

IMMS

JAHRESBERICHT

2024



Leitbild und strategische Schwerpunkte

Mission

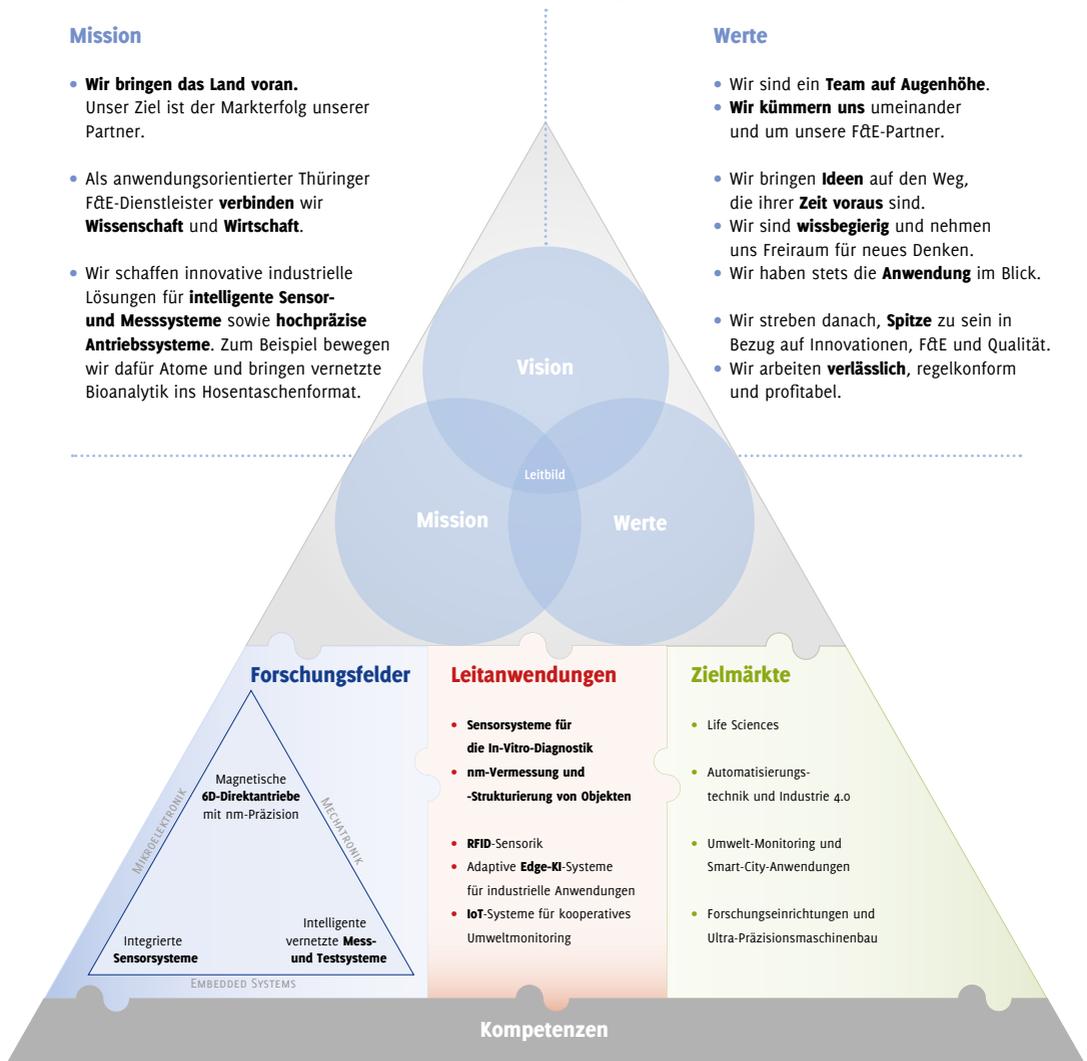
- **Wir bringen das Land voran.** Unser Ziel ist der Markterfolg unserer Partner.
- Als anwendungsorientierter Thüringer F&E-Dienstleister **verbinden** wir **Wissenschaft** und **Wirtschaft**.
- Wir schaffen innovative industrielle Lösungen für **intelligente Sensor- und Messsysteme** sowie **hochpräzise 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.



Inhalt

2 Leitbild und strategische Schwerpunkte

4 Vorwort

6 Interne Forschungsgruppen am IMMS

11 Kooperation mit der TU Ilmenau

13 Stimmen aus Industrie und Forschung

17 Nachwuchsförderung am IMMS

24 Stimmen aus dem IMMS

28 Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

30 **Highlights 2024** im Forschungsfeld

Integrierte Sensorsysteme

34 **Fachartikel:** Design, Architektur und Modellierung – vertrauenswürdig!

39 Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

41 **Highlights 2024** im Forschungsfeld

Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

50 **Fachartikel:** Aufwand senken, Nutzen steigern: Anomalie-Detektion mit Edge-KI und unüberwachtem Lernen für smartes Maschinenmonitoring

62 **Fachartikel:** Effizientes Zusammenführen heterogener Daten für übergreifende Analysen in der Landwirtschaft und darüber hinaus

74 Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

75 **Highlights 2024** im Forschungsfeld

Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

85 **Fachartikel:** NPS6D200 – 6D-geregeltes Direktantriebssystem für die nanometergenaue Positionierung im Verfahrbereich von \varnothing 200 mm x 25 mm

92 **Fachartikel:** Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester

98 Zahlen, Strukturen und Belege

99 Das IMMS in Zahlen

101 Organisation

103 Lehrangebot

103 Veranstaltungen

108 Publikationen

117 * Förderung

119 Abkürzungen

120 Impressum, Datenschutz



Ralf Sommer und Martin Eberhardt. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

2024 haben wir unsere internen Forschungsgruppen „TIRELESS“, „KI“ und „NextGen-PoS“ abgeschlossen. Diese vom Freistaat Thüringen finanzierten Forschungsgruppen sind ein wichtiger Baustein zur Weiterentwicklung und Umsetzung der strategischen Ziele des IMMS sowie für Transferprojekte mit Unternehmen. In ihnen werden Grundlagen bearbeitet sowie neue Forschungs- und Entwicklungsprojekte für die langfristige strategische Ausrichtung des Instituts angestoßen. Die Ergebnisse stellen wir Ihnen in diesem Bericht vor. Wir freuen uns, dass der Freistaat Thüringen auch ab 2025 mit „VirtuSen“ weiterhin IMMS-Forschung durch eine interne Forschungsgruppe fördert. Dort werden sich Nachwuchskräfte auf Promotionsthemen zur Applikation KI-basierter virtueller Sensorik zur effektiven Präzisionssteigerung von Positionierungssystemen fokussieren können.

www.imms.de/virtusen

Zu unserer Freude wurde einer unserer Mitarbeiter nicht nur mit einer iENA-Silbermedaille für sein Patent ausgezeichnet, er hat außerdem seine im Graduiertenkolleg NanoFab entwickelte Dissertation zu einem neuen Regelungskonzept zur sub-nanometergenauen Positionierung erfolgreich verteidigt.

2024 haben wir intensiv genutzt, um wichtige Meilensteine in unserer Forschung zu erreichen und damit die inhaltliche Ausrichtung unserer drei strategischen Forschungsfelder „Integrierte Sensorsysteme“, „Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme“ und „Magnetische 6D-Direktantriebe mit nm-Präzision“ zu verfeinern. Eine Auswahl beleuchtet dieser Bericht. So haben wir u.a. Lösungen zur Anomalie-Detektion mit Edge-KI und unüberwachtem Lernen für smartes Maschinenmonitoring realisiert, die für Anwender den Aufwand senken und den Nutzen steigern; wir haben Methoden für das Design, die Architektur und die Modellierung vertrauenswürdiger elektronischer Systeme entwickelt; wir haben Wege gefunden, um heterogene Daten für übergreifende Analysen in der Landwirtschaft und darüber hinaus effizient zusammenzuführen; wir haben ein in sechs Dimensionen geregeltes Direktantriebssystem für die nanometergenaue Positionierung in einem Verfahrbereich von 200 mm Durchmesser auf 25 mm Höhe entwickelt und die Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester weiterentwickelt.

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

Unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken wir für ihr Engagement, ihre kreativen Ideen und ihre Leistung; dies führt zu den innovativen Lösungen, die unsere Partner schätzen. Beispiele hierfür finden Sie im Bericht. Wir wünschen Ihnen ein spannendes Leseerlebnis.

Ralf Sommer
Wissenschaftlicher Geschäftsführer

Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

5

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

www.imms.de/forschung

Ein wichtiger Baustein zur Weiterentwicklung und Umsetzung der strategischen Ziele des IMMS sind dessen interne Forschungsgruppen, die über die institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen finanziert werden. Sie arbeiten an grundlegenden Themen, entwickeln innovative Technologien und sind entscheidend für die Erweiterung und den Aufbau von neuem Know-how in den Bereichen integrierte Sensorsysteme, intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme sowie den Hochpräzisionsantrieben. Sie tragen mit zum Auf- und Ausbau der wissenschaftlichen Basis des IMMS bei und ermöglichen es, auf Herausforderungen schnell und innovativ zu reagieren und so für die Zukunft gerüstet zu sein. Sowohl diese Bearbeitung von Grundlagen als auch das Anstoßen neuer Forschungs- und Entwicklungsprojekte ist für die langfristige strategische Ausrichtung des Instituts maßgeblich. Die Unabhängigkeit von Förderausschreibungen in Forschungsgruppen ermöglicht es, langfristig und kontinuierlich an wichtigen Themen zu arbeiten.

2024 wurden wichtige Ziele in den nachfolgend umrissenen Forschungsgruppen TI-RELESS, NextGenPos und KI erreicht und der Grundstein für Transferprojekte mit Unternehmen gelegt. Zudem wurde die Basis für die nächste, ab 2025 arbeitende Forschungsgruppe VirtuSen geschaffen. In dieser forschen Promovendinnen und Promovenden an virtueller Sensorik und KI, um Störeinflüsse auf komplexe mechatronische Systeme wie Hochpräzisionsantriebe orts aufgelöst erfassen und kompensieren zu können.

Interne Forschergruppe TIRELESS* (02/24-02/25)

Ziel der Forschungsgruppe TIRELESS ist es, die Ergebnisse und neuen Erkenntnisse aus den Projekten MEDIKIT, Ovutinin und SensInt zur zeitaufgelösten Fluoreszenzmessung zusammenzuführen und einen neuen Lock-in-Pixel-Sensor zum Auslesen von Lateral-Flow-Streifentests zu entwickeln.

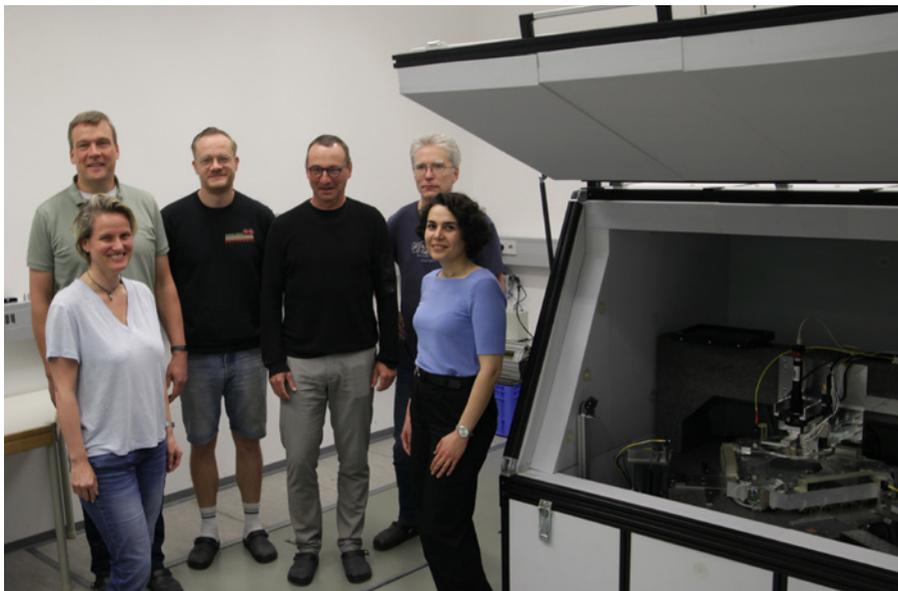
Fluoreszenzfarbstoffe werden u.a. in der In-vitro-Diagnostik als Marker eingesetzt, da sie sich leicht von Hintergrund- und Störsignalen unterscheiden lassen. Für viele diagnostische Fragen sind quantitative Aussagen zu Konzentrationen und Verhältnissen notwendig. Gängige Nachweisesysteme auf Streifentest-Basis mit klassischen Farbstoffpartikeln wie Gold und Streifentest-Lesegeräten sind dafür nicht empfind-



Vertreter der Forschergruppe TIRELESS mit dem entwickelten Chip mit optimierter Lock-in-Pixel-Technologie, hier auf einer Platine für Anwendungstests in einem Lateral-Flow-Teststreifen-Lesegerät. Foto: IMMS.

lich genug. Neue Teststreifen-Plattformen mit Fluoreszenzfarbstoffen wie Europium bieten weitaus höhere Ausleseempfindlichkeiten. Durch das in MEDIKIT erstmals in einem Chip realisierte und in Ovutinin und SensInt weitergeführte Lock-In-Prinzip werden aufwändige optische Aufbauten in Fluoreszenz-Teststreifen-Lesegeräten obsolet. Der Fluoreszenzfarbstoff wird dabei durch eine Lichtquelle optisch angeregt und die emittierten Photonen werden von dem Sensor-Chip detektiert, nachdem das Anregungslicht abgeklungen ist. Das Emissionslicht kann über mehrere Beleuchtungszyklen akkumuliert werden. Dadurch lassen sich selbst sehr schwache Fluoreszenzen quantitativ erfassen und somit höhere Empfindlichkeiten des Sensors erreichen.

In der Forschungsgruppe TIRELESS wurde erstmalig auch das Contact-Wall-Modul der X-FAB eingesetzt, dessen Einfluss erforscht und durch eine optimierte Lock-in-Pixel-Technologie sowie eine verbesserte Lichtquelle eine höhere Sensitivität bei der Fluoreszenzbildgebung erreicht.



Teil der internen Forschungsgruppe NextGenPos mit dem entwickelten Antriebssystem NPS6D200 mit implementiertem Laser-Fokus-Sensor. Foto: IMMS.

Interne Forschungsgruppe NextGenPos^{3*} (01/23-12/24)

Die Forschungsgruppe „Next Generation Positioning – NextGenPos“ widmet sich der Vorlauforschung zur Entwicklung magnetischer 6D-Direktantriebe mit höchster Präzision mit dem Ziel, derartige Positioniersysteme für den Einsatz in der nanometergenauen Vermessung und -Strukturierung von Objekten zu qualifizieren und zu etablieren. In der nunmehr abgeschlossenen Phase 3 konzentrierten sich die Arbeiten 2023 und 2024 dabei auf die systematische Charakterisierung und Verbesserung der Positionierperformance wie auch auf die Weiterentwicklung der Gesamtfunktionalität in Richtung robuster industrieller Applikation. Neben dem bereits in Phase 2 entwickelten und in diesem Jahresbericht in einem Fachartikel beschriebenen NPS6D200¹ wurde ein neuartiges 6D-Nanopositioniersystem für einen kleineren Verfahrbereich von \varnothing 100 mm x 10 mm realisiert und als Forschungsplattform für die verschiedenen Detailuntersuchungen eingesetzt.

Zum NPS6D200-
Fachartikel

¹ NPS6D200 – A Long Range Nanopositioning Stage with 6D Closed Loop Control, Steffen Hesse, Alex Huaman, Michael Katzschmann, Bianca Leistriz, Ludwig Herzog. Appl. Sci. 2024, 14, 6972. DOI: doi.org/10.3390/app14166972. IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany

So wurden anhand des \varnothing 200 mm x 25 mm großen Systems (NPS6D200) ein Laser-Fokus-Sensor als hochempfindliches Antastsystem erfolgreich implementiert und damit erstmals die volle Funktionalität als nanometergenau messendes Gesamtgerät umgesetzt. Darüber hinaus wurden mittels dieses Systems In-situ-Methoden zur Verbesserung der Maschinenmetrologie erarbeitet sowie eine systematische Analyse des thermischen Verhaltens mit einer Bewertung der verschiedenen thermischen Störeinflüsse durchgeführt.

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

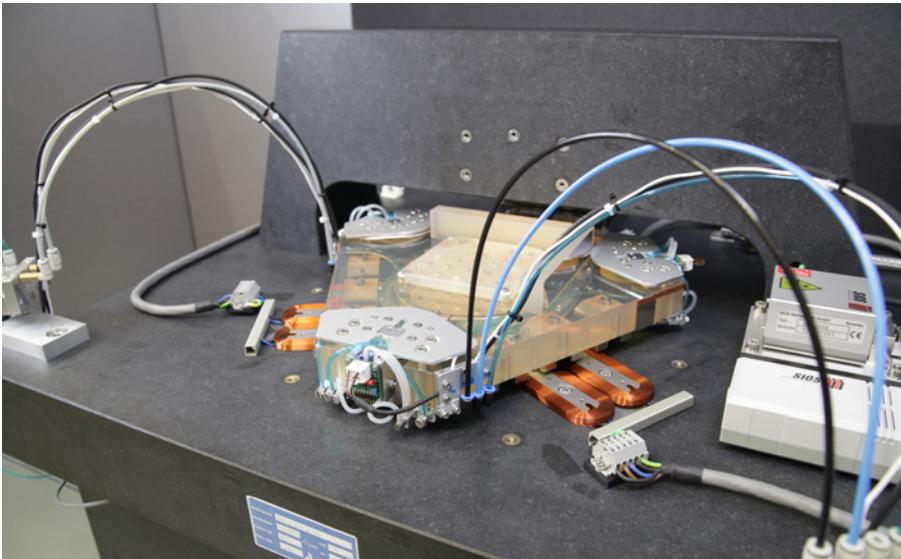
Anhand des neu realisierten NPS6D100-Demonstrators wurde neben der Performance-Optimierung und der Untersuchung ortsabhängiger Effekte vor allem der nanometergenaue Betrieb derartiger integrierter Mehrkoordinatenantriebe mittels industrieller Standard-Steuerungshardware untersucht.

> Inhalt
* Förderung

In der Gesamtbetrachtung lieferte die Forschungsgruppe wertvolle Ergebnisse zu den verschiedenen Detailspekten und legte so die Basis für weiterführende Forschungsprojekte am IMMS wie das Graduiertenkolleg „NanoFab“ und für die direkt anknüpfende Forschungsgruppe „VirtuSen“. Die realisierten 6D-Nanopositioniersysteme stellen als komplexe Technologiedemonstratoren vielseitige Untersuchungsplattformen für diese bereits laufenden und auch für zukünftige Forschungsvorhaben des IMMS auf dem Gebiet der Nanopositionierung dar.

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

Neuartiges 6D-Nanopositioniersystem für einen kleineren Verfahrbereich von \varnothing 100 mm x 10 mm. Es wurde in der Forschungsgruppe NextGenPos realisiert und als Forschungsplattform für die verschiedenen Detailuntersuchungen eingesetzt. Foto: IMMS.



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-XzoZxICQ>

- > Integrierte
Sensorsysteme
- > Intelligente ver-
netzte 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.

Interne Forschungsgruppe KI* (04/21-12/24)

In der Forschungsgruppe KI wurden Ansätze zur Datenvorverarbeitung und KI-Algorithmen entwickelt, deren Anwendungen insbesondere in der Überwachung und Analyse industrieller Prozesse sowie in der Aufnahme und Verarbeitung digitaler Biomarker gesehen werden.

KI und Machine Learning können in der Industrie die Effizienz steigern und viel Zeit einsparen – aber auch viel Zeit kosten, bis sie einsatzbereit sind. Um diesen Initialaufwand deutlich zu senken, hat das IMMS Methoden entwickelt und diese in zwei Demonstratoren implementiert. Für beide Szenarien konnte gezeigt werden, dass nicht nur ein schneller Einsatz von KI-basierten Monitoring-Lösungen möglich ist, sondern dieser auch ohne Cloud-Zugang funktioniert und sich somit schlanke Monitoring-Anwendungen ableiten lassen. Ergebnisse sind im Detail in einem Fachartikel in diesem Jahresbericht beschrieben.

Zum
KI-Fachartikel

Jahresbericht

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 2024 hat das IMMS mit zahlreichen Fachgebieten in den Bereichen Elektro- und Informationstechnik, Maschinenbau, Informatik und Automatisierung sowie Mathematik wissenschaftliche Projekte und Fragestellungen bearbeitet. Gleichzeitig ist das IMMS stark mit der Industrie vernetzt. Zur Entwicklung international erfolgreicher Innovationen für Gesundheit, Umwelt und Industrie ist es ebenso in regionale und nationale Innovationsnetzwerke eingebunden wie in industrielle Cluster. Die Nutzung und Bündelung technologischer Kompetenzen und die Entwicklung gemeinsamer Marktstrategien liefern für die Forschungstätigkeit des Instituts und der TU Ilmenau wertvolle Praxisimpulse.

