenzspannung gemeinsam mit diskreten Logiksignalen den Energieverbrauch bestimmen.

Die entwickelten Energie-Modelle ermöglichten eine realistische Abschätzung des Stromverbrauchs auf Systemebene und unterstützten damit die frühe Verifikation des Gesamtsystems. Für den RFID-Demonstrator war das besonders relevant, weil seine Reichweite direkt von der verfügbaren und verbrauchten Energie abhängt. Damit konnten Designentscheidungen hinsichtlich Topologie, Systemarchitektur und Betriebsstrategie früher und systematischer bewertet werden.

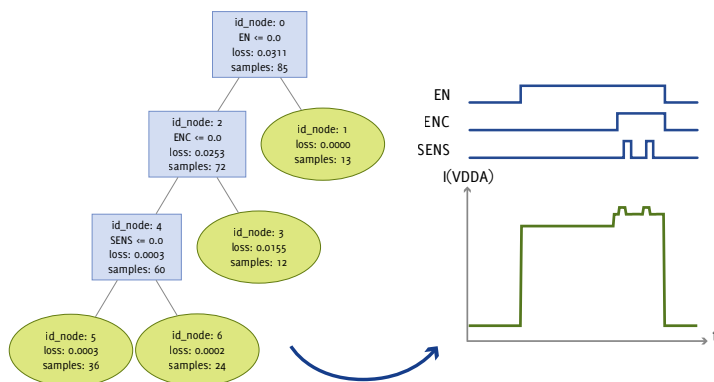


Abbildung 4:

Beispiel eines linearen Entscheidungsbaums zur Energie-Verhaltensmodellierung. An den Blättern befinden sich Regressionsmodelle zur Abbildung des Stromverbrauchs.

Grafik: IMMS.

Die entwickelten Methoden wurden schließlich im Rahmen eines Demonstrators zusammengeführt. Das IMMS realisierte dazu zwei integrierte Schaltungen in der X-FAB-CMOS-Technologie XT018 mit 180 nm Strukturgröße: Der Testchip D1038A enthielt das Analog-Frontend sowie eine I²C-Schnittstelle und diente der detaillierten Laborcharakterisierung des Frontends. Der zweite Chip, D1036A, integrierte das Analog-Frontend in einen vollständigen RFID-Transponder und war für Demonstratoruntersuchungen unter realen Einsatzbedingungen vorgesehen. Erste Charakterisierungsmessungen bestätigten inzwischen, dass die gefertigten Chips die angestrebten Eigenschaften im Wesentlichen erreichen.

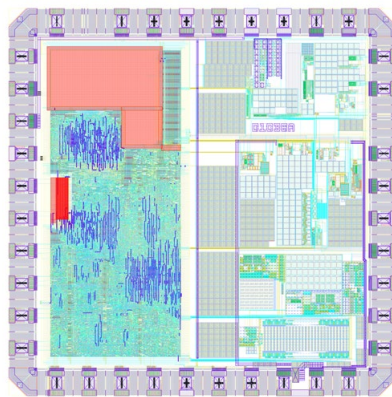
Die Ergebnisse zur Anwendung der EDP-Methodik auf das Ultra-Low-Power-Sensorfrontend wurden 2025 auf der internationalen Konferenz SMACD vorgestellt und veröffentlicht.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeiten im Projekt zeigten, dass generatorbasierte Entwurfsansätze ein hohes Potenzial für die Entwicklung von Ultra-Low-Power-Mixed-Signal-Schaltungen besitzen. Insbesondere die gemeinsam mit der Hochschule Reutlingen angepasste EDP-Methodik ermöglichte es, komplexe Entwurfsprozesse zu strukturieren, zu automatisieren und langfristig wiederverwendbar zu machen. Gleichzeitig zeigte die praktische

Abbildung 5:

Layout des vollständigen RFID-Transponder-ICs mit integriertem Analogfrontend für Demonstratoruntersuchungen. Grafik: IMMS.



Anwendung, dass die Erstellung solcher Generatoren weiterhin einen hohen initialen Aufwand erfordert. Weitere Verbesserungen der Methodik, der Werkzeugunterstützung und der Bedienbarkeit bleiben daher notwendig, um den Ansatz breiter in industriellen und wissenschaftlichen Entwicklungsprozessen zu verankern.

Die gemeinsam mit dem Fraunhofer IIS/EAS in Dresden eingesetzte und angepasste IIP-Methodik leistete im Projekt einen wichtigen Beitrag zur Automatisierung des physikalischen Entwurfs. Sie bietet großes Potenzial, Layoutschritte weiter zu beschleunigen und stärker mit schaltplan- und spezifikationsgetriebenen Entwurfsabläufen zu verknüpfen. Damit kann sie künftig dazu beitragen, den Übergang von der Architekturentscheidung bis zur physikalischen Implementierung noch konsistenter und schneller zu gestalten.

Auch die entwickelten Energie-Verhaltensmodelle eröffnen neue Möglichkeiten für die frühzeitige Verifikation und Optimierung energieeffizienter Systeme. Sie erlauben es, Systemkonzepte schneller gegen realistische Energieannahmen zu prüfen und so Iterationen im V-Modell effizienter zu durchlaufen. Zukünftig liegt ein Schwerpunkt darauf, die Modelle weiter zu verallgemeinern, ihre Integration in generatorbasierte Workflows zu verbessern und ihre Anwendbarkeit an weiteren Schaltungen zu validieren.

Mit der Fertigung der Demonstratorchips wurde ein entscheidender Schritt abgeschlossen. Die anschließende Charakterisierung der Schaltungen und ihre Integration in Gesamtsystemtests bilden die Grundlage für die weitere Bewertung und Verbesserung der entwickelten Ansätze. Langfristig tragen die Ergebnisse dazu bei, generatorbasierte Methoden im analogen und im Mixed-Signal-Schaltungsentwurf zu etablieren und die Entwicklung energieautarker Mikrosysteme deutlich zu beschleunigen.

Kontakt: Martin Grabmann, M.Sc., martin.grabmann@imms.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben HoLoDEC wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen 16ME0703 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
holodec

Literatur:

Application of the Expert Design Plan Methodology on an Ultra-Low-Power Sensor Frontend. Lorenz RENNER. Ralf SOMMER. Yannick UHLMANN. 2025 *21th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, July 7-10, 2025, Istanbul, Türkiye, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD65553.2025.11092185

Jahresbericht
© IMMS 2025

FORSCHUNGSFELD

INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME



Silicon Science Award

Auswahl verschiedener LED-Treiber-schaltungen, die Vincent Haude für seine mit dem Silicon Science Award 2025 ausgezeichnete Arbeit „Entwicklung und Charakterisierung einer Schaltungstopologie zur Erzeugung kurzer LED-Lichtpulse“ untersucht hat. Foto: IMMS.

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.

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 2025 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

61	o
> Integrierte	Sensorsysteme
> Intelligente ver-	netzte Mess- u.
Testsysteme	
> nm-präzise 6D-	Direktantriebe
> Inhalt	
* Förderung	

Silicon Science Award für schnelle LEDs zur In-vitro-Diagnostik

Vincent Haude, Elektrotechnik-Ingenieur und Forscher am IMMS, wurde am 3.12.2025 zur internationalen Waferbond25-Konferenz in Chemnitz mit dem Silicon Science Award ausgezeichnet. Seine prämierte Abschlussarbeit „Entwicklung und Charakterisierung einer Schaltungstopologie zur Erzeugung kurzer LED-Lichtpulse“ wurde am IMMS und der Technischen Universität Ilmenau betreut. Ihr Ergebnis ist ein sehr kompaktes System, das bezüglich der Dynamik und der optischen Schaltzeiten von LEDs deutliche Verbesserungen für die Entwicklung von Systemen zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung mit sich bringt. Die Arbeit des Thüringers ist ein wesentlicher Beitrag für integrierte Sensorsysteme zur In-vitro-Diagnostik. Hierfür erforscht und entwickelt das IMMS Lösungen für Point-of-Care-Geräte zur schnellen, patientennahen Diagnostik.

www.imms.de/ivd

Wettlauf um Abklingzeiten bei Fluoreszenzmarkern entscheidend

„Vincent Haude hat eine herausragende Arbeit zu einem sehr anspruchsvollen Thema vorgelegt, das Thüringens Innovationskraft in der Schlüsselbranche Sensorik stärkt“, so die Einschätzung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hannes Töpfer, Fachgebietsleiter für Theoretische Elektrotechnik an der Technischen Universität Ilmenau. Die vorgelegte Bachelorarbeit adressiere eine im größeren Forschungsrahmen aktuell sehr relevante Thematik: „Mit immer empfindlicheren Sensorsystemen lassen sich Analyseverfahren in Medizin und Umweltanalytik verbessern und sind somit von erheblichem gesellschaftlichen Interesse“, ordnet Töpfer weiter ein. In der Diagnostik



Vincent Haude, Elektrotechnik-Ingenieur und Forscher am IMMS, bereitet eine der LED-Treiberschaltungen für eine Messung vor. Für seine Arbeiten wurde er am 3.12.2025 zur internationalen Waferbond25-Konferenz in Chemnitz mit dem Silicon Science Award ausgezeichnet. Foto: IMMS.

würden Sensoren eingesetzt, um fluoreszierende Eigenschaften biologischer Proben zu messen.

„Fluoreszenzfarbstoffe setzt man zum Beispiel in der In-vitro-Diagnostik als Marker ein,“ erklärt Vincent Haude. Mit ihrer Hilfe ließen sich selbst geringste Konzentrationen von Erregern mit Analysegeräten in Speziallaboren nachweisen, die mit Standard-Tests nicht erfassbar wären, so Haude weiter. „Will man wie das IMMS mobile Diagnostik-Systeme bauen, ist das natürlich interessant.“ Die Farbstoffe emittieren Licht einer charakteristischen Wellenlänge, wenn sie mit Licht einer anderen Wellenlänge angeregt werden. Je nach Farbstoff ist diese Fluoreszenz über wenige Nanosekunden bis Mikrosekunden sichtbar und somit messbar, vorausgesetzt, sie überlagert sich nicht mit dem Anregungslicht. Das IMMS entwickelt halbleiterbasierte Mikroelektronik-Chips, mit denen die Intensität des Fluoreszenzlichts zeitaufgelöst erfasst wird. Hierbei wird das emittierte Licht gemessen, nachdem das Anregungslicht einer LED abgeschaltet und abgeklungen ist. „Man kann die Farbstoffe auch genauso mit Lasern anregen, die sind aber bei diesen Wellenlängen relativ teuer,“ führt Haude weiter aus. Mit optischen Filtern könne man Anregungslicht und Fluoreszenzlicht wie in den großen Laboranalysegeräten zwar auch trennen, das vergrößere aber auch den Bauraum und die Kosten.

www.imms.de/ivd

„Wir wollen kostengünstige mobile Systeme entwickeln, deswegen möchten wir am IMMS Standard-LEDs als Pulslichtquellen nutzen,“ erklärt Haude. Je schneller und besser sich diese an- und abschalten ließen, desto flexibler und verlässlicher könne man sie für verschiedene Fluoreszenzfarbstoffe und somit Anwendungen nutzen.

Optische Dynamik und optische Schaltzeiten von LEDs im Nanosekundentakt

Um dieses Ziel zu erreichen, hat Vincent Haude auf Basis der detailliert recherchierten physikalischen Grundlagen die relevanten Parameter herausgearbeitet, die das dynamische Schaltverhalten von LEDs beeinflussen. Mit diesen Erkenntnissen hat er kommerziell erhältliche Standard-LEDs mit Blick auf ihr Abschaltverhalten ausgewählt, hierfür Pulstreiberschaltungen für LEDs recherchiert und entwickelt, ausgewählte Schaltungen simuliert, hochfrequenzoptimierte Layouts erstellt und auf Leiterplatten als Charakterisierungs-Setup aufgebaut. Diese Schaltungen und die ausgewählten LEDs hat er sowohl elektrisch als auch optisch vermessen.

„Vincent Haude konnte das Nachleuchten der LEDs mithilfe optimierter Schaltungen auf wenige Nanosekunden reduzieren.“ erklärt Alexander Rolapp, Spezialist für die Charakterisierung und den Test integrierter Schaltungen am IMMS und Betreuer der Bachelor-Arbeit. „Das Limit war dabei immer die LED selbst und nie die Schaltung.“ Auf dieser Grundlage habe Vincent Haude ein sehr kompaktes LED-Pulssystem entwickelt, das die optische Dynamik und die optischen Schaltzeiten von LEDs nicht nur deutlich verbessere, sondern sich auch problemlos in bestehende Aufbauten integrieren lasse. „LEDs in dieser Form aktiv abzuschalten verschiebt ihre Dynamik für die für uns interessanten Anwendungen in Bereiche, die sonst nur Lasern vorbehalten sind“, fasst Rolapp zusammen.

www.imms.de/modtest



Treiberschaltung zur Untersuchung kommerziell erhältlicher LEDs für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen im Nanosekundenbereich, die neue Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik ermöglichen.

Foto: IMMS.

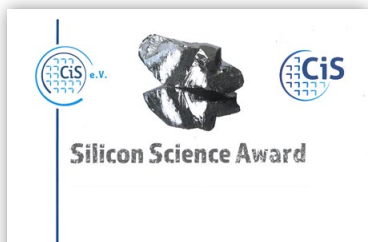
› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

Somit sind die Erkenntnisse von Vincent Haude und sein Charakterisierungs-Setup ein wichtiger Baustein, der die künftige Forschung und Entwicklung zur zeitaufgelösten Fluoreszenz wesentlich voranbringen wird.

Mix aus Theorie und Praxis stärkt Nachwuchskräfte und Wirtschaft

„Für meine Abschlussarbeit kam mir nicht nur das State-of-the-art-Messequipment am IMMS zugute. Um LEDs bestmöglich zu verstehen, habe ich mich mit Festkörperphysik, Optoelektronik und Elektrotechnik beschäftigt. Hier half mir das tiefe Verständnis der Kollegen am IMMS, die jede noch so komplizierte Frage einordnen und beantworten konnten“, bedankt sich Haude für die Betreuung. Der gebürtige Thüringer hat frühzeitig an der TU Ilmenau Angebote wie die Basic Engineering School genutzt, um Theorie mit Praxis zu verknüpfen und war später dort selbst Betreuer. Seit 2021 ist er am IMMS – zuerst als Praktikant und Assistent und seit dem Bachelor als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

„Die Auszeichnung mit dem Silicon Science Award zeigt, dass der Mix aus Theorie und Praxis, den wir an der TU Ilmenau gemeinsam mit dem IMMS anbieten, Früchte trägt“, ordnet Töpfer ein. Haude sei perfekt vorbereitet für einen Berufsstart in der anwendungsnahen Forschung, wie sie am IMMS betrieben werde und in Produkte von Partnern aus Medizintechnik, Sensorik und Industrie fließe, so Töpfer weiter. Gleichzeitig habe Haude dank seiner fundierten Ausbildung sämtliches Rüstzeug, direkt in die Forschung und Entwicklung in der Industrie einzusteigen oder ein Start-up zu gründen. „Ich bin gespannt, wo die Reise hingehet“, kommentiert Haude mit einem Augenzwinkern.





Auftakttreffen am 11.09.2025 in Erfurt für das im Juni 2025 gestartete Projekt „Inline-Reinigungsverfahren für Waschmedien in harzbasierten 3D-Druckverfahren“ (Inline3D). Foto: IMMS.

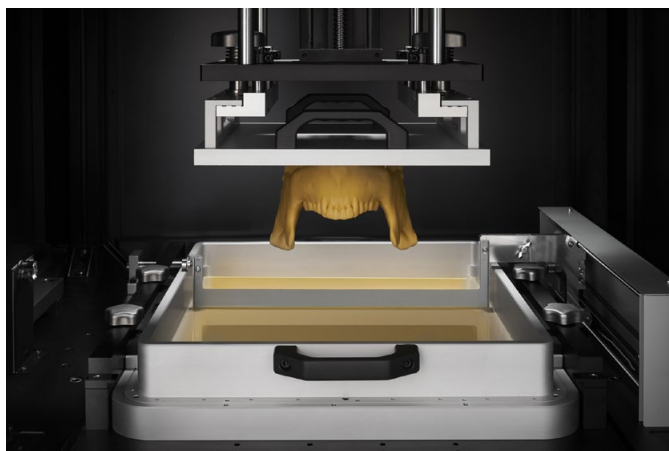
Projektstart von Inline3D*: Inline-Reinigung für Waschmedien in harzbasierter 3D-Druckproduktion

2025 haben IMMS, IL Metronic und BURMS der Thüringer Aufbaubank in Erfurt Details zu dem von Thüringen und der EU geförderten und im Juni gestarteten Projekt Inline3D vorgestellt. In dem knapp zweieinhalbjährigen Projekt werden Sensorik, Reinigungs- und Fluidikmodule entwickelt, um Waschmedien bei der harzbasierten 3D-Druckproduktion erstmals inline – direkt im Herstellungsprozess – zu reinigen. Ziel ist es, den Einsatz von umwelt- und gesundheitsbelastenden sowie kostenintensiven Stoffen in den für den 3D-Druck notwendigen Waschmedien zu minimieren.

www.imms.de/inline3d

Kunstharzbasierter 3D-Druckverfahren erzeugen schädliche Abfälle

Bei der harzbasierten 3D-Druckproduktion werden die 3D-Druckkörper mit speziellen Waschmedien gereinigt. Diese enthalten umwelt- und gesundheitsbelastende Stoffe und werden derzeit oft nach einmaliger Verwendung entsorgt statt aufbereitet. Der Grund ist, dass momentan die Druckobjekte mit aufbereiteten Waschsubstanzen meist nicht ausreichend von nicht ausgehärtetem Harz gereinigt werden können.



Im Projekt Inli-
ne3D wird an der
Inline-Reinigung für
Waschmedien in
der harzbasierten
3D-Druckproduktion
geforscht. Das Bild
zeigt maßgeschnei-
derte Lösungen aus
dem 3D-Drucker für
präzise Fertigung
für Industrie und
Forschung.

Foto: BURMS.

Kostenfaktor Waschmedien bislang schwer minimierbar

Der Verbrauch von Reinigungsmedien ist auch ein wesentlicher Kostenbestandteil im Produktionsprozess. Reinigungsmedien werden bisher nur im großindustriellen Maßstab aufgearbeitet. Verfügbare Reinigungsgeräte sind groß, unhandlich, energieintensiv und zudem nur „offline“ verwendbar. Das bedeutet, dass die zu reinigenden Medien in separaten Verfahrensschritten zum Reinigungssystem transportiert und später wieder teilweise in den 3D-Druckprozess zurückgebracht werden. Eine automatische Reinigung im laufenden Produktionsprozess mit permanenter Kontrolle der Eigenschaften der Medien ist bisher nicht verfügbar.

Inline-Aufbereitung erlaubt Weiterverwendung des Reinigungsmediums

Im Projekt Inline3D wird ein Aufbereitungsprozess der Waschmedien entwickelt, der direkt im Produktionsprozess die entstandenen Verunreinigungen entfernt und anschließend das aufbereitete Waschmedium in den Reinigungsprozess zurückführt. Bei dieser Behandlung werden die umwelt- und gesundheitsgefährdenden Bestandteile in unbedenkliche Abfallprodukte umgewandelt, die nicht als Sondermüll zu entsorgen sind.

[www.imms.de/
inline3d](http://www.imms.de/inline3d)

Durch die sensorische Überwachung des Verschmutzungsgrades kann die Nutzungsdauer des Waschmediums verlängert und die Qualität des Reinigungsprozesses optimiert werden. Ziel ist es, Ressourcen effizienter zu nutzen sowie Schadstoffe und Kosten von Produktionsprozessen im 3D-Druck zu minimieren.

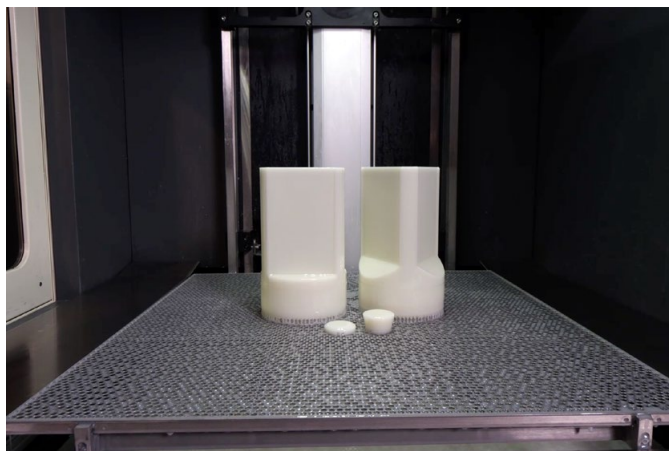
Der regionale Verbund der drei Thüringer Projektpartner BURMS 3D Druck, IL Metronic Sensortechnik und IMMS fördert die Innovation und Weiterentwicklung bestehender Kompetenzen im Bereich des 3D-Drucks in Thüringen.

Das IMMS koordiniert das Projekt und entwickelt ein sensorisches Messverfahren, um den Verschmutzungsgrad des Waschmediums zu quantifizieren. IL Metronic nutzt seine Kompetenzen im Bereich der UV-Bestrahlungstechnik, um das Messverfahren in ein Sensorikmodul zu überführen und ein Bestrahlungsmodul zur Ausfällung der gelösten Harzreste zu entwickeln. BURMS bringt Expertise durch seine kommerziellen 3D-Druck-Lösungen ein, realisiert im Projekt die Fluidik und Prozessintegration und gewährleistet Gerätesicherheit, Entsorgung und Biokompatibilität.

Schnellere Fertigung und ressourcenschonendere Kleinserien möglich

Aufgrund der Vorteile durch schnelle Fertigungszeiten sowie applikations- und kundenspezifische Anpassung von Einzelstücken ist vor allem für Anwendungen im medizinischen Bereich ein Wachstum zu erwarten. Ziel des Projekts ist neben der technologischen Weiterentwicklung der 3D-Drucktechnologien des Partners BURMS auch, mit den technologischen Erkenntnissen jene 3D-Drucksysteme weiterzuentwickeln, die das Waschmedium derzeit gar nicht aufbereiten.

www.imms.de/inline3d



Im Projekt Inline3D wird an der Inline-Reinigung für Waschmedien in der harzbasierten 3D-Druckproduktion geforscht. Das Bild zeigt maßgeschneiderte Lösungen aus dem 3D-Drucker für präzise Fertigung für Industrie und Forschung.

Foto: BURMS.



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Freistaat
Thüringen

Kontaktierungseinheit für Voruntersuchungen mit Graphen-Chips der FSU Jena zur Entwicklung der Auswerte-Elektronik für Graphen-Sensoren, die für die Vor-Ort-Detektion von Mikroschadstoffen im Abwasser genutzt werden sollen. Foto: IMMS.

Projektstart MikroGraph*: Auswerte-Elektronik für neue hochempfindliche Graphen-Sensortechnologien zur Vor-Ort-Detektion von Mikroschadstoffen im Abwasser

Mikroschadstoffe in Abwässern bis dato zu langsam bestimmt

80 Prozent der Mikroschadstoffbelastung in Abwässern großer Gemeinden müssen ab 2035 vermieden werden. Diese Vorgabe der EU-Kommunalabwasserrichtlinie lässt sich nur bewältigen, indem Daten umfassend erhoben und Belastungen gezielt behandelt werden.

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

Mit den derzeit üblichen Analysen von Einzelproben, die in Zentrallabore gebracht und auf z.B. Arzneimittelrückstände, Pestizide oder Weichmacher untersucht werden, wird das schwer gelingen. Dieses Vorgehen kostet viel Zeit und auf akute Belastungen kann nicht unmittelbar reagiert werden.

Künftig sollen Mikroschadstoffe in Abwässern vor Ort analysiert werden

Das Projekt MikroGraph entwickelt ein innovatives Analysesystem zur Vor-Ort-Detektion von Mikroschadstoffen in Abwässern. Ziel ist es, mindestens drei von zwölf relevanten Substanzen aus der EU-Richtlinie (91/271/EWG) mit hoher Präzision und niedriger Nachweisgrenze (0,003 µg/l) zu quantifizieren.

Jahresbericht

© IMMS 2025



Zentrale Kläranlage in Jena-Zwätzen. Das Forschungsvorhaben „MikroGraph“ dient dem Ziel, die Konzentration von Schadstoffen im Abwasser direkt erfassen zu können. Foto: Jens Meyer (Universität Jena).

Erreicht wird dies durch die Kombination von Graphen-Sensorik, Trennsäulentech-
nologie und Massenspektrometrie, die im Projekt parallel entwickelt und gegenseitig
validiert werden. Diese drei Technologien werden mit Mikrofluidik und intelligenter
Steuerung vereint und es entsteht eine kompakte, automatisierte Lösung für Klär-
anlagen und Industrie.

Durch den Abgleich von Messergebnissen derselben Probe können Abweichungen
erkannt, Ursachen analysiert und die Stärken jeder Methode gezielt genutzt werden.
So entsteht ein robustes Vor-Ort-Analysesystem, das Mikroschadstoffe präzise, effi-
zient und zuverlässig detektiert.

IMMS entwickelt Auswerte-Elektronik für Graphen-Sensoren

Das IMMS wird eine spezielle Auswerte-Elektronik für Graphen-Sensoren entwickeln.
Dazu entwirft, simuliert und charakterisiert das IMMS Schaltungen zur präzisen
Strommessung im nA-Bereich und schnellen Signalerfassung. Es realisiert dabei eine
Mehrkanal-Elektronik, integriert diese in den Laborsimulator und steuert dessen
Abläufe in Echtzeit. Abschließend fließen die Ergebnisse in ein kompaktes System
für Trink- und Abwasseranalysen ein, um eine zuverlässige Vor-Ort-Mikroschadstoff-
detektion zu ermöglichen.

www.imms.de/

mikrograph



Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Bildung,
Wissenschaft und Kultur



Kofinanziert von der
Europäischen Union

GraFET-Chip mit aufgesetzter Flusszelle für Voruntersuchungen in Multi-Interact. Foto: IMMS.

Projekt Multi-Interact* gestartet: Für die Gesundheitsforschung wird ein hoch-paralleliertes Multiplex-System zur genauen kinetischen Bestimmung von Bindungsenergien zwischen Biomolekülen entwickelt.

In der Gesundheitsforschung ist es für effektive Entwicklungsprozesse im Bereich Diagnostik und Pharmazie notwendig, verschiedene Biomarker der zu untersuchen- den Biomoleküle per Multiplexing-Technologien zu bestimmen. Dazu sollen Wechsel- wirkungsprozesse der Molekülgruppen untereinander mit parallel ablaufenden Mes- sungen untersucht werden.

[www.imms.de/
multi-interact](http://www.imms.de/multi-interact)

Mit Hilfe von funktionalisierten Kohlenstoffnanomembranen auf Graphen-Feld- effekttransistoren (GraFET) und mit einer elektronischen Schaltung zum Messen und Auswerten ist es möglich, diese biologischen Wechselwirkungen zu bestimmen. Ver- vielfacht man diese GraFETs mit verschiedenen Funktionalisierungsschichten, las- sen sich die kinetischen Bindungsenergien unterschiedlicher Biomarker parallel per Multiplexing bestimmen. Die Messung wird somit skalierbar und kann einen späte- ren preiswerten Geräteaufbau ermöglichen.

Für das Multiplex-System wird das IPHT Jena miniaturisierte Sensorarrays entwickeln und die FSU Jena hochsensitives Graphen mit Kohlenstoffnanomembranen. Das IMMS wird die elektronischen hochparallelisierten Auslesemethoden und Elektronik erarbeiten und das FZMB die Möglichkeiten erforschen, um die markierungsfreie Anbindung von Wirkstoffen und Substanzen in komplexen biologischen Matrices nachzuweisen.

Messelektronik des IMMS

Durch die Bindung von Biomarkern auf der Oberfläche des GraFET reichern sich dort Ladungsträger an. Diese Variation korreliert mit der Veränderung des Ladungsneutralitätspunkts (CNP) des GraFET. Hierfür wird das IMMS eine Messelektronik entwickeln, aufbauen und charakterisieren, welche den CNP mehrerer GraFETs parallel bestimmt. Mit einem automatisierten Versuchsaufbau wird anschließend das Auslesen eines bis zu 100-fachen GraFET-Arrays in Echtzeit auf einem PC visualisiert werden.