Ausgewählte gemeinsame Projekte

ProQuaOpt*: Optimierung des Spritzgießprozesses durch KI für mehr Effizienz

Um KI-Methoden für die automatisierte Produktivitäts- und Qualitätsoptimierung des Spritzgießprozesses zu erschließen, wird 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 entwickelt 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](#)

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](#)

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 ver-
netzte 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](http://www.imms.de/nanofab)

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

Gemeinsame Nachwuchsförderung

Das IMMS ergänzt nicht nur die Lehre an der TU durch umfangreiche Praxisangebote. Darüber hinaus engagieren sich Prof. Sommer und Prof. Töpfer mit Lehrveranstaltungen in der Grundlagenausbildung und im Masterstudium. Das IMMS fördert die Motivation und Ausbildung der Studentinnen und Studenten durch seine praktischen und industrienahen Angebote u.a. durch zahlreiche Themen für Praktika.

Jahresbericht
© IMMS 2024

STIMMEN AUS INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Alle Referenzen: www.imms.de/ref

Im Projekt VE-ARIS
entwickelter Demonstrator zur Validierung
von Wasserzeichen als
Kopierschutz im Chip-
entwurf.

Foto: IMMS.

Das Projekt VE-ARIS wurde 2024 durch das
Bundesministerium für Bildung und Forschung
unter dem Kennzeichen 16ME0242 gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

„iC-Haus GmbH ist ein führender deutscher Hersteller von anwendungsspezifischen integrierten Schaltkreisen (ASICs) mit 40-jähriger Erfahrung im Chip-Entwurf für industrielle, medizinische und Automotive-Lösungen.

Im Rahmen unseres Förderprojekts VE-ARiS suchten wir nach einer Lösung, um Fälschungen von Chips zu erkennen und zu verhindern. Durch eine erfolgreiche Partnerschaft und Kooperation konnten wir neue Methoden zum Kopierschutz auf Chip-Ebene erarbeiten. Diese werden jetzt direkt in die Praxis umgesetzt und erschweren den Nachbau und schützen gegen Plagiate auf Systemebene.

Das IMMS hat zu dieser Lösung beigetragen, indem es neue Verfahren entwickelte, um Chips mit einem Wasserzeichen zu versehen. Ein Demonstrator wurde gemeinsam mit allen Partnern des Projekts aufgebaut, um die Funktionalität und Effizienz der entwickelten Mechanismen zu testen.

Die Besonderheit des IMMS-Beitrags lag in der Entwicklung innovativer Verfahren zur Chip-Sicherung. Wir haben das IMMS in unser Projekt eingebunden, da wir aufgrund unserer langjährigen und erfolgreichen Zusammenarbeit in anderen Projekten wie KI-EDA und FluoresYst von der Expertise und Zuverlässigkeit des Institutes überzeugt sind.

Die Zusammenarbeit mit dem IMMS war sehr erfolgreich und effektiv. Durch den Austausch von Know-how und Ressourcen konnten wir gemeinsam eine Lösung entwickeln, die gestellte Vorgaben erfüllte und sogar übertroffen hat. Wir schätzen das Ergebnis und die Art der Zusammenarbeit sehr und freuen uns auf weitere gemeinsame Projekte in Zukunft.“



Dr. Heiner Flocke, Geschäftsführer der iC-Haus GmbH. Foto: iC-Haus GmbH.



Mirjam Mantel, Research & Predevelopment Mechatronic Systems & System Integration, Siemens AG. Foto: Stefan Schmerold, blende11.

„Wir sind als Siemens Forschungs- und Entwicklungsabteilung im Bereich Mechatronische Systeme und Leistungselektronikkomponenten in der Erprobung neuer Technologien tätig. Unsere gemeinsame Arbeit mit dem IMMS im Projekt VE-VIDES war ein wichtiger Aspekt für unsere Forschung und Entwicklung. Gemeinsam konnten wir einen am IMMS entwickelten RISC-V-basierten ASIC zur Auswertung von Kraftsensoren einsetzen. Das IMMS brachte seine Expertise im Entwurf vertrauenswürdiger Design-Strukturen ein und führte die Abstimmung zwischen den Partnern, um eine nahtlose Integration der Arbeiten im Konsortium zu gewährleisten.“

Die enge Kooperation mit dem IMMS war geprägt von einer praxisnahen und anwendungsorientierten Herangehensweise. Durch diese Zusammenarbeit konnten wir das volle Potenzial des gemeinsamen Förderprojekts ausschöpfen und ein erfolgreiches Ergebnis erzielen, welches durch einen System-Demonstrator nachgewiesen wurde.

Die Partnerschaft hat unsere Erwartungen übertroffen und wir schätzen die Ergebnisse als sehr erfolgreich ein. Die Kooperation mit dem IMMS war nicht nur für das Projekt selbst, sondern auch für potenzielle zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bedeutend.

Wir sehen den Austausch und die Zusammenarbeit mit dem IMMS als wichtigen Schritt, um innovative Lösungen in der vertrauenswürdigen Elektronik zu entwickeln.“

„Die Firma seioTec ist ein junges Thüringer Hightech-Unternehmen, welches industrielle IoT- und Edge-Lösungen anbietet. Dabei kommt zunehmend KI zum Einsatz. Zentrale Herausforderung vieler datengetriebener und KI-basierter Applikationen in der Industrie ist die Erfassung und echtzeitnahe Verarbeitung von Sensor- und Prozessdaten. Hochfrequente Schwingungs- und Ultraschall-daten bieten dabei große Potenziale für verschiedene Anwendungsfälle, stellen aber hohe Hürden bei der gerätetechnischen Umsetzung dar.



Frank Seiferth, Managing Director seioTec GmbH. Foto: Christopher Schmid.

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

Der InSignA Innovation Hub (iHUB) war daher für seioTec eine ideale Möglichkeit, zusammen mit dem Forschungs- und Entwicklungspartner IMMS nach innovativen Lösungen für diese Problematik zu suchen. Die gemeinsam erarbeitete Systemarchitektur und Implementierung konnte bis zu einer Proof-of-Concept-Messlösung geführt werden, welche nun in Zusammenarbeit mit unseren Kunden in verschiedenen Szenarien weiter getestet werden soll.

Zum iHub-Projekt

In der lösungsorientierten Zusammenarbeit mit dem IMMS konnten wir vor allem von der Fachkompetenz der IMMS-Mitarbeitenden bei Sensor- und Embedded-Systems-Technologien profitieren. Ich freue mich auf weitere zukünftige Kooperationen mit dem IMMS, welche bei der Erschließung neuer Technologien für unsere Produkte und Dienstleistungen und bei der Realisierung neuer marktfähiger Lösungen unterstützen.“



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

www.imms.de/
barcamp

Beteiligung an Karrieremessen ausgeweitet

Das IMMS hat sich 2024 auf sechs Karrieremessen präsentiert. Das waren doppelt so viele wie im Vorjahr. Auf seine hochwertige und engagierte Nachwuchsförderung hat das Institut mit neu aufbereiteten studienangabezogenen Informationen aufmerksam gemacht. Studentinnen und Studenten aus Fachrichtungen wie Elektro-

Wie hier an der HAW Hamburg präsentierten sich das IMMS 2024 auch an Hochschulstandorten wie Hannover, Hamburg und Duisburg-Essen sowie Ilmenau und Erfurt.



technik, Mechatronik, Informatik und verwandten Studiengängen informierten sich über Angebote 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. Positives studentisches Feedback zur angebotenen Themenvielfalt und zum passgenauen Betreuungsangebot kam sowohl zu den Karrieremessen an der TU Ilmenau und der FH Erfurt als auch an Hochschulstandorten wie Hannover, Hamburg und Duisburg-Essen.

Lange Nacht der Wissenschaften in Erfurt zur Berufsorientierung

Das IMMS hat die Lange Nacht der Wissenschaften in Erfurt am 8. November genutzt, um auch über seine Angebote zur Nachwuchsförderung zu informieren und über Mitmachangebote mit Spaßfaktor schon die Kleinen für technische Inhalte zu begeistern. Für die Erfurter Wissenschaftsnacht hat das IMMS als Akteur des Forschungs- und Industriezentrums Erfurt e.V. (FiZ) das Angebotspaket mit Partnern in Erfurt-Südost koordiniert. So konnten die Technische Universität Ilmenau, die Ernst-Abbe-Hochschule Jena, die Hochschule Schmalkalden, die Hochschule Nordhausen und die Duale Hochschule Gera-Eisenach dafür gewonnen werden, ihre Studien-

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

Zur Langen Nacht der Wissenschaften am 8.11.2024 waren vor allem die Lötplätze heiß begehrt – man konnte sein Lange-Nacht-Mitbringsel selbst bauen und testen. Foto: IMMS.





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

angebote zur Langen Nacht der Wissenschaften bei verschiedenen FiZ-Partnern zu präsentieren. Sie ergänzten damit die vielfältigen Einblicke der FiZ-Partner in mögliche spätere Tätigkeitsfelder in Forschung, Entwicklung und Produktion für Erfurter Schülerinnen und Schüler beim CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, dem Fraunhofer-Zentrum Erfurt, der IBYKUS AG, dem IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), der Melexis Erfurt GmbH, beim TÜV Thüringen e.V. und der X-FAB Global Services GmbH.

Am IMMS bildeten sich Warteschlangen an den Lötplätzen, wo unsere jungen Gäste mit viel Geduld diverse Bausätze mit unterschiedlichen Schwierigkeitsstufen unter fachkundiger Anleitung zusammenlöten und stolz mit nach Hause nehmen konnten. Weiterhin gab es am IMMS Mitmachangebote wie das Ilmenauer Schlittenrennen mit autarker Energieversorgung aus Vibrationen. Naschkatzen konnten pH-Tests machen und ohne Karies genießen. Man konnte einen Chip für mobile Diagnostiksysteme zum Nachweis von Krankheiten mithilfe von zeitaufgelösten Fluoreszenz-Messungen testen, mit dem Handy aus der Hand lesen und Sensor-Pflaster testen oder am Stand der TU Ilmenau den autonomen Miniaturtransporter inspizieren und sich zu Studienangeboten informieren.

www.imms.de/
angebote

Insgesamt gab es in Erfurt-Südost eine geballte Ladung Augenfutter, Spaß beim Mitmachen, Aha-Momente und jede Menge Berufs- und Studienorientierung im MINT-Bereich. Das Gesamtangebot führte nach Aussagen der FiZ-Mitglieder zu einem deutlich stärkeren Zustrom an Gästen als im Vorjahr.



Eine der Stationen zum Girls'Day am IMMS am 25.04.2024: Programmieren mit Open Roberta mit dem System Calliope mini. Foto: IMMS.

Girls'Day

Fraunhofer IDMT, IMMS und TU Ilmenau haben zum Girls'Day am 25. April 2024 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 17 Mädchen von Klasse 5 bis 8, 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 der Goethe-Schule Ilmenau waren mit viel Spaß bei der Sache und wurden mit ebenso viel Freude von einem Team aus zwei Ingenieurinnen und einer Mathematikerin des IMMS und studentischer Unterstützung betreut.



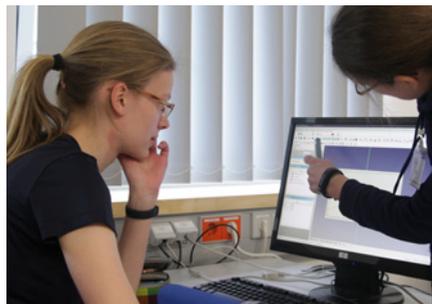
- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

Jugendliche zum Forschungstag am 3. April 2024 beim Bau und der Programmierung eines Teststandes zur elektromagnetischen Induktion. Foto: IMMS.

Forschungstag für Jugendliche

In den Osterferien am 3. April 2024 hatte das IMMS Schülerinnen und Schüler zu einem Forschungstag eingeladen. Es kamen 9 Jugendliche der Klassen 9 und 10, unter anderem aus den MINT-Spezialgymnasien in Ilmenau, Erfurt und Jena. Sie nutzten die Möglichkeit, die Schultheorie der MINT-Fächer mit Leben zu füllen und in unser Forschungsinstitut hineinzuschnuppern. Sie bekamen Einblicke in die Konstruktion und den 3D-Druck, haben den Aufbau einer kleinen Schaltung gelernt und diese auch gelötet. Im Anschluss haben sie sich um den Bau und die Programmierung eines Teststandes zur elektromagnetischen Induktion gekümmert. Der abwechslungsreiche Tag wurde sehr gut angenommen und mit viel Engagement vom Girls' Day-Team organisiert und betreut. Eine Wiederholung ist für die Herbstferien 2025 geplant.

Zum Forschungstag am 3. April 2024 konnten Jugendliche Schaltungen aufbauen, löten und programmieren. Fotos: IMMS.





Teilnehmerinnen und Teilnehmer des edaBarCamps 2024 beim Gastgeber Infineon in Neubiberg/München. Foto: IMMS.

edaBarCamp

Im September 2024 ging die edaBarCamp-Reihe in eine neue Runde, diesmal beim Gastgeber Infineon in Neubiberg/München zu Session-Pitches, Networking und Diskussionen in den Bereichen Open Source EDA, KI für EDA und Verifikation, Chipllets, ReUse, Hardware/Software-Co-Design und Automotive. 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.

Mehr Sichtbarkeit für studentischen Nachwuchs in Ilmenau



<https://youtu.be/g43-D-yKcXU>

Im Juni 2024 gab es einen Perspektivwechsel im neuen Maßstab und mehr Sichtbarkeit auf Wunsch von studentischer Seite: „Man muss doch direkt beim Gang über den Campus der TU Ilmenau sehen, was ihr für coole Sachen macht. Und dass man bei euch wachsen kann.“ Ergebnis: Die größte „Platine“, die das IMMS je entworfen hat. Video: IMMS.

Adrian Pitterling, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Erste Kontakte zum IMMS hatte ich durch Gespräche mit Kommilitonen und durch die Vorlesungen von Prof. Sommer während meines Studiums an der TU-Ilmenau. Diese ersten Eindrücke bestärkten mich darin, das Institut näher kennenlernen zu wollen. Direkte Verbindungen zum Institut ergaben sich dann durch die Möglichkeit, ein Fachpraktikum und meine Bachelorarbeit bei Dr.-Ing. Georg Gläser zu absolvieren, wobei bei den Themen eine enge Zusammenarbeit mit der TU Ilmenau bestand. Diese frühe Erfahrung hat mir gezeigt, wie ich die im Studium erworbenen Fähigkeiten in der Praxis anwenden kann.“

Nach meinem Bachelorabschluss ermöglichte mir das IMMS als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf Teilzeit neben dem Masterstudium an Projekten weiter mitzuwirken. Insbesondere am Projekt VE-ARiS konnte ich die im Studium erlernten Kenntnisse direkt anwenden und vertiefen. So konnte ich meine theoretischen Grundlagen aus meinem Vertiefungsgebiet „Kognitive technische Systeme“ mit praktischen Herausforderungen verbinden und meine Fähigkeiten weiterentwickeln. Die Arbeit an diesem Projekt war eine ideale Ergänzung zu meinem Studium und bereitete mich optimal auf meine Masterarbeit vor.

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

www.imms.de/aidesigntest

www.imms.de/immsvoices



Adrian Pitterling, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich Mikroelektronik.

Foto: IMMS.

Meine Masterarbeit mit dem Titel „LLM-based Top-Down Refinement Flow“ baute direkt auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und den Kenntnissen des Masterstudiums auf. Nach meinem Masterabschluss konnte ich meine Tätigkeit am IMMS fortsetzen und bin nun als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf Vollzeit tätig. Das IMMS bietet mir die ideale Umgebung, um meine wissenschaftliche Karriere voranzutreiben und an spannenden Projekten mitzuwirken. Die positive Atmosphäre im Team und die Möglichkeit zur fachlichen Weiterentwicklung machen das IMMS zu einem idealen Arbeitsplatz für mich.“

Bipasha Roy, M.Sc., wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMMS

“Meine Laufbahn am IMMS begann im Jahr 2022. Seit 2023 arbeite ich als Forscherin in der Abteilung System Design. Begonnen habe ich als studentische Assistentin, weiter ging es mit meiner Masterarbeit in der Mikroelektronik, in der ich mit Chip-Bilddaten verschiedene Regionen auf dem Chip identifiziert und das GDSII-Layout nachgebildet habe. Dabei habe ich nicht nur ein tieferes Verständnis für die Anwendung von KI in industriellen Szenarien gewonnen, sondern auch wertvolle Einblicke in die Struktur und den Aufbau von Mikrochips. Die praktischen Erfahrungen motivieren mich, weiter in der angewandten Forschung zu arbeiten.

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

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

Als Forscherin im System-Design-Team konzentriere ich mich auf die Anwendung von Künstlicher Intelligenz in industriellen Umgebungen. Ich finde es sehr bereichernd,

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



Bipasha Roy, wissenschaftliche Mitarbeiterin im Themenbereich System Design.

Foto: IMMS.

an der Schnittstelle zwischen akademischer Forschung und praktischer Umsetzung zu arbeiten, wo innovative Ideen zu praktischen Lösungen werden. Unser Team arbeitet eng mit industriellen und wissenschaftlichen Partnern zusammen, was ständig neue Herausforderungen mit sich bringt und kreatives Denken fördert.

Meine erste Tätigkeit am IMMS bot mir die Möglichkeit, an der Signalverarbeitung zu arbeiten und KI-basierte Lösungen für eingebettete Systeme zur Erkennung von Anomalien zu finden und so den Maschinenzustand abzuschätzen sowie Fehler in laufenden Maschinen zu diagnostizieren. Meine Forschung umfasste die Analyse verschiedener Modelle für Schwingungsdaten, um Defekte in Lagersystemen vorherzusagen und zu lokalisieren. Mein Schwerpunkt und meine Arbeit am IMMS entwickeln sich weiter in Richtung datengesteuerte Optimierung für Spritzgießmaschinen, wo ich KI-Techniken entwickle, um die Prozesseffizienz zu verbessern.

Am IMMS entwickle ich nicht nur KI-Modelle, sondern arbeite auch an anderen industriellen Anwendungen mit, bei denen intelligente Lösungen eingesetzt werden. Dadurch konnte ich meine technischen Fähigkeiten erweitern und gleichzeitig mein Verständnis dafür vertiefen, wie intelligente Systeme Fertigungsprozesse verändern können.

Neben den technischen Herausforderungen zeichnet sich das IMMS durch seine offene und partnerschaftliche Kultur aus. Dank meiner Kolleginnen und Kollegen ist die Arbeit am IMMS sehr angenehm, mit hohem Teamgeist und aktivem Wissensaustausch. Am IMMS kann ich mich weiterentwickeln – beruflich durch die Erforschung modernster KI-Anwendungen und persönlich durch Teamarbeit und gemeinsame Motivation. Ich freue mich auf die vor mir liegenden Wege voller neuer Ideen, sich weiterentwickelnder Technologien und inspirierender Menschen, mit denen ich jeden Tag zusammenarbeite.“

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

www.imms.de/
i4o

www.imms.de/
embeddedai

www.imms.de/
immsvoices



Dr.-Ing. David Schreiber, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich Mikroelektronik, Team Mixed-Signal IC Verification. Foto: IMMS.

Dr.-Ing. David Schreiber, wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Während meines Studiums und der Zeit meiner Promotion kam ich des Öfteren mit Mitarbeitern des IMMS in Kontakt. Es zeigten sich sehr schnell gemeinsame Interessen, besonders im Bereich der Design-Automatisierung. So bin ich 2022 in das Mikroelektronik-Team des IMMS am Standort Erfurt eingestiegen. Zu dieser Zeit entwickelte sich gerade ein neues Team mit Schwerpunkt auf dem Gebiet der Verifikation von Mixed-Signal-Schaltkreisen. Durch meine vorangegangenen Tätigkeiten im Bereich

der Entwurfsautomatisierung von analogen Schaltungen und der Schaltungssimulation konnte ich schnell einen wertvollen Beitrag liefern. Gerade nach meiner Zeit im universitären Forschungsumfeld war die hohe Taktung von regelmäßigen Chip-Designs und deren Tape-Outs eine spannende und willkommene Herausforderung.

Zum täglichen Geschäft am IMMS gehören sowohl Forschungsaufgaben in Förderprojekten als auch Industrieaufträge. Dieser Mix bietet ein hohes Maß an innovationsfördernden Forschungsaktivitäten im Bereich des Chip-Designs, von denen industrielle Auftraggeber direkt profitieren. Im Team für die Verifikation dieser Chips hat man aus meiner Sicht den besten Blick auf das Gesamtsystem, in dem die Chips später Anwendung finden sollen. Parallel dazu muss man dafür das System auch in seinen Details verstehen. Ich sehe diese Tätigkeit als eine Art Bindeglied zwischen den verschiedenen Disziplinen des Chip-Designs; wie Systemarchitektur, Analog-Design, Digital-Design und Charakterisierung.

Ich habe mich vom ersten Moment im Team des IMMS wohlfühlt. Die gute Kommunikation und das entspannte Arbeitsumfeld führt zu einer sehr effizienten und erfüllenden Arbeitskultur. Alle im Team unterstützen jederzeit gerne mit ihren jeweiligen fachlichen Kompetenzen. Besonders stark hat mich von Anfang an beeindruckt, wie viel Energie in die Nachwuchsförderung und die Betreuung von Studierenden investiert wird. Da ein Großteil der Mitarbeitenden auch selbst diesen Werdegang durchlaufen haben, zeigt sich, dass es das auf jeden Fall wert ist. Ich persönlich würde mich jederzeit wieder für diese Arbeitsstelle entscheiden.“



Für eine flexible Mikrofluidik-Scanner-Plattform zum kostengünstigen Nachweis biochemischer Reaktionen entwickelt das IMMS im Projekt ScoreChip einen SPAD-basierten Zeilensensor zur Chemolumineszenz-Detektion. Das Bild zeigt den Entwurf für ein Testsystem mit lichtdichtem Gehäuse. Die geplanten Sytemkomponenten sind im Video zu sehen unter <https://youtu.be/OlVMcomHenM>.
Grafik: IMMS.



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

Freistaat
Thüringen 

Das Verbundprojekt „Modulare Plattform zur Point-of-Care-Diagnostik am Beispiel von Parametern der Sepsis-Diagnostik“ wird über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund Dynamik gefördert und über die Europäische Union kofinanziert unter der Verbundnummer 1001607, das Teilprojekt „Entwicklung eines Mikrofluidikscanners für PoC-Anwendungen auf Basis von SPAD-Sensoren“ unter der Vorhabensnummer 2024 VFE 0059.

Jahresbericht

© IMMS 2024

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

Integrierte Sensorsysteme verbinden die analoge mit der digitalen Welt

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

Ziel: neue Anwendungen durch funktionale Integration und Miniaturisierung

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

Forschung mit kommerziellen Technologien für industrielle Verwertung

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

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

> *Integrierte Sensorsysteme*
> *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
> *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 2024

ScoreChip*-Projekt gestartet: modulare Plattform zur Point-of-Care-Diagnostik am Beispiel von Parametern der Sepsis-Diagnostik

Herausforderungen für Chemolumineszenz-basierte Point-of-Care-Geräte

Um frühestmögliche Therapien bei Sepsis oder anderen Krankheitsbildern einleiten zu können, soll eine schnelle und präzise Diagnostik vor Ort ohne Laborwartezeiten etabliert werden. Dafür relevante Analyten wie z.B. Zytokine sind u.a. über Chemilumineszenz bestimmbar. Diese Nachweisreaktionen erzeugen kurze, schwache Lichtblitze oder ein langes, schwaches Glühen, was für das menschliche Auge in der Regel nicht sichtbar ist. In Laboren können kleinste Mengen von Analyten über Chemilumineszenz-Immunoassays (CLIA) mittels Photomultiplier Tubes (PMTs) bestimmt werden. PMTs sind Stand der Technik für Low-Light-Sensing, insbesondere für Laboranalysatoren bzw. Zentrallabore. PMTs sind hochsensitiv, bieten jedoch nur pixelweise per zweiachsigen Scanningverfahren eine räumliche Auflösung und sind verglichen mit integrierten CMOS-Sensoren groß und teuer, lassen sich schlecht miniaturisieren und mit komplexer Elektronik oder Mikrofluidik integrieren. Somit sind Chemilumineszenz-basierte Point-of-Care-Tests in kostensensitiven Anwendungen eher die Ausnahme, obwohl sich mit ihnen eine hohe Sensitivität und Testgüte erreichen lässt.

Neuartige modulare Mikrofluidik-Scanner-Plattform für Chemolumineszenz

Im Projekt ScoreChip entsteht eine neuartige Mikrofluidik-Scanner-Plattform für eine Vor-Ort-Diagnostik von Analyten per Chemolumineszenz. Ziel ist es, biochemische Reaktionen direkt aus klinischen Proben sichtbar zu machen und dabei eine bisher unerreichte Kombination aus räumlicher Auflösung und Sensitivität zu bieten. Die neue Lösung revolutioniert den PMT-Ansatz, indem sie fluidische Chips räumlich aufgelöst nur auf einer statt zwei Achsen scannen muss und dabei eine vergleichbare Sensitivität bietet – jedoch zu erheblich geringeren Kosten.

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

www.imms.de/
ivd

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

SPAD-Technologie für schnellere und präzisere Diagnosen

Kernstück des Systems ist ein CMOS-Sensor auf der Basis von Single-Photon Avalanche Dioden (SPADs). SPADs können einzelne Photonen auflösen und erkennen die extrem schwachen Lichtsignale der Chemolumineszenz, die durch biochemische Reaktionen erzeugt werden. Ergänzt wird die Plattform bei Bedarf durch eine externe Fluidiksteuerung der Projektpartner, die das Messsystem flexibel und universell einsetzbar macht. Die Entwicklung erlaubt nicht nur die hochauflösende Analyse von Proben, sondern auch die einfache Anpassung an unterschiedliche diagnostische Anwendungen wie Sepsis-Screening.

IMMS erschließt SPAD-Technologie für Chemolumineszenz-basierte Point-of-Care-Diagnostik

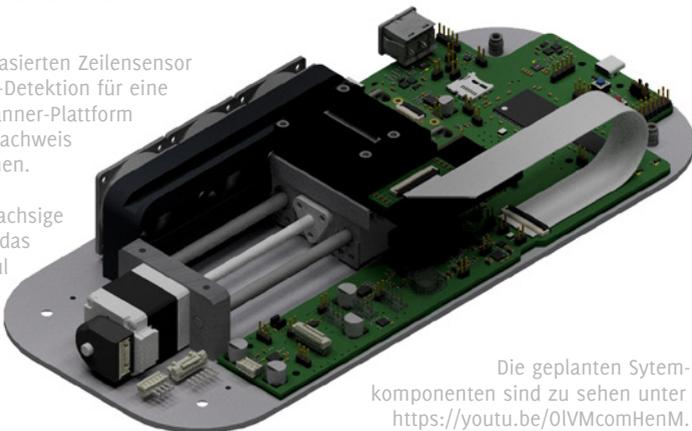
Das IMMS bringt seine umfangreiche Erfahrung im Design und der Fertigung von optoelektronischen CMOS-Sensoren in das Projekt ein. Durch die Entwicklung eines maßgeschneiderten SPAD-Zeilensensors wird eine bisher unerreichte Kombination aus Sensitivität und räumlicher Auflösung erzielt. Die Arbeit umfasst den Entwurf, die Verifikation und den Test der Sensoren sowie die Integration in die Scanner-Plattform.

Flexibilität und Wirtschaftlichkeit als Schlüsselmerkmale

Die Mikrofluidik-Scanner-Plattform bietet zusammen mit den Lösungen der Partner nicht nur eine kostengünstigere Alternative zu bestehenden Systemen, sondern auch eine deutlich höhere Flexibilität. Kliniken und Labore können das System individuell anpassen und so neue diagnostische Möglichkeiten erschließen. Das macht die Lösung besonders interessant für Point-of-Care-Anwendungen, bei denen Schnelligkeit und Präzision entscheidend sind.

Entwurf für den SPAD-basierten Zeilensensor zur Chemolumineszenz-Detektion für eine flexible Mikrofluidik-Scanner-Plattform zum kostengünstigen Nachweis biochemischer Reaktionen.

Die Grafik zeigt das einachsige Scannersystem, darauf das SPAD-Zeilensensormodul mit linearer SELFOC[®]-Linsenanordnung.



Grafik: IMMS.

Die geplanten Systemkomponenten sind zu sehen unter <https://youtu.be/O1VMcomHenM>.

Einer der in ARiS entwickelten Demonstratoren zur Validierung der Wasserzeichen als Kopierschutz im Chipentwurf.

Foto: IMMS.



Projektabschluss von VE-ARiS*: Kopierschutz für Chips

Kopierte Chips sind ein Problem für Hersteller und Anwender. Die Hersteller oder Design-Häuser entwerfen mit viel Know-how und hohem finanziellen Einsatz innovative Chips und erleiden mit jeder Kopie dieser Chips einen wirtschaftlichen Schaden. Anwender können sich bei Kopien nicht auf die Leistungsparameter der Originale verlassen und riskieren damit potenziell die Sicherheit ihrer eigenen Produkte.

Die Kopien entstehen auf verschiedene Arten: Ein Chip kann anhand des Datenblatts „nachgebaut“ werden, es entsteht also ein neues Chip-Design mit annähernd gleichen Eigenschaften. Sollen die Schaltungen selbst imitiert werden, werden die Chips oft mit verschiedenen Methoden untersucht, um den inneren Aufbau zu rekonstruieren. Zum Teil werden die Chips in kleinen Schritten abgeschliffen und unter dem Mikroskop fotografiert und anhand dieser Bilder die zur Fertigung benötigten Layouts nachgezeichnet.

Im Projekt ARiS hat das IMMS Methoden erforscht, dieses Kopieren schwerer zu machen und somit Chips davor zu schützen. Dabei wurden zwei Forschungsrichtungen verfolgt: Gegen das Nachbauen wurde ein Wasserzeichen untersucht, mit dem originale Chips markiert werden können. Wie bei Geldscheinen wird so ein Check eingebaut, mit dem ein Original identifiziert werden kann. Angriffe, wie das Abschleifen von Chips, standen ebenfalls im Fokus der Arbeiten. Am IMMS wurde ein Machine-Learning-basiertes Angriffsmodell entwickelt, mit dem dieser Reverse-Engineering-Prozess simuliert werden kann. Auf dieser Basis können Schaltungsteile gefunden werden, die leicht kopierbar sind und die im nächsten Schritt „gehärtet“ werden können. Hierbei werden Strukturen verwendet, die nur schwer rückerkannt werden können. Die untersuchten Ansätze zum Kopierschutz wurden anhand verschiedener Demonstratoren erfolgreich validiert.

www.imms.de/

aidesigntest

www.imms.de/

aris

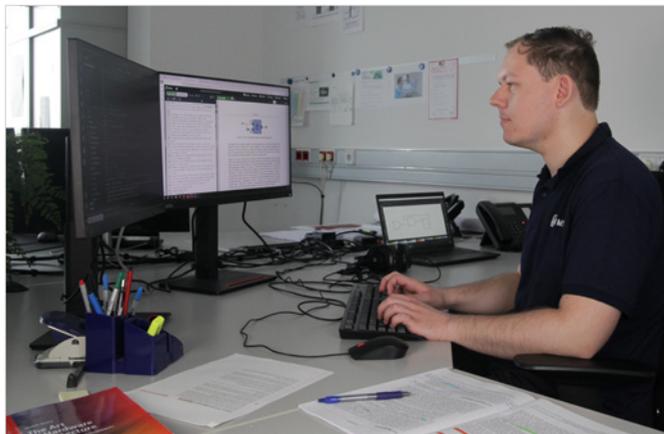
Jahresbericht

© IMMS 2024



Das IMMS erarbeitet in DI-Meta-X ein Open-Source-Software-Paket auf der Basis von Python, mit dem Digitalschaltungen eingelesen und gezielt verändert werden können.

Foto: IMMS.



Projekt DI-Meta-X* gestartet: innovative Open-Source-Werkzeuge für neue Chips

Open-Source-Entwurfswerkzeuge können gerade kleinen und mittleren Unternehmen den Einstieg ins Chip-Design erleichtern – es müssen keine Lizenzverträge geschlossen und das finanzielle Risiko kann klein gehalten werden. Jedoch sind diese Tools oft schwer bedienbar und sind z.B. für den Entwurf von Low-Power-Chips wenig geeignet. Das IMMS entwickelt hier neue Werkzeuge, um Open-Source-Chip-Design breiter anwendbar zu machen.

Dazu erarbeitet das IMMS ein Python-basiertes Software-Paket, mit dem Digitalschaltungen eingelesen und gezielt verändert werden können. Damit sollen beispielsweise sog. Clock-Gates eingefügt werden, um das Taktsignal in einzelnen Schaltungsteilen gezielt an- und auszuschalten und so die Chips sparsamer zu machen. Der Anwendungsbereich dieses Paketes ist jedoch breiter und es entsteht eine Basis für viele weitere Optimierungen: Logic-Locking zum IP-Schutz oder das gezielte Ersetzen von Schaltungsteilen durch effizientere Strukturen können mit diesem Paket umgesetzt werden. So sollen neue Funktionen für Anwendungen erschlossen und gleichzeitig der Forschung die Möglichkeit gegeben werden, neue Methoden anwendungsnah zu entwickeln.

Zusammen mit X-FAB arbeitet das IMMS an einer Lösung, mit der die Open-Source-Werkzeuge einfach in einer eigenen Umgebung installiert und eingesetzt werden können. Das IMMS testet dafür die Funktion in der eigenen Entwurfsumgebung, integriert neue Methoden für sparsamere Chips und erarbeitet einen Referenz-Entwurf für den industriellen Einsatz.

[www.imms.de/
meta-x](http://www.imms.de/meta-x)



Design, Architektur und Modellierung – vertrauenswürdig!

Demonstratoraufbau für den ersten RiscV am IMMS, einen Chip mit Open-Source-Befehlssatzarchitektur. Dieser Chip wurde im Projekt VE-VIDES für einen Demonstrator von Siemens entwickelt. Foto: IMMS.

*Zum Statement
von Siemens*

Motivation und Überblick

Die Entwicklung moderner elektronischer Systeme ist eine komplexe Aufgabe, bei der nicht nur Leistung und Effizienz im Fokus stehen, sondern auch die Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit der eingesetzten Komponenten. Kern des Projekts VE-VIDES war die Frage, wie man die Zuverlässigkeit von unseren Mixed-Signal-Systemen gewährleisten kann, wenn verschiedene Bestandteile aus verschiedenen Entwurfsumgebungen miteinander integriert werden müssen. Die Herausforderung lag darin, Schwachstellen bereits in frühen Entwicklungsstadien zu identifizieren und durch innovative Methoden zu überwinden. Ziel war es, eine solide Grundlage für zukünftige Systeme zu schaffen, die auch in anspruchsvollen Anwendungen wie der Robotik oder Industrieautomatisierung zuverlässig funktionieren.

*www.imms.de/
vides*

Einsatzbereich, Herausforderungen und Lösungsansätze

Die Sicherheit von Chips hängt stark von der Qualität der eingesetzten IP, also den einzelnen Komponenten, ab. Diese sind oft komplexe Bausteine, die auf verschiedenen Ebenen verifiziert werden müssen. Traditionelle Ansätze, die eine eng umgrenzte Verifikationsphase im Entwurfsprozess definieren, bieten zwar eine gewisse

*Jahresbericht
© IMMS 2024*

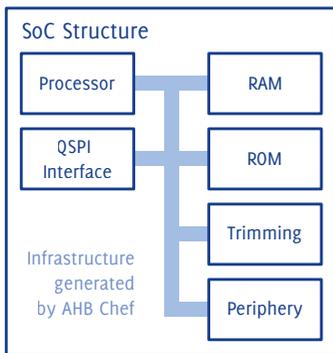


Abbildung 1:

Der AHB-Chef erzeugt den Verilog-Code für die On-Chip-Infrastruktur (hellblau) sowie die dafür notwendige Dokumentation und Definitionen für die Firmware-Entwicklung.

Grafik: IMMS.

Sicherheit, aber auch Grenzen. Insbesondere kurzfristige Änderungen vor der Übergabe in eine (Prototypen-)Fertigung sind ein Risiko und im Chip gefundene Design-Fehler können nur mit Zusatzaufwand in eine Simulation zurückübertragen werden, um sie genauer zu untersuchen. Daher wurde ein neuer Weg eingeschlagen: die Integration von Prüfmechanismen direkt in den Entwurfsprozess durch Generatoren für digitale Infrastruktur und automatisierte Prüfverfahren. Gleichzeitig standen die Entwicklung von Werkzeugen zur Optimierung der IP-Verwaltung und Konsistenzsicherung von Entwürfen im Fokus. Diese Ansätze ermöglichen es, die Sicherheit von Systemen von der Entwurfsebene bis hin zur Fertigung zu gewährleisten.

Infrastruktur: Das Straßennetz von ASICs

Die Entwicklung moderner integrierter Schaltungen ist wie der Bau einer Stadt: Sie erfordert nicht nur individuelle Gebäude, sondern auch ein zuverlässiges Straßennetz, das den Austausch von Daten ermöglicht. Dieser Austausch geschieht durch sog. Bus-Systeme. Ein solche Struktur ist in Abbildung 1 dargestellt. Für die Kommunikation zwischen verschiedenen Chips werden oft Schnittstellen wie I²C oder QSPI verwendet, die nur wenige Anschlussleitungen benötigen. Im Inneren wird die Datenübertragung durch schnellere Systeme mit mehr Verbindungen realisiert. An diesen On-Chip-Bussystemen sind z.B. Register und Speicher angeschlossen, die wie Häuser in einer Stadt verschiedene Größen und Adressen haben.

Der Aufbau einer solchen Infrastruktur ist oft Handarbeit und nur teilweise durch Werkzeuge unterstützt. Im Projekt entstand deshalb der AHB¹-Chef, ein Python-Programm, mit dem aus einer Beschreibung der verschiedenen Register der Hardware-Code automatisiert erzeugt werden kann.

¹ AMBA High-performance Bus (AMBA: Advanced Microcontroller Bus Architecture)

Die Register-Definitionen werden von Hand als strukturierte Text-Datei geschrieben. Sie können mit in den Design-Repositories abgelegt und versioniert werden. Der AHB-Chef erzeugt mit diesem „Rezept“ die Implementierung in SystemVerilog, einer Hardwarebeschreibungssprache. Dabei werden Aufgaben wie die Zuweisung der Adressen und die Erzeugung einer ersten Dokumentation und von Header-Dateien für die Verifikation und die Programmierung von der Anwendung übernommen.

Am Ende steht eine fertige Komponente, die direkt im Design verwendet werden kann. Der AHB-Chef wird nach Projektende in IMMS-Entwürfen eingesetzt.

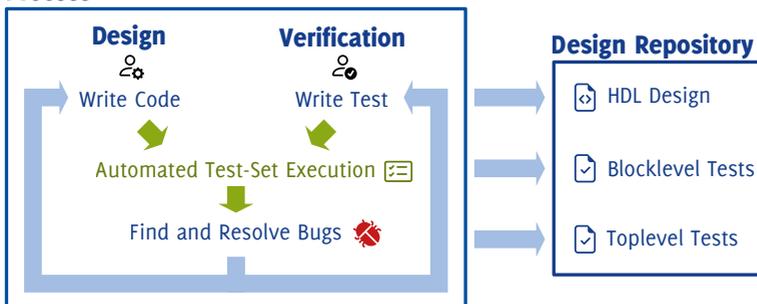
Regressionstests im Chip-Design

Im Chip-Design spielen Verifikationssimulationen auf verschiedenen Ebenen eine entscheidende Rolle: Da eine Fertigung aufwendig und teuer ist, müssen in der vorherigen Verifikation so viele Anwendungsszenarien wie möglich geprüft werden. Das betrifft sowohl einzelne Komponenten als auch den ganzen Chip im Systemkontext. Um den damit einhergehenden Herausforderungen zu begegnen, wurde im Projekt VIDES eine Regressionsumgebung geschaffen, mit der Testfälle automatisiert durchgeführt werden können. Die Struktur ist in Abbildung 2 gezeigt. In jedem Entwurf und jeder vorhandenen Komponente wird eine „Bibliothek“ von Testfällen erstellt. Nach jedem Code- oder Design-Update können diese Testfälle automatisiert gestartet werden und damit der aktuelle Zustand des Entwurfs beurteilt werden. Im Laufe

Abbildung 2:

Durch die neue Regressionsumgebung können Design- und Verifikationsingenieure ihre Testfälle in eine gemeinsame Bibliothek einpflegen und automatisiert durchführen. So fallen Entwurfsschwächen sehr früh auf und können sofort behoben werden. Grafik: IMMS.

Process



des Entwurfs- und Verifikationsprozesses wird diese Bibliothek Stück für Stück von Design- und Verifikationsingenieuren am IMMS erweitert und vervollständigt. Damit können auch kleine, scheinbar unproblematische Änderungen im Design direkt getestet und verifiziert sowie Probleme frühzeitig erkannt werden, ohne dabei Verifikationsspezialisten zu binden.