- › Integrierte Sensorensysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

www.imms.de/
multi-interact



Rick Pandey (IMMS, Mitte) am 11.12.2025 zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON | Landespatentzentrum Thüringen an der TU Ilmenau im Wettbewerb der Erfindermesse iENA. Foto: IMMS.

Längeres Leben für selbstlernende Funksensoren zur industriellen Instandhaltung: IMMS-Patent zu Edge-KI-Lösung erhält Bronzemedaille auf der iENA 2025

Das IMMS-Patent „Verfahren und Sensoranordnung zum Überwachen einer Funktion eines Bauteiles einer Maschine“ wurde am 11.12.2025 zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON | Landespatentzentrum Thüringen an der Technischen Universität Ilmenau im Wettbewerb der Erfindermesse iENA mit einer Bronzemedaille ausgezeichnet. Das PATON hatte Anfang November stellvertretend für den Erfinder Rick Pandey die Arbeit auf der iENA in Nürnberg in den Wettbewerb eingebracht. Kern des Patents ist eine neue Methode zur datenreduzierten Kommunikation zwischen Funksensorknoten und Monitoringsystemen, die den Energieverbrauch von Funksensoren erheblich senkt. Damit können Anwender oder Hersteller von Funksensoren diese zur industriellen Instandhaltung mit Zustandsüberwachung und vorausschauender Wartung auch in großer Menge und an schwer zugänglichen Stellen über Jahre hinweg einsetzen.

Energieverbrauch von Funksensoren und große Datenmengen kritisch

Maschinen und Industrieanlagen werden häufig mit Funksensoren in Echtzeit überwacht und analysiert, um potenzielle Probleme oder Abweichungen von normalen Betriebszuständen frühzeitig zu erkennen und Wartungsbedarf vorherzusagen. Hierbei kann es jedoch zu Einschränkungen kommen: Befinden sich die Sensoren an vie-



Rick Pandey mit einem KI-basierten eingebetteten System für die Maschinendiagnose. Edge-KI-Systeme wie diese wurden bezüglich ihrer Energieeffizienz und Gesamtsystem-Energiemodellierung im Projekt HoLoDEC erforscht. Foto: IMMS.

len oder schwer zugänglichen Stellen und sollen über Jahre zuverlässig arbeiten, ist deren Energieverbrauch mit Blick auf die Akkulaufzeit kritisch. Die für ein Monitoring interessante Sensorik generiert zudem eine große Datenmenge. Diese lässt sich bis dato nur mit hohem Energieaufwand an das zentrale Monitoring-Gerät übertragen. Zudem treten im Normalbetrieb Defekte an Maschinen sehr selten bis gar nicht auf und bestimmte Fehlerzustände, wie z.B. defekte Lager und Maschinenteile, lassen sich nicht einfach hervorgerufen.

www.imms.de/

holodec

Neuer Algorithmus lernt Gutzustände – Funksensor sendet nur Abweichungen

Mit der patentierten Edge-KI-Lösung werden Daten direkt auf dem Sensorknoten verarbeitet und für die Funkübertragung reduziert, was deren Energiebedarf senkt und somit die Lebensdauer erhöht. Auch Stördaten und Fehlerzustände müssen im Vorfeld nicht mehr erfasst werden.

Der vielzitierte Begriff Edge KI kombiniert Edge Computing und künstliche Intelligenz. Dadurch lassen sich Algorithmen und maschinelles Lernen direkt auf miteinander verbundenen Funksensoren ausführen – lokal oder mit Internetverbindung. Während mit Edge Computing die Daten in der Nähe von Maschinen und Anlagen gespeichert werden können, verarbeiten KI-Algorithmen die Daten direkt am Rand eines Netzwerks bzw. an der Schnittstelle zum übergeordneten Netzwerk und können Rückmeldungen zum Maschinenzustand in Echtzeit bereitstellen.

Der am IMMS entwickelte neue Algorithmus erfasst Daten und lernt die normalen Maschinenverhaltensmuster direkt auf dem Sensor weitgehend unüberwacht. Die regulären Verhaltensweisen einer Anlage und bestimmte Neuheitskriterien, die für abweichendes Verhalten stehen, werden aus den aufgezeichneten Daten auf dem Funksensor gelernt. Daten werden nur dann an ein zentrales Monitoringsystem gesendet, wenn der berechnete Neuheitswert von den normalen Kriterien für ein „gesundes Verhalten“ abweicht. Dadurch entfällt die Übertragung von Rohdaten an ein zentrales Monitoringsystem vollständig. Dieses On-Device-Lernen und das nachfolgende Retraining machen den Algorithmus generalisierbar für verschiedene industrielle Szenarien und robust gegenüber einer möglichen Daten-Drift. Die Methode zum Erkennen des Neuheitswertes von Daten verknüpft mathematische Verfahren in einer spezifischen Abfolge zur laufenden Zustandsüberwachung und vorausschauenden Wartung über Jahre hinweg.

On-Device-Datenreduktion durch Singulärwertzerlegung und Korrelation

Hierfür wird für z.B. ein Lager oder eine Maschine zunächst der ordnungsgemäße Betrieb oder Gutzustand erfasst, dessen Merkmale automatisiert durch eine Singulärwertzerlegung bestimmt und auf dieser Basis ein Schwellwert ermittelt, um Abweichungen erkennen zu können. Dieser Schwellwert wird dann durch Lernen bestimmter Anomalien und Zustände weiter verbessert.

Um den Datensatz auf dem Sensorknoten zu reduzieren, damit möglichst wenige Daten an das Monitoringsystem zu übertragen sind, wird nur eine bestimmte Anzahl der dominanten Singulärwerte mit deren zugehörigen Informationen verwendet. In der Anwendung werden neu aufgezeichnete Vibrationswerte per kanonischer Korrelationsanalyse analysiert. Über die Unterschiede von den gelernten Merkmalen des Gutzustandes und den neu aufgenommenen werden Zustandsänderungen qualitativ erfasst.

Das Verfahren lässt sich in verschiedene Anwendungen zum Monitoring von Maschinen implementieren und kann lizenziert werden.



Das IMMS hat 2025 zur embedded world auf dem Thüringer Gemeinschaftsstand sein im Projekt HoLoDEC entwickeltes energieeffizientes Edge-KI-Sensorsystem für Monitoring-Anwendungen in der Industrie vorgestellt.

www.imms.de/
holodec

IMMS zur embedded world: KI ohne Netz – energieeffizientes Edge-KI-Sensorsystem für Monitoring-Anwendungen in der Industrie

Das IMMS stellte vom 11. – 13. März 2025 Lösungen für automatisierbare Prozesse, Dienstleistungen und Anlagen auf der embedded world in Nürnberg vor. Auf dem Thüringer Gemeinschaftsstand präsentierte das IMMS die Entwicklung „AWARE“. Das kleine Sensorsystem mit lokaler KI wurde entwickelt, um perspektivisch direkt in Industrieprozessen Fehler zu erkennen und Entscheidungen zu vorausschauender Wartung zu unterstützen. AWARE ist als Forschungsergebnis die Basis, um gemeinsam mit Partnern Monitoring-Anwendungen in der Industrie zu entwickeln.

KI ohne Netz?

Jedem, der schon einmal im Funkloch den KI-Assistenten seines Smartphones be- fragen wollte, ist klar – die KI-Modelle und Algorithmen laufen nicht lokal, son- dern auf leistungsfähigen Servern mit viel Speicherplatz. Dass die Antwort trotzdem

Energieeffizientes Edge-KI-Sensorsystem für Monitoring-Anwendungen in der Industrie

AWARE

Energy-efficient edge AI sensor system for industrial monitoring applications

<https://youtu.be/Yv-XzoZxlCQ>

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

In den "AWARE"-Demonstrator (Advanced wireless AI-enabled real-time environment) sind wesentliche Ergebnisse aus der internen KI-Forschungsgruppe eingeflossen. Auf der Basis dieses energieeffizienten Edge-KI-Sensorsystems lassen sich Monitoring-Anwendungen in der Industrie entwickeln. Mehr dazu gibt es im Fachartikel zur Anomalie-Detektion mit Edge-KI und unüberwachtem Lernen für smartes Maschinenmonitoring – und im Video. Foto: IMMS.

Zum Fachartikel

direkt von einem kleinen Gerät „aus der Hosentasche“ kommen kann, zeigen Edge-KI-Systeme wie das vom IMMS im Forschungsprojekt HoLoDEC entwickelte AWARE-Demonstrator-System.

www.imms.de/holodec

In AWARE (advanced wireless AI-enabled real-time environment) ist die „Künstliche Intelligenz“ direkt im Sensor integriert. Somit lassen sich Entscheidungen in Echtzeit ohne Umweg über die Cloud ableiten. Durch die automatisierte Anpassung an neue Umgebungsbedingungen können vielseitige Einsatzfelder erschlossen werden, wie z.B. in der Fehler- und Verschleißerkennung in der Produktion.

Demonstrator mit Potenzial für Monitoring-Entwicklungen

Ein Demonstrator zeigt AWARE beim Monitoring von Lüftern – eine einfache Beispielanwendung mit großem Transferpotenzial. AWARE erfasst Schwingungsmessdaten, wertet sie aus und klassifiziert den aktuellen Zustand von Lüftern. Das System enthält einen Schwingungssensor, der Schwingungen bis 6,4 kHz erfassen kann, und einen Mikrocontroller mit integriertem Funktransceiver.

Jahresbericht

© IMMS 2025

Die Sensordaten werden mit einem unüberwachten Machine-Learning-Verfahren per Clustering verarbeitet. Dabei wird ein „intakter“ Lüfter angelernt. Das Training findet ausschließlich auf dem Mikrocontroller des Sensorknotens statt.

Ein weiterer „intakter“ und ein „defekter“ Lüfter können dann entsprechend erkannt und klassifiziert werden, ohne dass die Daten vorher aufgezeichnet wurden. Angezeigt wird das Ergebnis über eine grüne bzw. rote LED. Die Daten können auch energiesparend mittels BLE (bluetooth low energy) zu einem Edge-Device übertragen werden.

Viel Forschung für kleinen Sensorknoten

In Projekten wie HoLoDEC schafft das IMMS mit Entwicklungen wie AWARE die Basis, um Forschungsergebnisse in Industrieanwendungen zu transferieren.

In HoLoDEC forscht das IMMS daran, KI-Algorithmen auf ressourcenbeschränkten Geräten für IoT-Anwendungen optimal nutzen zu können. Dazu entwickelt das IMMS energieeffiziente Edge-KI-Systeme mit energieoptimierter Leistungsverteilung zwischen möglichst viel sensornaher Datenverarbeitung und möglichst geringer Auslagerung von Aufgaben in das Netzwerk.

Die Herausforderung ist, dass KI-Modelle und Algorithmen nicht mehr nur auf leistungsfähigen Servern mit viel Speicherplatz laufen, sondern auf Mikrocontrollern eingesetzt werden sollen, für die diese aber weder entwickelt wurden noch 1:1 übertragbar sind und dementsprechend angepasst werden müssen. Die aktuelle Forschung beschränkt sich allerdings oft auf die Entwicklung eines leistungsfähigen KI-Modells auf einem Server.

Die Entwicklung AWARE zeigt, dass es auch anders geht. Auf der embedded world suchte das IMMS neue F&E-Partnerschaften im Bereich adaptiver Edge-KI-Systeme für Automatisierungstechnik und Industrie 4.0 sowie für Monitoring und Instandhaltung, um anwendungsspezifische Weiterentwicklungen des AWARE-Systems auf den Weg zu bringen.



Das IMMS hat 2025 das Start-Up OmniSent über die Forschungsstarthilfe iHUB unterstützt mit der Untersuchung von Machine-Learning-Algorithmen zur lokalen Signalverarbeitung auf ressourcenbeschränkten Sensorknoten. OmniSent hatte diese für Lösungen zum kontinuierlichen Monitoring von Lecks in Druckluftleitungen vorgesehen. Foto: IMMS.

Projekt iHUB* – Forschungs-Starthilfe für innovative Ideen von Start-Ups und jungen Unternehmen

Das IMMS war auch 2025 als Teil des Leistungszentrums InSignA als Forschungspartner am Ideenwettbewerb iHUB beteiligt. In diesem wird innovativen Ideen zu Sensorik, Digitalisierung oder Assistenzsystemen Starthilfe gegeben. Die besten Ideen werden nach einem Pitch von einer Jury aus Wissenschaft, Wirtschaft, öffentlichen Einrichtungen sowie Venture-Capital-Unternehmen für eine Förderung ausgewählt und mit Forschungsleistungen im Umfang von bis zu sechs Personenmonaten der beteiligten Partner unterstützt, z.B. durch Demonstratoren, Prototypen, Marktanalysen, Machbarkeitsstudien, Zugang zu Experten, Laboren sowie Sachmitteln. 2025 hat das IMMS das zweite Jahr als Partner am Wettbewerb teilgenommen. Die Jury wählte eine der Projektideen, an denen das IMMS beteiligt war, aus – OmniSent.

www.imms.de/ihub

Aufgabe und Partner

Die Omnisent GmbH wurde im Januar 2025 gegründet. iHUB-Ziel war die Entwicklung eines innovativen IoT-basierten Sensorsystems zur automatisierten Echtzeit-Detek-

Jahresbericht
© IMMS 2025

tion und -Lokalisierung von Druckluftleckagen. In der Industrie werden bis zu 10% der elektrischen Energie allein dafür verwendet, um Druckluft zu erzeugen. Aktuell entweicht etwa ein Drittel dieser Luft durch Lecks und verursacht nicht nur Energieverluste und Kostensteigerungen in den Prozessen, sondern auch Fehlfunktionen in den betreffenden Maschinen und Anlagen. Das OmniSent-System soll eine kontinuierliche Überwachung ohne Produktionsstörungen sowie eine Echtzeitdetektion von Leckagen bieten, Lecks präzise lokalisieren, energieeffizient und kostengünstig sein sowie auch in schwierigen industriellen Umgebungen zuverlässig funktionieren. Im iHub-Projekt wurden dafür zwei zentrale Herausforderungen bearbeitet: Funktechnologien zur Datenübertragung vom Fraunhofer IIS/EAS und Algorithmen zur lokalen Vorverarbeitung vom IMMS.

79	○
› Integrierte	Sensorsysteme
› Intelligente ver-	netzte Mess- u.
Testsysteme	
› nm-präzise 6D-	Direktantriebe
› Inhalt	
* Förderung	

Lösung des IMMS: Algorithmen zur lokalen Vorverarbeitung

Das IMMS hat Signalverarbeitungsalgorithmen auf den Sensorknoten mit folgenden Anforderungen untersucht und optimiert: Merkmalextraktion aus hochabgetasteten Ultraschallsignalen (zeitliche und spektrale Merkmale), energieeffiziente Implementierung auf ressourcenbeschränkten Mikrocontrollern, niedrige Inferenzzeit für echtzeitfähige Klassifikation und Robustheit gegenüber Hintergrundgeräuschen. Dabei wurden die Techniken wie klassische Signalverarbeitungsmethoden (FFT, statistische Features), Decision Trees und Random Forests sowie Deep Neural Networks mit Optimierungstechniken wie Quantisierung untersucht. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung und Optimierung von Signalverarbeitungsalgorithmen, die auf den Sensorknoten implementiert werden sollten – was entscheidend für die Effizienz des Gesamtsystems ist: Eine intelligente lokale Verarbeitung reduziert den Energieverbrauch und das Datenübertragungsvolumen erheblich.

Die Untersuchungen führten zu einer klaren und praktisch verwertbaren Erkenntnis: Klassische Machine-Learning-Modelle, speziell Decision Trees und Random Forests, sind optimal für die lokale Signalverarbeitung auf ressourcenbeschränkten Sensorknoten geeignet. Diese Modelle bieten eine ausgezeichnete Balance zwischen mehreren kritischen Anforderungen. Sie erreichen extrem niedrige Inferenzzeiten von weniger als 30 Mikrosekunden, was eine echtzeitfähige Verarbeitung ermöglicht. Sie benötigen minimale Rechenressourcen und damit nur sehr niedrige Energie, was für batteriegetriebene Sensoren entscheidend ist. Gleichzeitig bieten sie eine hohe Vorhersagegenauigkeit.

www.imms.de/
ihub



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Freistaat
Thüringen

Damit Betonsteine wie diese emissionsärmer produziert werden können, entwickelt das IMMS eine Lösung zur drahtlosen Vibrationsmessung. Foto: FlorinBirjoveanu Pixabay.

Projektstart WirelessAccel* – drahtlose Vibrationsmessung für eine emissionsärmere Betonsteinproduktion

Ziel: Emissionsärmere Betonherstellung bei gleicher Produktqualität

Der Klimafußabdruck von Beton als einem der wichtigsten Baustoffe ist enorm. Pro Tonne Zement, dem Bindemittel im Beton, entstehen 587 kg CO₂-Äquivalentent. Jährlich werden in Deutschland 27,5 Mio. Tonnen Zement verbraucht, weltweit etwa 4,65 Mrd. Tonnen.

Im Projekt WirelessAccel sollen die CO₂-Emissionen in der Betonherstellung gesenkt werden, ohne dabei die Produktqualität zu gefährden. Ziel ist ein System, das den Einsatz umweltfreundlicherer Baustoffe wie etwa Recyclingmaterialien und reduzierte Zementmengen erleichtert.

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

Das IMMS wird daher ein drahtloses Messsystem zur Erfassung von Vibrationen im gesamten Vibrationsverbund eines Betonsteinfertigers entwickeln. Dieses System soll in der Lage sein, die komplexen und hochdynamischen Vibrationen, die während des Verdichtungsprozesses auftreten, präzise und in Echtzeit zu erfassen und somit die genaue Überwachung und Anpassung der Produktionsparameter zu ermöglichen. Das ist insbesondere bei zementarmen Betonrezepturen oder Recyclingmaterialien von großer Bedeutung.

Zeitsynchrone und energieeffiziente Datenerfassung

Das IMMS erforscht dazu Methoden zur exakten Zeitsynchronisation von bis zu 12 Funksensorknoten. Damit wird eine synchrone Messung an verschiedenen Orten des Betonsteinfertigers ermöglicht. Parallel dazu wird ein energieeffizientes Datenübertragungsprotokoll implementiert, das die erfassten Beschleunigungsdaten mit einer Abtastrate von 2 kHz und einem Messbereich von bis zu 500g zuverlässig und in Echtzeit an ein zentrales Gateway übermittelt. Die Sensorknoten sind dabei so konzipiert, dass sie extrem hohe Beschleunigungen aushalten und gleichzeitig mit minimalem Energieverbrauch betrieben werden können, wodurch eine robuste, langlebige Messinfrastruktur für diesen anspruchsvollen Fertigungsprozess entsteht.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das IMMS entwickelt im Projekt SecureTSN für den Angriffsschutz von Time Sensitive Networks die zentrale KI-gestützte Anomalie-Erkennungskomponente. Foto: IMMS.

Projektstart von SecureTSN*: KI-basierter Angriffsschutz für Time Sensitive Networks

Produktionsausfälle und Sicherheitsrisiken durch Angriffe auf Time Sensitive Networks (TSN)

Industrie-4.0-Anwendungen wie Robotik und Fertigungsstraßen bis hin zu verteilten Sensornetzen erfordern zuverlässige, zeitlich getaktete Kommunikationslösungen wie TSN. Time Sensitive Networks (TSN) funktionieren wie ein präzises Uhrwerk: Alle Geräte im Netzwerk arbeiten nach demselben Verständnis von Zeit und nach den gleichen Regeln für die Bearbeitung und Weiterleitung von Netzwerkpaketen und für die Auswahl und Reservierung von Bandbreite und Kommunikationspfaden. So erreicht jede Nachricht ihren Zielpunkt genau zur richtigen Zeit. Verzögerungen oder sog. Latenzen bei der Nachrichtenübermittlung sind bekannt und werden bei der Taktung der Kommunikation berücksichtigt.

www.imms.de/
realtime

Ein erfolgreicher Cyber-Angriff auf solche Netzwerke kann nicht nur Produktionsausfälle verursachen, sondern je nach Einsatzgebiet auch die Sicherheit von Menschen gefährden.

Im Projekt SecureTSN entwickelt das IMMS daher einen umfassenden KI-basierten Angriffsschutz für TSN. Ziel ist es, dass dieser ohne zusätzlichen Overhead die Produktionsgeschwindigkeit nicht reduziert.

Angriffstor alte Inselösungen

Um für industrielle Automatisierungslösungen Sensoren und Aktoren für die Kommunikation mit einem Automatisierungsgerät zu verbinden, werden derzeit in vielen Fällen jedoch noch heterogene Feldbussysteme wie PROFINET, EtherCAT, Ethernet/IP, Modbus oder CANopen eingesetzt. Diese sind Teil von meist langfristig ausgelegten Operational-Technology-Netzwerken (OT), mit denen physische Prozesse wie Maschinen, Anlagen oder Sensoren in der Industrie gesteuert werden. Oft handelt es sich dabei um ältere Systeme, die auf eine spezifische Anwendung zugeschnitten sind.

Die daraus entstehenden isolierten Inselnetzwerke verhindern nicht nur Interoperabilität, sondern erhöhen auch die Anfälligkeit für Cyber-Attacken.

TSN als Lösung – Schutzschild noch zu vergrößern

Um dem entgegenzuwirken, werden IT- und OT-Netzwerke mehr und mehr über Time Sensitive Networking (TSN) verschmolzen. TSN gewährleistet deterministische Latenzen, garantierte Quality-of-Service Dienste und hohe Verfügbarkeit, jedoch fehlt bislang eine umfassende Sicherheitsarchitektur.

Projekt SecureTSN stärkt Sicherheitsarchitektur

Das Projekt SecureTSN adressiert diese Lücke. Ziel ist die Bereitstellung von Hardware- und Software-Erweiterungen, die TSN-Netzwerke gegen Täuschung, Manipulation und Denial-of-Service-Attacken, bei denen Angriffsziele überlastet werden, schützen. Hierbei konzentriert sich das Projekt auf die kritischen TSN-Funktionen Zeitsynchronisation (IEEE 802.1AS) und Scheduling (IEEE 802.3Qbv).

Das IMMS arbeitet in dem Projekt an der Entwicklung und Integration von KI-gestützten Angriffserkennungssystemen in TSN-kompatible Geräte. Das IMMS nutzt sein TSN-Testlabor und die Expertise in eingebetteten Systemen, um maschinelle Lernmodelle zu trainieren, die Zeitreihen-Anomalien – insbesondere Delay Attacks – in Echtzeit erkennen. Anschließend werden die Modelle für den Einsatz auf Mikrocontrollern und Edge Switches optimiert. Diese kompakte Hardware-nahe Implementierung wird in Switches und End Devices eingebettet, sodass sie kontinuierlich Netzwerkverkehr überwachen, potenzielle Angriffe sofort melden und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen auslösen können. Durch diese Kombination aus Modelltraining, Optimierung und Hardware-Integration liefert das IMMS die zentrale Anomalie-Erkennungskomponente, die die Sicherheit der gesamten TSN-Infrastruktur stärkt.

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

Validierung mit Demonstrator

Die Ergebnisse werden in einem Test- und Demonstrationssetup validiert, das die Sicherheit von TSN Switches, End Devices und Switched End Devices unter realen Angriffsbedingungen aufzeigt. Durch die Kombination aus standardisierten Sicherheitsprofilen, Hardware-Sicherheitsfunktionen und intelligenter Monitoring Software erhöhen wir die Akzeptanz von TSN in KMU, ermöglichen schnellere Markteinführungen und stärken die Widerstandsfähigkeit industrieller Fertigungs- und Automatisierungsnetzwerke.



Das IMMS hat in thurAI ein kompaktes energieautarkes und in bestehende Infrastruktur einbindbares System für das kontinuierliche Feinstaubmonitoring entwickelt und für Messungen in den Ilmenauer Urlaubsorten installiert.

Foto: IMMS.

Smart-City-Lösungen in Ilmenau ausgeweitet

Die im Projekt thurAI* in der Zusammenarbeit zwischen der Stadtverwaltung Ilmenau, der TU Ilmenau und dem IMMS entwickelten Smart-City-Lösungen wurden 2025 erweitert. Ziel war es, digitale Technologien so einzusetzen, dass sie den Alltag der Bürgerinnen und Bürger konkret erleichtern und kommunale Prozesse effizienter gestalten.

Über digitale Dienste für den Alltag stehen Echtzeitinformationen im Mittelpunkt. Gäste der Schwimm- und Eishalle können online die aktuelle Auslastung einsehen und ihre Besuche besser planen. Ein intelligentes Monitoring der Straßenbeleuchtung sorgt dafür, dass Defekte automatisch erkannt und schneller behoben werden – ein Plus an Sicherheit und Energieeffizienz. Für Umwelt- und Klimadaten erfasst ein Netz aus Messstationen Feinstaub, Temperatur, Luftfeuchte und weitere Wetterdaten kontinuierlich. Diese Informationen werden über das Web-Portal der Stadt aufbereitet, offen zugänglich bereitgestellt und können von Bürgerinnen und Bürgern, Verwaltung und Forschung genutzt werden. Neu hinzugekommen ist die Echtzeitmessung des Ilm-Pegelstands, die eine frühere Erkennung möglicher Hochwasserlagen ermöglicht. Zudem testet die Stadt ein visuelles Sensorsystem, das freie Parkplätze automatisch erkennt und meldet. Damit sollen perspektivisch der Suchverkehr reduziert und Verkehrsflüsse verbessert werden.

Die Informationen können seit 2025 unter **www.ilmenau.de/smartcity** abgerufen werden. Insgesamt zeigt sich in Ilmenau, wie eine mittelgroße Stadt durch gezielte Kooperationen und praxisnahe digitale Lösungen Schritt für Schritt zu einer Smart City wird – mit klar erkennbarem Nutzen für Bevölkerung, Verwaltung und Forschung.

www.imms.de/

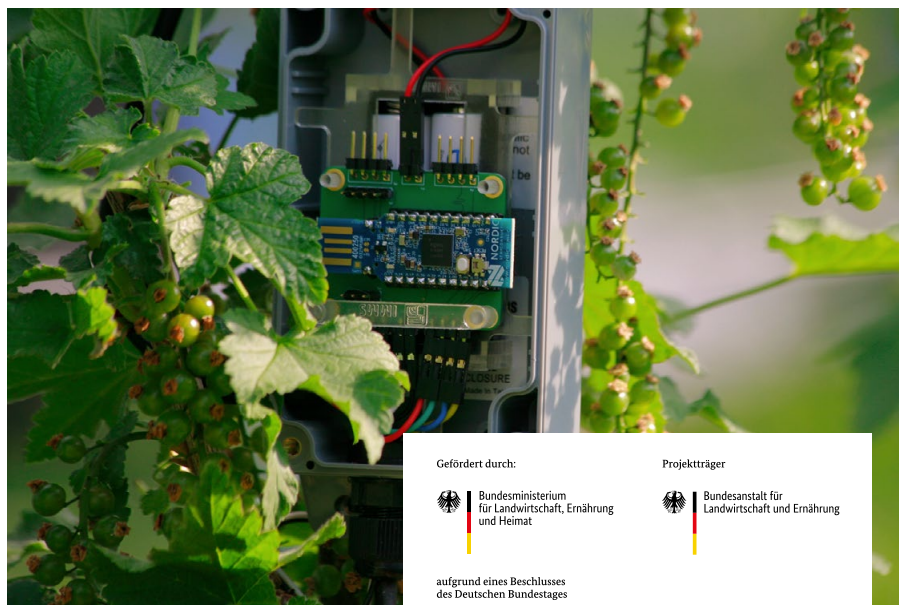
thurai

ilmenau.de/

smartcity

Jahresbericht

© IMMS 2025



Gefördert durch:

Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

Projektträger

Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährungaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mit autarken modularen Sensorsystemen wie diesem hat das IMMS im sechsjährigen Experimentierfeld EXPRESS an elf Pflanzenbau-Standorten in Mitteldeutschland u.a. das Monitoring von Mikroklima und Trockenstress unterstützt. Foto: IMMS.