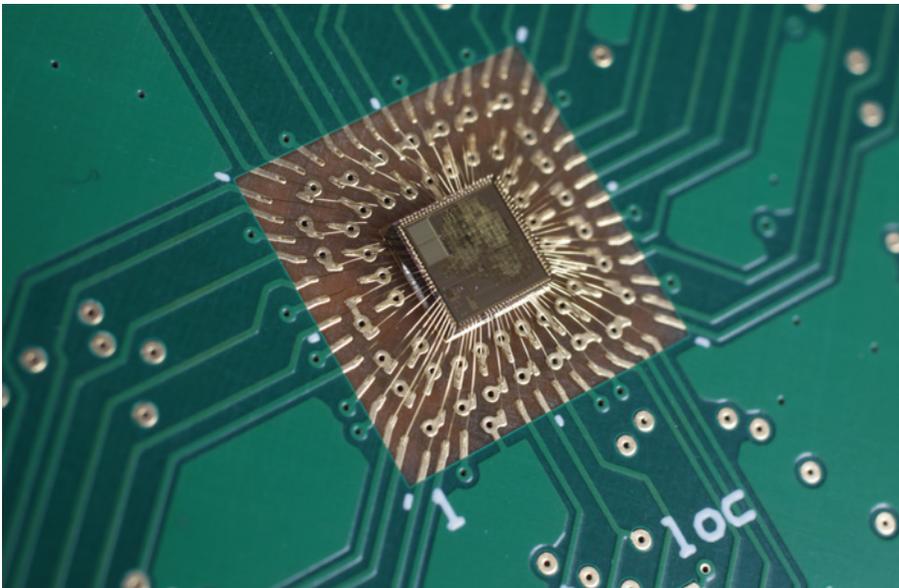
Wichtig war in dieser Testumgebung, dass die Tests in verschiedenen Domänen und Phasen des Entwurfs anwendbar bleiben. Die Umgebung ist so konstruiert, dass sowohl Digital-, als auch gemischt analog/digitale Schaltungen betrachtet werden können. Außerdem kann jede Simulation so eingestellt werden, dass auch Layout-Effekte wie z.B. Gatterverzögerungen mitsimuliert und damit in den Test einbezogen werden.

Die Umgebung wird nach Projektende direkt in den Chip-Designs am IMMS eingesetzt und weiterentwickelt. Hier sind die Ausführung in FPGA-Prototypen und die Einbindung von Open-Source-Simulatoren von Interesse.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung vertrauenswürdiger Mixed-Signal-Systeme ist eine komplexe Aufgabe, insbesondere wenn Komponenten aus unterschiedlichen Entwurfsumgebungen

Abbildung 3: Am IMMS entwickelter Smart-Sensor-ASIC zur Auswertung eines Kraftsensors. Dieser Chip mit RiscV-Prozessor wurde mit den gezeigten Methoden entworfen. Foto: IMMS.



integriert werden müssen. Traditionelle Verifikationsmethoden sind oft unzureichend oder zu komplex, da sie in späteren Phasen des Entwurfs stattfinden und letzte Änderungen vor der Fertigung Risiken bergen. Um diese Herausforderungen anzugehen, wurde ein neuer Ansatz verfolgt: die Integration von Prüfmechanismen direkt in den Entwurfsprozess, ergänzt durch automatisierte Werkzeuge und Testumgebungen.

Die gezeigten Methoden und Werkzeuge wurden im Projekt erfolgreich anhand eines Smart-Sensor-ASICs gezeigt, mit dem Kraftsensoren ausgewertet werden können. Der Chip konnte auf der in Abbildung 3 gezeigten Platine zusammen mit den Partnern in Betrieb genommen werden.

Die Projektergebnisse von VE-VIDES werden in den Chips des IMMS zukünftig eine große Rolle spielen: Die neuen Methoden werden nach Möglichkeit ab Projektende eingesetzt und in Folgeprojekten weiterentwickelt.

Kontakt: Dr.-Ing. Georg Gläser, georg.glaeser@imms.de

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

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Verbundprojekt VE-VIDES wurde 2024 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 16ME0246 gefördert.

www.imms.de/
vides

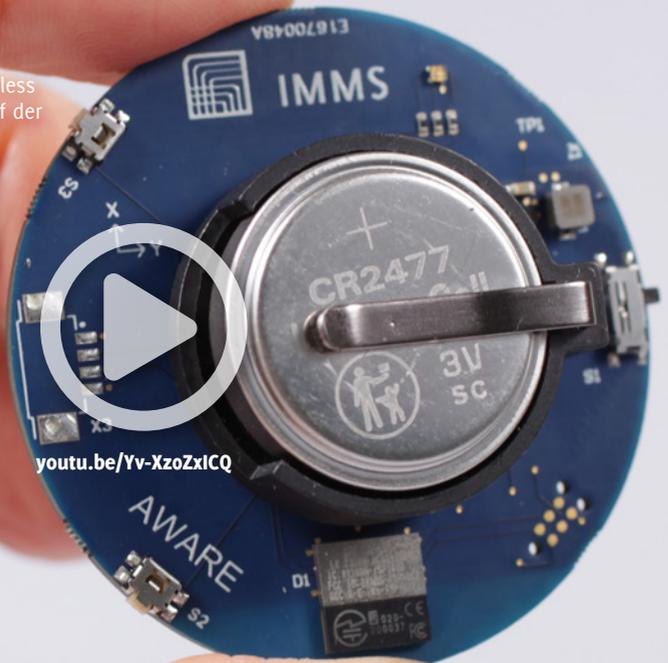
FORSCHUNGSFELD

INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME

“AWARE”-Demonstrator (Advanced wireless AI-enabled real-time environment). 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.



youtu.be/Yv-XzoZxICQ

Freistaat
Thüringen



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die vorgestellten Lösungen wurden in der internen, vom Freistaat Thüringen geförderten KI-Forschungsgruppe des IMMS und im Projekt HoLoDEC entwickelt.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben HoLoDEC wurde 2024 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ME0703 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

Testsysteme

> nm-präzise 6D-

Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

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

Für immer leistungsfähigere Sensoren bearbeiten wir folgende Forschungsfragen:

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

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

Mit unseren Lösungen adressieren wir folgende Anwendungen:

Für die Lösung unserer Forschungsfragen beschäftigen wir uns zum einen mit der Analyse von verteilten IoT-Systemen, um energie- und ressourcenoptimierte eingebettete Systeme beispielsweise für das „Internet der Dinge“ (Internet of things – IoT) oder autarke Sensornetzwerke für das Umweltmonitoring oder für Smart-City-Anwen-

www.imms.de/
vernetzmessen

dungen 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 2024 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

iHUB*: Starthilfe für innovative Ideen – wie Start-Ups und junge Unternehmen von Forschung profitieren können.

Was ist iHUB?

Das IMMS ist als Teil des Leistungszentrums InSignA* als Forschungspartner auch am Ideenwettbewerb iHUB beteiligt. In diesem wird innovativen Ideen zu den Themen Sensorik, Digitalisierung oder Assistenzsysteme Starthilfe gegeben. In einem Wettbewerb werden die Ideen einer Jury aus Wissenschaft, Wirtschaft, öffentlichen Einrichtungen sowie Venture-Capital-Unternehmen vorgestellt. Die besten Ideen werden dann zur Förderung ausgewählt und mit Forschungsleistungen der beteiligten Partner unterstützt. Dabei gibt es unterschiedliche Zielstellungen, die Idee voranzubringen, von Demonstratoren und Prototypen über Marktanalysen bis hin zu Machbarkeitsstudien. Die Projekte werden im Umfang von bis zu sechs Personenmonaten durch Mitglieder des Leistungszentrums bearbeitet inkl. Zugang zu Experten, Laboren sowie Sachmitteln.

iHub-Wettbewerb 2024

2024 konnte das IMMS erstmals als Partner am Wettbewerb teilnehmen. Insgesamt wurden drei Projektideen von der Jury ausgewählt, an denen das IMMS beteiligt ist.

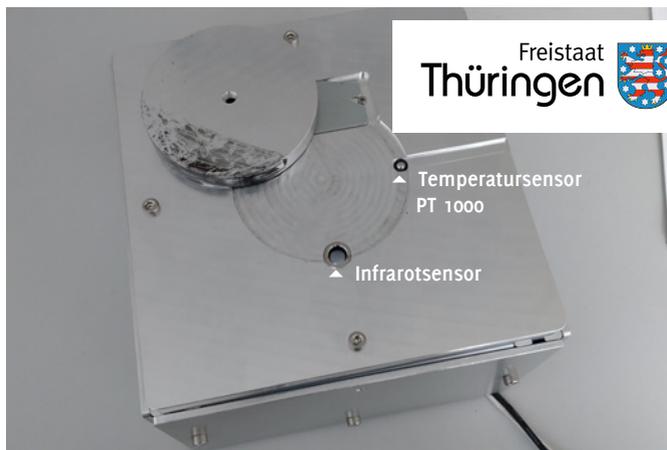


Abbildung 1:

Im iHub* erarbeiteter Teststand für ein Prozessmonitoring in einer Schneidkammer zur Kunststoffpulverisierung; hier wurden Infrarot- und Temperatursensorik eingebracht.
Foto: IMMS.

iHUB-Projekt LPT – Prozessmonitoring während der Pulverisierung

Aufgabe und Partner

LPT stellt feine Pulverkörner her, indem ein langer Kunststoffstrang von Messern geschnitten wird. Die Messer sind an einem rotierenden Messerkopf montiert, der sich in einer Schneidkammer befindet, aus der das Pulver abtransportiert wird. Der Schneidprozess ist derzeit aus Sicht des Prozessmonitorings weitestgehend eine Blackbox. Besonders interessante Informationen zum Schneidprozess wären Echtzeit-Bilder vom Schnitt selbst z. B. mittels Hochgeschwindigkeitskamera sowie der Temperaturverlauf der am Schneidvorgang beteiligten Komponenten, insbesondere der Messer, um den Prozess später optimieren zu können. Die optische Lösung wurde dabei durch das Fraunhofer IZFP bearbeitet, während sich das IMMS auf die Temperaturmessung konzentrierte.

Lösung durch das IMMS

Zur Erfassung der Messertemperatur wurde zunächst geprüft, ob Sensorik direkt an der Klinge angebracht werden kann. Dafür ist aufgrund der Rotation des Messerkopfes nur ein sehr kleines drahtloses System nutzbar. RFID-Sensoren sind die einzige Möglichkeit, dort zu messen. Allerdings ist das getestete System nicht in der Lage, die Daten in Echtzeit zu übermitteln, was für eine Regelung aber notwendig wäre.

Deshalb wurden alternative Messkonzepte erarbeitet. Hier konnten drei weitere Optionen zur indirekten Messung identifiziert werden, von denen zwei an einem eigens konstruierten Teststand am IMMS geprüft wurden, siehe Abbildung 1. Mit beiden Verfahren konnte die Temperatur der Testobjekte im Labor erfolgreich nach-

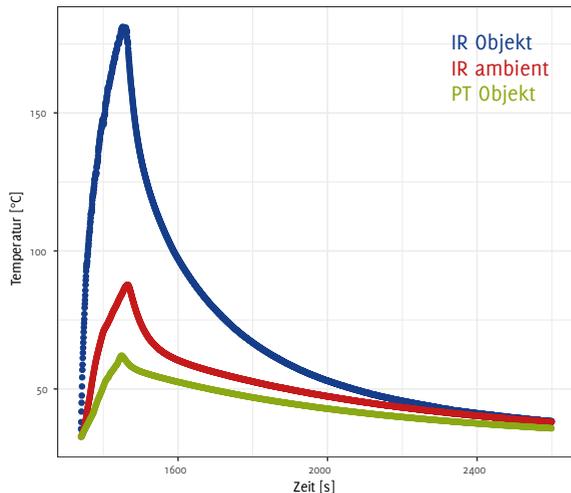


Abbildung 2:

Vergleich der Temperaturmesswerte an verschiedenen Messpunkten im Teststand für das Prozessmonitoring in einer Schneidkammer zur Kunststoffpulverisierung.

Grafik: IMMS.

vollzogen werden, siehe Abbildung 2. Der Infrarot-Sensor hat sich dabei als gute Option herausgestellt, wenn eine Positionierung im Bereich der Kammer möglich ist. Ähnliche Eigenschaften sollten mit einem schnellen Thermistor erreichbar sein. Damit konnte eine Empfehlung zur Messung der Prozessparameter entwickelt werden.

iHUB-Projekt KitchenGuard – mit eingebetteter KI zum neuen Kocherlebnis

Aufgabe und Partner

KitchenGuard hat die Vision, das Kochen mit am Herd installierter, intelligenter Sensorik sicherer zu machen, indem eine KI aus akustischen Daten ermittelt, was im Kochtopf passiert, um ggf. die Entstehung von Bränden durch rechtzeitiges Abschalten zu verhindern. Im iHUB-Projekt sollte ein erster Schritt in Richtung der Realisierung gegangen werden. Das Fraunhofer IDMT hat dazu die Konzeption der Mikrofonanordnung sowie die Auswahl geeigneter Mikrofone und das IMMS die Konzeption der eingebetteten Datenverarbeitungsplattform übernommen.

Lösung durch das IMMS

Basis des Systems soll ein Mikrocontroller zur Verarbeitung der Audiosignale bilden. Dazu wurden unterschiedliche Optionen recherchiert und die Eckdaten miteinander verglichen. Die begrenzten Ressourcen von eingebetteten Systemen (MCUs) stellen bei der Implementierung von KI-Modellen eine große Herausforderung dar. Insbesondere der verfügbare Speicher (RAM und Flash) sowie die vorhandene Rechenleistung sind dabei zu beachten. Einige Varianten aktueller Mikrocontroller haben Hardware-Beschleuniger für die Berechnung neuronaler Netze integriert, was die Ka-

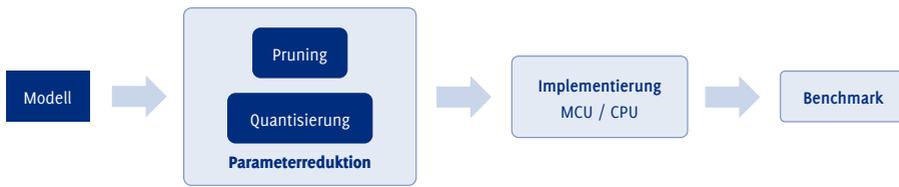


Abbildung 3: Vorgehen für die Untersuchung von MCUs mit Hardware-Beschleunigern für neuronale Netze für eingebettete KI-Lösungen. Grafik: IMMS.

kapazität verbessern soll. Daneben existieren Optionen, die Größe der Netze sowie die Komplexität der Berechnungen zu reduzieren – idealerweise, ohne die Genauigkeit negativ zu beeinflussen. Um dies zu untersuchen, wurden verschiedene Modelle auf einer NXP MCXN947 MCU sowie einem leistungsfähigeren NXP iMX8 CPU mit Google TPU und die Leistungsfähigkeit bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Hardwarebeschleuniger die Berechnungszeit des neuronalen Netzes um Faktor 8 bis 38 beschleunigen kann, je nach Größe und Aufbau des Netzes. Das performanteste System mit dem i-Mx8-Applikationsprozessor bietet eine starke Beschleunigung (bis 60-fach) der Berechnung von großen Netzwerken.

iHUB-Projekt PerfML – Edge-Messsystem für die verteilte Signalerfassung in industriellen ML-Applikationen

Aufgabe und Partner

seioTec verfügt bereits mit der datAIndustry App über eine Edge-Plattform für ML-Applikationen auf eingebetteten Systemen. Allerdings steigt die Nachfrage nach Lösungen für Schwingungs- und Ultraschall-Sensorik und den damit einhergehenden hohen Abtast- und Datenübertragungsraten, insbesondere in verteilten Systemen. Im iHUB-Projekt sollten daher die Voraussetzungen für ein entsprechendes System als Proof-of-Concept geschaffen werden. Neben seioTec und dem IMMS war zudem das Fraunhofer IDMT beteiligt. Die Aufgabe des IMMS bestand darin, die Datenübertragung effizient auszulegen.

Lösung durch das IMMS

Zunächst wurde von den Partnern eine geeignete Systemarchitektur für ein Edge-fähiges Messsystem für die verteilte mehrkanalige Signalerfassung und integrierte Datenvorverarbeitung für industrielle Machine-Learning-Anwendungen erarbeitet, © IMMS 2024

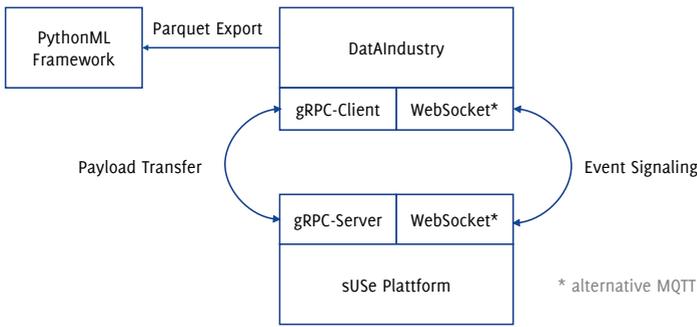


Abbildung 4: Systemarchitektur für ein Edge-fähiges Messsystem für die verteilte mehrkanalige Signalerfassung und integrierte Datenvorverarbeitung für industrielle Machine-Learning-Anwendungen. Grafik: IMMS.

siehe Abbildung 4. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Kommunikationsschnittstelle zwischen der Messplattform und der datAIIndustry-App. Nach eingehender Analyse verfügbarer Technologien und Protokolle fiel die Wahl auf das gRPC-Framework als Grundlage für die Datenschnittstelle zwischen den Komponenten.

Mit einer Testkonfiguration aus PC-Client und -Server implementiert als jeweilige Kommunikationsgegenstellen für die beiden Systeme wurden bereits erste Benchmarks durchgeführt. Dabei wurde nachgewiesen, dass die Übertragung der Daten von mehreren Sensoren per gRPC über Ethernet ohne Probleme möglich ist. Zu kleine Paketgrößen wirken sich nachteilig auf den Durchsatz aus. Zu große Pakete erzeugen eine hohe Systemlast und können bei der datAIIndustry-App zu Problemen beim Einspeichern der Daten in die interne Datenbank führen. Diese Erkenntnisse erlauben es seiTec, die eigene Software weiter zu optimieren. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mehrkanalige Messungen mit hoher Abtastrate vom System verarbeitet und auf dieser Basis weitere Analysen durchgeführt werden können.

Fazit zu iHUB

In drei sehr unterschiedlichen Projekten konnte das IMMS verschiedene Kompetenzen einbringen, um Start-ups bzw. junge Unternehmen bei der Realisierung ihrer Ideen zu unterstützen. Das Institut ist bereit für die nächsten Herausforderungen, die Unternehmen in die iHub-Wettbewerbe einbringen.

Veranstaltungen und Infoangebote für KMU

Durch das IMMS wurden 2024 als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ 7 Vorträge, 16 Online-Seminare, 16 Stammtische, und 13 Fachworkshops sowie 40 Informations- und Werkstattgespräche zur Digitalisierung angeboten bzw. durchgeführt, um kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von Digitalisierungs- und KI-Lösungen zu unterstützen. Darüber hinaus war das IMMS als Modellfabrik auf 19 regionalen **Veranstaltungen** von Branchennetzwerken und Messen präsent. Im bundesweiten Netzwerk „Mittelstand-Digital“ gab es weitere 27 Aktivitäten. Die Angebote gehen Hand in Hand mit den Partnern TU Ilmenau, an der die Geschäftsstelle und die „Modellfabrik Vernetzung“ angesiedelt sind, der Ernst-Abbe-Hochschule Jena als „Modellfabrik Virtualisierung“ und der Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V. in Schmalkalden als „Modellfabrik Prozessdaten“.

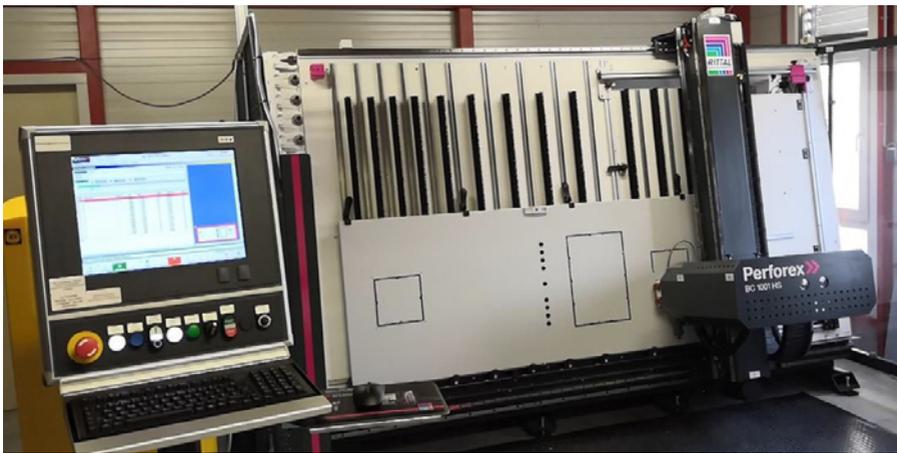
Das „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ setzt neben den aus den Modellfabriken ersichtlichen fachlichen Schwerpunkten auf Nachhaltigkeit, Plattformökonomie und KI. Das IMMS widmet sich darin als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ vor allem den Themen Retrofit, vorausschauende Wartung, smarte Sensorsysteme,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

Parallel zu den Veranstaltungen entstanden 11 **Publikationen**, z.B. über die Zusammenarbeit mit Unternehmen in Projekten oder zu Demonstratoren, die auf den Webseiten des Zentrums, über Newsletter und über die Sozialen Medien an Interessenten verteilt werden.

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

www.imms.de/md

www.imms.de/i40



Fräse (oben), Frässpindel (unten links) und Edge-KI-Messsystem an der Frässpindel (unten rechts) für Untersuchungen zur Verschleißerkennung an Fräsworkzeugen.

Fotos: HELIRO.



Neue Demonstratoren und Digitalisierungsprojekte

Neben den verschiedenen Veranstaltungen wurde in der „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ am IMMS auch an drei nachfolgend beschriebenen Demonstrations- und Umsetzungsprojekten gearbeitet, die Einsatzmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz (KI) in produzierenden KMU demonstrieren.

www.imms.de/md

Verschleißerkennung an Fräsworkzeugen

Die Verschleißerkennung an Fräsworkzeugen dient einerseits der Ausnutzung der Werkzeugstandzeit und andererseits der rechtzeitigen Warnung der Fachkräfte, wenn das Werkzeug verschlissen ist, um Brüche oder unsaubere Bearbeitungsergebnisse und damit Ausschuss zu vermeiden. Die Messdatenaufnahme erfolgt am Versuchsaufbau einerseits mittels Schwingungssensoren im niedrigen kHz-Bereich an der Werkzeugspindel und andererseits durch ein mobiles Ultraschallmessgerät. In mehreren Messkampagnen wurden für typische Bearbeitungsabläufe, Materialien und Werkzeuge Datensätze erzeugt, aufbereitet und analysiert. Dabei kamen verschiedene Feature-Analysetechniken zum Einsatz. Es zeigte sich, dass aufgrund einiger spezieller Randbedingungen mit der vorhandenen Sensorik keine sichere

www.imms.de/i40

Verschleißerkennung möglich ist. Deshalb wurden für weiterführende Untersuchungen neue Lösungsansätze mit erweiterter Sensorik und anderen KI-basierten Auswertungsverfahren erarbeitet.

Füllstandsmessung in einem Granulattrockner

Ziel des Projektes Füllstandsmessung war es, den Füllstand von Kunststoffgranulat in den Granulattrocknern von Spritzgussmaschinen zu erfassen und zu visualisieren, um ein „Leerlaufen“ der Trocknerbehälter zu verhindern und damit eine kontinuierliche Fertigung abzusichern. Dafür wurde zunächst ein Konzept für die Sensorik, die Datenverarbeitungs- und -übertragungstechnik sowie die Visualisierung der Messdaten erarbeitet. Um die Eignung der Sensoren zu verifizieren, waren aufgrund der hohen Einsatztemperatur und der Größe des Messbereichs umfangreiche Vortests mit dem Sensorhersteller notwendig. Diese wurden noch 2024 durchgeführt und fließen in die Umsetzung 2025 ein.

Ultraschallbasierte Diagnose von Motorlagern mit einer KI-basierten Datenauswertung in einer App.

Der Demonstrator zur ultraschallbasierten Diagnose von Motorlagern zeigt eine einfache Möglichkeit der vorbeugenden Instandhaltung, bei der Messdaten mit einem Luftultraschallsensor gewonnen werden, der an ein spezielles mobiles Ultraschallmessgerät angeschlossen ist. Der Sensor wird dabei auf das jeweilige zu untersuchende Motorlager gerichtet. Die aufgenommenen Geräusche können dann mit einer



Am IMMS im Mittelstand-Digital-Zentrum Imenau entwickelter Demonstrator zur ultraschallbasierten Diagnose von Motorlagern mit einer KI-basierten Datenauswertung in einer App.

Foto: IMMS.

speziellen App, die die Messdaten KI-basiert in Echtzeit auswertet, auf dem Geräte-display angezeigt werden. Für die Klassifikation wird ein maschinelles Lernverfahren genutzt, das dafür verwendete KI-Modell basiert auf der Deep-Learning-Technologie Convolutional Neural Networks (CNN). Zum Anlernen des KI-Modells wurden Messdaten sowohl von neuen Motorlagern als auch von unterschiedlich stark verschlissenen und defekten Lagern aufgenommen und ausgewertet.

Vernetzung mit Digitalisierungsakteuren ausgebaut

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeit im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ ist die Vernetzung der an der digitalen Transformation der Unternehmen beteiligten Akteure. Im bundesweiten Mittelstand-Digital-Netzwerk gab es einen regelmäßigen Austausch, u.a. in themenspezifischen Arbeitsgruppen oder auf Regionalkonferenzen der beteiligten Zentren. Themen waren Bedarfe der Unternehmen, der Ausbau und die zielgruppengerechte Ausgestaltung der Unterstützungsangebote. Das IMMS hat sich darüber hinaus auch regelmäßig mit Thüringer Netzwerken und Initiativen ausgetauscht, wie z.B. der Cross-Cluster-Initiative Thüringen (CCIT), dem Cluster für Elektronische Mess- und Gerätetechnik Thüringen eG (ELMUG), dem Thüringer Zentrum für Maschinenbau (ThZM), dem Branchenverband der Kunststoffindustrie PolymerMat e.V., dem Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR) und dem 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. Zugleich bündeln die Mittelstand-Digital-Zentren die Anforderungen der KMU, damit diese in der Grundlagen- und angewandten Forschung Berücksichtigung finden.

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

*digitalzentrum-
chemnitz.de*

scads.ai

*ki-hub-sachsen-
thueringen.de*

*www.imms.de/
md*

Jahresbericht

© IMMS 2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Mittelstand-
Digital 

Mittelstand-Digital
Zentrum
Ilmenau 



A close-up photograph of a person's hand adjusting a small green sensor on a CNC machine. The machine's tool bit is positioned over a metal workpiece. A semi-transparent neural network diagram with white nodes and connecting lines is overlaid on the top half of the image. The background is a blurred industrial setting.

Aufwand senken, Nutzen steigern:

Anomalie-Detektion mit Edge-KI und unüberwachtem Lernen für smartes Maschinenmonitoring

Für automatisierbare Prozesse, Dienstleistungen und Anlagen hat das IMMS energieeffiziente Edge-KI-Systeme mit Gesamtsystem-Energiemodellierung entwickelt, um beispielsweise Bestandsanlagen mit kabellosen Sensoren für Condition Monitoring oder Füllstanderfassung nachrüsten zu können.
Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

KI und Machine Learning können in der Industrie die Effizienz steigern und viel Zeit einsparen – aber auch viel Zeit kosten, bis sie einsatzbereit sind. Um diesen Initialaufwand deutlich zu senken, hat das IMMS Methoden entwickelt und diese in zwei Demonstratoren implementiert. Für beide Szenarien konnte gezeigt werden, dass nicht nur ein schneller Einsatz von KI-basierten Monitoring-Lösungen möglich ist, sondern dieser auch ohne Cloud-Zugang funktioniert und sich somit schlanke Monitoring-Anwendungen ableiten lassen.

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

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

Einsatzbereich und Herausforderungen

Für effiziente Produktionsprozesse ist es entscheidend, Störungen von Maschinen früh zu erkennen, Ausfallzeiten zu minimieren und kostspielige Reparaturen zu vermeiden. Der Schlüssel dafür ist ein kontinuierliches Monitoring von Maschinenzuständen, meistens von Vibrationssignalen oder auch von der Stromaufnahme. Damit kann man frühzeitig vor einem tatsächlichen Ausfall Abweichungen vom normalen

Jahresbericht

© IMMS 2024

Betriebsverhalten erkennen. Insbesondere in Kombination mit modernen Machine-Learning-Verfahren lassen sich komplexe Muster und kleine Veränderungen identifizieren, die mit konventionellen Methoden nicht möglich sind.

Allerdings ist es ein erheblicher zeitlicher und organisatorischer Aufwand, Sensordaten aufzunehmen und potenzielle Fehlerzustände mit allen relevanten Betriebs- und Stördaten für ein Training von Algorithmen zu erfassen, vor allem in industriellen Anwendungen. 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 hervorrufen. Hinzu kommt, dass die gesammelten Rohdaten in der Regel umfangreich vorverarbeitet werden müssen, um sie für das Training eines KI-Modells nutzen zu können.

Lösungsansätze

Um KI und Machine Learning mit möglichst geringem Initialaufwand für Monitoring-Anwendungen von Unternehmen zu erschließen, fokussiert sich das IMMS auf unüberwachte Lernmethoden. Bei diesen wird ein bekannter Zustand, hier der fehlerfreie Gutzustand, erfasst und Algorithmen eingesetzt, um Abweichungen zu erkennen und entsprechende Maßnahmen einleiten zu können. Dazu wurden verschiedene Methoden untersucht. Ein einfacher Algorithmus wurde direkt auf einem kleinen, energieautarken Sensorsystem mit lokaler KI implementiert und mit einem Demonstrator zum Lüftermonitoring evaluiert. Komplexere, leistungsfähigere Methoden wurden in einem energieeffizienten Edge-KI-System implementiert. Die Daten werden auf dem Sensorknoten lokal vorverarbeitet. Komplexere Algorithmen, z.B. für die Anomalie-Detektion, werden auf dem Edge-System, z.B. auf einem Raspberry Pi, ausgeführt. Die Anwendung wird anhand der Überwachung von Vibrationen auf einem Shaker demonstriert. Das Verfahren und die Sensoranordnung zum Überwachen einer Funktion eines Bauteiles einer Maschine wurden patentiert.¹

Unüberwachtes Lernen

Unüberwachtes Lernen ist ein Teilbereich des maschinellen Lernens, bei dem Algorithmen eingesetzt werden, um Muster, Strukturen oder Zusammenhänge in Daten zu identifizieren – ganz ohne vorab definierte Zielwerte oder Labels. Ziel ist es, aus den reinen Eingabedaten wertvolle Informationen zu extrahieren, wie etwa Gruppierungen, Trends oder Ausreißer. Das heißt, Stördaten und Fehlerzustände müssen beim unüberwachten Lernen nicht mit viel Aufwand im Vorfeld erfasst werden.

¹ DE 10 2024 100 703 B3, <https://register.dpma.de/DPMAREgister/pat/register?AKZ=1020241007036>

Zu den typischen Methoden zählen **Clustering-Algorithmen** wie k -Means zur Gruppierung ähnlicher Datenpunkte, Verfahren zur **Dimensionalitätsreduktion** wie Hauptkomponentenanalyse oder Singulärwertzerlegung zur Vereinfachung komplexer Datensätze sowie **Anomalieerkennung**, um ungewöhnliche oder unerwartete Beobachtungen zu entdecken. Diese Verfahren sind besonders nützlich, wenn keine oder nur begrenzt gelabelte Daten vorliegen.

Für die weiteren Untersuchungen wurden unterschiedliche Datensätze, zum Teil öffentlich verfügbare wie z.B. der Pronostia-Datensatz², verwendet. Dabei wurden Vibrationsdaten von Lagern aufgezeichnet.

Clustering von Daten

Der k -Means-Algorithmus ist ein Verfahren aus dem Bereich des unüberwachten Lernens und wird vor allem für Clustering-Aufgaben eingesetzt. Hierbei werden Datenpunkte in k Gruppen unterteilt, sodass Punkte innerhalb einer Gruppe möglichst ähnlich sind. Zu Beginn wählt der Algorithmus zufällig k sogenannte Clusterzentren. Anschließend ordnet er jedem Datenpunkt das nächstgelegene Zentrum zu und berechnet danach die neuen Mittelpunkte der Gruppen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich die Gruppierungen nicht mehr wesentlich ändern. k -Means arbeitet in der Regel sehr schnell und lässt sich gut auf größere Datenmengen anwenden. Allerdings kann das Verfahren empfindlich auf Ausreißer reagieren und liefert nicht immer gute Ergebnisse, wenn die Daten komplex oder ungleichmäßig verteilt sind.

Datenreduktion mittels Singulärwertzerlegung und Korrelation

In Abbildung 1 ist der aufgenommene Amplitudenverlauf der Vibrationssignale für ein Maschinen-Lager aus dem Pronostia-Datensatz dargestellt. Darin sind einzelne Anomalien oder Abweichungen vom „intakten“ Zustandswert zu erkennen. Diese können aufgrund von äußeren Erschütterungen oder ähnlichen Ereignissen entstanden sein. Bei dem Pronostia-Datensatz wurden die untersuchten Lager mit zusätzlichen Kräften beaufschlagt, damit das Lager schneller verschleißt. Für industrielle Maschinen können bei normalem Verschleiß je nach Anwendung 10.000 – 100.000

² Nectoux, Patrick & Gouriveau, Raïfael & Medjaher, Kamal & Ramasso, Emmanuel & Chebel-Morello, Brigitte & Zerhouni, Noureddine & Varnier, Christophe. (2012). PRONOSTIA: An experimental platform for bearings accelerated degradation tests. *Conference on Prognostics and Health Management*. 1 – 8.

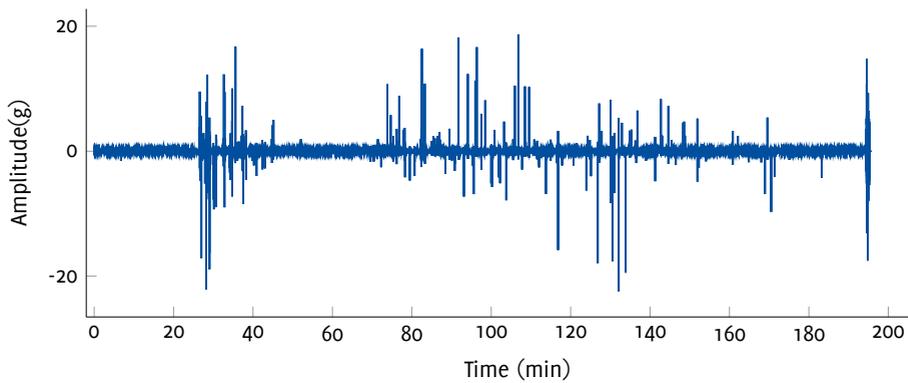


Abbildung 1: Amplitudenverlauf eines Lagers des Pronostia-Datensatzes. Grafik: IMMS.

Betriebsstunden vergehen. Daten im Prozess aufzunehmen und für ein Training von KI-Modellen vorzuverarbeiten, macht in der Regel etwa 80% des Gesamtaufwandes aus. Um somit nicht alle Rohdaten aufwändig vorverarbeiten zu müssen, ist eine Datenreduktion sinnvoll.

Singulärwertzerlegung

Die Singulärwertzerlegung (Singular Value Decomposition, SVD) ist eine Methode der linearen Algebra, um die Dimensionalität von Daten zu reduzieren. Zuerst werden die aufgenommenen Vibrationsdaten zeilenweise in eine Matrixdarstellung überführt. Dann werden diese in drei separate Matrizen zerlegt. Die Singulärwertzerlegung einer Matrix A wird in der Regel wie folgt dargestellt:

$$A = U \Sigma V^T$$

Hierbei sind:

- **U** : Die linke singuläre Vektormatrix. Die Spalten von U sind die Eigenvektoren der Matrix AA^T (Kovarianzmatrix).
- **Σ** : Die Diagonalmatrix der Singulärwerte. Die Singulärwerte repräsentieren die Wichtigkeit der jeweiligen Eigenvektoren und sind auf der Diagonalen von Σ angeordnet. Sie sind immer nicht-negativ.
- **V^T** : Die transponierte rechte singuläre Vektormatrix. Die Spalten von V^T sind die Eigenvektoren der Matrix $A^T A$ (Kovarianzmatrix).

Einen reduzierten Datensatz erhält man, indem nur die ersten k dominanten Singulärwerte und die entsprechenden Teile von U , Σ und V^T verwendet werden. Die Datenpunkte mit den größten Singulärwerten sind in Abbildung 2 dargestellt.

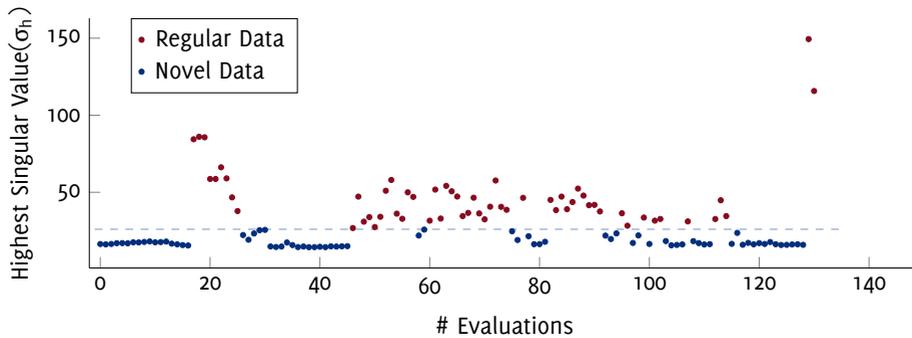


Abbildung 2: Darstellung der Singulärwerte mit ermittelten Schwellwert. Grafik: IMMS.

Die Standardabweichung der Singulärwerte wurde genutzt, um einen Schwellwert (Ψ), dargestellt als gestichelte Linie in Abbildung 2, für den Neuigkeitswert der Daten zu berechnen.

Korrelation

Die Singulärwerte können dazu genutzt werden, um in einem weiteren Schritt mittels Kreuzkorrelation Abweichungen von einem gelernten Gutzustand zu erkennen. Als Korrelationsalgorithmus wurde die Canonical Crosscorrelation Analysis (CCA) verwendet und für die Umsetzung 3 Phasen definiert, vgl. Abbildung 3:

- Learning Phase – Lernphase
- Observation Phase – Beobachtungsphase
- Deployment Phase – Implementierungsphase

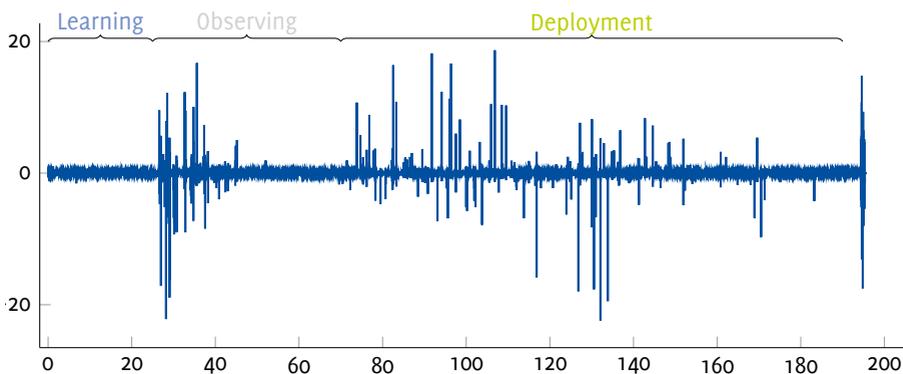


Abbildung 3: Amplitudenverlauf eines Lagers und Einteilung in die 3 Phasen. Grafik: IMMS.

Lernphase

In der Lernphase wird davon ausgegangen, dass sich die Maschine in einem intakten Gutzustand befindet. Die Singulärwertzerlegung wird auf das erfasste Vibrationssignal X angewendet, das eine 2D-Transformation der Sensordaten ist. Die für eine Analyse per Fast-Fourier-Transformation (FFT) in Frequenzanteile zerlegten zeitdiskreten Signale des Vektors der Singulärwerte wird als Merkmal für den intakten Zustand der Maschine verwendet und in einer Merkmalsmatrix F gespeichert. In dieser Matrix werden mehrere Instanzen einer solchen Erfassung und Zerlegung der Zustandsmerkmale gespeichert. Die Anzahl der in F gespeicherten Merkmale ist durch die Anwendung und dem im Sensorknoten verfügbaren Speicher begrenzt. Die Singulärvektoren, die diesen Merkmalsvektoren entsprechen, werden ebenfalls gespeichert und zur Berechnung eines Schwellenwerts ψ verwendet, wie in der Abbildung 2 dargestellt.

Beobachtungsphase

Die Beobachtungsphase ist optional, kann aber nützlich sein, um bestimmte Anomalien bzw. Zustände zu lernen und als Merkmal F zu speichern. Dies führt zur Aktualisierung der Merkmalsmatrix F und des Schwellenwertes ψ .

Implementierungsphase

In der Implementierungsphase werden neue Vibrationswerte (X) aufgezeichnet und mit SVD zerlegt, um den Merkmalsvektor f des neu aufgezeichneten Signals zu erhalten. Dieses Merkmal wird dann mittels CCA mit der bereits erlernten Merkmalsmatrix F des Gutzustandes analysiert. CCA versucht zu analysieren, wie unterschiedlich die gelernten Merkmale im Vergleich zu dem neu aufgenommenen Merkmal sind. Die Vergleichsskala ist immer 0 bis 1, wobei 0 für sehr unterschiedlich und 1 für identisch steht. Das Ergebnis der CCA-Analyse wird als Degradationskoeffizient bezeichnet. Ein Beispiel für einen sich verschlechternden Lagerzustand ist in Abbildung 4 dargestellt.