Projektabschluss EXPRESS* – autarke modulare Sensorsysteme für kostengünstige Optionen zur Datenerhebung in der Landwirtschaft

Regionales Experimentierfeld EXPRESS

Als Teil des mitteldeutschen Experimentierfelds EXPRESS hat das IMMS nach sechs Jahren die Arbeiten im Experimentierfeld zur datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft (EXPRESS) erfolgreich abgeschlossen. www.imms.de/express

In EXPRESS arbeiteten unter der Leitung des Instituts für Wirtschaftsinformatik an der Universität Leipzig das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, das Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management IMW (später Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI) und das IMMS an den Grundlagen für das Zusammenspiel bestehender technischer Infrastrukturen mit neuen Technologien und Methoden in landwirtschaftlichen Betrieben.

Hintergrund war die steigende Bedeutung der Digitalisierung in der Landwirtschaft, beispielsweise um die Bewässerung von Nutzpflanzen in langen Trockenperioden zu [Jahresbericht](#)
© IMMS 2025

optimieren. Vielen Betrieben fehlten jedoch die Voraussetzungen, um für sie geeignete und bezahlbare Systeme zu identifizieren, deren Möglichkeiten zu erfassen und einen Nutzen zu generieren.

EXPRESS richtete sich vor allem an den Pflanzenbau mit besonderem Fokus auf Sonderkulturen. Digitale Technologien sollen dort die Ressourceneffizienz steigern, eine umweltschonende Produktion unterstützen und die Biodiversität langfristig bewahren. Innovative Technologien wie Sensorik, Blockchain, Virtual Reality, Feldroboter und 5G-Anwendungen sollen neue Wertschöpfungsketten mitgestalten und Produktionsprozesse optimieren. In EXPRESS wurde in Zusammenarbeit mit Landwirten anhand von fünf Use-Cases potenziell geeignete Technik erprobt und der Branche vorgestellt:.

- skalenübergreifendes Wasserstress-Monitoring zur Bewässerungsoptimierung
- automatische Überwachung von abiotischen Schlüsselparametern, z.B. durch die Messung des Mikroklimas im Bestand
- Food Tracing via Blockchain
- Augmented/Virtual/Mixed Reality in der Landwirtschaft
- Datenintegration und Management stark heterogener Datenquellen aus diversen Sensorsystemen

IMMS unterstützte Monitoring von Mikroklima und Trockenstress

Das IMMS verantwortete die Datenerhebung und kümmerte sich um die Bestimmung des Mikroklimas sowie weiterer Parameter für das Monitoring von Trockenstress. Dabei wurden Agrarbetrieben unterschiedliche Systemlösungskonzepte für diese Anwendungsfälle vorgestellt. Zusätzlich erprobte das IMMS verschiedene am Markt verfügbare Sensorsysteme auf ihre Eignung. Darüber hinaus stattete das IMMS die Experimentierfelder mit geeigneter Sensorik aus, überwachte deren Betrieb und die Übertragung der Daten.

IMMS entwickelte kostengünstige autarke Sensorsysteme für die Praxis

Im Fokus der IMMS-Entwicklungen standen dabei praxistaugliche autarke Sensorsysteme. Diese wurden möglichst modular konzipiert, um sie an die jeweiligen Randbedingungen in einem landwirtschaftlichen Betrieb anpassen und dort für weitere Analysen und Optimierungen nutzen zu können. Kostengünstige Systeme zu ent-

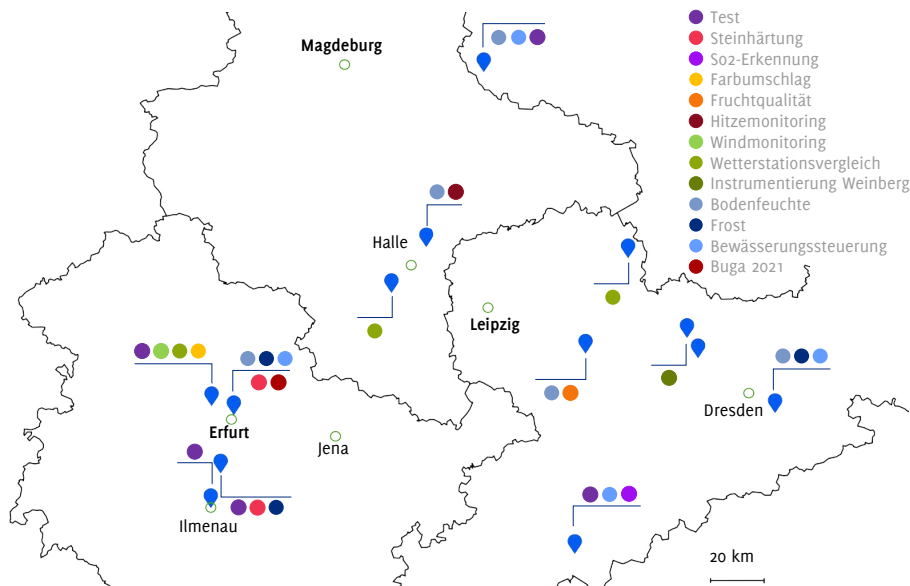


Abbildung 1: Überblick über die in EXPRESS vorgenommenen Untersuchungen in Feldtests zur Erprobung von verschiedenen Sensorik-Anwendungen. Grafik: IMMS.

wickeln, die alle erforderlichen Größen hinreichend genau erfassen und gleichzeitig mit möglichst wenigen Messpunkten verwertbare und vor allem nützliche Aussagen ermöglichen, war dabei die Herausforderung.

Sechs Jahre Feldtests in Zusammenarbeit mit Landwirten in Mitteldeutschland

Das IMMS hat über die letzten Jahre an verschiedenen Standorten Fragstellungen der Landwirte in Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt mit digitalen Technologien unterstützt.

Im Projekt wurden an 11 verschiedenen Standorten in Mitteldeutschland gemeinsam mit den Partnern aus Versuchswesen, Forschung und Anwendern Experimente und Versuche durchgeführt, um den Nutzen digitaler Technologien nachzuweisen.

www.imms.de/

express

Abbildung 1 zeigt die Standorte der Erprobung unterschiedlicher Sensorik, an denen Lösungen für spezifische Fragen der Partner entwickelt und getestet wurden. Einge-
flossen sind dabei Parameter für Themen wie die Erkennung von Knospenwachstum
im Frühjahr sowie Steinhärtungsphase und Farbumschlag bei Kirschen, das Frost-
monitoring, das Hitzemonitoring unter einer Überdachung, der Vergleich von Bo-
denfeuchtesensoren oder der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Fruchtqualität.



Abbildung 2: Untersuchungen zum Hitzemonitoring unter einer Überdachung (links) und zum Farbumschlag von Kirschen (rechts). Fotos: IMMS.

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

Im Ergebnis entstand eine neue modulare Sensorplattform (siehe Abbildung 3) für die Datenerhebung im land- und forstwirtschaftlichen Kontext, die weiterhin an verschiedenen Standorten für Untersuchungen im Folge- bzw. Schwesterprojekt EXPRESS.smart! und MIRO eingesetzt wird. Für die Kommunikation im Sensornetzwerk werden verschiedene Technologien wie MiraMesh, LoRaWAN oder Bluetooth je nach Anwendungsfall eingesetzt. Die Sensorknoten übertragen ihre Messwerte an ein Gateway, das die Daten vorübergehend speichert, ihnen Messpunkte zuordnet und lokale Protokolldateien erstellt. Stündlich werden die Daten über ein Mobilfunknetz an einen Server übertragen, wo sie in eine Zeitreihendatenbank (InfluxDB) geschrieben und in Dashboards (Grafana) visualisiert werden. Über dieses System können auch Schwellenwerte festgelegt und bei Bedarf Meldungen über verschiedene Kanäle versendet werden. Darüber hinaus kann das System auch Ausfälle

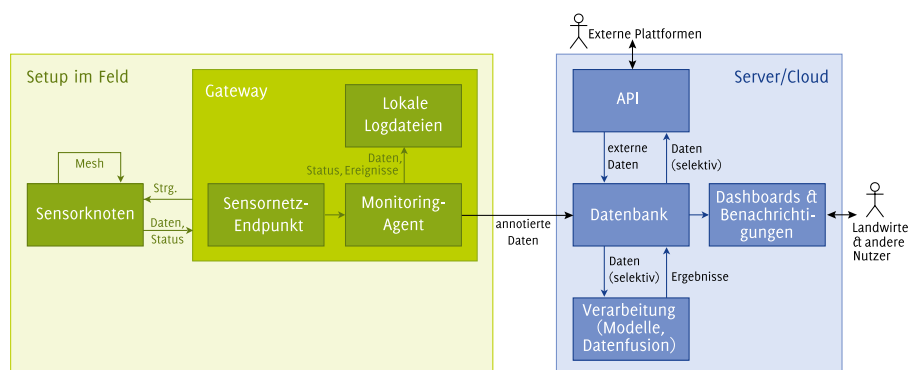


Abbildung 3: Sensorplattform zur Datenerhebung und -verarbeitung. Grafik: IMMS.



Abbildung 4: Das in EXPRESS am IMMS in unterschiedlichen Ausführungen entwickelte Dendrometer wurde z.B. eingesetzt zum Monitoring des Knospenwachstums (oben links) und der Steinhärtungsphase bei Kirschen (oben rechts), zum Monitoring des Knospenwachstums vor dem Hintergrund von Spätfrösten (unten links) und für Untersuchungen zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Fruchtqualität (unten rechts). Foto: IMMS.

überwachen, was eine schnelle Behebung ermöglicht. Analyseskripte auf dem Server verarbeiten die Daten und schreiben die Analyseergebnisse zurück in die Datenbank, von wo aus sie visualisiert werden können, gegebenenfalls in Verbindung mit den Rohdaten.

Entwicklung eines Dendrometers

Einer der im Projekt entwickelten Sensoren ist ein Dendrometer, welches an die Sensorplattform angeschlossen und für verschiedene Zwecke eingesetzt werden kann, siehe Abbildung 4. Dafür wurden verschiedene Größen realisiert und als Knospendendrometer, als Gradmesser zur Erkennung der Steinhärtung bei Süßkirschen und als Fruchtdendrometer genutzt. Mit Hilfe dieses Dendrometers lassen sich zum ersten Mal mit wenig Personalaufwand, kontinuierlich und digital die Entwicklungsstadien zu Beginn der Saison verfolgen und quantifizieren. Das ist für die Züchter ein großer Schritt hinsichtlich der Bewertung einer Sorte im Bezug zum Klimawandel.



Abbildung 5:

Vergleich von Boden-
feuchtesensoren.

Foto: IMMS.

Außerdem wurden innerhalb der sechsjährigen Projektlaufzeit zahlreiche kleine Experimente durchgeführt, wie z.B.:

- Kamerabasierte Erkennung von Entwicklungsstadien beim Apfel
- Funkbasierte Bewässerungssteuerung
- Trockenstress-Sensorik
- Bewertung von RFID-Sensorik in der Landwirtschaft
- Test eines Sensorsystems zur Blattdruckmessung
- Test von drahtloser Sensorik im Gemüseanbau (Kohl)
- Messkampagnen zur Reichweitenmessung und deren Auswertung

Alle Aktivitäten wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (IMW/ISI, ULE, UFZ) sowie Anwendungspartnern (LVG, JKI) umgesetzt und haben die Sichtbarkeit von EXPRESS auf regionaler und überregionaler Ebene maßgeblich erhöht, vgl.: www.digitalisierung-landwirtschaft.de/veranstaltungen/.

*digitalisierung-
landwirtschaft.de/
veranstaltungen*

Digitalisierung wird auch in der Landwirtschaft immer wichtiger, beispielsweise um die Bewässerung von Nutzpflanzen in langen Trockenperioden zu optimieren. Vielen Betrieben fehlten jedoch die Voraussetzungen, um für sie geeignete und bezahlbare Systeme zu identifizieren, deren Möglichkeiten zu erfassen und einen Nutzen zu generieren. Um das zu ändern, hat das Projekt EXPRESS einen wertvollen Beitrag geleistet.

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



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Zum Kernobsttag 2025 an der Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau und Arboristik (LVGA) in Müncheberg. wurden die in EXPRESS entwickelte Sensorik zur Überwachung abiotischer Parameter sowie die automatisierte Bewässerungssteuerung vorgestellt. Foto: IMMS.

Projekte EXPRESS* und MIRO*: IMMS präsentiert Digitalisierungslösungen für den Obstbau

Das IMMS präsentierte Ergebnisse aus den beiden Schwesterprojekten EXPRESS (Experimentierfeld zur datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft) und MIRO (Mitteldeutsche Innovationsregion Obstbau) beim **Haselnusstag 2025** beim Lehr-Und Versuchszentrum für Gartenbau (LVG) in Erfurt.

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

In einem Vortrag wurden prognostizierte Klimaveränderungen für Mitteldeutschland und Auswirkungen auf die Bewässerung von Obstbäumen aus Sicht des Projektes MIRO beleuchtet. Anschließend wurde auf den Versuchsflächen des LVG die im Projekt EXPRESS entwickelte automatisierte Bewässerungssteuerung vorgestellt.

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

Darüber hinaus unterstützte das IMMS gemeinsam mit anderen Forschungseinrichtungen und Obstbauern den **Kernobsttag 2025** an der Lehr- und Versuchsanstalt



Zum Haselnusstag 2025 in Erfurt wurde u.a. der Einbau von Bodenfeuchtesensoren präsentiert. Foto: IMMS.

für Gartenbau und Arboristik (LVGA) im Brandenburgischen Müncheberg. Im Mittelpunkt des Tages stand die Verbindung von Forschung, Praxis und Genuss. In lockerer Atmosphäre konnten die Besucher Vorträge von Expertinnen und Experten zu aktuellen Entwicklungen der Apfelmehr zu Möglichkeiten der Digitalisierung im Obstbau erfahren.

93

Integrierte Sensorsysteme

Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

nm-präzise 6D-Direktantriebe

Inhalt

Förderung

Am Ausstellungsstand wurden zwei der in EXPRESS entwickelten Lösungen vorgestellt: Sensorik zur Überwachung abiotischer Parameter sowie eine automatisierte Bewässerungssteuerung.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Funkbasierte Messung der Temperatur an Obstbäumen. In EXPRESS.smart werden viele solcher Messpunkte auf einer Obstanbaufläche installiert und damit die spezifische klimatische Charakteristik ermittelt. Foto: IMMS.

Projektstart von EXPRESS.smart:* KI-gestütztes Klima- und Pflanzenmonitoring im regionalen Obst- und Weinbau zur Sicherung und Optimierung von Ertrag und Qualität

Vorhersage von Risiken durch Spätfröste im Obst- und Weinbau

Bereits früh im Jahresverlauf entscheidet sich Menge und Qualität der Ernte im Obst und Weinbau. Besonders wichtig ist dabei, ob am Ende der Wintersaison noch Spätfröste auftreten, denn diese können den Pflanzen erheblichen Schaden zufügen.

Im Projekt EXPRESS.smart erprobt das IMMS digitale und KI-basierte Lösungen zur Vorhersage von Frostereignissen und den daraus entstehenden Risiken für die Ernte als Grundlage für Handlungsempfehlungen.

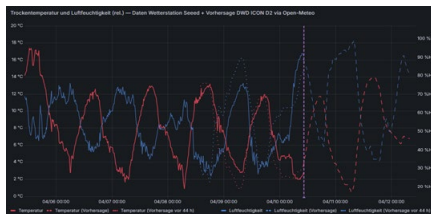
Lösung: Integriertes Frostmonitoring

Um rechtzeitig zu reagieren, ergänzen speziell ermittelte örtliche Gegebenheiten wie Geländeprofile und Luftströmungen die allgemeinen Wetterprognosen, insbesondere für zu erwartende minimale Temperaturen. Gleichzeitig bestimmen Sensoren, in welchem Entwicklungsstadium sich die Pflanzen befinden und welche aktuelle Temperatur vorherrscht. Auf dieser Basis entscheiden angepasste Algorithmen, ob und welche Schutzmaßnahmen durchgeführt werden müssen.

Das IMMS ist verantwortlich für die gesamte Datenpipeline von der Datenerhebung bis zur Formulierung von Handlungsempfehlungen.



Am IMMS entwickelter Sensor zur Messung des Knospenwachstums an einem Kirschbaum. In EXPRESS.smart wird aus der Knospengröße das Entwicklungsstadium der Knospe und damit das Risiko für Frostschäden ermittelt. Foto: IMMS.



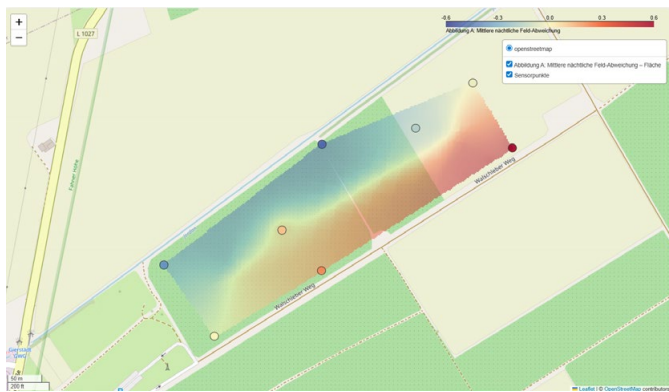
Vergleich zwischen allgemeiner Wetterprognose für Temperatur und Luftfeuchtigkeit und tatsächlich gemessenen Werten. In EXPRESS.smart wird aus den Ergebnissen des Vergleichs für alle Messpunkte einer Obstanbaufläche die spezifische klimatische Charakteristik ermittelt. Quelle: IMMS.

Innovation: KI-gestützte Datenauswertung

KI Modelle unterstützen die Empfehlung geeigneter Maßnahmen. Sie analysieren die erhobenen Daten, erkennen ungewöhnliche Muster und bewerten, welche Gefahren bestehen. Daraufhin schlagen sie passende Gegenmaßnahmen vor – etwa spezielle Frostschutzmaßnahmen oder veränderte Bewässerungsstrategien. Am IMMS kombinieren wir geeignete KI-Algorithmen zur Auswertung unserer Sensordaten mit Zuarbeiten unserer Projektpartner für ein ganzheitliches Klima- und Pflanzenmonitoring.

Vorteile: Wissenstransfer zwischen Forschung und Praxis

Bislang basieren Schutz und Optimierungsmaßnahmen im Obst- und Weinbau vor allem auf Erfahrungswerten, sind teilweise unsicher und erfordern häufig einen hohen Einsatz an Ressourcen. Die Kombination aus angepassten Wetterdaten, automatisch ermittelten Entwicklungsstadien der Pflanzen und KI-gestützten Algorithmen macht die bewährten Strategien greifbarer und für einen erweiterten Kreis von Praktikern zugänglich. So können auch kleinere Betriebe von den Empfehlungen profitieren und ihre Erträge effizient schützen und steigern.



Darstellung der Feucht-Temperaturverteilung auf einer spezifischen Teilfläche im Obstanbau. In Express.smart messen Feucht-Tempersensoren die Temperaturverteilung im Schlag und können so Hinweise auf „Kaltluft-Spots“ geben. Quelle: OpenStreetMap/IMMS.

Veranstaltungen und Infoangebote für KMU

Das IMMS war im Jahr 2025 als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ mit einem umfangreichen Veranstaltungs- und Informationsangebot aktiv. Insgesamt wurden 24 Orientierungsgespräche, 10 Stammtische, 4 Vorträge, 10 Fachworkshops sowie 6 Online-Seminare durchgeführt. Ziel dieser Angebote war es, kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der Einführung und Umsetzung von Digitalisierungs- und KI-Lösungen praxisnah zu unterstützen.

Darüber hinaus präsentierte sich das IMMS als Modellfabrik auf 19 regionalen **Veranstaltungen** von Branchennetzwerken sowie auf Messen. Auf Bundesebene wurden im Netzwerk „Mittelstand-Digital“ weitere 15 Aktivitäten umgesetzt. Die Arbeit im Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Partnern TU Ilmenau, an der die Geschäftsstelle sowie die „Modellfabrik Vernetzung“ angesiedelt sind, der Ernst-Abbe-Hochschule Jena als „Modellfabrik Virtualisierung“ sowie der Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V. in Schmalkalden als „Modellfabrik Prozessdaten“.

Neben den fachlichen Schwerpunkten, die sich aus den Bezeichnungen der Modellfabriken ergeben, setzt das Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau einen besonderen Fokus auf die Themen Nachhaltigkeit, Plattformökonomie und Künstliche Intelligenz. Das IMMS bearbeitet als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ insbesondere Fragestellungen rund um Retrofit-Lösungen, vorausschauende Wartung, smarte Sensoren, digitale Diagnoselösungen sowie die KI-basierte Auswertung von Sensordaten. So werden beispielsweise Nachrüstlösungen für Maschinen demonstriert, mit denen der Maschinenzustand automatisiert erfasst und visualisiert werden kann. Eine weitere Kernkompetenz liegt in der praktischen Umsetzung smarter Sensorsysteme, mit deren Hilfe unter anderem Werkzeugmaschinen mithilfe von KI überwacht werden. Ergänzend dazu zeigen Demonstratoren digitale Diagnoselösungen, etwa zur Identifikation kostenintensiver Leckagen in Druckluftsystemen mittels mobiler Messgeräte. Fragestellungen der KMU zum Einsatz von KI werden dabei durch die KI-Trainer aller Partner des Zentrums aufgegriffen und bearbeitet.

Begleitend zu den Veranstaltungen entstanden im Berichtsjahr acht **Publikationen**, unter anderem zur Zusammenarbeit mit Unternehmen in Projekten oder zu entwickelten Demonstratoren. Diese wurden über die Webseiten des Zentrums, Newsletter sowie über soziale Medien an interessierte Zielgruppen verbreitet.

- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › nm-präzise 6D-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

www.imms.de/md

www.imms.de/i40



Das IMMS hat in seinen Laboren eine aktive Überwachung der Druckluftanlage implementiert. Diese stellt den zuverlässigen Anlagenbetrieb sicher und alarmiert im Fehlerfall, beispielsweise beim Platzen von Verbindungsschläuchen. Die Demonstrationslösung wird regelmäßig zu Veranstaltungen des Zentrums präsentiert. Foto: IMMS.

Neue Digitalisierungsprojekte

Neben den vielfältigen Veranstaltungsformaten wurden in der „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ am IMMS zwei Demonstrations- und KI-Anwendungsprojekte begonnen, die konkrete Einsatzmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz in produzierenden KMU aufzeigen.

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

Erweiterung des Demonstrators „Stationäre Druckluftüberwachung“

Im Rahmen der Arbeiten im Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau wurde in den Laboren des IMMS eine aktive Überwachung der Druckluftanlage als Demonstrationslösung implementiert. Diese dient zum einen der Sicherstellung des zuverlässigen Anlagenbetriebs und der Alarmierung im Fehlerfall, beispielsweise beim Platzen von Verbindungsschläuchen. Zum anderen ist der Demonstrator fester Bestandteil der Demonstrationen zu Veranstaltungen des Zentrums. Interessierte können dabei live die Funktionsweise sowie mögliche Reaktionen, etwa Push-Benachrichtigungen, erleben.

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

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Forschungsarbeiten im IMMS bestand die Notwendigkeit, die schwingungs isolierten Fundamente im Hauptlabor des The-

Jahresbericht
© IMMS 2025

menbereichs Mechatronik deutlich präziser zu dämpfen. Hierzu wurde die bisherige passive, federbasierte Schwingungsisolierung durch aktive Schwingungsisolierungen ersetzt, die ebenfalls Druckluft nutzen. Dieser Umbau machte eine erneute Erfassung der Druckluftverbrauchsdaten erforderlich, um ein Neuanlernen der aktiven Druckluftüberwachung zu ermöglichen. Da bei der Datenerhebung zahlreiche Einflussparameter aus unterschiedlichen Laborbereichen berücksichtigt werden müssen, dauert dieser Prozess sehr lange und wird im ersten Halbjahr 2026 fortgeführt. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für eine KI-basierte Messdatenauswertung, die kontinuierlich weiterlernt und dadurch immer präzisere Reaktionen auf Veränderungen erlaubt.

KI-Anwendungsprojekt „KI-basiertes innerbetriebliches Wissensmanagement für KMU“

Aus zahlreichen Gesprächen mit Thüringer KMU ist bekannt, dass der Erfassung und Bereitstellung innerbetrieblichen Wissens eine hohe Bedeutung zukommt. Wissensmanagement umfasst dabei sowohl explizites Wissen aus Dokumenten, ERP- und anderen Planungssystemen sowie aus betrieblichen Abläufen als auch implizites Wissen in Form von Know-how und Erfahrungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Dieses Wissen geht häufig verloren, wenn Fachkräfte das Unternehmen verlassen.

Ziel des Projekts ist es, betriebliches Wissen über eine einfache Abfrage in einer chatähnlichen Benutzeroberfläche zugänglich zu machen einen niederschweligen, natürlichsprachlichen Zugang zu ermöglichen. Als technische Basis wird Künstliche Intelligenz in Form großer Sprachmodelle (Large Language Models, LLM) eingesetzt, die unter Berücksichtigung von Datenschutzaspekten mit unternehmensspezifischen Daten angereichert werden (Retrieval Augmented Generation, RAG). Auf diese Weise werden die Stärken klassischer abfragebasierter Systeme mit generativen KI-Modellen kombiniert.

Die Umsetzung kann entweder über eine abgesicherte Cloud-Instanz mit Zugriff auf eine exklusive LLM-Instanz eines Drittanbieters oder über ein lokal installiertes LLM auf einem eigenen leistungsfähigen Server (On-Premise) erfolgen. Die Auswahl der geeigneten Implementierungsvariante erfolgt projektspezifisch in Abhängigkeit von der Größe des betrieblichen Datenpools, den Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie unter Berücksichtigung von Beschaffungs-, Installations-, Lizenz- und Wartungskosten. Unabhängig von der gewählten Variante ist in beiden Fällen ein webbasiertes Frontend erforderlich, das sowohl das einfache Einpflegen neuer Datenbestände als auch die prozessgerechte Abfrage von Unternehmenswissen ermöglicht.

Gemeinsam mit dem Ilmenauer Unternehmen deenovum AG wurde im Projekt eine breit einsetzbare Lösung für innerbetriebliches Wissensmanagement auf Basis verfügbarer KI- und Internet-Technologien realisiert. Das Anwendungsszenario deckt ein breites Spektrum betrieblicher Prozesse ab – vom Onboarding neuer Fachkräfte über die Unterstützung des Kundenservice bis hin zu spezifischen Hilfestellungen bei der Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen in KMU. Die Implementierung von Beispieldaten für Demonstrationszwecke für Mittelstand-Digital-Aktivitäten sowie die umfassenden Tests des Systems erfolgen im ersten Quartal 2026.

Vernetzung mit Digitalisierungsakteuren

Ein weiterer zentraler Bestandteil der Arbeit im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ ist die Vernetzung relevanter Akteure der digitalen Transformation. Im bundesweiten Mittelstand-Digital-Netzwerk fand ein regelmäßiger Austausch statt, unter anderem in themenspezifischen Arbeitsgruppen sowie auf Regionalkonferenzen der beteiligten Zentren. Dabei standen insbesondere die Bedarfe der Unternehmen sowie der Ausbau und die zielgruppengerechte Ausgestaltung der Unterstützungsangebote im Fokus.

Darüber hinaus pflegte das IMMS einen intensiven Austausch mit Thüringer Netzwerken und Initiativen, darunter die Cross-Cluster-Initiative Thüringen (CCIT), das Branchencluster für Elektronische Mess- und Gerätetechnik Thüringen eG (ELMUG), das Thüringer Zentrum für Maschinenbau (ThZM), der Branchenverband der Kunststoffindustrie PolymerMat e.V., das Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR) sowie der Verbund Thüringer KI-Transferzentren.

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. Gleichzeitig bündeln die Mittelstand-Digital-Zentren die Anforderungen der KMU, damit diese in der Grundlagen- und angewandten Forschung Berücksichtigung finden.