Kombination aus Singulärwertzerlegung und Korrelation

Diese Kombination aus Merkmalsextraktion mit SVD und nachfolgender Korrelation erlaubt eine automatisierte Merkmalsextraktion und anschließende Detektion von Zustandsänderungen. Weitere Details sind im Patent „Verfahren und Sensoranordnung zum Überwachen einer Funktion eines Bauteiles einer Maschine“, DE 10 2024 100 703 B3, beschrieben.³

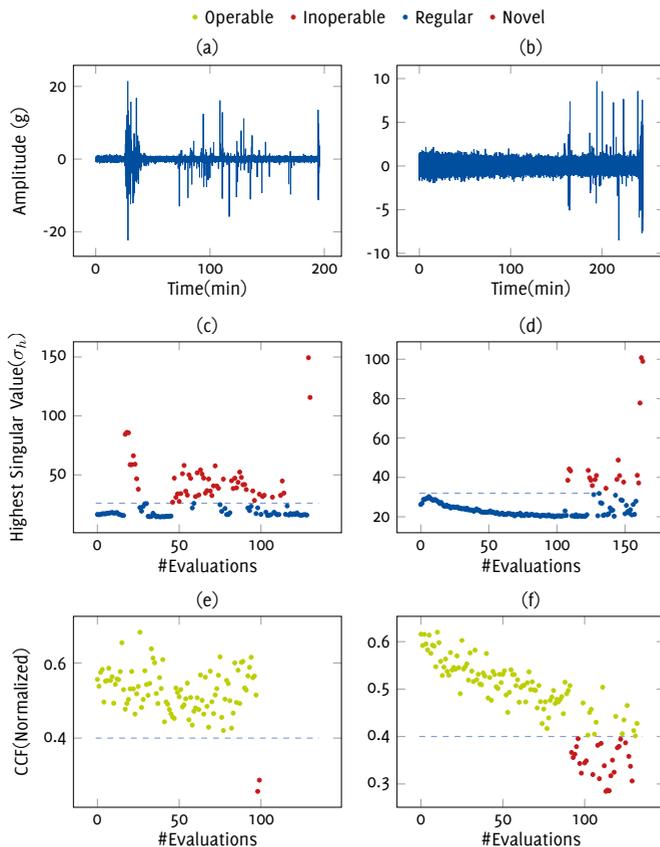


Abbildung 4:

Beispiel für einen sich verschlechternden Lagerzustand. Die Spalten zeigen Signale von zwei unterschiedlichen Lagern:

oben: Vibrations-
signale der Lager,

Mitte: Singulärwerte
der Vibrations-signale

unten: CCA der
Singulärwerte

Grafik: IMMS.

Anomalie-Detektion mit neuronalen Netzen

Neuronale Netze sind eine Methode, um Abweichungen vom Normzustand, d.h. Anomalien in den Daten, anhand wesentlich komplexerer Muster zu erkennen und somit ein zeitaufwändiges Erfassen bekannter Fehlerzustände überflüssig zu machen.

In dieser Untersuchung wurden zwei Modelle zur Anomaliedetektion verwendet: LSTM-AD (Long Short-Term Memory Anomaly Detection) und Autoencoder. Beide Modelle wurden mit Vibrationsdaten trainiert, die ausschließlich den normalen, also fehlerfreien Zustand einer Maschine repräsentieren. Sie lernen auf Basis einer festgelegten Fenstergröße, also eines bestimmten Zeitabschnitts der Messdaten, das typische Verhalten der Maschine und sagen anschließend die nächsten Messwerte voraus. Diese Vorhersage basiert auf den Mustern, die während des Trainings erkannt wurden.

Um die Robustheit der Modelle zu testen, wurden sie mit verschiedenen Testdaten evaluiert, sowohl mit fehlerfreien als auch mit fehlerhaften Daten, die bereits Anomalien enthalten können. Da die Modelle jedoch nur auf Gutzustände trainiert wurden, gelingt ihnen die Rekonstruktion der Vibrationsdaten bei Vorliegen einer Anomalie nicht mehr präzise. Es entsteht ein sogenannter Rekonstruktionsfehler, also die Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem vorhergesagten Signal. Aus diesem Fehler wird ein Anomalie-Score berechnet, der Hinweise auf ungewöhnliches Verhalten liefern kann. Zuvor werden die Daten aller drei Schwingungsachsen normalisiert und mithilfe eines gleitenden Fensters (Moving-Window-Ansatz) für das Modelltraining vorbereitet. Dabei stellt die Fenstergröße die Eingabe (X-Train) dar, während das nachfolgende Zeitfenster als Zielwert (Y-Train) dient.

Der aus dem Modell resultierende Rekonstruktionsfehler wird anschließend einem Change-Point-Detection-Algorithmus übergeben. Dieser sucht mithilfe eines fensterbasierten, schrittweisen Verfahrens nach Punkten im Signal, an denen sich das Verhalten signifikant ändert, also potenziellen Anomalien. In einem ersten Schritt identifiziert der Algorithmus mögliche Haltepunkte und berechnet deren Fehlerwerte. Im anschließenden Vorhersageschritt wählt er unter Berücksichtigung einer maximalen Anzahl erlaubter Change Points sowie einer Strafbewertung für übermäßige

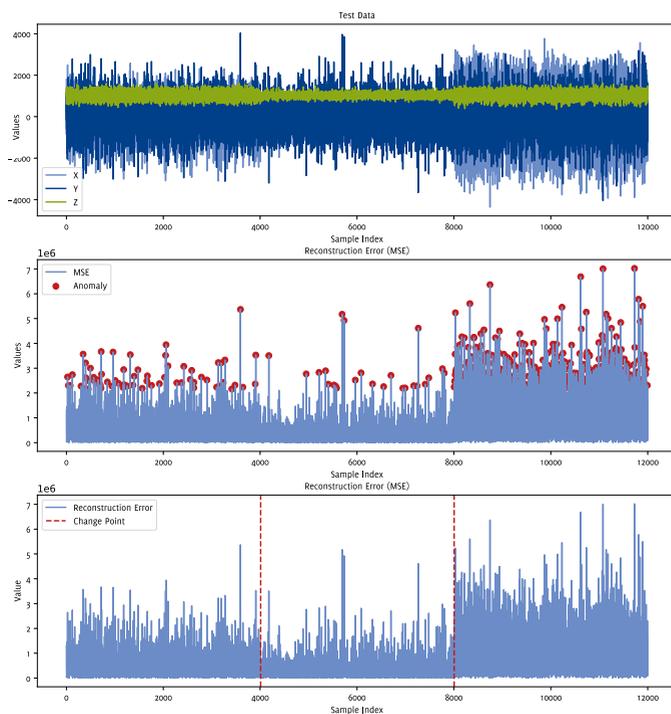


Abbildung 5:

oben:
Testdaten

Mitte:
Rekonstruktions-
fehler (Anomalien
mit statischem
Schwellwert),

unten:
Rekonstruktions-
fehler (Change Point
Detector).

Grafik: IMMS.

Unterteilungen die optimalen Punkte aus. Auf diese Weise lassen sich Veränderungen im Maschinenzustand automatisiert und zuverlässig erkennen.

In Abbildung 5 sind die Vibrationsdaten, der Rekonstruktionsfehler mit erkannten Anomalien, einmal mit einem statischen Schwellwert und einem Change Point Detektion Algorithmus dargestellt.

LSTM-AD (Long Short-Term Memory Anomaly Detection)

Die untersuchten Modelle erlauben eine Detektion von Anomalien. LSTM-AD ist besonders geeignet für die Analyse zeitabhängiger Daten, da es durch seine rückgekoppelte Struktur sowohl langfristige als auch kurzfristige Muster in sequenziellen Signalen erfassen kann. Das macht es zu einer besonders leistungsfähigen Methode, wenn Maschinenverhalten stark von zeitlichen Verläufen abhängt. Allerdings erfordert der Einsatz von LSTM-AD eine größere Menge an Trainingsdaten sowie eine aufwendigere Modellanpassung und ist damit auch rechenintensiv.

Autoencoder

Im Gegensatz dazu bieten Autoencoder einen effizienteren Ansatz zur Anomaliedetektion, da sie versuchen, Eingabedaten möglichst originalgetreu zu rekonstruieren. Weicht das rekonstruierte Signal stark vom Original ab, kann dies auf eine Anomalie hinweisen. Autoencoder sind besonders gut geeignet, wenn es sich um stationäre Vibrationsdaten handelt, also Daten, deren Muster sich über die Zeit wenig verändern. Sie sind einfacher zu trainieren als LSTM-Modelle, eignen sich jedoch weniger für stark zeitabhängige oder dynamisch veränderliche Zustände.

Bewertung der Methoden

Mit allen Methoden lassen sich Abweichungen von Normalzuständen in Daten erkennen. Die Singulärwertzerlegung ist eine robuste Methode zur Dimensionsreduktion und zur Identifikation neuartiger Muster in linearen Daten. Sie ist besonders geeignet, wenn die Datenstruktur relativ einfach ist und die Anomalien geringfügige Abweichungen in der Datenstruktur darstellen. Algorithmen zur Anomaliedetektion sind flexibler und leistungsfähiger bei der Analyse komplexer oder nichtlinearer Systeme. Sie können jedoch rechenintensiver sein und erfordern eine sorgfältige Parametrierung.

Demonstratoren

Um eine mögliche Anwendung im industriellen Umfeld zu veranschaulichen, wurden Algorithmen für zwei Szenarien in zwei Demonstratoren implementiert. Der einfache k -Means-Algorithmus wurde direkt auf einem kleinen, energieautarken Sensorsystem als lokale KI implementiert und mit einem Demonstrator zum Lüftermonitoring als Beispiel für die Überwachung von Lagern evaluiert. Eine komplexere, leistungsfähigere Anomalie-Detektion wurde in einem energieeffizienten Edge-KI System mit lokaler Vorverarbeitung auf dem Sensorknoten und Anomalie-Detektions-Algorithmen auf dem Edge-Device mit einer Datenverarbeitung anhand der Überwachung von Vibrationen auf einem Shaker demonstriert.

Lüfter-Demonstrator

Am Lüfter-Demonstrator kann ein defekter Lüfter mit einem kleinen, energieautarken Sensorsystem mit lokaler KI erkannt werden. Dazu wurden drei Lüfter verwendet, bei einem wurde das Kugellager beschädigt, die anderen beiden sind intakt. Der batteriebetriebene Sensorknoten erfasst Schwingungsmessdaten, wertet sie aus und klassifiziert den aktuellen Zustand. Das System enthält einen Schwingungssensor, der Schwingungen bis 6,4 kHz erfassen kann, und einen Mikrocontroller mit integriertem Funktransceiver.

Auf dem Sensorknoten wurde der Clustering Algorithmus k -Means implementiert. Der Sensor kann auf den Zustand des einen intakten Lüfters trainiert werden. 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, siehe Abbildung 6. Die



Abbildung 6:

Lüfterdemonstrator: Die Lüfter können einzeln an- und abgeschaltet werden. Das Sensorsystem wird mittig auf einem der Lüfter platziert und ist mittels eines Magneten befestigt. Der Status wird über eine LED angezeigt. Grün entspricht intakt, Rot defekt.

Foto: IMMS.



Abbildung 7: Demonstratorsystem mit (1) Vibrationserzeuger, (2) drahtlosen Sensorknoten, (3) Edge-Device und (4) Tablet. Foto: IMMS.

Daten können auch energiesparend mittels BLE (bluetooth low energy) zu einem Edge-Device übertragen werden.

Energieeffizientes Edge-KI-System

Dieser Demonstrator zeigt, wie sich mit einem drahtlosen Sensorknoten Vibrationsdaten aufnehmen und mit BLE (bluetooth low energy) zu einem Edge-Device übertragen lassen, auf dem ein LSTM-AD-Algorithmus zur Anomalie-Detektion implementiert ist.

Vibrationsdaten weisen je nach Maschine und Prozess komplexere Muster auf. Die dafür notwendigen Algorithmen benötigen daher Rechenkapazitäten außerhalb des Sensorknotens. Die Vibrationsdaten können jedoch auf dem Sensorknoten schon vorverarbeitet werden. Dazu wurden Methoden zur Datenkompression wie die Singulärwertzerlegung eingesetzt, um die Energieeffizienz und somit Batterielaufzeit des Sensorknotens zu erhöhen.

Für diesen Demonstrator wurde ein Schwingungserreger (Shaker) genutzt, um Vibrationen ähnlich zum industriellen Umfeld zu erzeugen. Der Sensorknoten ist auf dem Erregersystem montiert. Mit dem System kann nun ein Gutzustand trainiert werden. Der Sensorknoten erfasst zyklisch das Vibrationssignal, was von 1x pro Sekunde bis zu 1 x pro Stunde einstellbar ist, und überträgt es zu dem Edge-Device, in dem Fall ein Raspberry Pi ohne Cloud-Zugang. Auf diesem werden dann Abweichungen vom Gutzustand detektiert und per Dashboard im Browser auf einem Tablet visualisiert. Wird nun das erzeugte Schwingungssignal verändert, werden diese Änderungen detektiert und grafisch angezeigt.

Das IMMS fokussiert sich bei seinen Arbeiten zu adaptiven Edge-KI-Systemen darauf, die Bestimmung und Vorhersage von Maschinen- und Werkzeugzuständen im Applikationsfeld der vorausschauenden Wartung mithilfe von KI zu erforschen und umzusetzen.

Die vorgestellten Ergebnisse zum unüberwachten Lernen helfen, den Aufwand und die Kosten bei der Implementierung von KI beim Monitoring zu reduzieren. Der Schwerpunkt lag auf Vibrationssensoren, da diese meist in der Praxis eingesetzt werden, um Maschinenzustände zu erfassen. Einfache Algorithmen wie ein Clustering wurden in einem Mikrocontroller implementiert, um zu zeigen, dass diese sich direkt auf Ultra-Low-Power-Sensorik ausführen lassen. Für komplexere Aufgaben müssen Daten vom Sensorknoten zu einem Edge-Device übertragen werden, auf dem die KI-Algorithmen ausgeführt werden. Dafür wurden Kompressionsalgorithmen untersucht und auf dem Sensorknoten implementiert, um nur die benötigten Daten an das Edge-Device zu senden und so eine möglichst hohe Batterielaufzeit des Sensorknotens zu erreichen. Es wurde gezeigt, dass sowohl das Training als auch die Inferenz, also die KI-basierte Schlussfolgerung, direkt auf dem Sensorknoten oder bei komplizierten Algorithmen auf Edge-Devices wie einem Raspberry Pi ohne Cloud-Zugang implementiert werden können.

Auf der Basis dieser Lösungen zur Erfassung von Maschinenzuständen und zur automatischen Detektion von Abweichungen von Gutzuständen ist das IMMS bestrebt, Weiterentwicklungen voranzubringen und sucht dafür nach Anwendungspartnern.

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



Die vorgestellten Lösungen wurden in der internen, vom Freistaat Thüringen geförderten KI-Forschungsgruppe des IMMS und im Projekt HoLoDEC entwickelt. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben HoLoDEC wurde 2024 mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ME0703 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

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

www.imms.de/embeddedai

www.imms.de/i40

www.imms.de/holodec

Jahresbericht
© IMMS 2024



Effizientes Zusammenführen heterogener Daten für übergreifende Analysen in der Landwirtschaft und darüber hinaus

In MIRO werden Daten in Form von Zeitreihen erhoben und u.a. für die Forschung am digitalen Zwilling regionaler Obstsorten genutzt. Das IMMS hat hierfür ein Konzept für ein effizientes Zusammenführen heterogener Daten für übergreifende Analysen in der Landwirtschaft entwickelt, das sich auch für andere Anwendungen nutzen lässt. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Das IMMS arbeitet im Projekt „Mitteldeutsche Innovationsregion Obstbau“ (MIRO) an Digitalisierungslösungen mit dem Ziel, die Zukunftssicherheit der gesamten Wertschöpfungskette Obst von Anbau, Weiterverarbeitung bis Vermarktung in der Region Mitteldeutschland zu stärken und damit Themen wie ein sich rasch wandelndes Klima sowie eine herausfordernde Fachkräfte- und Wettbewerbssituation in der Landwirtschaft, v.a. im Obstbau, zu adressieren. So ließen sich beispielsweise Probleme bei der Verarbeitung durch angepasste Anbaumethoden vermeiden oder lokal geeignete Obstsorten je nach konkreten Umwelt- und Bodenbedingungen auch in Zeiten des Klimawandels finden.

www.imms.de/

miro

Zentral für die Digitalisierung ist der Austausch bzw. das Zusammenführen von Daten aus unterschiedlichen Systemen bzw. von unterschiedlichen Akteuren. So werden, wie in vielen anderen Disziplinen auch, in der Landwirtschaft unterschiedlichste Daten benötigt, um effiziente Abläufe im Betrieb und über Betriebe hinweg entlang der Wertschöpfungskette zu gewährleisten. Diese reicht von Erzeugern und Zulieferern

Jahresbericht

© IMMS 2024

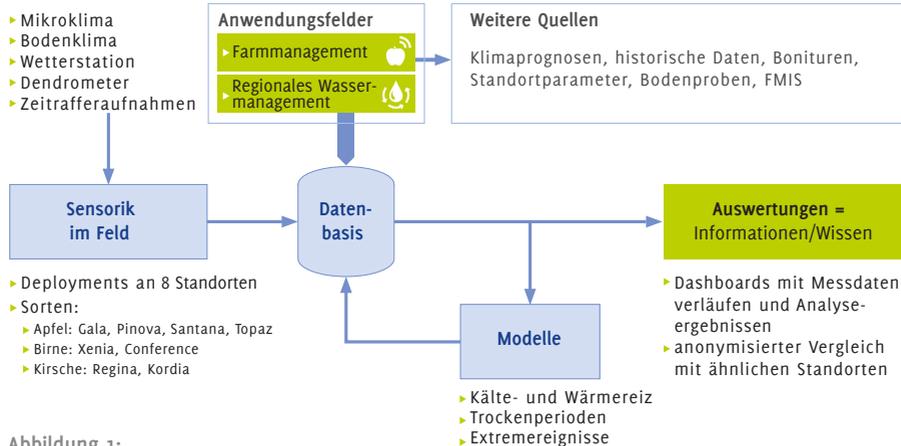


Abbildung 1: Datenbedarfe und -verarbeitung für den digitalen Zwilling in MIRO (schematisch). Grafik: IMMS.

über Logistik mit Kühllagern sowie Verarbeitern wie Keltereien oder Konservenherstellern hin zu fertigen Produkten wie Saft, Wein oder Apfelmus für Endkunden im Handel. Aber auch andere Interessengruppen wie Pflanzenzüchtung, Baumschulen oder Behörden erwarten zunehmend einen Datenaustausch mit den Betrieben. Dieser wird durch zahlreiche unterschiedliche Systeme, nicht passende, z.B. herstellerabhängige, Schnittstellen und separate Initiativen erschwert. Im Ergebnis müssen Daten mehrfach aufbereitet werden, und das zum Teil mit erhöhtem manuellen Aufwand, wenn Dinge von Hand dokumentiert und ins System übertragen oder Daten aus unterschiedlichen Systemen manuell exportiert und zusammengeführt werden müssen. Solche Aktivitäten sind nicht Kernaufgabe der Landwirte.

Vor diesem Hintergrund hat das IMMS in MIRO zwei Anwendungsfälle bearbeitet – den eben kurz umrissenen Datenaustausch zwischen den Akteuren in der Region und den digitalen Zwilling für Feedback zu Sorteneigenschaften an unterschiedlichen Standorten entlang der Wertschöpfungskette.

Den Anwendungsfall Datenaustausch hat das IMMS sowohl mit Blick auf die Landwirtschaft als auch auf die beteiligten Projektpartner betrachtet. Zunächst wurden Bedarfe beider Zielgruppen analysiert und dabei das effiziente, idealerweise automatisierte Zusammenführen der Daten und deren Ablage in einer für eine Weiternutzung für verschiedene Zwecke geeigneten Form als Zielstellung identifiziert.