- 99
- › Integrierte Sensordsysteme
 - › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
 - › nm-präzise 6D-Direktantriebe
 - › Inhalt
 - * Förderung

www.imms.de/md

digitalzentrum-chemnitz.de

scads.ai

ki-hub-sachsen-thueringen.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Jahresbericht



KI-basierte Optimierung von Spritzgießprozessen

Im Projekt ProQuaOpt wurden KI-basierte Methoden zur automatisierten Produktivitäts- und Qualitätsoptimierung für Spritzgießverfahren entwickelt. Für das verwendete Werkzeug konnte die Zykluszeit so um ca. 4 Sekunden reduziert werden, was die Produktivität für einen Tag um 73 Produkte oder ca. 5% erhöhte. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Spritzgießen ist das verbreitetste Verfahren, um Kunststoffteile für praktisch alle Anwendungsgebiete herzustellen. In Deutschland werden jährlich 14,6 Mio. Tonnen Kunststoff von über 3000 Unternehmen zu formfallenden Bauteilen und Baugruppen mit verschiedensten Oberflächen aus bis zu vier Materialien verarbeitet. Ließe sich dabei der Ausschuss von aktuell 4% um nur 1 % reduzieren, würden allein in Deutschland ca. 150.000 t Kunststoff und ca. 650 Mio. € Kosten eingespart.

Spritzgießmaschinen werden in der Regel durch Fachpersonal so eingestellt, dass sie gute Teile produzieren. Doch gute Teile allein bedeuten nicht automatisch eine ressourceneffiziente Produktion, da das Optimum aus hoher Qualität und hohem Durchsatz bei möglichst geringem Input derzeit nur über iterative Versuche herausgefunden werden kann. Großes Einsparpotenzial könnten Tools bieten, die den Ausschuss reduzieren. Daneben ließen sich zusätzlich Material, Energie und Zeit je Teil einsparen, wenn der optimale Betriebspunkt gefunden und dafür die Effektivität der Prozesse und Qualität der Produkte bewertet und zu optimiert werden.

www.imms.de/

i4o

Jahresbericht

© IMMS 2025

Im Projekt ProQuaOpt wurden daher KI-basierte Methoden zur automatisierten Produktivitäts- und Qualitätsoptimierung für Spritzgießverfahren entwickelt. Dafür wurde ein Produkt-Prozess-Qualitätsregelkreis aufgebaut. Dieser besteht aus einer Regelstrecke an der Spritzgießmaschine, einem Messglied zur optischen Qualitätsprüfung des Bauteils und einem Regler in Form eines selbstlernenden Assistenzsystems.

Dieser Regelkreis wurde beim Projektpartner KHW Kunststoff- und Holzverarbeitungswerk GmbH implementiert und über iterative Tests verfeinert. Mit ihm wurde nachgewiesen, dass sich Prozessparameter unter realen Produktionsbedingungen verfeinern, die KI-basierten Modellvorhersagen validieren und der Spritzgießprozess sicher zu verbesserter Qualität und reduzierten Zykluszeiten steuern lassen kann. Für das verwendete Werkzeug konnte die Zykluszeit so um ca. 4 Sekunden reduziert werden, was die Produktivität für einen Tag um 73 Produkte oder ca. 5% erhöhte. Bei Fehlern kehrte das System zur letzten akzeptablen Lösung zurück, was einen unterbrechungsfreien Betrieb bei gleichzeitig reduzierter Anzahl physischer Versuche sicherstellte.

Vom manuellen Einstellen zum Regelkreis – Ansatzpunkte und Herausforderungen

Über den Regelkreis kann an der Spritzgussmaschine stets der optimale Produktionsprozess hinsichtlich Produktivität, Qualität und Energieeffizienz gefahren werden. Dieser Vorgang hat Parallelen zum initialen manuellen Einrichten in einzelnen Schritten: Dort ist bislang stets abzuwägen, ob die Prozessoptimierung über die Einhaltung der Qualitätsmerkmale hinaus mit dem zeitlichen Aufwand der weiteren Optimierung vereinbar ist. Entgegengesetzt dazu verfeinert das Optimierungssystem kontinuierlich den Prozess und passt mithilfe kleiner Iterationsschritte die Prozessparameter an, um einen optimalen Betriebspunkt einzustellen. Startpunkt können dabei auch die letzten dem System bekannten Parameter einer Werkzeug-Maschinen-Kombination sein.

Spritzgießmaschinen verfügen bereits über viele Sensoren und dokumentieren deren Signalverläufe. Viele Daten sind für den Betrieb der Anlage essentiell, wirken sich jedoch nicht direkt auf die Formteilqualität oder die Zeit eines Spritzgießzyklus aus, wie z.B. Ölvorlauftemperatur oder Auswerferweg. Spritzgießmaschinen lassen sich durch weitere Daten charakterisieren, wie z.B. Zylinderwandtemperaturzonen.

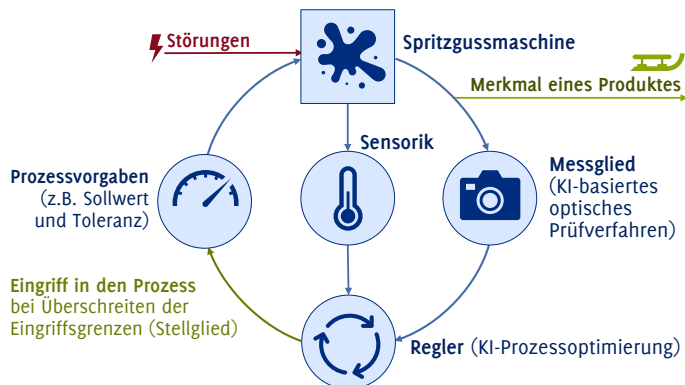


Abbildung 1:

Produkt-Prozess-
Qualitätsregelkreis.

Grafik: IMMS.

Massedrücke, Einspritzgeschwindigkeit, Einspritzvolumenstrom, Staudruck, Plastifizierdrehzahl, Spritzweg, Masserestpolster, Nachdruck, Nachdruckzeit, Restkühlzeit, Schließkraft oder Werkzeugwandtemperatur. Eine besondere Herausforderung bestand deshalb im Trennen signifikanter Einflüsse von Störgrößen aus den Daten der Spritzgießmaschinen und deren spezifischen Einflüssen auf die drei Zielkriterien Qualitätsmerkmale, Zykluszeit und den Energieeinsatz.

Produkt-Prozess-Qualitätsregelkreis

Der implementierte Produkt-Prozess-Qualitätsregelkreises kombiniert die Ergebnisse der aus Bilddaten gewonnenen Qualitätsinformationen und Prozessdaten und leitet daraus automatisiert Handlungsempfehlungen zur Parametereinstellung auf Basis der Optimierungsalgorithmen für den Spritzgießprozess ab. Die Einstellung der neuen Parameter muss zurzeit noch manuell an der Maschine vorgenommen werden, da an dieser der schreibende Zugriff über eine digitale Schnittstelle nicht möglich war.

Das IMMS hat für diesen Regelkreis den Regler in Form einer KI-basierten Prozessoptimierung entwickelt. Dieser erhält über ein Messglied Informationen zur Qualität eines Produktes, untersucht den Parameterraum, identifiziert dabei mögliche Lösungen zur Optimierung von verschiedenen Parametern wie Zykluszeit, Energieverbrauch oder Materialeinsatz und schlägt Einstellungen an der Maschine vor. Darüber hinaus hat das IMMS das Design und die Implementierung der Schnittstellen zu den Spritzgießmaschinen verantwortet sowie die Datenablage und -aufbereitung realisiert.

Für eine möglichst generische Lösung hat das IMMS die Schnittstellen von Spritzgießmaschinen im Austausch mit deren Herstellern analysiert, ein Konzept zur Datenerfassung entwickelt und dieses zu einer integrierten Systemarchitektur konsolidiert sowie die Maschinendatenerfassung, Datenverarbeitung und Qualitätsbewertung in einem einheitlichen Workflow kombiniert. Mit dem implementierten System lassen sich Maschinendaten kontinuierlich erfassen, Qualitätsinformationen aus der bildbasierten Inspektion integrieren sowie alle relevanten Daten zentral speichern und verarbeiten. Die modulare Architektur erlaubt es, unterschiedliche Datenquellen und Schnittstellen zu integrieren, ohne die zentrale Verarbeitungspipeline zu verändern.

Mit dem System können Maschinendaten und Qualitätsinformationen während des Betriebs nahezu in Echtzeit verarbeitet, ausgewertet und rückgemeldet werden. Das ist die Grundlage für Echtzeit-Monitoring und Parameterbewertung und wurde in Live-Setups beim Partner KHW demonstriert.

Darüber hinaus unterstützt die Architektur die nahtlose Integration zusätzlicher Datenquellen, wie OPC/UA-basierte Zeitreihendaten und bildbasierte Qualitätsmessungen, und stellt standardisierte Schnittstellen für nachgelagerte Analyse-Module bereit. Das gewährleistet, dass das entwickelte System in Zukunft auf geschlossene Regelkreise und datengetriebene Optimierung erweitert werden kann.

KI-basierter Regler mit Surrogate-Modellierung und evolutionärer Optimierung

Auf Basis der verfügbaren Daten hat das IMMS Optimierungsalgorithmen untersucht und **Surrogate-Modellierungsansätze** implementiert, um den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und der resultierenden Produktqualität zu approximieren. Bei solchen Ersatzmodellierungen werden teure oder schwer zu berechnende Modelle durch günstigere Annäherungen ersetzt, um Simulationen, Optimierungen oder Schlussfolgerungen zu beschleunigen oder zu vereinfachen. Das ist vor allem bei komplexen Räumen nützlich, hängt aber von Trainingsdaten, Surrogaten sowie Hyperparametern ab und erfordert somit ein tiefes Fachwissen, um Modellfehler zu

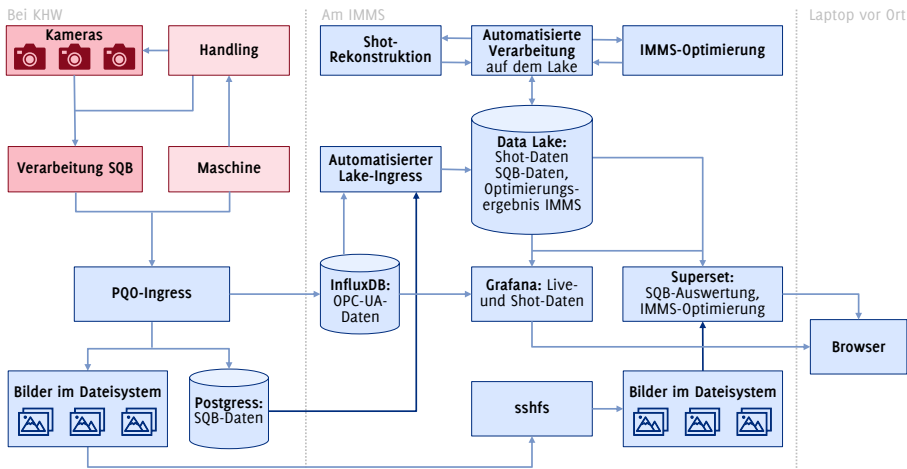


Abbildung 2: Workflow-Module für den beim Partner KHW realisierten Demonstrator zur KI-basierten Optimierung von Spritzgießprozessen; rot: Steinbeis Qualitätssicherung und Bildverarbeitung GmbH (SQB), blau: IMMS. Grafik: IMMS.

minimieren. Das IMMS hat Surrogate-Modelle ausgewählt, mit den Spritzgussdaten trainiert und damit eine effiziente KI-basierte Bewertung von Kandidaten für Parameterkonfigurationen ermöglicht, ohne zeitaufwändige Maschinenversuche durchführen zu müssen.

Aufbauend auf diesen Modellen hat das IMMS **evolutionäre Optimierungsstrategien** implementiert, insbesondere **genetische Algorithmen**, um verbesserte Parameterkonfigurationen im mehrdimensionalen Parameterraum des Spritzgießprozesses zu suchen. Bei diesen von der natürlichen Evolution inspirierten stochastischen Suchverfahren werden Lösungen über Mutation, Rekombination und Selektion u.a. über genetische Operatoren iterativ verbessert, bis ein Optimum gefunden wird. Das für komplexe Optimierung prädestinierte Vorgehen ermöglicht ohne exakte Modellierungen und über Black-Box-Suchen gute Lösungen für nicht-lineare, multi-modale, nicht-differenzierbare Probleme. Auch hier ist für die Parametrisierung viel Erfahrung notwendig, da die Verfahren oft rechenintensiv, in manchen Fällen nur aufwändig skalierbar und in ihrer Konvergenzgeschwindigkeit schwer vorhersagbar sind.

Der in ProQuaOpt implementierte Optimierungsprozess bewertet die generierten Lösungsvorschläge auf der Grundlage von Vorhersagen der Surrogate-Modelle und

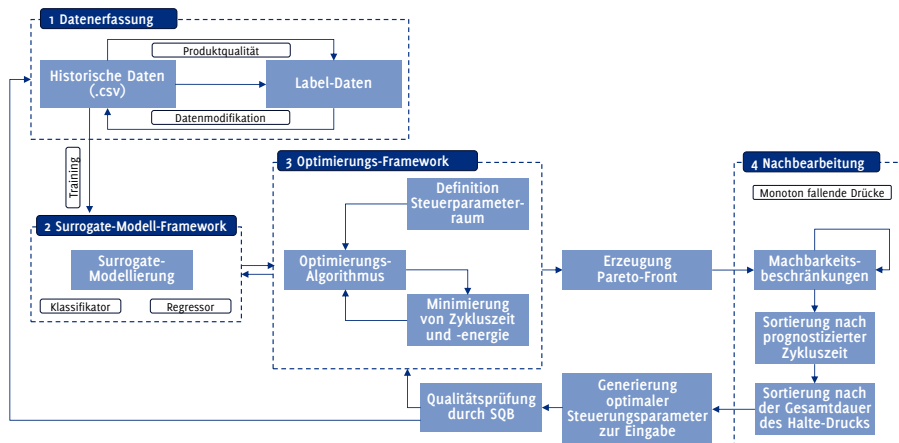


Abbildung 3: Das implementierte Prototypensystem ist als modulare Softwarearchitektur aus vier Hauptfunktionsmodulen aufgebaut: 1) Datenerfassung, 2) Surrogate-Modell-Framework, 3) Optimierungs-Framework, 4) Nachbearbeitung. Grafik: IMMS.

verfeinert die Parameterkonfigurationen iterativ innerhalb vordefinierter Grenzen, die für jeden steuerbaren Prozessparameter festgelegt wurden. Die gemessenen Zykluszeiten, der Energieverbrauch und die Fehlerquoten werden in die Surrogate-Modelle zurückgeführt, um eine Konvergenz hin zu optimalen Produktionseinstellungen zu erreichen.

Prototyp: Demonstration der Lösung bei laufender Produktion

Für den Demonstrator bei der Firma KHW hat das IMMS eine integrierte Systemarchitektur, die Maschinendatenerfassung, Datenverarbeitung und Qualitätsbewertung in einem einheitlichen Workflow kombiniert, siehe Abbildung 2. Die vom Partner Steinbeis Qualitätssicherung und Bildverarbeitung GmbH (SQB GmbH) realisierte und im Bild rot dargestellte optische Qualitätsprüfung lieferte das notwendige Feedback über die von der an Spritzgießmaschine ausgeworfenen Fertigteile an die Regelung des IMMS.

Für die beim Partner KHW vorhandenen Maschinen war es notwendig, aus den verfügbaren Zeitreihendaten diskrete Spritzgießzyklen zu rekonstruieren, da die Maschinen diese nicht selbst bereitstellten.

Die oben beschriebenen Lösungsansätze wurden in einem Prototypsystem mit einer in Abbildung 3 illustrierten modularen Softwarearchitektur aus vier Hauptfunktionsmodulen implementiert:

1. **Datenerfassung:** Dieses Modul erfasst Prozessparameter und Produktionsdaten von den Spritzgießmaschinen.
2. **Surrogate-Modell-Framework:** Maschinenlernmodelle approximieren die Beziehung zwischen Prozessparametern und der resultierenden Produktqualität. Sie ermöglichen eine schnelle Bewertung von Kandidaten-Parameterkonfigurationen ohne physische Experimente für jede Kombination und werden kontinuierlich aktualisiert, sobald neue Daten von den Maschinen und der Qualitätsprüfung verfügbar werden.
3. **Optimierungs-Framework:** Im Prototyp ist ein genetischer Algorithmus als primäre Optimierungsstrategie implementiert. Der Algorithmus erzeugt iterativ neue Parameterkonfigurationen, bewertet diese mithilfe der Surrogat-Modelle und identifiziert verbesserte Lösungen über mehrere Optimierungsgenerationen. Dieses Modul unterstützt Multi-Objective-Optimierung, um unterschiedliche Qualitäts- und Prozesskriterien zu balancieren.
4. **Nachbearbeitung:** Dieses Modul interpretiert die Optimierungsergebnisse und schlägt finale Maschineneinstellungen vor. Der Demonstrator bei KHW beinhaltet ein vollständig automatisiertes, wissensbasiertes Nachbearbeitungssystem, das Vorhersagen der Surrogatmodelle, Optimierungsergebnisse und Qualitätsfeedback integriert, um die optimalen Maschineneinstellungen automatisch zu bestimmen.

Ausblick

Der Prototyp zeigt, dass eine Prozessoptimierung auch mit wenig Daten mittels maschineller Lernmethoden möglich ist. Die erreichten Verbesserungen der Produktivität von 5% wurden konkret für ein bestimmtes Produkt mit den dafür notwendigen Werkzeugen an einer dafür geeigneten Maschine nachgewiesen. Generell ist die Optimierung von Zykluszeiten vom verwendeten Werkzeug und verschiedener anderer Parameter abhängig und kann jeweils nur für das konkrete Produkt angegeben werden.

Das IMMS strebt an, das Verfahren weiter auszubauen und für verschiedene Werkzeuge und Prozesse zu generalisieren. Darüber hinaus wird das Potenzial gesehen, das Verfahren auf ähnliche Prozessoptimierungen für verschiedene Prozesse auch außerhalb des Spritzgießens zu übertragen, beispielsweise auf solche, bei denen Parametersätze auch über verschiedene Maschinen hinweg den Produktentstehungsprozess beeinflussen und deren richtige Kombination für gute Produktqualität und einen energieeffizienten Ablauf sorgen.

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

Gefördert durch:



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben **Pro-QuaOpt** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen **01S22019E** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Literatur:

Real-Time Optimal Parameter Recommendation for Injection Molding Machines Using AI with Limited Dataset, Bipasha ROY, Silvia, KRUG, TINO HUTSCHENREUTHER. *AI* 2026, 7, no. 2: 49. <https://doi.org/10.3390/ai7020049>

FORSCHUNGSFELD

MAGNETISCHE 6D-DIREKTANTRIEBE MIT NANOMETER-PRÄZISION

Am IMMS entwickeltes Nanopositioniersystem mit 6 geregelten Freiheitsgraden und $\varnothing 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ Verfahrweg, das im Projekt MC_NPS mit einem adaptierten Signal-Prozessor-basierten Motion-Controller von SIOS für den Industrieinsatz weiterentwickelt werden wird. Foto: IMMS.

Das Verbundprojekt „Motion Controller für die Nano-Positionier-Plattform NPS6D100“ (MC_NPS) wird über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund Dynamik unter der Verbundvorhabensnummer 1007528 gefördert und über die Europäische Union kofinanziert, das Teilvorhaben des IMMS „Portierung und Anpassung der Regelungssoftware des NPS6D100 an die NMM-DSP-Steuerung von SIOS“ unter der Nummer 2025 VDY 0050.



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Freistaat
Thüringen



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 Zentimeter-bereich, 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 Bewegungs-bereiche. Mit unseren hochdynamischen Mehrkoordinaten-Direktantriebssystemen können Objekte in Arbeitsbereichen von mehreren hundert Millimetern in kürzester Zeit mit Nanometer-Präzision positioniert werden. Unsere Lösungen eignen sich für den Einsatz im Vakuum, in Reinräumen und an Orten mit besonderen Anforderungen hinsichtlich thermischer Isolation und Entkopplung von Vibrationen.

www.imms.de/
nm drives

Highlights 2025 im Forschungsfeld

Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

Neues Projekt MC_NPS* verbindet Know-how aus Forschung und Industrie zur nanometergenauen Positionierung für High-Tech-Anwendungen

Am 05.11.2025 haben die SIOS Meßtechnik GmbH und das IMMS im Auftakttreffen am IMMS Ilmenau die Arbeiten für das einjährige Verbundvorhaben „Motion Controller für die Nano-Positionier-Plattform NPS6D100“ (MC_NPS) aufgenommen. Im Projekt wird eine spezielle Steuerung von SIOS auf ein am IMMS entwickeltes nanometerge-naues Positioniersystem mit großem Bewegungsbereich adaptiert. Ziel ist es, durch diese Kombination ein marktreifes High-Tech-Produkt für neue Anwendungen zu erschließen. Diese reichen von der Halbleiter- und Optikindustrie über das Eich- und Kalibrierwesen zu Medizin, Luft- und Raumfahrttechnik bis hin zu den Zukunfts-märkten Photonik und Quantentechnologie.

www.imms.de/
mcnps



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Freistaat
Thüringen



Vertreter der Projektpartner SIOS und IMMS des im November 2025 gestarteten Projekts MC_NPS zum Auftakttreffen am 05.11.2025 in Ilmenau. Foto: Rolf Peukert, IMMS.

Kleinste Strukturen auf weitem Feld

Viele Industriebereiche brauchen immer präzisere Maschinen, mit denen kleinste Strukturen und Objekte hochgenau vermessen und bearbeitet werden können, meist um technische Produkte immer weiter zu miniaturisieren. Viele solcher Objekte sind einige Millimeter- bis Zentimeter groß. Oberflächenmerkmale und Funktionselemente messen oft aber nur wenige Mikro- oder Nanometer. In der Produktion müssen sie bis auf wenige Nanometer genau positioniert werden, das heißt auf etwa ein Millionstel ihrer Größe. Doch nicht nur die Präzision der Antriebe soll immer besser werden, auch deren Arbeitsbereich ermöglicht mehr Anwendungen und nicht zuletzt mehr Wirtschaftlichkeit, je größer er bei gleicher Positioniergenauigkeit werden kann.

Bislang Einzellösungen zur Forschung und für die Industrie

Genau diese Anforderungen adressiert das IMMS mit seiner Forschung und definiert damit den aktuellen Stand der Technik weltweit mit: Es hat das Nanopositionierungssystem NPS6D100 entwickelt, das bis zu zwei Kilogramm schwere Objekte in einem Bewegungsbereich von 100 Millimetern Durchmesser und 10 Millimetern Höhe mit einer Auflösung von unter 2 Nanometern und mit 6 geregelten Freiheitsgraden positioniert. Übersetzt in alltäglichere Dimensionen wäre das vergleichbar mit einem Hubschrauber, der im Umkreis von 100 Kilometern seine Ladung bis auf unter 2 Millimeter genau absetzen kann.

Um dieses System für flexibel betreibbare Industrieanwendungen und somit für eine Vermarktung zu erschließen, ist noch eine Anbindung an die dort übliche Hardware und Software zur Steuerung notwendig. Die Steuerungs-Hardware hat dabei die aufwendigen Regelungsalgorithmen in Echtzeit abzuarbeiten. Die Software muss eine intuitive Bedienung und eine flexible Einbindung von unterschiedlichen Anwendungen erlauben. All das lässt sich mit kommerziell verfügbaren Standard-Achscontrollern nicht erreichen.

Für solche Anforderungen hat SIOS bereits eine industriell etablierte und ausgereifte Hardware und Software zur Steuerung seiner Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1. Mit dem NMM-1-System ist SIOS weltweit Marktführer. Für den Antrieb des IMMS ist diese Steuerung allerdings nicht direkt nutzbar, da sie für eine andere Antriebsarchitektur ausgelegt ist.

Industrietaugliches modulares Gesamtsystem für breite Anwendbarkeit

Im Projekt MC_NPS werden SIOS und IMMS an einer markttauglichen Lösung arbeiten, die den neuerforschten Antrieb des IMMS mit der industrieerprobten Steuerung von SIOS vereint. Das anvisierte Ergebnis ist ein System, das nicht nur einen deutlich größeren Arbeitsbereich als das aktuell führende Produkt von SIOS abdeckt, sondern auch modular konfigurierbar ist und so mit verschiedenen Antastsystemen wie Fokussensor, Atomkraftmikroskop oder Mikrotaster in unterschiedlichen Anwendungen arbeiten kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird SIOS das Projekt koordinieren und den auf einem speziellen digitalen Signal-Prozessor basierenden Motion-Controller seiner NMM-1-Maschine für den IMMS-Antrieb NPS6D100 adaptieren und erweitern. Seitens des IMMS werden die entwickelten Steuer- und Regelalgorithmen seines NPS6D100-Antriebs, die die Positionierung auf Nanometer-Level ermöglichen, passend zur SIOS-Steuerung neu strukturiert und schließlich auf diese portiert.

Gelingt diese Verschmelzung aus Ultrapräzisions-Positioniersystem, effizienter und kostengünstiger Controller-Hardware sowie State-of-the-Art-Messsystemen, so öffnet das den Weg in eine Vermarktung des NPS6D100 als ein weiteres Nanopositioniersystem „Made in Thüringen“, das weltweit Maßstäbe setzt.



Kick-off-Treffen des Projekts ERA-AMR am 14.01.2025. Das IMMS hat im Projekt ein Modellierungswerkzeug zur Optimierung von Antriebssystemen für autonome mobile Roboter entwickelt. Foto: IMMS.

Projektabschluss ERA-AMR* – optimierte Antriebssysteme für autonome mobile Roboter

Ziel des einjährigen, Ende 2026 abgeschlossenen Projekts ERA-AMR war es, für vielfältige Aufgabenbereiche neue Antriebslösungen für autonome Roboter zu erschließen und so innovative produktionsnahe Anwendungen zu ermöglichen. Zentral war dabei die Entwicklung eines softwarebasierten Modellierungswerkzeugs.

www.imms.de/eraamr

Autonome mobile Roboter als Helfer

Robotische Systeme können vor allem im Industrie- und Dienstleistungssektor Arbeitskräfte von monotonen und sich wiederholenden Tätigkeiten entlasten, ihnen somit die notwendige Zeit für anspruchsvollere und abwechslungsreichere Aufgaben verschaffen und insgesamt die Effektivität und Produktivität steigern.

Kommerziell verfügbare autonome Roboter am Markt sind in der Lage, mit einfachen Antrieben vorwärts, rückwärts und um Kurven zu fahren und sich auf der Stelle zu drehen. So tragen sie bereits in Produktions- und Lagerbereichen zu einem effizienten Materialfluss und zu einer reibungslosen Warenbewirtschaftung bei. Sie können nicht nur Transporte übernehmen, z.B. von Kleinladungsträgern für dynamisch anpassbare Produktionslinien, sondern auch Daten erfassen, z.B. zur Qualitätssicherung oder für autonome Inventuren.

Für etliche Anwendungen erreichen Systeme mit den einfachen Antrieben schnell ihre Grenzen, wie bei hohen Lasten oder bestimmten Bewegungen. Seitwärtsfahrten oder ein Herausmanövrieren aus Engstellen sind zum Beispiel nicht möglich.

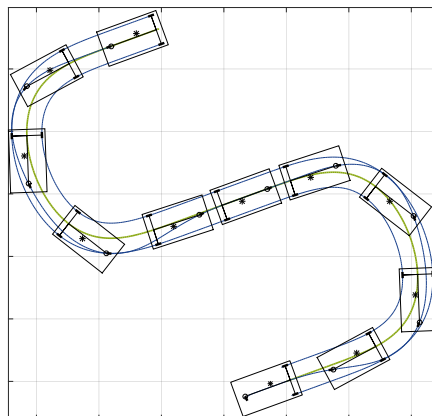
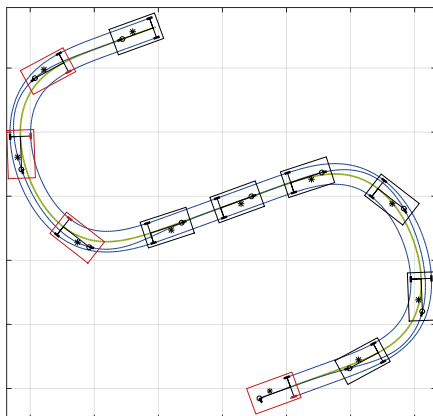
Komplexere Lösungen für flexiblere Bewegungen sind anspruchsvoller in der Entwicklung und damit deutlich teurer. Grund ist das Antriebssystem, das für einen robusten und leistungsstarken autonomen Roboter nicht nur konstruktiv angeordnet, technisch dimensioniert und in das Gesamtsystem zusammen mit den Sensoren und der Steuerungstechnik integriert werden muss. Je nach Anwendung gibt es zudem andere Zielvorgaben und individuelle Umgebungsbedingungen, die bei der Entwicklung einzubeziehen sind.