Der Lösungsansatz auf Basis aktuell verfügbarer Plattformen sollte eine einheitliche, zentrale Ablage für alle Arten von strukturierten wie unstrukturierten Daten realisieren. Jahresbericht
© IMMS 2024

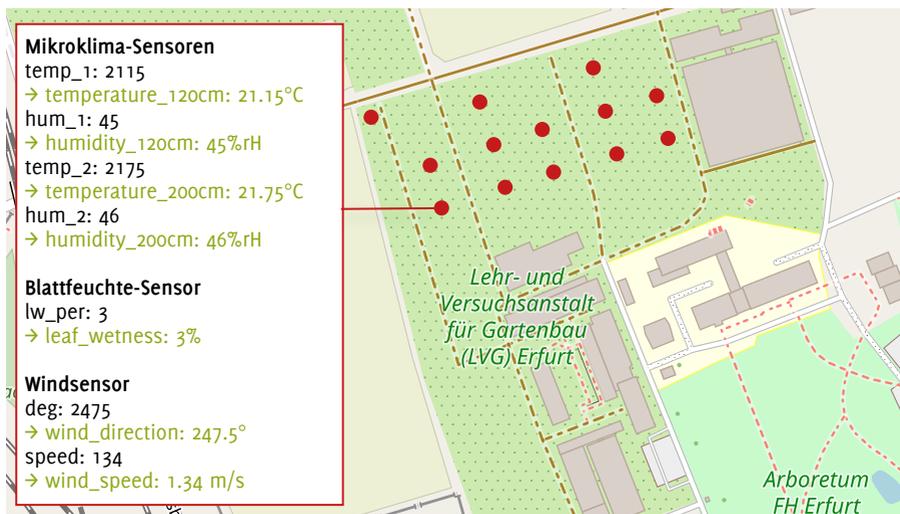
ren, die die Abfrage und Ablage von Daten ebenso erleichtert wie das spätere Auffinden oder Analysieren anhand mehrerer Datenquellen. Dieser Ansatz sollte auch nicht spezifisch auf die Verarbeitung der Daten in MIRO begrenzt sein, sondern vielmehr auch anderen Daten-intensiven Anwendungen, z.B. im KI-Bereich, zugutekommen.

Datenerhebung von Zeitreihen am Beispiel digitaler Zwilling regionaler Obstsorten

Am IMMS werden nicht nur in MIRO, sondern in weiteren Projekten wie z.B. EX-PRESS, umfangreiche Daten erhoben, konkret Zeitreihendaten aus verschiedenartigen Sensoren in landwirtschaftlichen Schlägen, Wetterdaten oder auch Bilddaten. Datenquellen sind eigene Sensorikinstallationen wie drahtlose Sensornetze, Wetterstationen oder Wildkameras zur Pflanzenbeobachtung, Partner oder auch öffentliche und kommerzielle Datenbereitsteller im Netz wie der Deutsche Wetterdienst (DWD) oder Sensorikplattformen, von denen Daten über verschiedene Schnittstellen (APIs) bezogen werden können.

Zwar laufen Zeitreihendaten in diesen Projekten bereits systematisch in Zeitreihendatenbanken am Institut ein, jedoch werden sie von Gateways im Feld ohne weitere Aufbereitung geschrieben. Aspekte wie die zeitlich variierende Zuordnung von Messknoten zu Messstellen oder die Zuordnung von Index-referenzierten Messfühlern zu

Abbildung 2: Roh- vs. semantisch aufbereitete Daten für einen Sensorknoten, Verortung der Knoten nur illustrativ). Bei der Aufbereitung erfolgen u.a. die Zuordnung semantischer Bezüge wie der Einbauhöhe/-tiefe und Umrechnungen. Karte erstellt mit MapOSMatic/OCitysMap am 21. Juli 2025. Map styles: Baumkarte by Oliver Rudzick; Allotments overlay; Data source: Kartendaten ©2025 OpenStreetMap.org und Mitwirkende (siehe <http://osm.org/copyright>).



bestimmten Messtiefen oder -höhen sind erst bei der weiteren Arbeit mit den Daten in Zusammenhang zu bringen. Praktisch heißt das, dass diese Metainformation mit den Daten bei jeglicher Weiternutzung erneut kombiniert werden müssen, was fehleranfällig ist. Außerdem lassen sich Zeitreihendatenbanken, vor allem die genutzte InfluxDB, nicht über die übliche Datenbank-Abfragesprache SQL abfragen, was die Nutzung für Auswertungen erschwert.

Die Arbeiten in MIRO im Anwendungsfall Digitaler Zwilling erfordern eine intensivere Auswertung von Daten und zeigten die notwendigen Ansatzpunkte für die eigenen Datenbestände auf. Hier sollen sensorisch und manuell erhobene Daten wie die von Bonituren Rückschlüsse zur Sorteneignung vor dem Hintergrund des Klimawandels zulassen. Aber auch für fachlich gänzlich anders gelagerte Projekte, in denen Daten zu erfassen und intensiver zu verarbeiten sind, wurde das Potenzial für neue Ansätze deutlich.

Zeitgemäße Ansätze für große, heterogene Datenbestände

Daher wurde im MIRO-Anwendungsfall Datenaustausch zunächst der Stand der Technik für Datenhaltung im Allgemeinen eruiert. Konzeptuell ist dieser nach den älteren Konzepten Data Warehouse zur effizienten Ablage vereinheitlichter strukturierter Daten und Data Lake zur effizienten Ablage heterogener, einschließlich unstrukturierter Daten beim sog. Lakehouse angekommen, das die Vorteile beider Ansätze zu vereinen versucht.

Für Lakehouses gibt es verschiedene Open-Source-Lösungen, die komplex zu realisieren und nutzen sind und auf Object Stores als Datenspeicher zurückgreifen. Ein Object Store speichert Dateien als Objekte in sog. Buckets. In diesen Objektsammlungen sind sie mit Namen, optionalem Pfad und ggf. weiteren Attributen zu finden. Vertreter von Object Stores sind Cloud-Speicher wie Amazon AWS S3 oder die Open-Source-Lösung MinIO mit dazu kompatibler Schnittstelle. Verbreitete Lakehouse-Lösungen sind im Open-Source-Bereich Apache Iceberg oder Apache Hudi, im kommerziellen Bereich Databricks oder Snowflake. Iceberg und Hudi wurden näher betrachtet, da diese auch in eigenen Instanzen lokal betrieben werden können.

Bei den Betrachtungen ausgewachsener Lakehouse-Lösungen wurde schnell klar, dass diese zum einen leistungsfähige Hardware für den Betrieb auf eigener Infra- Jahresbericht
© IMMS 2024

struktur benötigen, wie z.B. Cluster für Spark SQL als Abfrage-Engine. Zum anderen erfordern sie erhebliches Know-how für den Betrieb und in der Nutzung. Letzteres stellt für ein Institut oder andere Betreiber bezüglich der IT-Ressourcen und Schulung von Fachkräften ohne tiefgehendere Datenbankkenntnisse durchaus eine nennenswerte Hürde dar. Allerdings sind Teile der komplexen Lakehouse-Lösungen durch Big-Data-Anwendungen und Fortune-500-Unternehmen motiviert, da deren gesamte Datenbasis darauf abgebildet wird. Die Anforderungen für die Ablage von Messdaten und Auswertungen (WORM, write-once read-many) werden aber bei weitem überstiegen.

Als tragfähige Alternative stellte sich bei Betrachtung aktueller Technologien ein Ansatz heraus, der ein Lakehouse dadurch realisiert, dass Dateien im Apache-Parquet-Format in geeigneter hierarchischer Dateisystemstruktur direkt im Object Store abgelegt werden. Bei Parquet handelt es sich um ein mittlerweile verbreitetes binäres Dateiformat für tabellarische Daten, das speicherplatzeffizient und performant einlesbar ist, typische Probleme bei der Arbeit mit CSV-Dateien (wie unklare Datentypen von Spalten, Varianten der Darstellung von Fehlwerten u.a. vermeidet) und darüber hinaus die Integration von Metadaten erlaubt. Parquet-Dateien in MinIO/S3 können per Apache Spark SQL oder über die In-Prozess-Datenbank DuckDB performant und gleich einer Datenbank per SQL abgefragt werden. Dieser Ansatz vermeidet die Komplexitäten „ausgewachsener“ Lakehouse-Tabellenformate in Nutzung und Betrieb; Einschränkungen diesen gegenüber sind für die betrachteten Nutzungsszenarien unerheblich.

Tschüss CSV, hallo Parquet – Datenhaltung für MIRO leichter und flexibler

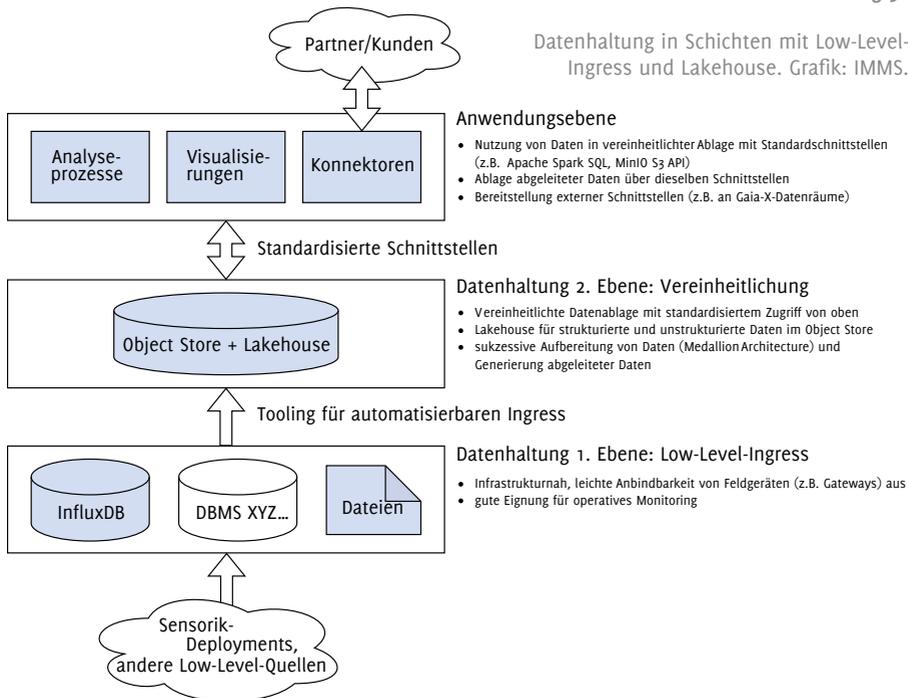
Statt Daten von der Quelle, insbesondere Sensorikinstallationen im Feld, direkt ins Lakehouse zu schreiben, hat es Vorteile, eine Zeitreihendatenbank wie die in diesen Projekten bereits genutzte InfluxDB beizubehalten. Diese ist aus dem Feld von ressourcenbeschränkten Geräten wie IoT-Gateways einfacher und leichtgewichtiger anzusprechen und kann bei Bedarf auch anderswo als zentral auf einem Server am IMMS liegen. Die Flexibilität der InfluxDB gegenüber SQL-Datenbanken hat sich dahingehend bewährt, dass kein starres Schema definiert und gepflegt werden muss. Und da es nicht sinnvoll ist, am Gateway bereits alle weiteren Informationen konfigurativ vorzuhalten, die für die angestrebte Datenaufbereitung und Metadatenannotation notwendig sind, ist dieser Schritt nachgelagert und separat besser zu realisieren.

Der Ingress in das Lakehouse geschieht durch geschaffene flexible Werkzeuge nachgelagert periodisch. Dabei werden die Daten aufbereitet (grundlegend gefiltert, umgerechnet) und mit Metadaten (Größen, Einheiten, Standorte etc.) angereichert. Das Ergebnis dieses Prozesses sind Parquet-Dateien mit Bezug zu einzelnen Sensorik-installationen und bestimmten Zeitbereichen, die in einer durchdachten Organisationsstruktur im MinIO abgelegt und anschließend von dort abgefragt und weiter verarbeitet werden können.

Datenhaltung mit InfluxDB oder anderen Datenbanken

Abbildung 3 zeigt das Konzept im Überblick mit zwei Ebenen der Datenhaltung: Die erste besteht in diesem Fall aus einer InfluxDB-Instanz (eigene Präferenz, andere Lösungen wären hier bei Adaptierung des Ansatzes durch Andere ebenso denkbar) für sensorische Datenerhebungen und weiteren vorhandenen oder extern bereitgestellten Quellen, z.B. anderen Datenbanken oder auch einfach CSV-Dateien. Ein geeigneter Satz an Werkzeugen wird verwendet, um Daten aus dieser ersten Ebene ins Lakehouse zu „heben“. Dabei erfolgt eine erste Aufbereitung und Metadatenannotation. Auf dem Lakehouse können weitere Verarbeitungen erfolgen sowie Visualisierungen

Abbildung 3:



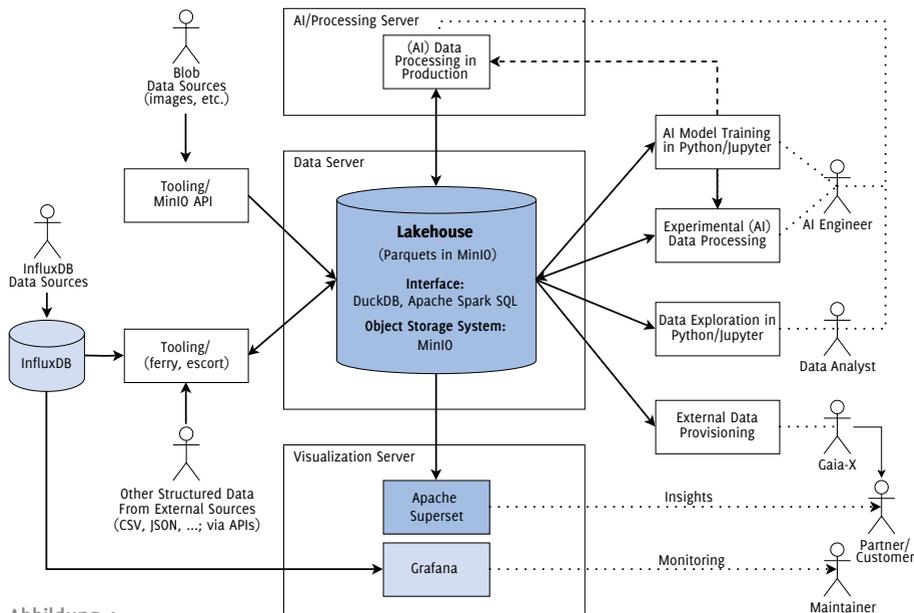


Abbildung 4:

Nachhaltige Datenhaltung per Lakehouse auf Basis von Parquets in MinIO. Grafik: IMMS.

und Schnittstellen oder Datenexporte aufsetzen, wie das für den digitalen Zwilling des regionalen Obstes geplant ist.

Abbildung 4 detailliert das Konzept weiter: Im Kern der Datenhaltung steht das Lakehouse auf Basis von Parquet-Dateien im Object Store MinIO. Im MinIO/Lakehouse gibt es einzelne Buckets je Projekt oder Sensorikfeldinstallation (Deployment). In jedem dieser Buckets gibt es auf der obersten Ebene zwei Verzeichnisse: „warehouse“ für strukturierte Daten, weiter strukturiert nach den Ebenen der sog. Medallion-Architektur mit den Ebenen Bronze, Silver und Gold für unterschiedliche Grade der Verarbeitung, und „blobs“ für anders oder unstrukturierte Daten wie Bilder, Videos oder KI-Modelle.

Automatisierter und kontinuierlicher Datentransfer

Der Ingress, also der Transfer strukturierter Daten in das Lakehouse aus InfluxDB-Instanzen und anderen Quellen, erfolgt automatisiert und kontinuierlich mittels zweier dafür implementierter Software-Komponenten. Diese sind flexibel konfigurierbar und erzeugen Zeitscheiben-Parquets (jeweils für ein Jahr, einen Monat, einen Tag oder eine Stunde). Das Schreiben von Daten in Einzeldateien für kürzere Zeiträu-



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

Abbildung 5: Monitoring-Dashboard, hier für die Inbetriebnahme eines Mira-Sensornetzes, auf Basis von Grafana und Roh- incl. technischer Metadaten in einer InfluxDB. Quelle: IMMS.

me und Zusammenführen dieser zu größeren Zeiträumen, sobald diese passé sind, vermeidet ein ineffizientes ständiges erneutes Schreiben aller vorliegenden Daten. Beim Erzeugen der Parquets werden diese mit Metadaten auf Basis einer eigenen JSON-Struktur versehen; pro Zeitreihe werden die Metadaten zudem in einer namentlich zugeordneten, separaten JSON-Datei abgelegt, auf die noch leichter zugegriffen werden kann.

Die InfluxDB bleibt die bevorzugte Quelle für ein Monitoring von Sensorinstallationen, da man hier (auf der Ebene von Rohdaten und weiterer technischer Metadaten, die für die eigentliche Datenauswertung uninteressant sind und daher nicht ins Lakehouse überführt werden) Probleme besser nachvollziehen kann. Hierbei hat sich Grafana zur Anzeige in Dashboards bewährt. Für die Visualisierung aufbereiteter Daten im Lakehouse soll zukünftig primär Apache Superset genutzt werden, das im Unterschied zu Grafana auch andere Daten als Zeitreihendaten und Einzelwerte visualisieren und dabei Interaktionsmöglichkeiten bieten kann.

Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung auf dem Lakehouse kann mit verschiedenen Ansätzen erfolgen, Python und R sind gleichermaßen leicht nutzbar, mit Zugriff auf Parquets im Lakehouse via DuckDB oder Spark SQL. Dies gilt für algorithmische Verarbeitungsansätze ebenso wie für KI-basierte. Zudem kann bei der Entwicklung von Verarbeitungen zunächst leicht mit festen beispielhaften Parquets gearbeitet und dann

durch Anpassungen des Pfads bzw. URLs bei der Produktivsetzung auf „Live-Daten“ umgeschwenkt werden, ohne dass Anpassungen am Code nötig sind. Verarbeitungsergebnisse können ebenfalls einfach als Parquets im Lakehouse abgelegt, während der Entwicklung zur Gegenprüfung aber auch zunächst lokal erzeugt und validiert werden.

Umsetzung für den digitalen Zwilling des regionalen Obstes

In MIRO wurde eine MinIO-Produktivinstanz auf Servern am IMMS aufgesetzt. Auf die Einrichtung eines Apache-Spark-SQL-Clusters wurde verzichtet, stattdessen wird auf DuckDB gesetzt. Neben der MiniIO-Instanz laufen Produktivinstanzen der geschaffenen Werkzeuge für automatisierte Daten-Ingresse und -verarbeitungen.

Auf dieser Basis konnten und werden für den digitalen Zwilling in MIRO sämtliche bislang und weiterhin in InfluxDB-Instanzen eingehenden Zeitreihendaten einem au-



Abbildung 6:

Illustration der Datenaufbereitung anhand von Beispieldaten aus SQL-Abfragen auf dem Lakehouse via DuckDB. Von oben nach unten:

1. Auf Bronze geschriebene, bereits metadatenannotierte Rohdaten verschiedener Messpunkte mit uneinheitlichen/asynchronen Zeitstempeln.
2. Auf Bronze intervallnormierte Daten eines Messpunkts.
3. Auf Silver zu Tagesaggregaten zusammengefasste Werte eines Messpunkts. Zudem ist anhand der URLs in den Abfragen die verwendete Organisationsstruktur im Lakehouse/MinIO ersichtlich.

tomatisierten kontinuierlichen Ingress in das Lakehouse zugeführt werden, der die Daten aufbereitet, dabei semantisch zuordnet und mit Metadaten annotiert. Weitere Automatisierungen führen ebenfalls kontinuierlich Intervallnormierungen der typischerweise asynchron erfassten Daten und auch Script-basierte Verarbeitungen per Python und R durch. Damit werden mit geringer Latenz kontinuierlich Daten aller Sensorikinstallationen im Lakehouse bereitgestellt und dort aufgearbeitet. Periodisch erfolgen Verarbeitungen dieser auf der Medallion-Schicht Bronze erzeugten Daten in die Schicht Silver (z.B. durch Aggregationen). Neben strukturierten Daten werden im Lakehouse auch unstrukturierte Daten, wie etwa Bilder oder Firmware-Images als Sicherungen, zentral zugänglich abgelegt.



Abbildung 7: Frostschäden an Kirschblüten am LVG Erfurt, dokumentiert durch Wildkamera-Fotos im April 2024: Blüten vor dem Frost, bei Frost, nach dem Frost. Fotos: IMMS.

In MIRO werden zusätzlich Bilddaten im Lakehouse abgelegt, auf die mit MinIO-/S3-Client-Bibliotheken leicht zugegriffen werden kann und die so bei Datenverarbeitungen einbezogen werden können. Aus der Arbeit mit den Daten resultierende Zwischenergebnisse in Form abgeleiteter Daten können wiederum im Warehouse-Teil des Lakehouses abgelegt werden.

Neben selbsterfassten werden zusätzlich verschiedene Daten externer Dienste eingebunden und ebenfalls als Parquet-Dateien abgelegt. Dabei werden vor allem Daten vom DWD, dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), aber auch Daten von verschiedenen Anbietern von Wetterstationen eingebunden, je nachdem, welche Sensorik bei den Partnern bereits vorhanden war oder synergetisch durch Partner im Projekt ausgebracht wurde.