Neue Anwendungen erfordern optimierte Antriebskonzepte und softwarebasierte Modellierungswerkzeuge

Für die komplexen Anforderungen sind nicht nur fortschrittliche Antriebskonzepte notwendig, die autonome mobile Roboter auf der Basis von definierten Kennzahlen leistungsfähiger und wirtschaftlicher machen. Für diese technologischen Verbesserungen hat das IMMS vor allem an einem softwarebasierten Modellierungswerkzeug gearbeitet. Dieses Tool soll künftig die Entwicklung besagter Systeme bereits in der Konzeptphase unterstützen, indem es Kennzahlen für definierte Einsatz- und Anforderungsprofile berechnet und die Auswahl von geeigneten Lösungen ermöglicht.

Genutzt wurden dafür mathematische Ansätze, Methoden und Algorithmen zu Kinematik und Dynamik, die nicht nur Antriebssysteme optimieren, sondern auch in die Entwicklung von autonomen Steuerungssystemen einfließen. Diese Steuerungssysteme können auf dieser Basis die zuvor gesetzten Ziele wie maximale Geschwindigkeit, minimaler Energieverbrauch und hohe Robustheit beachten und dafür die Steuerungsaufgaben optimal umsetzen.

Mit dem neuen Modellierungswerkzeug des IMMS kann der Partner MetraLabs aus allen definierten Anforderungen ein optimales Antriebskonzept entwickeln und damit auch einen Prototyp für einen neuen autonomen Roboter realisieren.



Gegenüberstellung des Ausgangs- und des optimierten Designs. Im Ausgangsdesign (links) sind entlang der Bahn kritische Zustände rot markiert. Das optimierte Design (rechts) ermöglicht die problemlose Verfolgung der Sollbahn. Grafiken: IMMS.

Ergebnis ist ein Ansatz, mit dem eine signifikante Leistungssteigerung gegenüber konventionellen Antrieben möglich wird, um neue Maßstäbe in der mobilen Robotik und Automatisierung setzen zu können.

Modellierungswerkzeug des IMMS für robuste und stabile Antriebe autonomer mobiler Roboter

Die am IMMS entwickelte Methodik umfasst Lösungen zur Modellierung, Simulation und Bewertung omnidirektionaler Fahrsysteme für mobile Robotik und wurde softwareseitig umgesetzt. Hierzu wurden zunächst verschiedene Antriebskonzepte systematisch analysiert und hinsichtlich ihrer kinematischen und dynamischen Eigenschaften, ihrer technischen Realisierbarkeit sowie ihres Potenzials zur Erweiterung des Bewegungsraums bewertet.

www.imms.de/fem

Für ausgewählte Konzepte wurden mathematische Kinematik- und Dynamikmodelle entwickelt und in einer flexiblen Python-basierten Softwareumgebung implementiert. Das entstandene Modellierungswerkzeug ermöglicht die Parametrierung von Geometrie- und Systemparametern sowie die Berechnung von Zustandsgrößen und wirkenden Kräften unter vorgegebenen fahrdynamischen Szenarien. Dadurch können unter anderem Vertikal-, Antriebs- und Querkräfte bestimmt und fahrdynamische Effekte wie Kippstabilität sowie Schlupf- und Rutschbedingungen bewertet werden.

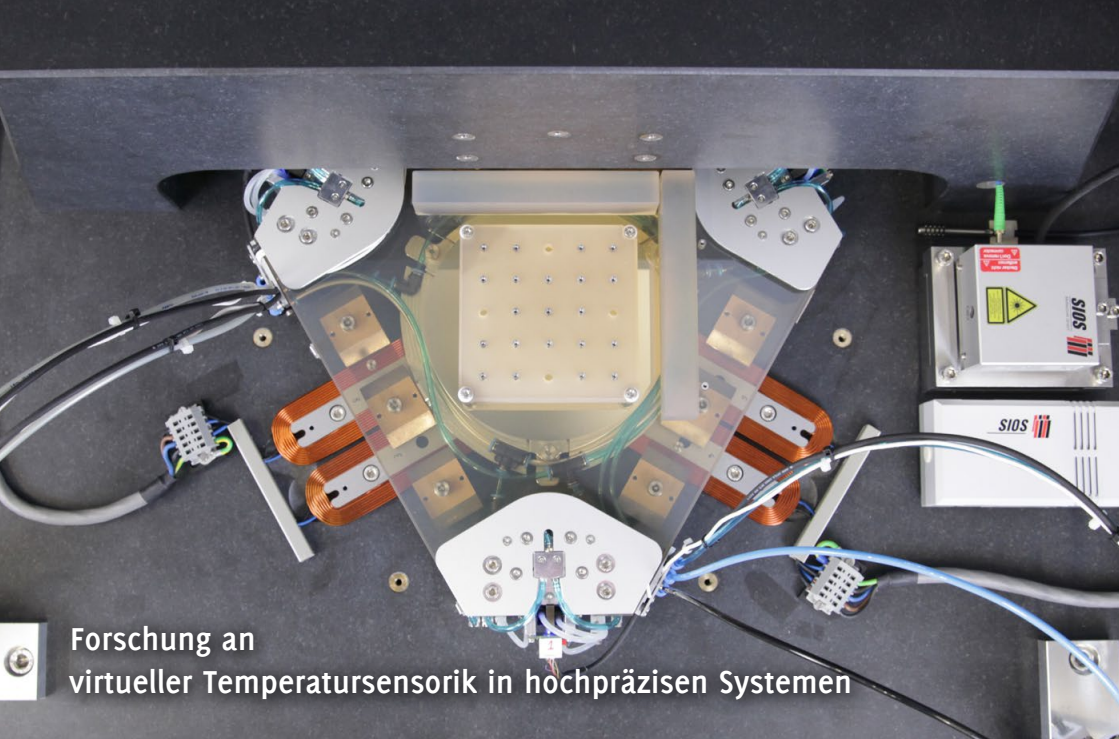
Ergänzend wurden Verfahren zur optimierenden Bahnplanung sowie zur Regelung entwickelt. Die Bahnplanung berücksichtigt sowohl statische als auch dynamische Hindernisse und erzeugt kollisionsfreie Trajektorien unter Einhaltung fahrdynamischer Randbedingungen wie Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen. Für die Trajektorienverfolgung wurde ein modellprädiktiver Regler implementiert, der eine robuste und stabile Regelung des Gesamtsystems ermöglicht. Die zugehörigen Algorithmen wurden zudem in eine Softwarelösung auf Basis der Optimierungsbibliothek CasADi integriert.

Modellierungstool mit Differentialantrieb von MetraLabs validiert

Die entwickelten Methoden und Softwarebausteine wurden umfassend simulativ validiert und in Teilen auf einer Demonstratorplattform des Projektpartners MetraLabs mit Differentialantrieb erfolgreich experimentell erprobt. Dabei konnte die grundsätzliche Übereinstimmung zwischen Modell und realem System nachgewiesen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung und Untersuchung omnidirektionaler Antriebskonzepte, die insbesondere Seiten- und Diagonalbewegungen ermöglichen. Diese erweiterten Bewegungsmöglichkeiten konnten modellseitig beschrieben und in Simulationen hinsichtlich ihrer fahrdynamischen Auswirkungen analysiert und validiert werden.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden wissenschaftlich aufbereitet und zur internationalen Fachkonferenz International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) 2026 eingereicht und angenommen. Die entwickelten Modelle, Algorithmen und Softwarekomponenten stehen als wiederverwendbare Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verfügung.



Forschung an virtueller Temperatursensorik in hochpräzisen Systemen

Mithilfe virtueller Sensorik und KI sollen Störeinflüsse auf komplexe mechatronische Systeme wie auf einen solchen Hochpräzisionsantrieb ortsaufgelöst erfasst und kompensiert werden können. Daran arbeitet die Forschungsgruppe VirtuSen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Hochpräzise Nanopositioniersysteme (NPS) sind in der modernen Fertigung, Messtechnik und bei Halbleiteranwendungen, wo eine Positioniergenauigkeit im Subnanometerbereich erforderlich ist, unverzichtbar [1]. Eine der größten Herausforderungen bei solchen Systemen sind thermische Störungen, die zu strukturellen Verformungen und Positionierfehlern führen [2]. Obwohl Temperaturmessungen für die Kompensation entscheidend sind, ist die Platzierung von Sensoren aufgrund von Platzmangel, funktionalen Einschränkungen und der Komplexität des Systems begrenzt. Infolgedessen ist es nicht möglich, die Temperatur an allen relevanten Stellen innerhalb des Systems direkt zu messen.

www.imms.de/nmdrives

Das Projekt VirtuSen zielt darauf ab, diese Einschränkung zu überwinden, indem es KI-basierte virtuelle Sensoren entwickelt, die Temperaturfelder an unzugänglichen Stellen mithilfe einer Kombination aus wenigen Messungen, physikalischer Modellierung und datengesteuerten Methoden abschätzen. Die zentrale Innovation besteht

www.imms.de/virtusen

Jahresbericht
© IMMS 2025

Umwelteinflüsse



Lärm und Vibration



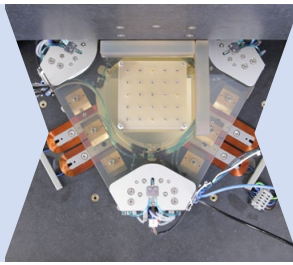
Feuchtigkeit



Mechanischer Stress



Temperatur



Verbesserung der Präzision

Modellbasierte Charakterisierung

Physisch informierte Modelle

KI-Modell-Generalisierung

Materialeinfluss

117

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

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

Abbildung 1: Einflussgrößen und Lösungsansätze für hochpräzise Positioniersysteme. Grafik: IMMS.

in der Kombination von physikalischer Modellierung mit künstlicher Intelligenz, wodurch auch bei begrenzten Sensordaten genaue und physikalisch konsistente Vorhersagen ermöglicht werden. Der Gesamtansatz folgt einer schrittweisen Strategie: Ausgehend von kontrollierten Experimenten an Materialproben geht es weiter zu vereinfachten Nanopositionierungssystemen und schließlich zu realen Systemen mit eingeschränktem Sensorzugang. Diese Methodik stellt sicher, dass die entwickelten Modelle sowohl genau als auch auf praktische Anwendungen übertragbar sind.

Untersuchung und Modellierung des thermischen Verhaltens

Um eine zuverlässige Grundlage für die Temperaturvorhersage zu schaffen, wurden sowohl experimentelle Untersuchungen als auch physikalische Modellierungen durchgeführt. Die Experimente wurden an Proben aus Hartgestein und Mineralguss durchgeführt, die üblicherweise in Konstruktionen der Feinmechanik verwendet werden. Die Proben wurden speziell so konzipiert, dass eine detaillierte Untersuchung der Temperaturgradienten möglich war, indem Sensoren in unterschiedlichen Tiefen und Positionen eingebettet wurden. Die experimentellen Ergebnisse lieferten Erkenntnisse über die Wärmeausbreitung innerhalb des Materials einschließlich der Unterschiede zwischen Oberflächen- und Innentemperaturen sowie des Einflusses von Umgebungsbedingungen wie Konvektion. Gleichzeitig wurden Einschränkungen hinsichtlich Messunsicherheit, Wiederholbarkeit und Empfindlichkeit gegenüber Randbedingungen festgestellt.

Parallel dazu wurden mithilfe numerischer Simulationswerkzeuge transiente 3D-Modelle zur Beschreibung des Wärmeverhaltens entwickelt, um die realen Versuchsbedingungen nachzubilden. Durch die Anwendung dieser Modelle wird die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung berechnet, womit eine systematische Analyse von Einflussfaktoren wie Wärmeeintrag und Randbedingungen ermöglicht wird.

Jahresbericht

© IMMS 2025

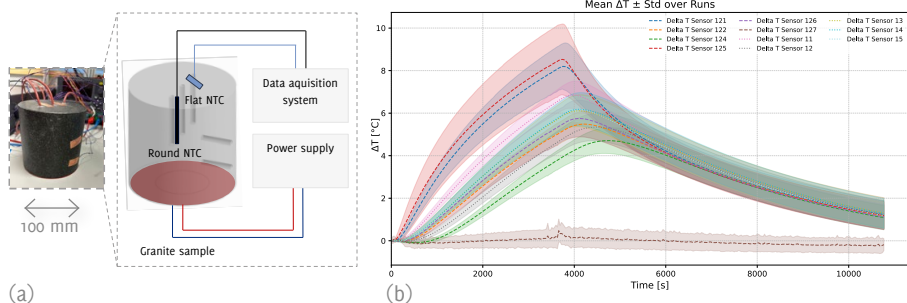


Abbildung 2: (a) Erster Versuchsaufbau mit einem Granitzylinder (100 mm). (b) Ein Beispiel für die gemittelte Temperaturverteilung in einer Granitzylinderprobe. Quelle: IMMS.

Zwar wurde eine allgemeine Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erreicht, doch bestehen weiterhin Abweichungen aufgrund von Unsicherheiten bei den Materialeigenschaften und Randbedingungen. Die Verringerung dieser Diskrepanzen und die Sicherstellung der Übertragbarkeit auf komplexere Geometrien sind laufende Aufgaben.

Entwicklung von KI-basierten virtuellen Sensoren

Auf der Grundlage der experimentellen und simulierten Daten wurden mehrere KI-basierte Ansätze untersucht, um die Machbarkeit der virtuellen Temperaturerfassung zu bewerten. Klassische Modelle des maschinellen Lernens, Deep-Learning-Architekturen und physikalisch informierte neuronale Netze (PINNs) wurden implementiert und verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Temperaturschätzung anhand weniger Sensordaten grundsätzlich möglich ist. Insbesondere sequenzielle Modelle zeigen die Fähigkeit, zeitliches Verhalten zu erfassen, während physikalisch

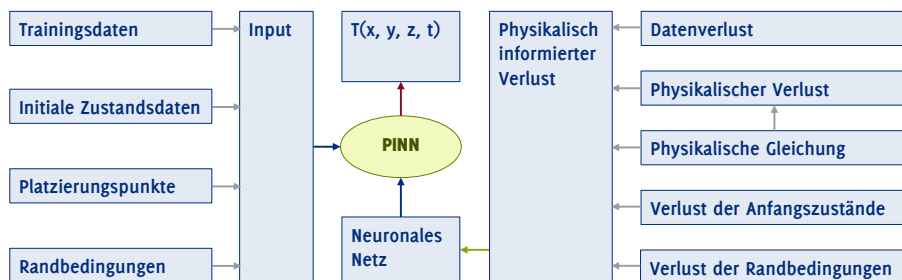


Abbildung 3: Schematischer Überblick über den Trainingsrahmen eines PINN. Grafik: IMMS.

informierte Ansätze einen Rahmen bieten, um physikalische Einschränkungen in den Lernprozess einzubeziehen. Es bleiben jedoch erhebliche Herausforderungen bestehen. Die Modelle zeigen eine Empfindlichkeit gegenüber der Sensorkonfiguration, eine begrenzte Robustheit bei sich ändernden Bedingungen sowie Schwierigkeiten bei der genauen Erfassung lokaler thermischer Effekte oder unbekannter Wärmequellen. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass eine weitere methodische Entwicklung und die Integration mit verbesserten Daten- und Modellierungsansätzen notwendig sind, um eine zuverlässige Leistung zu erzielen.

Verallgemeinerung und Übertragung von KI-Methoden

Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Übertragung der entwickelten Methoden auf reale Nanopositionierungssysteme, bei denen nur eine begrenzte Anzahl von Oberflächensensoren zur Verfügung steht und an den gewünschten Stellen keine direkten Referenzmessungen vorliegen. Erste Untersuchungen zeigen, dass die Modelle zwar unter kontrollierten Versuchsbedingungen gut funktionieren, ihre Übertragung auf komplexere Systeme jedoch nach wie vor eine große Herausforderung darstellt. Insbesondere strukturierte Vorhersagefehler, Unsicherheiten in den Modellausgaben und die Abhängigkeit von den Trainingsdaten schränken die direkte Anwendbarkeit aktueller Ansätze ein. Darüber hinaus ist die Integration von physikalischen Modellen und KI-Methoden auf Systemebene noch nicht vollständig validiert. Um diese Herausforderungen anzugehen, werden im nächsten Schritt die entwickelten Methoden auf ein vereinfachtes Nanopositionierungssystem angewendet, bei dem eine teilweise interne Sensorik noch möglich ist. Dieser Zwischenschritt ermöglicht eine systematische Bewertung der Modellübertragbarkeit und liefert wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung.

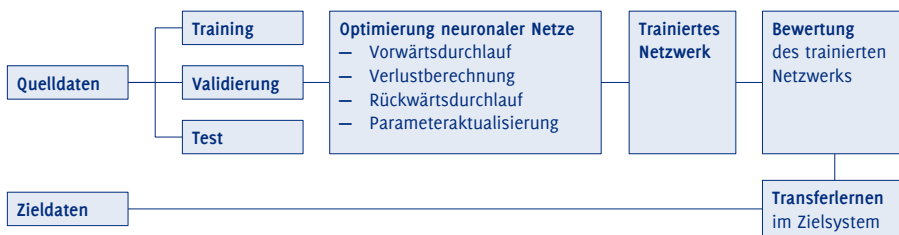


Abbildung 4: Trainings- und Transferablauf der neuronalen Netze. Grafik: IMMS.

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

› nm-präzise 6D-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Die bisher durchgeführten Arbeiten stellen einen ersten Schritt zur Realisierung einer virtuellen Temperaturerfassung in hochpräzisen Systemen dar. Es sind jedoch noch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um die Genauigkeit, Robustheit und Generalisierungsfähigkeit der Modelle zu verbessern. In der nächsten Phase wird der Schwerpunkt auf der Verfeinerung der Versuchsaufbauten, der Verbesserung der physikalischen Modelle und der Weiterentwicklung KI-basierter Methoden liegen, um wenige Daten und Unsicherheiten besser zu bewältigen. Nach der Validierung an vereinfachten Systemen wird der Ansatz auf ein reales Nanopositionierungssystem mit begrenzter Sensorausstattung ausgeweitet.

Langfristiges Ziel ist es, vereinfachte physikalische Modelle und KI-basierte virtuelle Sensoren zu kombinieren, um das gesamte Temperaturfeld vorherzusagen und unbekannte thermische Störungen innerhalb des Systems zu identifizieren. Die entwickelte Methodik bietet erhebliches Anwendungspotenzial für eine Vielzahl von Systemen der Feinmechanik, insbesondere für solche, die am IMMS entwickelt werden und bei denen eine direkte Messung der internen Zustände nicht möglich ist. Durch die Kombination von physikalischem Verständnis mit künstlicher Intelligenz trägt das Projekt zur Entwicklung intelligenter, selbstüberwachender Systeme bei, die unter wechselnden Betriebsbedingungen eine hohe Leistung aufrechterhalten können. Dies würde effektivere thermische Kompensationsstrategien ermöglichen und zur Aufrechterhaltung einer hohen Positioniergenauigkeit beitragen. Über Nanopositioniersysteme hinaus haben die entwickelten Methoden potenzielle Anwendungsmöglichkeiten in einer Vielzahl von Bereichen der Feinmechanik, darunter Werkzeugmaschinen, Messsysteme und andere mechatronische Systeme, bei denen interne Zustände nicht direkt gemessen werden können.

Kontakt: Dr.-Ing. Parastoo Salimitari, parastoo.salimitari@imms.de

- [1] Y. LI et al., "Design, modeling and control of high-bandwidth nano-positioning stages for ultra-precise measurement and manufacturing: a survey," *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 6, no. 6, p. 062007, Sep. 2024, doi: 10.1088/2631-7990/AD6ECC.
- [2] J. WANG, C. ZHU, M. FENG, and W. REN, "Thermal error modeling and compensation of long-travel nanopositioning stage," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, no. 1-4, pp. 443-450, Mar. 2013, doi: 10.1007/S00170-012-4183-3/METRICS.
- [3] P. SALIMITARI, S. HESSE, M. KATZSCHMANN, L. HERZOG, "Experimental characterization of thermal disturbances in a 6DOF nanopositioning system under varying operational conditions", *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th- 20th November 2025*
- [4] I. NAUJOKAT, L. HERZOG, S. HESSE, P. SALIMITARI, "Development and validation of a simplified coil model for CFD simulation of a nano-positioning planar drive system", *Precision & Performance Conference 2025, Cranfield University, UK, 17th-20th November 2025*
- [5] I. NAUJOKAT, L. HERZOG, S. HESSE, P. SALIMITARI, "Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling", *Appl. Sci.* 2026, 16, 2748

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung



Spule und Spulenbaugruppe eines Nanopositioniersystems, deren thermisches Verhalten in physikalisch reduzierten Modellen simuliert wurde. Perspektivisch ist es so möglich, die Systeme durch Vorhersage und Kompensation von Störeinflüssen zu verbessern. Foto: IMMS.

Reduzierte Modellierung zur effizienten Simulation thermischer Effekte

Nanopositioniersysteme (NPS) werden in verschiedenen Branchen, wie der Nano- und Mikrotechnologie, eingesetzt, um Objekte zu positionieren und zu manipulieren. Da der Trend zu immer kleineren und komplexeren Strukturen geht, steigen die Anforderungen bezüglich der Dynamik und Positioniergenauigkeit von Nanopositioniersystemen stetig. In diesen Genauigkeitsbereichen reichen schon geringe Störeinflüsse wie thermisch bedingte Deformationen aus, um die Positionierungsgenauigkeit negativ zu beeinflussen. Daher ist es notwendig, die Performance von Nanopositioniersystemen über Modellierungen vorherzusagen, um auftretende Störeinflüsse perspektivisch kompensieren zu können. Da es sich bei diesen Modellierungen um sehr rechen- und zeitintensive Simulationen handelt, wird daran geforscht, wie auch mit reduzierten Modellen eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse erzielt werden kann. Im Fokus der Forschungsgruppe VirtuSen steht die Vorhersage von Störeinflüssen wie zum Beispiel durch Wärmequellen hervorgerufene Temperaturänderungen, die zu Spannungen und Verformungen führen und somit eine genaue Positionierung beeinträchtigen.

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

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

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2025

Dem IMMS gelang es in der Forschungsgruppe VirtuSen, das thermische Verhalten einer Spulenbaugruppe in einem physikalisch reduzierten Modell für numerische Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics; CFD) in der Simulationssoftware Ansys Fluent wiederzugeben. Durch die Reduzierung des Modells ist es möglich, effizient verschiedene Arbeitspunkte zu betrachten. Darauf basierend kann die Kühlung der Spulen optimiert und der thermische Einfluss der Spulenbaugruppe auf die anderen Bestandteile des Nanopositioniersystems untersucht werden. Perspektivisch sollen zudem Deformationen vorhergesagt und kompensiert werden, bevor sie die Positionierung negativ beeinflussen können.

Spulenbaugruppen eines nanometergenauen Hochpräzisionsantriebs

Die Spulenbaugruppe ist dreimal um je 120° gedreht im planaren Antrieb des Positioniersystems **NPS6D200** (Abbildung 1 (a): A, B, C) verbaut. Dieses am IMMS entwickelte Nanopositioniersystem wurde in verschiedenen früheren Forschungsprojekten für einen planaren Arbeitsbereich von $\varnothing 200$ mm realisiert. Neu am NPS6D200 war die Erweiterung eines integrierten planaren Direktantriebs um eine vertikale Aktuierung mit 25 mm Verfahrweg. Das Zusammenspiel aus dem planaren und vertikalen Antrieb ermöglichte eine Regelung in sechs Freiheitsgraden (6D). Die elektrischen Spulen des planaren Antriebs erwärmen sich durch Ohm'sche Verluste. Die entstehenden Temperaturunterschiede führen zur Erwärmung der umliegenden Strukturen durch direkten oder indirekten Kontakt über verschiedene Wärmeübertragungsmechanismen. Unter anderem die Granit-Basis des Systems ist diesen Temperaturgradienten ausgesetzt, was schließlich zu Spannungen und Deformationen führt.

Zum NPS6D200-
Fachartikel auf
www.imms.de

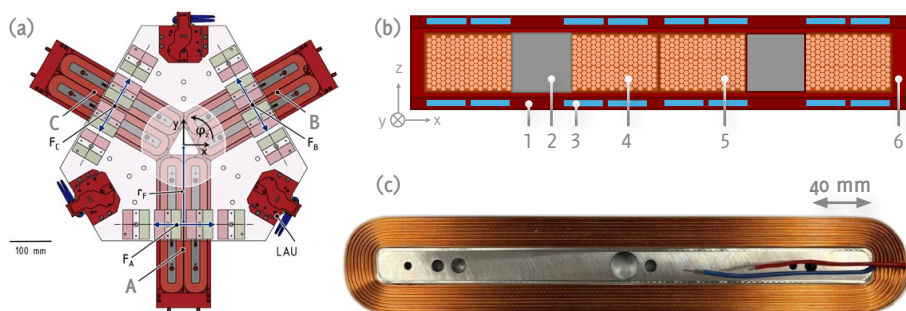


Abbildung 1:

- (a) Schematische Darstellung des planaren Antriebssystems;
 (b) Schematische Darstellung einer Spulenbaugruppe im Querschnitt: 1) Kühlkörpersandwiches, 2) Spulenkern, 3) Kühlkanäle, 4/5) gewickelter Kupferdraht, 6) Spulenrahmen;
 (c) Foto einer Spule mit Spulenkern und elektrischen Anschlüssen. Grafik/Foto: IMMS.

Ziel der Arbeiten am IMMS war es, über die reduzierte Simulation das thermische Verhalten der Spulen und Spulenbaugruppen unter verschiedenen Belastungen vorhersagen zu können, um die Kühlung der Spulen zu optimieren, deren thermischen Einfluss auf das gesamte Positioniersystem zu bestimmen und perspektivisch die Positioniergenauigkeit des gesamten Nanopositioniersystems zu verbessern, indem auftretende Deformationen kompensiert werden können.

Die Spulenbaugruppen, schematisch dargestellt in Abbildung 1 (b), bestehen aus zwei Spulen aus gewickeltem Kupferdraht (4,5) und Spulenkernen aus Aluminium (2), den Spulenrahmen aus Aluminium (6) und den sogenannten Kühlkörpersandwiches (1), welche die Temperierung der Spulen durch eingebettete Kühlkanäle (3) ermöglichen.

Die thermische Simulation der gesamten Spulenbaugruppe wurde dabei in mehrere Teilsysteme aufgeteilt: zunächst erfolgte eine Untersuchung der Spule und eine geometrische Reduktion des Spulenmodells, dann die gesonderte und aufgrund der Kühlflüssigkeit sehr rechenintensive Simulation der Kühlkörpersandwiches und final die Simulation der Spulenbaugruppe. Alle Simulationsergebnisse wurden mittels äquivalenter Experimente validiert.

Untersuchung und physikalisch reduzierte Simulation der Spulen

Die **Untersuchung der Spulen** erfolgte zunächst mikroskopisch, um deren Zusammensetzung zu bestimmen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, bestehen die Spulenwicklungen neben den Kupferdrähten (1) zudem aus verschiedenen Lacken (2), einem Füllmaterial (Epoxid) (6), einer Polyamid-Folie (3), um die Wicklungen vom Spulenkern (5) zu isolieren, und Lufteinschlüssen (4).

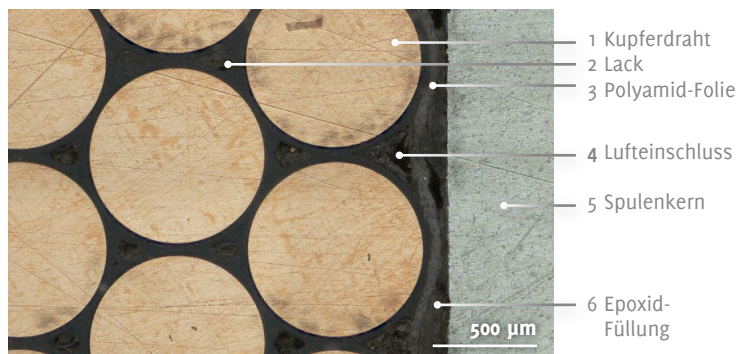


Abbildung 2:

Mikroskop-Aufnahme einer Spule im Querschnitt.

Foto: IMMS.

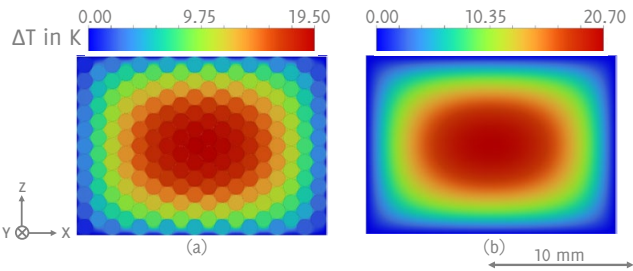


Abbildung 3:

Vergleich der entstehenden Temperaturgradienten zwischen einer detaillierten Simulation mit allen Drähten (a) und einer reduzierten Simulation mit richtungsabhängiger Wärmeleitfähigkeit (b). Grafik: IMMS.

Da die Simulation aller Geometrie-Details einen hohen Berechnungsaufwand bedingt, wurde ein geometrisch **reduziertes Modell** entworfen. Hierfür wurden zunächst alle Füllmaterialien zu einem Werkstoff mit gemittelten Materialeigenschaften zusammengefasst. Die nun verbleibenden Kupferdrähte und das gemittelte Füllmaterial wurden näher betrachtet, um die thermischen Eigenschaften zu bestimmen. Hierbei lag das Augenmerk auf der Wärmeleitfähigkeit des angestrebten Ersatzmaterials. Anhand des Spulenquerschnitts (Abbildung 1 (b)) und der Form der Spulen, wie in Abbildung 1 (c) zu erkennen, wurde davon ausgegangen, dass die thermischen Eigenschaften richtungsabhängig sind. Um das zu untersuchen, wurde eine gesonderte **Simulation** durchgeführt. Diese verglich den resultierenden Temperaturgradienten einer Simulation mit detailliertem Modell (Abbildung 3 (a), S1) und die Simulation mit dem Ersatzmaterial (Abbildung 3 (b)). Der Vergleich wurde einmal mit richtungsabhängiger (S2) und einmal mit richtungsunabhängiger Wärmeleitfähigkeit (S3) durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt die prozentuale Abweichung der resultierenden Wärmestromdichten der Simulationen an den entsprechenden Außenwänden. Es zeigt sich, dass die Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit nicht vernachlässigt werden darf.

	Abweichung S2 / S1 in %	Abweichung S3 / S1 in %
Linke Wand	-3,40	-14,80
Rechte Wand	-2,82	-14,29
Obere Wand	5,57	14,88
Untere Wand	5,56	14,88

Tabelle 1: Vergleich der resultierenden Wärmestromdichten der Simulationen S1, S2 und S3 an den Wänden. Quelle: IMMS.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Sensor 124

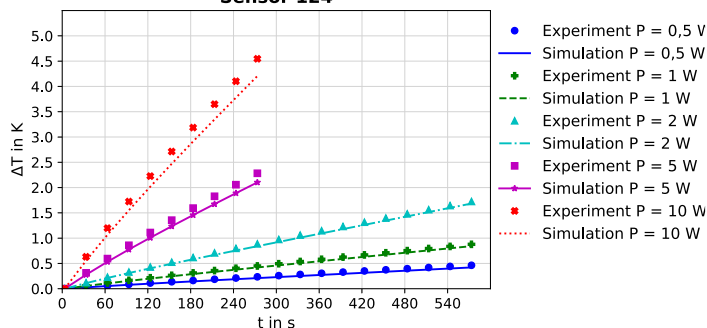


Abbildung 4:

Diagramm der entstehenden Temperaturdifferenz zwischen Simulation und Experiment für einen beispielhaften Sensor mit mittlerer Abweichung.

Grafik: IMMS.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

In einem weiteren Schritt wurde eine gesamte Spule transient mit unterschiedlichen angelegten Leistungen simuliert und experimentell validiert. Die Differenz zwischen den gemessenen und simulierten resultierenden Temperaturdifferenzen bezogen auf die jeweilige Starttemperatur wurde für jeden im Experiment verwendeten Sensor einzeln ermittelt. Wie in Abbildung 4 beispielhaft für einen Sensor auf der Spulenwicklung dargestellt, werden Ergebnisse mit geringer Abweichung zueinander erzielt. Der gewählte Sensor zeigt eine mittlere Abweichung der Ergebnisse im Vergleich mit den restlichen Sensoren. Dies lässt darauf schließen, dass das reduzierte Modell der Spule geeignet ist, um in der Simulation der gesamten Spulenbaugruppe eingesetzt zu werden.

Simulation der Kühlkörpersandwiches und der gesamten Spulenbaugruppe

Zur **Simulation der Kühlkörpersandwiches** liegt das Hauptaugenmerk auf der korrekten Abbildung der Kühlflüssigkeit. Um die flache, lange Geometrie des Kühlkanals gut abzubilden, wurde die Vernetzung wie in Abbildung 5 gezeigt gewählt, wobei in jedem Netzvolumen ein Berechnungspunkt der Simulation liegt. Hierbei wurde auf die korrekte Wahl der Randschichten geachtet, da diese essenziell für die Berechnung der Wärmeübertragung zwischen Fluid und Festkörper ist. Die resultierende, mittels der experimentellen Daten validierte Simulation der Kühlkörpersandwiches wird final in die Simulation der gesamten Spulenbaugruppe übernommen.

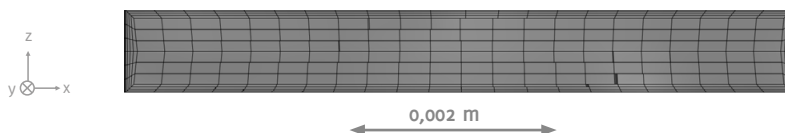


Abbildung 5: Darstellung der Vernetzung des Kühlkanals. Grafik: IMMS.

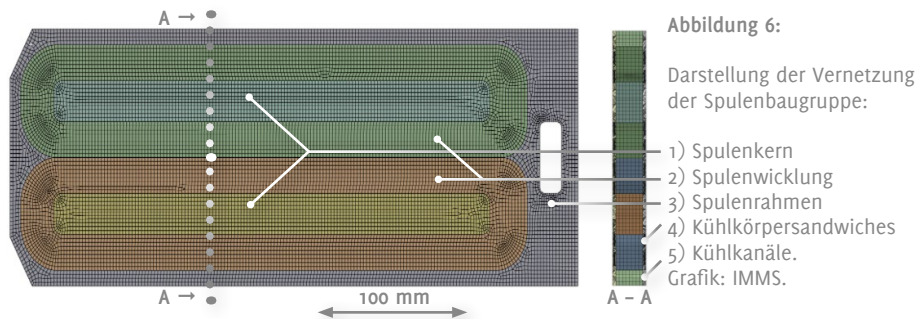


Abbildung 6:

Darstellung der Vernetzung der Spulenbaugruppe:

- 1) Spulenkern
 - 2) Spulenwicklung
 - 3) Spulenrahmen
 - 4) Kühlkörpersandwiches
 - 5) Kühlkanäle.
- Grafik: IMMS.

› Integrierte Sensorsysteme

› Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

› nm-präzise 6D-Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Zur **Simulation der gesamten Spulenbaugruppe** wurden zunächst die thermischen Kontaktwiderstände zwischen den Festkörpern gewählt, da diese einen bedeutenden Einfluss auf die Wärmeübertragung zwischen den einzelnen Bauteilen haben. Die Simulation erfolgte anschließend für verschiedene Leistungen an den Spulen, um einen großen Bereich an möglichen Arbeitspunkten abzudecken. In Abbildung 6 wird die gewählte Vernetzung der einzelnen Bestandteile der Spulenbaugruppe gezeigt, wobei der Hauptteil der Zellen des erstellten Netzes innerhalb der Kühlkanäle der Kühlkörpersandwiches liegt. Das ist wie schon begründet auf die benötigte hohe Auflösung im Fluid zurückzuführen.

Abbildung 7 zeigt die resultierende Temperaturverteilung der Spulenbaugruppen-simulation mit einer elektrischen Eingangsleistung von 10 W. Es ist zu sehen, dass die Temperatur des Kühlkanals vom Inlet (1) zum Outlet (2) zunimmt, da die in den Spulen entstehende Wärme von dem Kühlmittel aufgenommen und aus dem System heraus transportiert wird. Es ist außerdem zu erkennen, dass es einen Temperatur-Hotspot über einer der Spulen gibt, welcher zu einem höheren Wärmeeintrag in umliegende Geometrien führt.

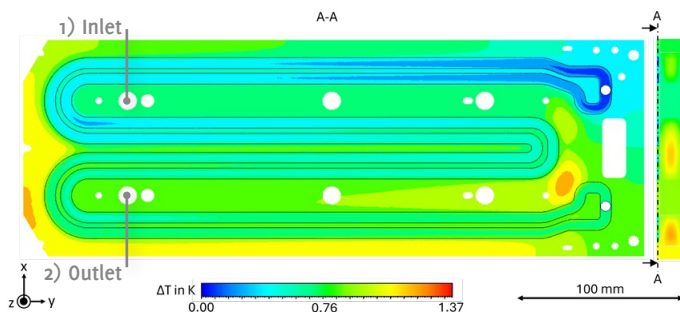


Abbildung 7:

Darstellung des resultierenden Temperaturgradienten der Spulenbaugruppen-simulation mit einer elektrischen Leistung von 10 W und einer Kühlmittelgeschwindigkeit von 0,202 m/s am Inlet. Grafik: IMMS.

Der Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und experimentellen Daten zeigt eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse. Das lässt darauf schließen, dass es sich um eine korrekte Simulation des Systems handelt, welche aufgrund der reduzierten Geometrie der Spulen eine schnellere Berechnung der Ergebnisse als eine geometrisch detailgenaue Simulation bei hoher Genauigkeit ermöglicht.

Ausblick

Diese Ergebnisse sind der Ausgangspunkt, um den thermischen Einfluss der Spulen und Spulenbaugruppen als eine der primären Wärmequellen innerhalb des Gesamtsystems auf die umliegenden/angrenzenden Geometrien zu untersuchen. Hierfür kann die Simulation vorhersagen, welche Temperaturgradienten bei verschiedenen Leistungen entstehen und wie sie sich an den Spulenbaugruppen verteilen. Für die anschließenden Geometrien, wie zum Beispiel die Granit-Basis des gesamten Positioniersystems, erzeugt die Nähe zu den Spulen als Wärmequelle einen Temperaturgradienten. Da sich die meisten Werkstoffe, so auch der Granit, mit zunehmender Temperatur ausdehnen, bringen die Spulen ungewollte Spannungen in das Gesamtsystem ein. Auf Basis dieser Ergebnisse wird in der Forschungsgruppe VirtuSen die thermomechanische Reaktion der Granit-Basis und weiterer angrenzender Systeme untersucht und perspektivisch das gesamte Nanopositioniersystem in einem reduzierten Modell effizient thermomechanisch simuliert.

Kontakt: Dipl.-Ing. Ina Naujokat, ina.naujokat@imms.de

Freistaat
Thüringen
Hier hat Zukunft Tradition.



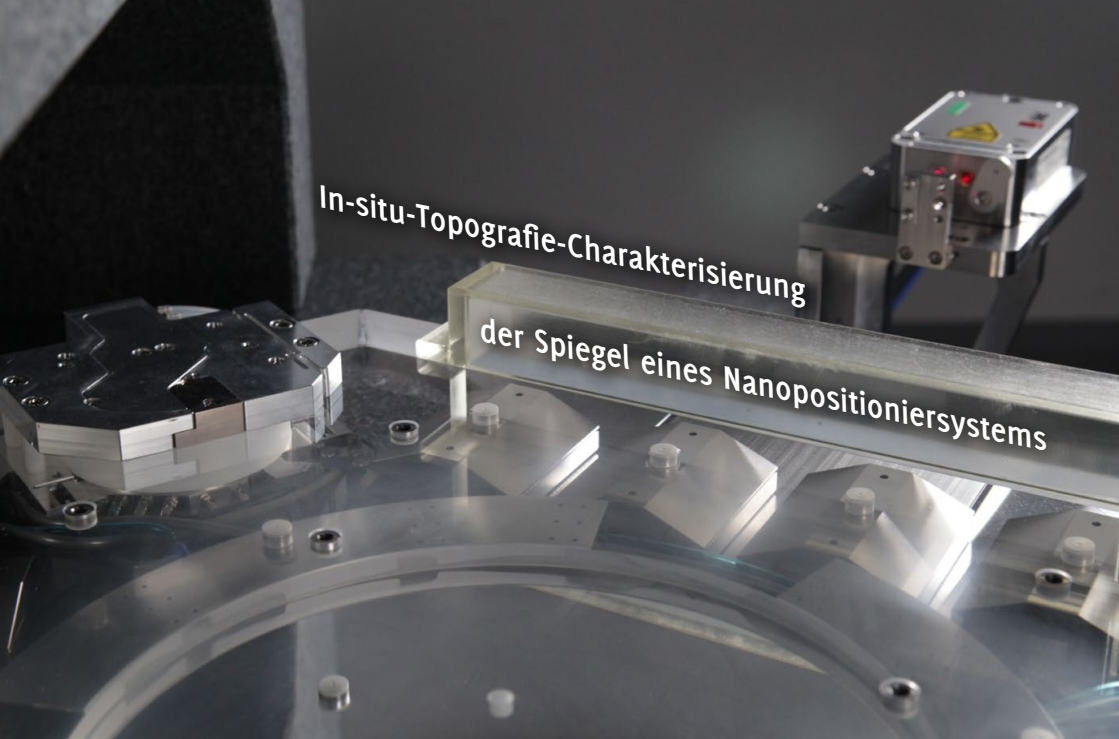
Die Forschungsgruppe „Applikation KI-basierter virtueller Sensorik zur effektiven Präzisionssteigerung von Positioniersystemen – VirtuSen“ wird vom Freistaat Thüringen gefördert.

› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› nm-präzise 6D-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

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

Literatur:

Thermal Analysis of a Coil Assembly in a Nanopositioning Drive System via Reduced-Complexity CFD Modeling, Ina NAUJOKAT, Ludwig HERZOG, Steffen HESSE, Parastoo SALIMITARI. *Appl. Sci.* 2026, 16, 2748. <https://doi.org/10.3390/app16062748>



Das IMMS hat einen Ansatz entwickelt, bei dem sich die Referenzspiegel direkt im Gesamtaufbau eines Positioniersystems charakterisieren lassen. Abweichungen vom Idealzustand der Spiegel können so über Korrekturrechnungen die Positioniergenauigkeit erheblich verbessern. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick:

Der unsichtbare Einfluss von Spiegelfehlern auf die Nanopositionier-Genauigkeit

Hochpräzisions-Nanopositioniersysteme sind unverzichtbar in der hochmodernen Fertigung, Nanometrologie und wissenschaftlichen Instrumentierung. Diese Systeme ermöglichen eine geregelte Bewegung mit Subnanometer-Auflösung über Strecken von mehreren hundert Millimetern – vergleichbar damit, eine einzelne Nadel in einer Stadt der Größe von Ilmenau zu lokalisieren.

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

Am IMMS wurde das NPS6D200 entwickelt, ein Nanopositionierungssystem für große Bewegungsbereiche in allen sechs Freiheitsgraden (6 DOF) – drei translatorische und drei rotatorische – mittels interferometrischem Regelungs-Feedback zur Positionsmessung. Im Mittelpunkt seines metrologischen Systems stehen vier ebene Referenzspiegel, die als feste Referenzflächen für die internen Sensoren (Laserinterferometer und ein Autokollimator) dienen.

[Zum NPS6D200-
Fachartikel auf
www.imms.de](#)

Die Regelungsarchitektur des Systems geht zunächst davon aus, dass diese Spiegel geometrisch ideal sind – perfekt eben und exakt ausgerichtet. In der Praxis kön-

[Jahresbericht
© IMMS 2025](#)

nen Abweichungen von dieser Annahme jedoch die Leistung des Positioniersystems erheblich verschlechtern. Schon kleine Fehler in der Spiegelgeometrie können die Fähigkeit des Systems beeinträchtigen, Position und Orientierung präzise zu bestimmen. Wenn die Spiegel beispielsweise nicht vollkommen flach sind, kann dem System der Referenzpunkt „verloren gehen“ – genauso wie es unmöglich wäre, einen Ort in einer Stadt zu finden, wenn die Karte selbst verzerrt ist.

Diese Abweichungen wirken durch die Feedbackschleifen fort und führen zu systematischen Fehlern in der Koordinatenrekonstruktion, einschließlich Kosinusfehler und parasitären Bewegungen. Ohne Korrektur verringern solche Fehler die Positionierungsgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Messungen.

Das IMMS hat einen Ansatz entwickelt, bei dem sich die tatsächliche Oberflächen-topografie der Referenzspiegel direkt im Gesamtaufbau eines Positioniersystems charakterisieren lässt. Die gemessene Spiegelgeometrie inklusive Verformungen wird intern über eine Koordinatenrekonstruktion des Systems korrigiert. Darüber kann die Positioniergenauigkeit erheblich verbessert werden, ohne dass die Hardware oder die Steuerarchitektur angepasst werden müssen, und reale Abweichungen werden so berücksichtigt. Das ist vergleichbar mit der Gabe der richtigen Brille an jemanden mit Sehschwäche: So, wie eine falsche Linse die Welt verzerrt, führt die Annahme eines vollkommen flachen Spiegels dazu, dass die Maschine die Position verfälscht wahrnimmt.

Einführung: Die Herausforderung, eingebaute Spiegel im laufenden Betrieb zu messen

Das NPS6D200 (Abb. 1) ist ein Nanopositionierungssystem für große Bewegungsbereiche, das für die Bewegung in sechs Freiheitsgraden (6 DOF) ausgelegt ist. Das heißt, es kann sich in drei Richtungen (X, Y, Z) translatorisch bewegen und um drei Achsen (Gieren, Nicken, Rollen) rotieren. Es erreicht Nanometer-Genauigkeit über einen horizontalen Bewegungsbereich mit einem Durchmesser von 200 mm und einen vertikalen Bereich von 25 mm.

Zur Positionsverfolgung nutzt das System vier ebene Spiegel:

- Spiegel U: Regelung der Gier-Rotation (φ_z),
- Spiegel V und W: Regelung von X- und Y-Translation,
- Spiegel Z: Regelung der Z-Translation und der X/Y-Rotationen (φ_x und φ_y) – Nicken und Rollen.

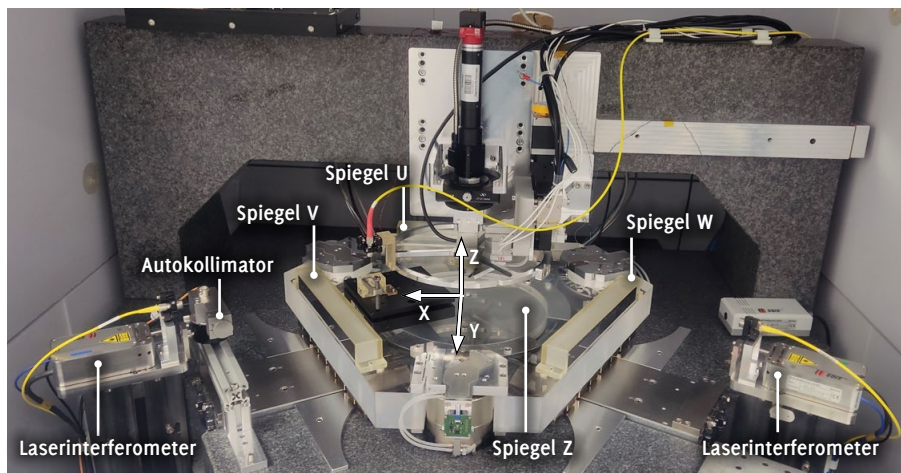


Abbildung 1: NPS6D200 mit zusätzlichem externem Autokollimator. Foto: IMMS.

Interne Sensoren – Laserinterferometer und ein Autokollimator – setzen auf die vier Referenzspiegel, um die Position und Orientierung des Systems zu messen. In der Praxis sind diese Spiegel jedoch nicht perfekt eben oder exakt ausgerichtet, sodass reale Effekte ihre Leistung verschlechtern. Die Schwerkraft lässt die Spiegel leicht nach unten durchhängen – ähnlich wie ein Draht zwischen zwei Aufhängungen unter seinem eigenen Gewicht nachgibt. Klemmungen, welche die Spiegel an Ort und Stelle halten, können ungleichmäßigen Druck erzeugen, was zu lokalen Verformungen oder Verbiegungen führt. Schon während der Herstellung ist kein Spiegel vollkommen eben – Oberflächenformabweichungen sind unvermeidlich. Im Laufe der Zeit können Temperaturänderungen und mechanische Schwingungen die Positionen oder mechanischen Spannungen der Spiegel weiter verschieben und kleine, aber kumulative Veränderungen verursachen. Kombiniert bedeuten diese Faktoren, dass die Spiegel von der idealen Geometrie abweichen, was zu systematischen Fehlern während der Bewegung und Positionierung führt und die Messgenauigkeit verringern kann.

Diese Effekte propagieren durch die Feedbackschleifen der Maschine und verzerren die interne Karte der Maschine. Im Ergebnis glaubt die Maschine, die korrekte Position erreicht zu haben, tatsächlich ist sie aber von dieser versetzt – was zu systematischen Messfehlern führt. Traditionelle Verfahren zur Messung der Spiegelform – etwa mit einem hochauflösenden Profilometer – erfordern das Entfernen der Spiegel aus der Maschine. Das ist vergleichbar damit, die Aufhängung eines Autos auseinanderzunehmen, um seine Ausrichtung zu bestimmen: sobald man sie wieder

zusammenbaut, ist die Ausrichtung anders. Aus diesem Grund wird eine Alternative vorgeschlagen: Eine Methode, welche die Spiegel vermisst, während sie noch an ihrem Platz sind, und unter realen Betriebsbedingungen.

Experimentbeschreibung: Wie wir die Spiegel vermessen haben, ohne sie zu beeinflussen

Das Experiment wurde am Nanopositionierungssystem NPS6D200 durchgeführt, wobei ausschließlich externe Sensorik ohne Änderungen an der Maschine verwendet wurde.

Es wurden drei kompakte Autokollimatoren des Partners SIOS zur Vermessung eingesetzt: kleine, tragbare Geräte, die Winkelabweichungen mit hoher Empfindlichkeit im Bereich ± 50 arcsec messen. Die Autokollimatoren wurden außen an der Maschine montiert und sorgfältig auf den Mittelpunkt jedes Spiegels ausgerichtet. Das System wurde in seiner normalen Konfiguration betrieben – keine Demontage, keine Änderungen an der Steuerungssoftware.

Zusätzliche Sensorik:

- Ein hochpräziser Referenzautokollimator ELCOMAT® HR der Firma Möller Wedel diente zur Überprüfung der Genauigkeit der anderen Autokollimatoren.
- Ein 12-seitiges optisches Polygon wurde als kalibrierter Präzisionswinkelstandard als Referenzfläche für die Verifikation der Autokollimatoren genutzt.

Um die Genauigkeit der Autokollimatoren sicherzustellen, wurden diese in einem separaten Experiment gegen den Referenzautokollimator im Bereich von ± 50 arcsec mithilfe des optischen Polygons verifiziert.

Ablauf: Von einzelnen Winkeln zur 3D-Karte

Der Ablauf zur Rekonstruktion der Spiegel-Topografie wurde in fünf Schritte unterteilt:

1) Identifizierung der geregelten Freiheitsgrade:

Das System nutzt den U-Spiegel zur Gierregelung (φ_z) und den Z-Spiegel zur Roll- (φ_x) und Nickregelung (φ_y). Da die Spiegel V und W nicht in diesen Regelschleifen verwendet werden, werden sie für externe Messungen nutzbar.

2) Definition des Koordinatensystems:

Für jeden Spiegel wurde ein lokales Koordinatensystem definiert:

- Ursprung: Spiegelmittelpunkt,
- horizontale Achse: zeigt bei Blick auf die reflektive Oberfläche nach links,
- vertikale Achse: entgegen der vertikalen Achse der Maschine (also senkrecht nach unten),
- Normal-Achse: Positive Höhen entsprechen einer Erhebung aus der Spiegeloberfläche heraus.

3) Direkte Abstandsmessung (Einzel-DoF-Ermittlung):

Für die Gier-Charakterisierung wurden Messungen an den Spiegeln V und W durchgeführt und entsprechend Gleichung 1 umgesetzt (siehe Abbildung 2), da der Spiegel U für die Gier-Regelschleife genutzt wird. Durch Messungen auf mehreren Höhen und durch Berücksichtigung anfänglicher Winkel-Offsets wurde die vollständige Topografie von Spiegel U rekonstruiert.

Für die Charakterisierung der Rolltopographie wurden Messungen an den Spiegeln U, V und W durchgeführt, da für die Rollregelung nur Spiegel Z verwendet wird. Die Autokollimatoren wurden jeweils auf den Mittelpunkt jedes Spiegels ausgerichtet und senkrechte Bewegungen wurden vorgenommen, um die Strahlenausrichtung beizubehalten.

4) Relative Verschiebungsmessungen:

Nach den direkten Messungen wurden die relativen Verschiebungen bestimmt. Beispielsweise wurde die Giertopografie vom Spiegel V ermittelt, indem der hochskalierte Messwert vom Spiegel U von den Messdaten subtrahiert wurde. Ähnlich wurden die Rolltopografien des Spiegel W durch Subtraktion der Topographie vom Spiegel U wie folgt abgeleitet:

$$\theta_U = -\theta_{VV} = -\theta_{WW} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit θ_U als Giertopografie des Spiegels U, θ_{VV} als Winkeltopografie, abgeleitet aus den Messungen an Spiegel V unter Aufnahme einer Bewegung normal zur nominellen W-Spiegeloberfläche, und θ_{WW} als Winkeltopografie, abgeleitet aus den Messungen an Spiegel W unter Aufnahme einer Bewegung normal zur nominellen W-Spiegeloberfläche.

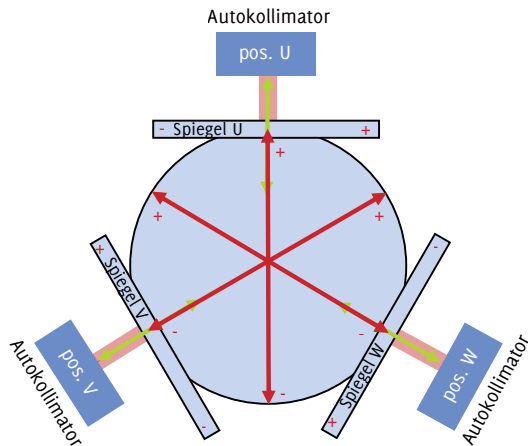


Abbildung 2:

Position der Autokollimatoren bezüglich der Spiegel und der durchgeführten Bewegungen für die Topografie-Detektion.

Grafik: IMMS.

5) Sekundäre relative Verschiebung und Spiegel-Z-Rekonstruktion

Eine sternförmige Bewegung wurde verwendet, um multiple Punkte auf Spiegel Z zu messen. Da die Nickrotation nicht direkt durch die Autokollimatoren erfasst werden kann, wurden zwei Messpositionen eingesetzt, um ein System aus zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten zu lösen, das in Gleichung 2 beschrieben wird. Die Lösung wurde mittels einer kleinsten-Quadrate-Methode ermittelt. Die endgültige Topografie wurde anschließend durch geometrische Integration rekonstruiert.

$$\begin{aligned}\varphi_{UStar}(x,y) &= \varphi_U(x) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha) \\ \varphi_{VStar}(x,y) &= \varphi_V(-x \cdot \sin(\pi/6) + y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha - 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \varphi_{WStar}(x,y) &= \varphi_W(-x \cdot \sin(\pi/6) - y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha + 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha + 2\pi/3)\end{aligned}$$

Gleichung 2

Die Symbole der Gleichungen sind in Tabelle 1 beschrieben.

Symbol Beschreibung

φ_{UStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom U-Spiegel
φ_{VStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom V-Spiegel
φ_{WStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom W-Spiegel
φ_U	Roll-Topografie des U-Spiegels
φ_V	Roll-Topografie des V-Spiegels
φ_W	Roll-Topografie des W-Spiegels
φ_Z	Roll-Topografie des Z-Spiegels (in Bewegungsrichtung)
φ_{ZP}	Topografie, die der Autokollimator während der Messung nicht detektiert (Nickrotation)

Tabelle 1: Terme der Gleichung 2

Autokollimator

pos U

- Spiegel U +

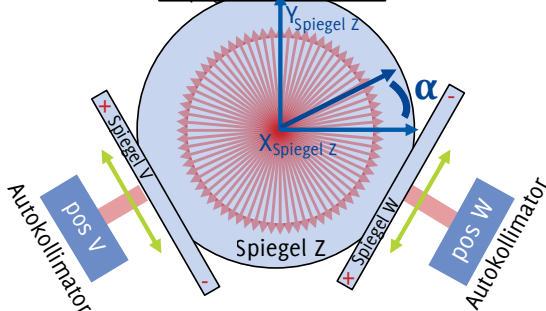


Abbildung 3

Position der Autokollimatoren bezüglich der Spiegel und Bewegung für die Topografie-Detektion.

Grafik: IMMS.

Alle Messungen wurden bei einer Geschwindigkeit von 5 mm/s durchgeführt. Thermischer Drift wurde kompensiert, indem ein gemeinsamer Ursprung im Zentrum der Messbewegungen definiert wurde.

Ergebnisse: Wie die Spiegel aussehen

Die rekonstruierten Oberflächentopografien der vier Referenzspiegel sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen Deformationsmuster, die das Zusammenspiel von mechanischen Kräften und Befestigungsbedingungen widerspiegeln.

Der **Z-Spiegel** weist die größten Abweichungen auf, mit Werten von bis zu ca. -1300 nm in einem begrenzten Bereich nahe dem unteren Rand. Diese hochgradig lokale Deformation folgt nicht dem erwarteten Muster einer gleichmäßigen, durch die Schwerkraft verursachten Durchbiegung über drei Auflagepunkte des Läufers, bei dem die Durchbiegung typischerweise symmetrisch über die Oberfläche verteilt wäre. Stattdessen ist die Deformation auf einen bestimmten Bereich beschränkt. Dieses Merkmal lässt sich eher auf Fertigungsunregelmäßigkeiten wie eine nicht gleichmäßige Werkzeugbahn während des Polierens zurückführen.

Der **U-Spiegel** zeigt relativ kleine Variationen, mit Abweichungen von etwa -300 nm bis $+300$ nm über die gesamte Oberfläche. Leichte Zunahmen der Abweichung in der Nähe der Ränder deuten auf geringfügige Einflüsse durch das Klemmen oder Montage-Fehlstellungen hin.

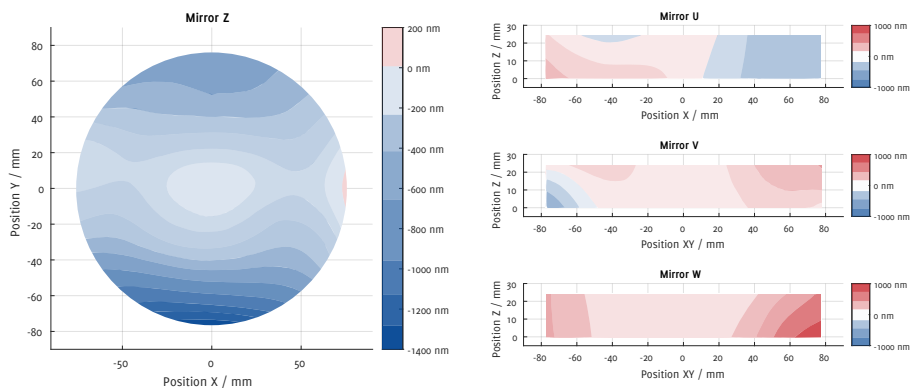


Abbildung 4: Topografien aller Spiegel des Positioniersystems, welche durch die vorgestellte Methode aufgenommen wurden. Grafik: IMMS.

Der **V-Spiegel** weist eine symmetrische Deformation auf, wobei der zentrale Bereich nahe Null bleibt und die Abweichungen zu den Rändern hin zunehmen, bis zu -500 nm. Dieses Verhalten ist konsistent mit einer durch Klemmkräfte verursachten Biegung.

Der **W-Spiegel** dagegen zeigt Abweichungen bis zu +800 nm mit einer konkaven Form in der Nähe der Klemmbereiche. Das Deformationsmuster unterscheidet sich von dem des V-Spiegels und deutet auf eine Asymmetrie in der Übertragung der mechanischen Lasten durch die Struktur oder durch die Montageart hin.

Gemeinsam zeigen diese Erkenntnisse, dass mechanische Beschränkungen, Montage-induzierte Spannungen und Fertigungsabweichungen signifikant zu den systematischen Positionierfehlern von Nanopositioniersystemen beitragen. Die rekonstruierten Topografien zeigen eine Kombination aus intrinsischer Oberflächenform, verbleibenden Ausrichtungsfehlern und lokalen Deformationen, welche aus mechanischen Belastungen und durch die Herstellung verursachten Fehlern resultieren. Während die durch die Gravitation verursachten Deformationen in Bereichen auftreten, die mit der Auflagegeometrie übereinstimmen, etwa entsprechend gradueller Biegungen in der Nähe der Ränder, ist die Vertiefung im Z-Spiegel örtlich definiert und asymmetrisch. Das deutet darauf hin, dass sie vor allem auf Fertigungsfehler wie nicht gleichmäßige Werkzeugbahnen oder Restspannungen zurückzuführen ist und nicht auf eine gleichmäßige mechanische Belastung. Dies bestätigt, dass sowohl das strukturelle Design als auch die Produktionsqualität entscheidende Rollen bei der Bestimmung der metrologischen Leistungsfähigkeit des Systems spielen.

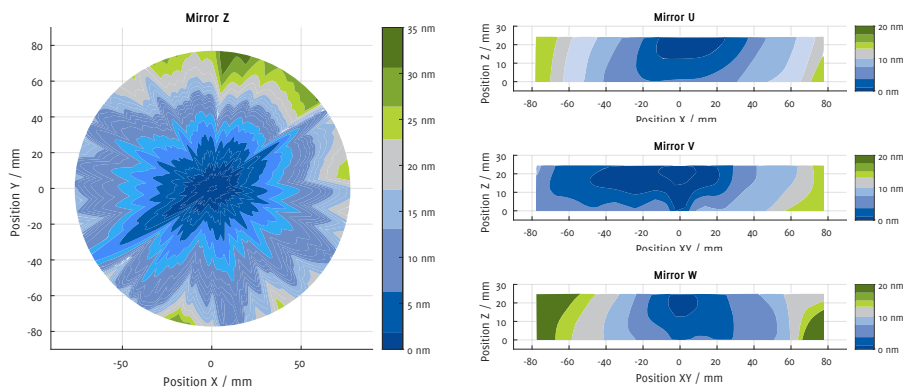


Abbildung 5: Standardabweichung der Topografien aller Spiegel des Positioniersystems entsprechend der präsentierten Methode. Grafik: IMMS.

Reproduzierbarkeit: Wie verlässlich sind die Messungen?

Die Standardabweichung der rekonstruierten Topografien ist in Abbildung 5 dargestellt. Diese Kartendarstellung gibt Aufschluss über die Wiederholbarkeit der Messungen und die Ausbreitung der Unsicherheit im hierarchischen Rekonstruktionsprozess.

Der **Z-Spiegel** weist die höchste Streuung auf, mit Standardabweichungen von bis zu 31 nm, insbesondere in der Nähe der Ränder. Diese erhöhte Unsicherheit entsteht, weil die Topografie des Spiegels in der Reihenfolge zuletzt rekonstruiert wird und dabei mehrere relative Messungen sowie eine Kleinste-Quadrate-Lösung verwendet werden, wodurch kleine Fehler aus früheren Schritten verstärkt werden.

Im Gegensatz dazu zeigt der **U-Spiegel** die geringste Unsicherheit, mit Standardabweichungen, die in den meisten Bereichen unter 12 nm bleiben, und nur leicht höheren Werten an den Rändern. Da er der zuerst gemessene Spiegel ist, ist seine Rekonstruktion unabhängig von vorherigen Ergebnissen, was ihn zum stabilsten Referenzspiegel macht.

Der **V-Spiegel** weist Standardabweichungen ähnlich denen des U-Spiegels auf, mit leicht erhöhten Werten in den positiven X-Y-Bereichen, vermutlich aufgrund von Randeffekten und Messempfindlichkeit.

Der **W-Spiegel** zeigt eine mittlere Streuung, mit Standardabweichungen von bis zu 17 nm, vor allem an den Rändern. Das stimmt mit der Ausbreitung der Unsicherheit aus der früheren Rekonstruktion des U-Spiegels überein.

Die allgemeine Tendenz, dass die Standardabweichung vom U-Spiegel über V-Spiegel und W-Spiegel hinweg bis zu Z-Spiegel ansteigt, spiegelt die hierarchische Struktur der Methode wider. Weitere Quellen der Abweichungen sind kleine Unterschiede in der Initialposition der Maschine nach dem Start (im Bereich von etwa 0,1 mm), Verkopplungen zwischen den Rotationsfreiheitsgraden des Autokollimators sowie Umwelteinflüsse wie Luftströmungen während der Läufer-Bewegung.

Fazit: Ein praktischer Weg zu höherer Präzision

Diese Arbeit zeigt, dass durch den Einsatz von drei externen Autokollimatoren die Oberflächentopografien aller vier Referenzspiegel in einem Nanopositioniersystem unter realen Betriebsbedingungen abgebildet werden können. Die präsentierte Methode erfasst reale Effekte wie Schwerkraft-bedingte Durchbiegung, durch Klemmungen induzierte Spannungen und befestigungsbedingte Deformationen – Faktoren, die bei der Annahme einer idealen Spiegelgeometrie leicht übersehen werden können.

Die beobachtete Deformation beim Z-Spiegel – dort tritt eine lokal begrenzte Vertiefung von bis zu –1300 nm nahe dem unteren Rand auf – folgt nicht dem erwarteten symmetrischen Muster einer Schwerkraft-bedingten Durchbiegung über drei Auflagepunkten. Stattdessen deutet die asymmetrische und lokal begrenzte Abweichung eher auf Fertigungsfehler hin, wie beispielsweise ungleichmäßige Werkzeugbahnen während der Herstellung, und nicht ausschließlich auf mechanische Belastungen.

Durch die Einbeziehung der gemessenen Spiegelgeometrie – sowohl globaler als auch lokaler Deformationen – in die interne Koordinatenrekonstruktion des Systems kann die Positioniergenauigkeit erheblich verbessert werden, ohne dass Änderungen an der Hardware oder der Steuerarchitektur erforderlich sind.

Der Ansatz ist vollständig in-situ: Die Spiegel werden charakterisiert, während sie in ihrer Betriebsbefestigungs- und -belastungslage verbleiben. Dadurch wird das Risiko eliminiert, ihren mechanischen Zustand durch Demontage zu verändern. Alle Messungen sind durch die Verifikation gegen einen Referenzautokollimator und ein optisches Polygon Standard rückführbar. Das Verfahren ermöglicht eine genaue, In-situ-Charakterisierung der Spiegelgeometrie ohne Systemmodifikationen und eignet sich daher hervorragend für die Integration in routinemäßige Kalibrierungs- und Überwachungs-Workflows in Hochpräzisionssystemen.

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

Gefördert durch

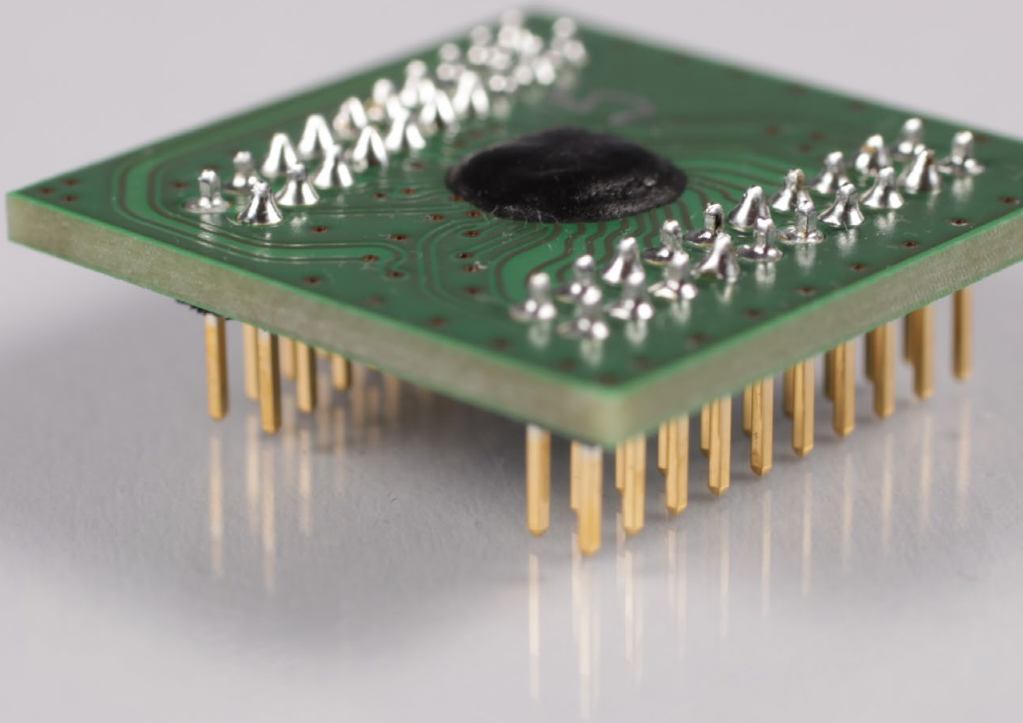


Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wurde unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

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

ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE

Chip-on-Boad-Aufbau für den in HoLoDEC entwickelten Testchip D1038A. Er enthält separiert den analogen Teil eines größeren RFID-Sensorchips sowie eine I²C-Schnittstelle und dient der detaillierten Laborcharakterisierung des Analogteils. Details zur neuentwickelten Chip-Design-Methodik enthält der Fachartikel „Generatorbasierter Entwurf für Ultra-Low-Power-Mixed-Signal-Schaltungen“ in diesem Bericht. Foto: IMMS.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **HoLoDEC** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen **16ME0703** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Am IMMS waren zum Ende des Geschäftsjahres 2025 97 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** verschiedenster Nationalitäten und Fachrichtungen tätig.¹

Hiervon waren 63 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 22 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 87 % aller Beschäftigten. Darüber hinaus waren vier von 12 der Administration zugeordneten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter direkt wissenschaftsunterstützend eingesetzt.

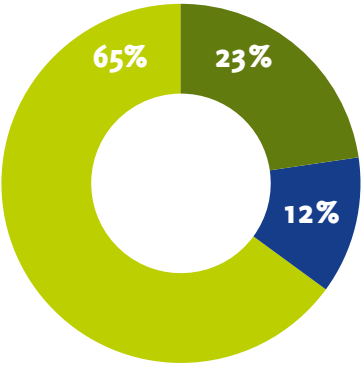
Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr am IMMS insgesamt 37 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 4 Bachelorarbeiten und 10 Masterarbeiten, und 6 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben. Ein Wissenschaftler hat seine Promotion erfolgreich abgeschlossen.

2025 konnten wir mit einer vom Freistaat Thüringen geförderten internen neukonzipierten Forschungsgruppe beginnen. Hier geben wir drei Absolventen die Möglichkeit, in wichtigen Forschungsthemen zu forschen und zu promovieren.

Die **Drittmittel**erträge konnten im Geschäftsjahr 2025 mit rd. 25 % gegenüber dem Vorjahreswert weiter gesteigert werden. Dabei lagen sowohl die Erträge der industriellen Auftragsforschung (Industrieerträge) wie auch die Erträge aus öffentlich geförderten Forschungsprojekten (Förderprojekte) auf einem Höchststand. Es wur-

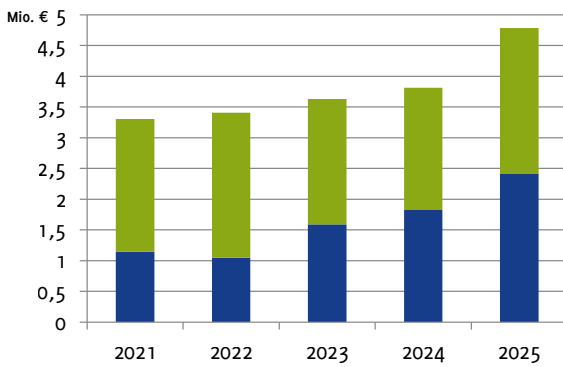
- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

Personalstruktur



Wissenschaft | studentische Mitarbeit | Administration / Auszubildende

¹ Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2025 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit weiter zurückliegenden Berichten ist daher nur bedingt möglich.



Projekterträge

Förderprojekte

Industrieprojekte

142

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente ver-

netzte Mess- u.

Testsysteme

› nm-präzise 6D-

Direktantriebe

› Inhalt

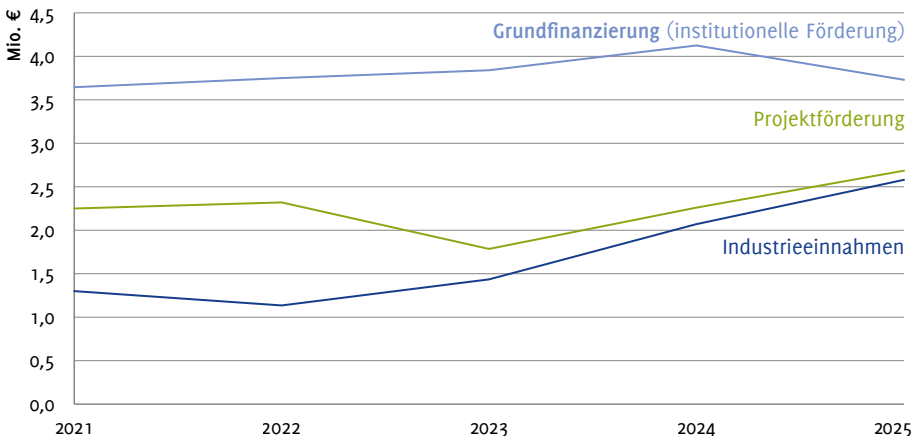
* Förderung

den im Geschäftsjahr 59 Industrieprojekte bearbeitet. Im Geschäftsjahr 2025 konnten 11 öffentlich geförderte Forschungsprojekte (Förderprojekte) begonnen werden und es waren insgesamt 83 Förder- und Industrieprojekte in der Umsetzung.

Die **Finanzierung** (Einnahmen) des Instituts bestand auch im Geschäftsjahr 2025 aus den drei Finanzierungsbausteinen öffentlich geförderte Forschungsprojekte (Förderprojekte), industrielle Auftragsforschung (Industrieprojekte) und institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen. Die Förderung des Freistaats bleibt dabei trotz erheblicher Kürzung der Zuwendung 2025 die unverzichtbare Grundlage für die Forschungstätigkeit des IMMS. Jedoch nimmt die Bedeutung der industriellen Auftragsforschung für das Wachstum des Instituts stets zu.

www.imms.de/funding

Finanzierungssäulen



Jahresbericht

© IMMS 2025



Integrierte Sensorsysteme
Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
nm-präzise 6D-Direktantriebe
Inhalt
Förderung

www.imms.de/
org

Aufsichtsrat

- **Vorsitzender:** Herr Dr. ¹Sebastian STARK, Referatsleiter Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TMWLLR), Aufsichtsratsmitglied BATT mbH
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau ¹Dr. Mandy KANDLER, Stellv. Referatsleiterin Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (TMBWK)
- 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 der Technischen 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, Vorstandsmitglied TRIDELTA CAMPUS HERMSDORF e.V
- Frau Jessica VÖLLGER, Geschäftsführerin Melexis GmbH

- **Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin HOFFMANN, Chair of Microsystems, Ruhr Universität Bochum, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik (*bis 31.08.2025*)
- **Stellvertretender Vorsitzender:** Prof. Dr. mont. Mario KUPNIK, Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktion, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST) (*bis 31.08.2025*)
- Prof. Dr.-Ing. Holger BLUME, Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Institut für Mikroelektronische Systeme (*seit 01.09.2025*)
- Jörg DOBLASKI, Chief Technology Officer, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH
- Dr. Alfred HANSEL, Geschäftsführer Epitype GmbH (*bis 31.08.2025*)
- 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 (*bis 31.08.2025*)
- 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, Vorstandsvorsitzender edacentrum e.V. (*bis 31.08.2025*)
- 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 (*bis 31.08.2025*)
- Prof. Dr.-Ing. Johannes TRABERT, Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrgebiet Kommunikationssysteme und Übertragungstechnik
- Prof. Dr.-Ing. Norbert WEHN, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Entwurf Mikroelektronischer Systeme (*seit 01.09.2025*)

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

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

- Theoretische Elektrotechnik I und II, Vorlesung
- Supraleitung und Schaltungen der Quanteninformationsverarbeitung, Vorlesung
- Elektromagnetisches Feld, Vorlesung
- Projektseminar TET

Dr.-Ing. Georg Gläser, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektronische Schaltungen und Systeme

- Entwurf von digitalen und Mixed-Signal Systemen, Vorlesung

Veranstaltungen

Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

11.03.2025 – **KI-Tag für den Mittelstand** – BMW e.V. Thüringen und ITnet Thüringen e.V. im Rahmen der Thüringen-Ausstellung, *Vortrag, Messestand*, Erfurt

02.04.2025 – **UnternehmerInnen-Vormittag** – SaaleWirtschaft e.V., *Vortrag, Messestand*, Rudolstadt

03.04.2025 – **BTT-Unternehmensabend** – BTT Treuhand Steuerberatungsgesellschaft mbH, *Vortrag*, Ilmenau

09.04.2025 – **WID 2025** – World Interferometry Day, *Poster, Messestand*, Ilmenau

12.05.2025 – **edaWorkshop25** – zentrale deutsche Veranstaltung zu Elektronik, Design und Anwendungen (EDA), *Vortrag*, Dresden

04.06.2025 – **2. Fachtagung des SaaleWirtschaft e.V.** – Künstliche Intelligenz und IT-Sicherheit: Nachhaltigkeit, Cyber- & Rechtssicherheit, *Vortrag*, Saalfeld

18.06.2025 – **Ökofeldtage Canitz** – Treffpunkt für die Landwirtschaft von morgen, *Poster, Demonstratoren*, Canitz

18.06.2025 – **Bernburger Innovationstage** – Wissenstransfer und Innovationen für die Landwirtschaft von morgen, *Vortrag*, Bernburg

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

› nm-präzise 6D-

Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

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

Jahresbericht

© IMMS 2025

25.06.2025 – **Thüringer Kirschentag 2025** – Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau (LVG), *Vortrag*, *Demonstrator*, Erfurt

07.07.2025 – **SMACD 2025** – International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design, *Vortrag*, Istanbul

08.07.2025 – **MIMAR 2025** – International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, *Vortrag*, Lorraine, Frankreich

16.07.2025 – **AI4PlantPhysio** – Workshop im Projekt AI4PlantPhysio zu Pflanzen und Sensorik an der Universität Konstanz, *Vortrag*, Konstanz

20.08.2025 – **2. Thüringer Haselnusstag** – Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau (LVG), *Vortrag*, Erfurt

25.08.2025 – **ISSOM 2025** – International Summer School on Microelectronics, *Vorlesung*, *Messestand*, Hannover

24.09.2025 – **W3+ FAIR JENA 2025** – Begleitkonferenz „en-tech.talks“, *Vortrag*, Jena

21.10.2025 – **elmug4future 2025** – Messtechnik für Life Science: Märkte, Anforderungen und Lösungen, *Vortrag*, *Messestand*, Jena

22.10.2025 – **Mitteldeutscher Digitaltag 2025** – Obst- und Weinbau, *Workshop-Moderation*, Meißen

28.10.2025 – **Experten-Tag für Präzisionsmesstechnik** – Fachvorträge, Live-Anwendungen, Expertentreff, Führungen bei der SIOS Meßtechnik GmbH, *Vortrag*, Ilmenau

28.10.2025 – **IEEE MetroAgriFor 2025** – 2025 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, 2 *Vorträge*, Bologna, Italien

18.11.2025 – **euspen SIC 2025** – euspen Special Interest Conference: Precision & Performance 2025 (combining MATADOR, LAMDAMAP & Thermal Issues), 2 *Vorträge*, Cranfield, UK

Workshop-Angebote / IMMS als Gastgeber / Veranstalter / Mitinitiator

21.01.2025 – **2. Mitteldeutscher Digitaltag** – Netzwerktreffen für alle Wertschöpfungspartner des Obstbaus in der Region, *Workshop*, Leipzig

22.01.2025 – **Klima-Cafe** – Ressourcenschonung und nachhaltige Kreislaufwirtschaft – Mit KI zu mehr Nachhaltigkeit und Energieeffizienz, *Mittelstand-Digital-Angebot*, *Co-Organisator und Vortrag*, online

18.02.2025 – **Jahresauftakt MD & DGQ** – Mittelstand-Digital-Zentrum Ilmenau und Deutsche Gesellschaft für Qualität (DGQ) zur Digitalisierung in der Qualitätssicherung, *Mittelstand-Digital-Angebot*, *Vortrag*, *Veranstaltung am IMMS*, Ilmenau

06.03.2025 – **KI zum Frühstück** in Ilmenau – Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von KI, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Vortrag, Ilmenau

03.04.2025 – **Girls'Day 2025** – Welche Aufgaben hat eigentlich ein Forschungsinstitut und wie sieht der Arbeitstag einer Ingenieurin aus?, *Veranstaltung am IMMS*, Ilmenau

13.05.2025 – **KI-Stammtisch** – Model Context Protocol (MCP) – Die „USB-C-Schnittstelle“ für LLM-Multi-Agentensysteme, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Veranstalter, Moderation, online

21.05.2025 – **Industrieforum „Smarte Fertigung“** – Automatisiertes und innovatives Fügen, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Host und Moderation, Ilmenau

27.05.2025 – **MeetUp „Building Agent-Native AI-Applications“** – Entwicklung und Anwendung von CoAgents als produktionsnahe Tools für die Umsetzung von Workflows, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Host, Ilmenau

17.06.2025 – **KI-Stammtisch: Generative KI in der Praxis** – Entwicklung und Anwendung von generativer KI für den Handel, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Host, Ilmenau

24.06.2025 – **Online-Seminar – Booste Dein Business** – Mit KI Prozesse optimieren! Potenziale und Grundlagen für KI-Readiness, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Vortrag, online

21.08.2025 – **Industrieforum „Smarte Fertigung“** – „Retrofit entlang des Produktionsprozesses“, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Erfurt

08.09.2025 – **Auftaktveranstaltung Cross-Cluster Wochen 2025** – „Wandel im Unternehmen gestalten – Zukunft sichern“, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Co-Host, Erfurt

10.09.2025 – **IT-Security-Day Thüringen** – „Für die Zukunft gewappnet: Handlungsempfehlungen und Lösungen“, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Erfurt

23.09.2025 – **edaBarCamp VII** – The 7th Sense of EDA, Workshop, Co-Organisator, Moderation, Böblingen

13.11.2025 – **Experts-MeetUp** – Automatisierung in der Produktion: Kunststofftechnik trifft Sensorik, Ansätze für Forschungskooperationen, *Mittelstand-Digital-Angebot*, Co-Organisator, Vortrag, Geschwenda

11.03.2025 – **embedded world 2025** – embedded world Exhibition & Conference 2025, Branchentreffpunkt für die Embedded-Community, *Messestand*, Nürnberg

11.03.2025 – **KI-Tag für den Mittelstand** – BMW e.V. Thüringen und ITnet Thüringen e.V. im Rahmen der Thüringen-Ausstellung, *Vortrag, Messestand*, Erfurt

02.04.2025 – **UnternehmerInnen-Vormittag** – SaaleWirtschaft e.V., *Vortrag, Messestand*, Rudolstadt

09.04.2025 – **WID 2025** – World Interferometry Day, *Poster, Messestand*, Ilmenau

23.04.2025 – **IT-KOM 2025** – Kontaktmesse der Fachrichtung Angewandte Informatik an der Fachhochschule Erfurt, *Messestand*, Erfurt

07.05.2025 – **InnoCON 2025** – Innovationspolitische Leitveranstaltung des Freistaats Thüringen. Thema „Schlüsseltechnologien: Wegbereiter für die Welt von morgen“, *Messestand*, Ilmenau

08.05.2025 – **Connections 2025** – Job- und Karrieremesse der Hochschule Coburg, *Messestand*, Coburg

18.06.2025 – **Ökofeldtage Canitz** – Treffpunkt für die Landwirtschaft von morgen, *Poster, Demonstratoren*, Canitz

25.08.2025 – **ISSOM 2025** – International Summer School on Microelectronics, *Vorlesung, Messestand*, Hannover

27.08.2025 – **17. Erfurter Technologiedialog** – „Mit dem Digitalen Zwilling in eine zukunftsfähige Produktion“, *Messestand*, Erfurt

28.08.2025 – **Jahreskonferenz ThEx Zukunftswirtschaft** – „Zukunft gestalten – Nachhaltigkeit erleben“, *Messestand*, Jena

22.09.2025 – **Thüringer Maschinenbautag 2025** – Produktion der Zukunft: automatisiert, vernetzt und kollaborativ, *Messestand*, Erfurt

01.10.2025 – **7. Thüringer KI-Forum** – Vernetzung, praktische Anwendbarkeit und Zukunftsfähigkeit von Künstlicher Intelligenz, *Messestand*, Erfurt

21.10.2025 – **elmug4future 2025** – Messtechnik für Life Science: Märkte, Anforderungen und Lösungen, *Vortrag, Messestand*, Jena

28.10.2025 – **inova 2025** – Das Karriereforum an der Technischen Universität Ilmenau, *Messestand*, Ilmenau

12.11.2025 – **TUCconnect 2025** – Die Karrieremesse der Technischen Universität Chemnitz, *Messestand*, Chemnitz

01.12.2025 – **Handwerksfestival „Meister trifft Maschine“** – Tagung und Ausstellung mit Automatisierungs- und Robotiklösungen für das Handwerk, *Messestand*, Erfurt

Hochpräzisions-Labore neu aufgestellt für Forschung bis zum Pikometer; <https://youtu.be/XiQR5vMODg4>

AWARE: Energieeffizientes Edge-KI-Sensorsystem für Monitoring-Anwendungen in der Industrie; <https://youtu.be/Yv-XzoZxICQ> sowie <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7305144446898110464>

ScoreChip: Entwicklung eines Mikrofluidikscanners für PoC-Anwendungen auf Basis von SPAD-Sensoren; <https://youtu.be/OlVMcomHenM>

Medizintechnik-Fachschaften zu Besuch in Erfurt; <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7333125118602235906>

Frohes Fest; <https://youtube.com/shorts/zRJNL3qGUmY> sowie <https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7407412380822999040>

Begutachtete Veröffentlichung

Case Study on Compression of Vibration Data for Distributed Wireless Condition Monitoring Systems, Rick PANDEY¹. Felix GRIMM^{2,3}. Dominik NILLE². Christoph BÖCKENHOFF². Jonathan GAMEZ¹. Sebastian UZIEL¹. Albert DORNEICH². Tino HUTSCHENREUTHER¹. Silvia KRUG^{1,4}. *Applied Sciences* 2025, 15, 12346. DOI: doi.org/10.3390/app152212346. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Balluff GmbH, Zabergäustraße 8, 73765 Neuhausen auf den Fildern, Germany. ³University of Stuttgart, Institute of Smart Sensors (IIS), Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Germany. ⁴Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

Quantization Compensator Network: Server-Side Feature Reconstruction in Partitioned IoT Systems, Isaac Sánchez LEAL¹. Oscar Artur Bernd BERG¹. Silvia KRUG^{1,2}. Eiraj SAQIB¹. Irida SHALLARI¹. Axel JANTSCH^{1,3}. Mattias O’NILS¹. Tomas NORDSTRÖM^{4,5}. *in IEEE Access*, vol. 13, pp. 186488 – 186508, 2025, DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3627072. ¹Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Universität Wien, Christian Doppler Laboratory for Embedded Machine Learning, Institute of Computer Technology, Gußhausstraße 27-29, 1040 Vienna, Austria. ⁴Umeå University, Department of Applied Physics and Electronics, 901 87 Umeå, Sweden. ⁵Research Institutes of Sweden (RISE), Högskolan i Borås, 501 90 Borås, Sverige.

Suitability of Radio Communication Technologies for Smart Orchards Considering Seasonal Effects, Silvia KRUG^{1,2}. Falk EISENREICH¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. 2025 *IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroA-griFor)*, October 28 – 30, 2025, Bologna, Italy. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

www.imms.de/ publ

Out-of-Band Over-The-Air-Update for LoRaWAN-based Sensor Networks using BLE, Florian JUNG¹. Silvia KRUG^{1,2}. Tino HUTSCHENREUTHER¹. *2025 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), October 28 – 30, 2025, Bologna, Italy.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

NPS6D100-A 6D Nanopositioning System with Sub-10 nm Performance in a Ø100 mm x 10 mm Workspace, Steffen HESSE¹. Alex S. HUAMAN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Ludwig HERZOG¹. *Actuators 2025, 14, 361, DOI: doi.org/10.3390/act14080361.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Application of the Expert Design Plan Methodology on an Ultra-Low-Power Sensor Frontend, Lorenz RENNER¹. Ralf SOMMER^{1,2}. Yannick UHLMANN³. *2025 21th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), July 7 – 10, 2025, Istanbul, Turkiye, pp. 1 – 4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD65553.2025.11092185.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Electronic Circuits and Systems Group, P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau, Germany. ³Reutlingen University, Electronics & Drives, Oferdinger Straße 50, 72768 Reutlingen-Rommelsbach, Germany.

Trust is Good, Monitoring is Better: FPGA- & TEE-Based Monitoring for Malware-Detection, Friederike BRUNS¹. Georg GLÄSER². Florian KÖGLER². Jonas LIENKE². Nithin R. NANJUNDASWAMY³. Gregor NITSCHKE³. Behnam R. PERJIKOLAEI⁴. Jörg WALTER⁴. *13th IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability MIMAR2025, July 8 – 10, 2025, Université de Lorraine, France, DOI: doi.org/10.19124/ima.2025.01.25.* ¹Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Ammerländer Heerstraße 114-118, 26129 Oldenburg, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut Systems Engineering für zukünftige Mobilität, Escherweg 2, 26121 Oldenburg, Germany. ⁴OFFIS e.V. Institut für Informatik, Escherweg 2, 26121 Oldenburg, Germany.

151

› Integrierte Sensorsysteme

› Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

› nm-präzise 6D-Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

www.imms.de/publ

TCL: Time-Dependent Clustering Loss for Optimizing Post-Training Feature Map Quantization for Partitioned DNNs, Oscar Artur Bernd BERG^{1,2}. Eiraj SAQIB¹. Axel JANTSCH^{1,2}. Irida SHALLARI¹. Silvia KRUG^{1,3}. Isaac Sánchez LEAL¹. Mattias O'NILS¹. *in IEEE Access*, vol. 13, pp. 103640 – 103648, 2025, DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3579107. ¹Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²Technische Universität Wien, Institut für Computertechnik, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Austria. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Automated Design Methodology for Electromagnetic Energy Harvesters, Bianca LEISTRITZ¹. Ludwig HERZOG¹. *Sensors* 2025, 25, 3358, DOI: doi.org/10.3390/s25113358.

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

Optimized Measurement Methods Evaluating Crosstalk in different SOI Technologies, Björn BIESKE¹. Dagmar KIRSTEN². Michael FREY³. Andreas OTT³. *2025 IEEE 22nd International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Monastir, Tunisia*, 2025, pp. 1315 – 1321, DOI: doi.org/10.1109/SSD64182.2025.10989885. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

²X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Haarbergstraße 67, 99097 Erfurt, Germany. ³Melexis GmbH, Konrad-Zuse-Straße 15, 99099 Erfurt, Germany.

Efficient Inference of parallel partitioned hybrid-Vision Transformers, Oscar Artur Bernd BERG^{1,2}. Eiraj SAQIB². Axel JANTSCH². Mattias O'NILS². Silvia KRUG^{2,3}. Irida SHALLARI². Isaac Sánchez LEAL². *In Proceedings of the 4th International Workshop on Real-time and IntelliGent Edge computing (RAGE '25). Association for Computing Machinery, May 6th, 2025, New York, NY, USA, Article 5, 1 – 6.* DOI: doi.org/10.1145/3722567.3727849. ¹Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, 1040 Vienna, Austria. ²Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

High-Sensitive Demodulator with Built-in Negative Offset Comparator for Passive UHF RFID Tags, Rohit KESHARWANI¹. Andre JÄGER¹. Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. Eric SCHÄFER¹. *2024 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Daytona Beach, FL, USA, 2024, pp. 109 – 112*, DOI: doi.org/10.1109/RFID-TA64374.2024.10965142. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

152 
 > Integrierte Sensordaten
 > Intelligente verteilte Mess- und Testsysteme
 > nm-präzise 6D-Direktantriebe
 > Inhalt
 * Förderung

www.imms.de/
 publ

Jahresbericht
 © IMMS 2025

Quantization-Aware Training for Autoencoder-Based Partitioning of CNNs, Oscar Ar-
tur Bernd BERG^{1,2}. Eiraj SAQIB². Isaac Sánchez LEAL². Axel JANTSCH^{1,2}. Irida SHALLA-
RI². Silvia KRUG^{2,3}. Mattias O’NILS². *2025 IEEE International Conference on Pervasive
Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom
Workshops), March 17 – 21, 2025, Washington DC, DC, USA, pp. 261-266, DOI: doi.
org/10.1109/PerComWorkshops65533.2025.00075.* ¹Technische Universität Wien, Institut für Compu-
tertechnik, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Austria. ²Mid Sweden University, Department of Computer and Electrical
Engineering, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme
gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Vortrag und Posterpräsentation

**Development and validation of a simplified coil model for CFD simulation of a nano-
positioning planar drive system**, Ina NAUJOKAT¹. Ludwig HERZOG¹. Steffen HESSE¹.
Parastoo SALIMITARI¹. *Euspen Special Interest Conference: Precision & Performance
2025, November 18 – 20, 2025, Cranfield University, United Kingdom.* ¹IMMS Institut für Mik-
roelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

**Experimental characterization of thermal disturbances in a 6DOF nanopositioning
system under varying operational conditions**, Parastoo SALIMITARI¹. Steffen HES-
SE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Ludwig HERZOG¹. *Euspen Special Interest Conference:
Precision & Performance 2025, November 18 – 20, 2025, Cranfield University, United
Kingdom.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27,
98693 Ilmenau, Germany.

**Optical detected magnetic resonance (ODMR) of ASi-Sii defects: case of acceptor
indium**, Kevin LAUER^{1,2}. Bernd HÄHNLEIN¹. Mario BÄHR¹. Kai KÜHNLENZ¹. Philipp
KELLNER¹. Dirk SCHULZE². Stefan KRISCHOK². Alexander ROLAPP³. Christian MÖLLER¹.
Thomas ORTLEPP¹. *4th DRD3 week on Solid State Detectors R&D, 10. – 14. November
2025, CERN, Zürich, Schweiz.* ¹CIS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Konrad-Zuse-Str. 14, 99099 Er-
furt, Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Institut für Physik, Weimarer Str. 32, 98693 Ilmenau, Germany. ³IMMS In-
stitut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

153

› Integrierte
Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme

› nm-präzise 6D-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

www.imms.de/
publ

NPS6D200: Long-Range-6D-Nanopositionierung mit interferometrischem Feedback für das Closed-Loop-Regelungssystem, Steffen HESSE¹. *Experten-Tag für Präzisionsmesstechnik*, 28. – 29. Oktober 2025, bei SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau, Germany. ¹IMMS

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

CMOS-basierte Sensorsysteme für die In-vitro-Diagnostik, Alexander HOFMANN¹. Benjamin SAFT¹. *elmug4future, Technologiekonferenz*, 21. – 22. Oktober 2025, Jena, Thüringen. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27,

98693 Ilmenau, Germany.

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Entwicklung kraftgekoppelter Hochpräzisions-Vertikalantriebe, Ludwig HERZOG¹. *18. Jahrestagung „Feinwerktechnische Konstruktion“*, 25. – 26. September 2025, Dresden, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik-

und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Demonstration einer automatisierten Bewässerungssteuerung für den Obstbau, Falk EISENREICH¹, *Brandenburger Kernobsttag Müncheberg, Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau und Arboristik e.V. (LVGA)*, 13. September 2025, Peter-Lenné-Weg 1, 14979 Großbeeren, Brandenburg, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Before It Hits the Chip: A Gentle Introduction to Mixed-Signal IC Verification, Martin GRABMANN¹. *ISSOM 25, International Summer School on Microelectronics*, 25. – 29. August 2025, Leibniz-Universität Hannover, Hannover, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelek-

tronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Klimatische Änderungen am Standort Erfurt und deren Auswirkungen auf die Bewässerung von Obstbäumen, Silvia KRUG^{1, 2}. *Thüringer Haselnusstag*, 20. August 2025, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum für Gartenbau (LVG), Erfurt, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-

Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Demonstration einer automatisierten Bewässerungssteuerung für den Obstbau, Falk EISENREICH¹. 2. Thüringer Haselnusstag, 20. August 2025, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum für Gartenbau (LVG), Erfurt, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

- › *Integrierte Sensorsysteme*
- › *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
- › *nm-präzise 6D-Direktantriebe*
- › *Inhalt*
- * *Förderung*

Energy-efficient Sensor Systems for Environmental Monitoring, Marco GÖTZE¹.
AlqPlantPhysio-Workshop, 16. Juli 2025, Universität Konstanz, Germany. ¹IMMS Institut für
Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

HF-Messtechnik 2: Klein gegen Groß – nanoVNA: messen und kalibrieren, Björn BIESKE¹. *HAM Radio, Internationale Amateurfunk-Ausstellung, 27. – 29. Juni 2025, Friedrichshafen, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Demonstration einer automatisierten Bewässerungssteuerung für den Obstbau, Falk
EISENREICH¹. *Thüringer Kirschentag 2025, 25. Juni 2025, Thüringer Landesamt für
Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau (LVG),
Erfurt.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693
Ilmenau, Germany.

Demonstration einer automatisierten Bewässerungssteuerung für den Obstbau,
Silvia KRUG¹, *Öko Feldtage 2025 auf dem Wassergut Canitz, 18. – 19. Juni 2025, 04808
Thallwitz, Sachsen, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige
GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany

Datenaustauschaspekte entlang der Wertschöpfungskette Obst im Projekt MIRO, www.imms.de/
 Silvia KRUG¹. *Bernburger Innovationstage, 18. – 19. Juni 2025, Hochschule Anhalt, publ*
Bernburg-Strenzfeld. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehren-
 bergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Wissensbasierte Automatisierung im Analogentwurf – Expert Design Plans im Einsatz für energieeffiziente Sensorfrontends, Ralf SOMMER^{1,2}. Lorenz RENNER¹. Till MOL-

DENHAUER³. *edaWorkshop 2025, 12. – 13. Mai 2025, Dresden, Germany.* ¹IMMS Institut

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

²Technische Universität Ilmenau, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Elektronische Schaltungen

und Systeme, P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau, Germany. ³Reutlingen University, Electronics & Drives, Oferdinger Straße

50, 72768 Reutlingen-Rommelsbach, Germany.

A method for dynamic interferometric characterization of air bearings for nanopositioning stages, Steffen HESSE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Alex HUAMAN¹. Parastoo SALIMITARI¹. Ludwig HERZOG¹. *Internationales Wissenschaftliches Symposium zum Welttag der Interferometrie, 8. – 9. April 2025, Technische Universität Ilmenau, Ilme-*

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

Ilmenau, Germany.

NeuroSenseEar: Neuromorphic acoustic sensing for the high-performance hearing aids of tomorrow, Claudia LENK¹. Yuxuang HE². Alirheza HOSSEINI². Fang ZHENG². Aayushmi MUKHERJEE². Jakob ABEßER². Lina JAURIGUE². Kathy LÜDGE². Alexander RAAKE². Tzvetan IVANOV². Iko PIEPER². Paul FRITZSCHE³. Jan KÜLLER³. Daniel BEER³. Stefan SCHÖNEICH⁴. Manuela NOWOTNY⁴. Sebastian UZIEL⁵. Tino HUTSCHENREUTHER⁵. Martin ZIEGLER⁶. *DAGA 2025, 51st Annual Meeting on Acoustics, March 17 – 20, 2025, Copenhagen, Denmark, DOI: doi.org/10.71568/dasdag2025.523.* ¹University Ulm, 89081 Ulm,

Germany. ²Technische Universität Ilmenau, P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau, Germany. ³Fraunhofer-Institut für Digitale

Medientechnologie IDMT, Ehrenbergstr. 31, 98693 Ilmenau, Germany. ⁴Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1,

7743 Jena, Germany. ⁵IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstra-

ße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ⁶Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Christian-Albrechts-Platz 4, 24118 Kiel, Germany.

A virtual metrology frame test setup using fiber interferometric sensors, Davi Anders BRASIL¹. Steffen HESSE¹. Ludwig HERZOG¹. Thomas FRÖHLICH². Thomas KISSINGER². *22nd International Metrology Congress (CIM 2025), March 11-14, 2025, Lyon, France.*

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

Germany. ²Technische Universität Ilmenau, Department for Mechanical Engineering, Institute for Process Measurement

and Sensor Technology, P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau, Germany.

Point-of-care solution for rapid monitoring of cytokine release syndrome by chemiluminescence cytokine detection on sensitive Single Photon Avalanche Diodes (SPAD)

sensors, A. LOPES¹. P. SCHOLZ¹. S. ALLELEIN¹. A. KÖLSCH¹. E. SCHÄFER². M. WIENER². B. SAFT². N. ISSERSTEDT-JOHN³. D. KUHLMEIER¹. 18. *Research Festival for Life Sciences*, 30. Januar 2025, Leipzig.

¹Fraunhofer-Institut für Zelltherapie und Immunologie IZI, Perlickstraße 1, 04103 Leipzig, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³microfluidic ChipShop, Stockholmer Str. 20, 07747 Jena, Germany.

Sortenversuche vor dem Hintergrund des Klimawandels: Wie kann der Erfahrungsaustausch zwischen Akteuren verbessert werden?, Silvia KRUG^{1, 2}. *Mitteldeutscher Digitaltag*, 21. Januar 2025, Leipzig.

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

Was braucht es, um die Sorteneignung vor dem Hintergrund klimatischer Änderungen zu beurteilen?, Silvia KRUG¹. *Thüringer Obstbautag*, 16. Januar 2025, Erfurt.

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

Fachartikel in Zeitschriften

Sensor for Picometer-Scale Positioning in Vacuum – Demonstration of an IDS3010-Based Ultra-Precise Closed-loop Linear Drive System, Markus ØVERLAND¹. Gregor SCHINDLER¹. Alex S. HUAMAN². Ludwig HERZOG². *Technical Note: Motion & Sensing 15, attocube systems GmbH. V10/25. PDF: [marketing.attocube.com/action/attachment/4434/f-ed569c35-99d8-435b-b87f-8f6a30a97ca2/1/-/-/-/TechNote_MAS-15_Sensor for Picometer-Scale Positioning in Vacuum.pdf](https://marketing.attocube.com/action/attachment/4434/f-ed569c35-99d8-435b-b87f-8f6a30a97ca2/1/-/-/-/TechNote_MAS-15_Sensor%20for%20Picometer-Scale%20Positioning%20in%20Vacuum.pdf)*.

¹attocube systems GmbH, Eglfinger Weg 2, 85540 Haar, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Smartes Maschinenmonitoring – Anomalien mit Edge-KI detektieren, Sebastian UZIEL¹. *in elektroniknet.de*, 11. November 2025, www.elektroniknet.de/automation/industrie-40-iiot/anomalien-mit-edge-ki-detektieren.228572.html und *in Markt & Technik, Trend Guide Industrie 4.0/IIoT/KI 2025, S. 37 – 40, ePaper: wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/MUT*.

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

Erteiltes Patent

Verfahren und Sensoranordnung zum Überwachen einer Funktion eines Bauteiles einer Maschine, Rick PANDEY, DE 10 2024 100 703 B3

- Das **NeAlxt**-Projekt wurde im Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizont Europa“ der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung HORIZON-JU-Chips-2024-1-IA Nr. **101194172** gefördert. Die dargestellten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht zwingend die Ansichten der Europäischen Union oder des CHIPS JU wider. Weder die Europäische Union noch die zuständige Fördereinrichtung können dafür haftbar gemacht werden. Das Projekt wird außerdem von seinen Mitgliedstaaten Frankreich, Italien, Tschechien, Deutschland, Schweden, Dänemark, Griechenland, Spanien, den Niederlanden, Portugal, der Türkei und der Schweiz unterstützt. Das IMMS wird im Projekt NeAlxt vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter der Fördernummer **16MEE0590T** sowie vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Landwirtschaft und Ländlichen Raum unter dem Kennzeichen **2025 ECS 0004** gefördert.



Kofinanziert von der Europäischen Union

Gefördert durch:



Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Freistaat Thüringen



Ministerium für Wirtschaft, Landwirtschaft und Ländlichen Raum

- Das Projekt **FluoResYst** wurde im Rahmen des Förderprogramms Photonik-Forschung vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert (Förderkennzeichen **13N15807**).
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **HoLoDEC** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen **16ME0703** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.
- Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben **ProQuaOpt** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen **01IS22019E** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.
- Das Projekt **Waldmonitor** wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) über den Projektträger Forschungszentrum Jülich (PTJ) unter dem Kennzeichen **03WIR3607A** gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

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

- Die Arbeiten des IMMS als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ wurden im „**Mittelstand-Digital-Zentrum Ilmenau**“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen **01MF21008C** gefördert.

Mittelstand-Digital

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

160

> Integrierte
Sensorsysteme
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> nm-präzise 6D-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

- Das Projekt „**SecureTSN** – Intelligente Absicherung echtzeitfähiger und interoperabler Kommunikationsnetzwerke“ wurde unter dem Kennzeichen **01IF23657N** durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG IGF

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

- Die Förderung des Vorhabens **EXPRESS** erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Projektträger-schaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Förderung der Digitalisierung in der Landwirtschaft mit dem Förderkennzeichen **FKZ 28DE102D18**.
- Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Experimentierfeld zur smarten datengetriebenen Vernetzung und Digitalisierung in der Landwirtschaft“ (**EXPRESS.smart**) wurde mit Mitteln vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) unter dem Kennzeichen **28DE405E23** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektträger



Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

www.imms.de/funding

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

Gefördert durch

DFG

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Jahresbericht

© IMMS 2025

- Der „InSignA Innovation HUB (**iHUB**)“ ist ein vom Land Land Thüringen getragenes Projekt, mit dem (Aus-)Gründungen im Bereich intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme in Thüringen, aber auch darüber hinaus, gefördert werden.

- Das Forschungsvorhaben **thurAI** wurde durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen **2021 FGI 0008** gefördert.
- Die interne Forschungsgruppe **TIRELESS** wurde durch den Freistaat Thüringen gefördert.
- Die Forschungsgruppe „Applikation KI-basierter virtueller Sensorik zur effektiven Präzisionssteigerung von Positioniersystemen – **VirtuSen**“ wurde vom Freistaat Thüringen gefördert.



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

- Das Verbundprojekt „**ERA-AMR** – Entwicklung und Realisierung optimierter Antriebssysteme für Autonome Mobile Roboter“ wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund Dynamik unter der Vorhabennummer **2024 VDY 0045** gefördert und über die Europäische Union kofinanziert.
- Das Verbundprojekt „Inline-Reinigungsverfahren für Waschmedien in harzbasierten 3D-Druckverfahren“ (**Inline3D**) wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund unter der Vorhabensnummer **2024 VFE 0113** gefördert und über die Europäische Union kofinanziert.
- Das Verbundprojekt „Motion Controller für die Nano-Positionier-Plattform NPS6D100“ (**MC_NPS**) wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund Dynamik unter der Verbundvorhabensnummer **1007528** gefördert und über die Europäische Union kofinanziert, das Teilvorhaben des IMMS „Portierung und Anpassung der Regelungssoftware des NPS6D100 an die NMM-DSP-Steuerung von SIOS“ unter der Nummer **2025 VDY 0050**.

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



- Das Verbundprojekt „Entwicklung und Integration von Graphen-Sensorik für die Analyse von Mikroschadstoffen in Kombination mit Trennsäulen- und Massenspektrometer-Technologien“ (**MikroGraph**) wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund gefördert und über die Europäische Union kofinanziert unter der Verbundnummer **1003625**, das Teilprojekt „Entwicklung elektronischer Auswerteverfahren für die Signalerfassung von Graphen-Sensorik“ unter der Vorhabensnummer **2024 VFE 0114**.
 - Die Interdisziplinäre Partnerschaft für innovative Spektroradiometer aus Thüringen (**PANDIA**) wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund unter der Verbundvorhabensnummer **1004537** gefördert, das Thema „Entwicklung und Erforschung von Zeilensensor-ICs für Spektroradiometer“ des IMMS unter der Vorhabensnummer **2025 VFE 0027**.
 - Das Verbundprojekt „Drahtloses Vibrationsmesssystem für eine ressourcenschonende Betonsteinproduktion“ (**Wireless Accel**) wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund unter der Verbundvorhabensnummer **1004825** gefördert und über die Europäische Union kofinanziert, das Teilvorhaben des IMMS „Hard- und Softwareentwurf des Sensorknotens sowie Entwicklung des Kommunikationsprotokolls zur Datenübertragung“ unter der Nummer **2025 VFE 0026**.
-
- Die Forschungsgruppe **Multi-Interact** wurde durch den Freistaat Thüringen und aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds Plus (ESF+) unter dem Kennzeichen **2024 FGR 0070** gefördert.

www.imms.de/
funding



6D 6 Degrees of Freedom, 6 Freiheitsgrade	I²C Inter-Integrated Circuit, Schnittstelle
AC Alternating Current, Wechselstrom	IC Integrated Circuit, integrierte Schaltung
ADC Analog-to-Digital Converter, Analog-Digital-Wandler	IIP Intelligent-IP
AFE Analog-Frontend	IoT Internet of Things, Internet der Dinge
ASIC Application-specific Integrated Circuit, anwendungsspezifische integrierte Schaltung	LFA Lateral Flow Assay, Streifentest
BLE Bluetooth Low Energy	KI künstliche Intelligenz
CMOS Complementary Metal-Oxide Semiconductor, komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter	KMU kleine und mittlere Unternehmen
CFD Computational Fluid Dynamics, Modell für numerische Strömungsmechanik	NPS Nanopositioniersystem
CNN Convolutional Neural Network, faltendes neuronales Netzwerk	PCB Printed Circuit Board, Leiterplatte
CSV Comma-Seperated Values, kommagetrennte Werte	PINN physikalisch informiertes neuronales Netz
CTW Contact-Wall-Modul, Kontaktwandmodul	QSPI Quad Serial Peripheral Interface, vierfache serielle Peripherieschnittstelle
DC Direct Current, Gleichstrom	RAM Random-Access Memory, Arbeitsspeicher
DOFs Degrees of Freedom, Freiheitsgrade	SPAD Single-Photon Avalanche Diode, Einzelphotonendetektor
EDA Electronic Design Automation, rechnergestützte Entwurfsautomatisierung	SRAM Static random-access memory, statischer flüchtiger Speicher
EDP Expert-Design-Plan	TSN Time-sensitive Networking
FD Floating Diffusion, Ladungsspeicher	TSV Through-silicon via, Silizium-Durchkontaktierung in der Halbleitertechnik
FFT Fast-Fourier-Transformation	ULP Ultra-Low Power
FPGA Field Programmable Gate Array, vor Ort programmierbare Logik-Gatter-Anordnung	

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:

Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt,
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 an-
onymisierte Analyse und die Verbesse-
rung 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 aus-
schließlich deren Betreiber. Wir haben
keinerlei Einfluss auf die aktuelle und
zukünftige Gestaltung und auf die Inhal-
te der verknüpften Seiten.

Lektorat

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
› nm-präzise 6D-
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