Metric	Durchschnittstemperatur [°C]												Total (Average)		
	month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12	
slice															
200x		1.8	2.0	4.4	8.5	12.4	16.0	18.3	18.0	13.6	9.3	4.1	2.2		9.2
201x		1.9	3.2	5.2	8.5	12.8	15.8	18.1	18.1	14.4	9.3	4.4	2.0		9.5
202x		2.7	2.8	5.5	8.8	13.3	16.0	18.1	18.2	14.0	9.6	4.6	2.5		9.7
203x		2.4	3.1	5.8	9.0	13.1	16.3	18.6	18.4	14.5	10.0	4.8	3.0		9.9
204x		2.7	3.5	5.1	9.2	13.8	16.8	19.2	19.3	14.8	10.0	4.7	3.0		10.2
205x		2.7	3.6	5.8	9.5	13.3	16.7	19.1	18.9	14.4	10.3	5.2	2.7		10.3
206x		3.2	3.4	6.2	9.5	13.9	17.3	19.9	19.3	15.1	10.7	5.4	3.4		10.6
207x		3.0	3.9	6.0	9.6	14.5	16.7	19.6	19.5	15.3	10.9	5.9	3.6		10.7
208x		3.0	3.5	5.8	10.1	14.4	17.5	19.6	19.0	15.2	10.5	5.5	3.5		10.7
209x		3.1	3.9	6.1	9.7	14.3	17.3	20.0	19.9	16.0	10.9	6.1	3.6		10.9
Total (Average)		2.7	3.3	5.6	9.3	13.6	16.6	19.1	18.9	14.7	10.1	5.1	2.9		10.2

Niederschlag (Monatssummen-Mittel)

🔍 ⌵ ⌵

Metric	Durchschnittliche Niederschlagssumme [mm]												Total (Average)		
	month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12	
slice															
200x		32.1	38.9	44.9	43.9	62.8	53.9	67.5	57.3	48.8	35.6	50.6	50.7		48.9
201x		43.2	38.4	49.0	44.5	55.1	49.3	72.4	56.3	55.6	38.7	64.9	52.8		51.7
202x		39.6	40.1	49.7	41.9	58.6	54.5	84.5	52.8	52.1	40.0	60.1	53.7		52.3
203x		42.3	39.4	45.9	41.0	58.7	53.5	78.6	50.5	59.5	39.1	57.9	61.2		52.3
204x		40.7	41.8	49.8	40.8	55.4	54.7	67.5	55.5	54.0	37.9	61.2	61.5		51.7
205x		46.1	41.7	49.3	41.4	52.5	50.6	77.4	46.1	54.2	47.0	61.6	51.1		51.6
206x		46.6	39.4	42.2	48.5	53.2	54.1	72.2	52.7	51.6	37.1	63.2	56.7		51.5
207x		50.9	37.1	53.7	40.8	57.9	58.4	76.1	53.0	57.6	43.4	63.8	58.1		54.2
208x		45.0	41.7	51.0	40.5	61.5	50.2	78.3	58.7	56.4	36.6	57.0	59.7		53.0
209x		44.3	43.9	55.5	41.7	58.9	55.5	74.5	45.7	45.2	39.3	63.6	60.4		52.4
Total (Average)		43.1	40.2	49.1	42.5	57.5	53.5	74.9	52.9	53.5	39.5	60.4	56.6		52.0

Abbildung 8:

Prognosen für Jahrestemperatur- und -niederschlagsverlauf für den Standort LVG Erfurt anhand des Modells RCP4.5 mit Erderwärmung um 2,6 K bis 2100.

Daten: UFZ, Visualisierung: IMMS via Apache Superset.

Es wurde bereits eine erste Standortanalyse durchgeführt mit dem Ziel, die Auswirkungen des Klimawandels sichtbar zu machen. Genutzt wurden hierfür bereits Daten des DWD zur historischen klimatischen Entwicklung, Klimaprognosen des Projektpartners UFZ sowie automatisierte Aggregationen von monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten. Abbildung 8 zeigt eine exemplarische Analyse in Superset.

Ausblick in MIRO

In MIRO wurde ein Datenhaltungskonzept als Grundlage für Datenerhebungen und -analysen erarbeitet, mit denen künftig u.a. auf Basis von Klima- und Bodenbedingungen fundierte Entscheidungen für den Anbau von lokal geeigneten Obstsorten abgeleitet werden können, die dem Klimawandel gewachsen sind.

Auf Basis der aktuell vorhandenen Silver-Daten sollen perspektivisch weitere Auswertungen über den aktuell begonnenen Standortvergleich hinaus ergänzt werden. Dazu sollen auch weitere Bonitur-Daten automatisiert in das Lakehouse geschrieben werden und so die Auswertung der Bilder (z.B. zur Verifikation der identifizierten

Blühzeitpunkte) wie auch die Korrelation von Ertragsdaten ermöglichen. Hier sind zudem weitere Sensorsysteme geplant, um Betriebe bei der Erfassung zu unterstützen und diese möglichst zu automatisieren. Die vorgestellte Architektur ermöglicht durch gezielte Konfigurationen von Ingressen und Exportfunktionen einen angepassten, automatisierten Datenaustausch auch zwischen verschiedenen Akteuren, wenn die entsprechenden Schnittstellen bekannt sind.

Die vorgestellte Lakehouse-Architektur ist dabei nicht nur auf den Kontext von MIRO beschränkt. Durch die Vereinheitlichung des vorgestellten Ansatzes können Datenabruf und -ablage durch generische, wiederverwendbare Bibliotheken für die gängigen Auswertungswerkzeuge und -sprachen (z.B. Python, R) auf einfache Weise realisiert werden. MinIO als S3-kompatibler Object Store erlaubt die Nutzung derselben Tools und Bibliotheken auch für andere S3-kompatible Object Stores und damit ggf. auch eine Nutzung der Lösung auf Basis z.B. eines Cloud-Anbieters, ohne dass sonstige Anpassungen notwendig wären.

Kontakt:

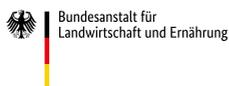
Dipl.-Inf. Marco Götzte, marco.goetze@imms.de

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

Gefördert durch



Projektträger



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Förderung des Vorhabens MIRO erfolgte 2024 aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Bekanntmachung über die Förderung der Einrichtung von Experimentierfeldern als Zukunftsbetriebe und Zukunftsregionen der Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie in vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten mit dem Förderkennzeichen 2822ZR0005.



1 t



FORSCHUNGSFELD

**MAGNETISCHE
6D-DIREKTANTRIEBE**

**MIT NANOMETER-
PRÄZISION**



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

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

Highlights 2024 im Forschungsfeld

Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

Umbau und Erweiterung der Mechatroniklabore

2024 wurden am IMMS für die Umgestaltung und Erweiterung der Mechatroniklabore tonnenweise Antriebe bewegt, um der Forschung am IMMS an subnanometergenauen Antrieben mehr Raum zu schenken. Die bis dato mit Stahlfedern entkoppelten Fundamente in den Hochpräzisions-Laboren wurden nun mit pneumatischen Schwingungsisolatoren ausgestattet, damit die Antriebe weitgehend isoliert von Gebäudeschwingungen arbeiten können. Zudem wurde mehr Raum geschaffen, u.a. in einem neuen Labor für die Durchführung verschiedenster Forschungsprojekte, die nicht die hohen Anforderungen an Schwingungsisolierung und Umweltkontrolle wie in den Hochpräzisionslaboren mit sich bringen.

High-precision labs reorganised

for research down to the picometre

Für Forschung bis zum Pikometer:
Hochpräzisions-Labore neu aufgestellt

Das Video zeigt einen Teil der Umbauarbeiten in den Hochpräzisionslaboren: <https://youtu.be/XiQR5vMODg4>

76

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

Durch die nun vergrößerte Kapazität in den Hochpräzisionslaboren konnte das „kleine“ 3D-Nanopositioniersystem endlich auf geeignete Fundamente umziehen und dort zum neuen 6D-System NPS6D100 erweitert werden, das nun neue Maßstäbe in der Positionierperformance setzt. In den neu ausgestatteten Hochpräzisionslaboren wurden 2024 bereits Arbeiten in der internen Forschungsgruppe NextGenPos, im Graduiertenkolleg GraKo NanoFab und im Projekt OptoMed-Vakuumluftlager durchgeführt, für die ab 2025 laufende Forschungsgruppe VirtuSen vorbereitet und es erfolgte Inbetriebnahme, Charakterisierung, Analytik und Optimierung für Hochpräzisions-Industriedienstleistungen.

www.imms.de/nmdrives

Im gleichen Zuge wurde ein Mehr-Koordinaten-Direkt-Antrieb nach 15 Jahren in den Ruhestand verabschiedet und vom Labor ins Foyer geholt – als Anschauungsobjekt und Diskussions-Starter für Besuche verschiedenster Art. In den umgestalteten Laboren wird an Genauigkeiten bis in den Pikometerbereich geforscht und der Transfer in Industrienwendungen weiter vorangebracht.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Prüfstand zur Untersuchung von Saugleistungsverlusten im molekularen Strömungsbereich abhängig von der Leitungsgeometrie. Auf Basis solcher und anderer Voruntersuchungen wird im Projekt OptoMed-Vakuumluftrager der Einfluss der Evakuierungsleitungen ermittelt, um die Restgaseinströmung von Luftlagern für Hochvakuumanwendungen zu minimieren. Foto: IMMS.

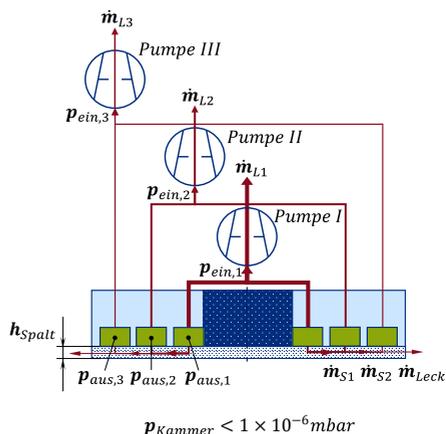
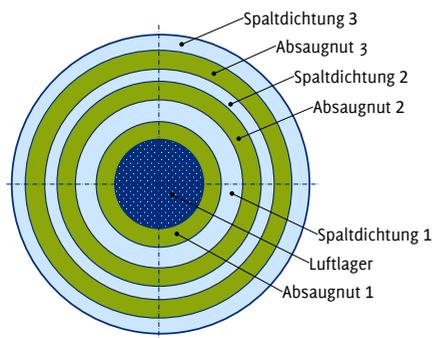
Projektstart: OptoMed-Vakuumluftrager* für Hochpräzisions-Vakuumanwendungen

Mit immer kleiner werdenden Strukturgrößen auf Mikroelektronik-Chips wachsen die Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit in der Halbleiterindustrie.

www.imms.de/
valu

Positioniersysteme, die nach aktuellem Stand der Technik die höchste Präzision über große Bewegungsbereiche haben, sind luftgelagerte Direktantriebssysteme. Deren bewegter Teil schwebt auf einem dünnen Luftpolster. Der feste und der bewegliche Teil des Antriebs berühren sich somit nicht und es findet daher eine nahezu reibungsfreie Bewegung statt. Dadurch sind Positioniergenauigkeiten im einstelligen Nanometerbereich möglich, also bis auf Millionstel Millimeter genau.

Parallel dazu ist höchste Reinheit bis zur Partikelfreiheit in der Halbleiterherstellung notwendig. Deshalb werden große Teile der Fertigung ins Vakuum überführt. Vakuum ist jedoch nicht gleich Vakuum. Im angestrebten Hochvakuum ist der Anteil an Restgasteilchen weniger als ein Milliardstel als unter Atmosphäre.



Schematische Darstellung eines hochvakuumtauglichen planaren Luftlagers mit konzentrisch um das Lagerelement angeordneten Kaskaden aus Absaugnuten. Grafik: IMMS.

Wie kann nun ein System, das auf eine kontinuierliche Luftzufuhr angewiesen ist, in einer derart luftleeren Umgebung funktionieren? Die Antwort darauf erscheint simpel. Man muss die Luft kontinuierlich absaugen, bevor sie das umgebende Vakuum erreicht. Möglich wird das durch Absaugnuten, die das Luftlagerelement umgeben und jeweils mit Vakuumpumpen verbunden sind.

Die Herausforderung besteht darin, Absaugleitungen (siehe Abbildung) zu finden, die durch ihre Größe genug Luft abführen können und gleichzeitig so wenig Störkräfte erzeugen, dass die Vorteile von Luftlagern nicht eliminiert werden. Hinzu kommt, dass sehr viele Materialien aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung und der damit verbundenen Ausgasung nicht im Hochvakuum einsetzbar sind.

www.imms.de/
valu

Im Projekt werden daher Lösungen für vakuumtaugliche Luftlager erarbeitet und deren Funktion anhand eines prototypischen Antriebssystems nachgewiesen.

Als einer der ersten Schritte wurde ein Prüfstand aufgebaut, mit dem sich Saugleistungsverluste vor allem im molekularen Strömungsbereich abhängig von der Leitungsgeometrie ermitteln lassen. Das ist notwendig für eine belastbare Dimensionierung des Lagersystems und hilft bei der Auswahl geeigneter Evakuierungsleitungen. Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, kleinste Mengen an Gasdurchsatz bis etwa $3 \times 10^{-5} \text{ mbar l/s}$ definiert in ein Leitungssystem einströmen zu lassen und den Druckunterschied zwischen Leitungsanfang und -ende messtechnisch zu ermitteln.



Gefördert durch

DFG

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Alex S. Huaman mit
IMMS-Team nach der
erfolgreichen Verteidi-
gung seiner Disserta-
tion.

Foto: IMMS.

79

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> nm-präzise 6D-

Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Dissertation zu einem robusten adaptiven Regelungsansatz für hochdynamische Nanopositionierung verteidigt

Am 17. September 2024 hat Alex S. Huaman, Spezialist für Regelungssysteme am IMMS, seine Dissertation „Highly Dynamic Nanopositioning: A Robust Adaptive Control Approach“ erfolgreich an der Technischen Universität Ilmenau verteidigt. Er hat seine Arbeit am IMMS im Graduiertenkolleg 2182 „NanoFab“ realisiert, wo er und weitere Doktoranden der TU Ilmenau an Lösungen für die spitz- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in erweiterten makroskopischen Arbeitsräumen forschen. Betreut werden sie von Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern der TU Ilmenau und des IMMS. Die von Alex S. Huaman entwickelte Regelungsstrategie bietet sowohl hohe Präzision als auch schnelle Störungsunterdrückung. Experimente mit einem Nanopositioniersystem haben gezeigt, dass dieses Regelungskonzept auch bei komplexen Bewegungsaufgaben die Positionierfehler im einstelligen Nanometerbereich hält. Diese Konzepte könnten künftigen Technologien aus der Halbleiterindustrie, der Biotechnologie und der Quantenforschung erheblich zugutekommen, wo ultrapräzise Bewegungen über relativ große Bereiche erforderlich sind.

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

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

Bedarf an Nanopositionierung

Nanopositionierung ist für die Herstellung von Miniaturbauelementen, die Analyse von biologischen Proben oder den Aufbau von Quantensystemen entscheidend. Da Forschung und Industrie immer kleinere Maßstäbe anstreben, benötigen sie Maschinen, die sich nicht nur mit extremer Präzision bewegen, sondern auch einen größeren Arbeitsbereich bieten als herkömmliche Nanopositioniertische, wie z. B. piezobasierte Systeme.

Jahresbericht

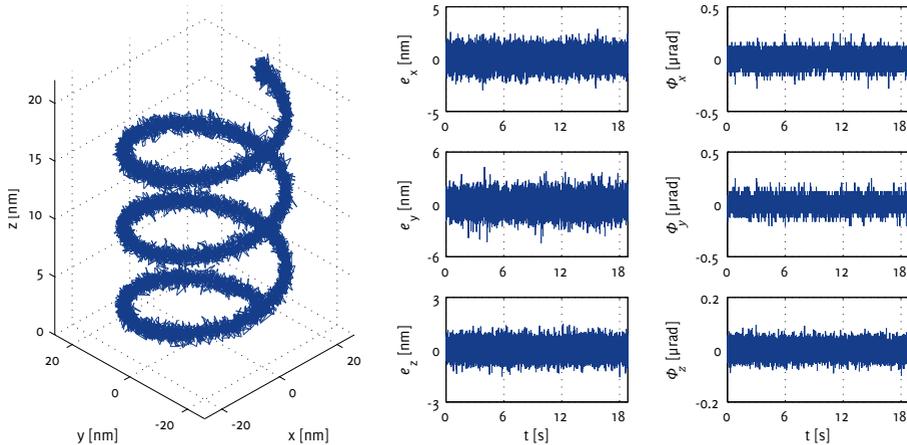
© IMMS 2024

Um diesen Bedarf zu decken, wurde ein neuartiges System namens NPS6D200 entwickelt. Es ist eine Nanopositionierplattform mit großem Bewegungsbereich, deren Position in sechs Freiheitsgraden hochgenau kontrolliert wird, d. h. entlang der x-, y- und z-Achse (vorwärts – rückwärts, links – rechts, oben – unten) und per Rotation um jede dieser Achsen. Trotz des großen Verfahrbereichs von $\varnothing 200$ mm in horizontaler Richtung und 25 mm in vertikaler Richtung wird eine außergewöhnlich hohe Positioniergenauigkeit erreicht. Der Läufer wird berührungslos auf Luftlagern geführt und durch Spulen und Magnete ohne mechanischen Kontakt angetrieben. Die Maschine verfügt über laserbasierte Sensoren zur berührungslosen Messung der Position mit subnanometergenauer Auflösung. Auf diese Weise wird Reibung beim Betrieb des NPS6D200 vermieden und eine hochgenaue Positionsregelung ermöglicht.

Regelstrategie

Die Regelung eines so vielseitigen Systems stellt eine große Herausforderung dar, nicht nur bezüglich der hohen Positionierperformance, sondern auch bei der aktiven Störungsunterdrückung. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurde ein neuartiges Verfahren zur Bewegungssteuerung entwickelt, das zwei Ebenen umfasst. Die erste ist ein Feedforward-Controller, der die gewünschte Bewegung der Maschine vorgibt und die erforderlichen Kräfte entsprechend einstellt. Die zweite ist ein Feedback-Controller, der kontinuierlich Fehler ausgleicht, indem er die tatsächliche Position mit dem gewünschten Sollwert vergleicht.

Auch der Feedback-Controller integriert zwei Regelalgorithmen. Der Primärregler folgt einer Standardmethode, die als Active Disturbance Rejection Control (ADRC) bekannt ist. Dabei werden Störungen, wie z. B. Kreuzkopplungen zwischen Achsen, geschätzt und aktiv kompensiert. ADRC allein kann jedoch nicht mit Änderungen der Systemparameter, die im Laufe der Zeit auftreten, oder mit unerwarteten Fehlern umgehen. Aus diesem Grund wurde ein zweites Regelverfahren in Form einer adaptiven Erweiterung eingeführt. Dieser Controller kann während des Betriebs Vorhersagen treffen und sich selbst anpassen. Er beobachtet die gemessenen Positionen und passt seine internen Steuerungsregeln schnell an, um eine hohe Leistung beizubehalten, auch wenn sich die Maschinenparameter ändern. Mathematische Analysen und Simulationen sorgen dafür, dass die Regelung auch bei anspruchsvollen Positionieraufgaben stabil bleibt und der Läufer die gewünschte Bewegung gleichmäßig und genau ausführt.



Helixbewegung mit \varnothing_{40} nm x 20 nm. Darstellung der 3D-Helix (linke Seite), Zeitreihen der Servofehler (e_x , e_y , e_z) und Rotationen (ϕ_x , ϕ_y , ϕ_z) während der Bewegung (rechte Seite). Grafik: IMMS.

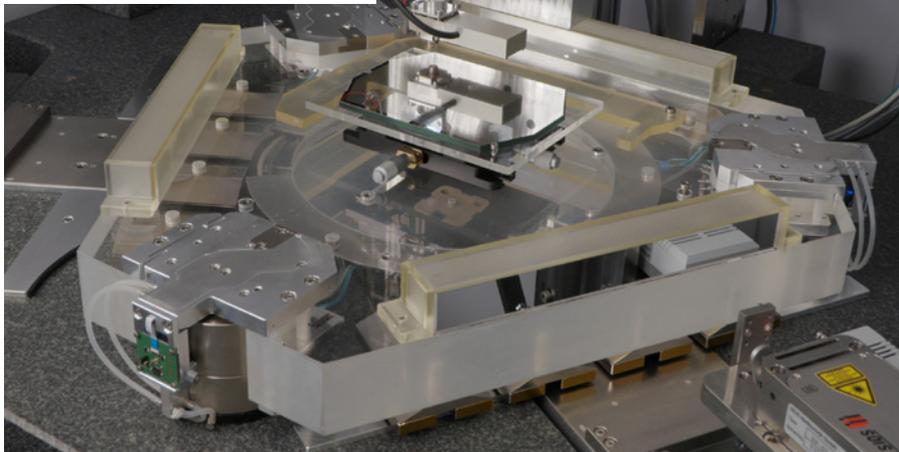
Durch die Kombination dieser Ansätze behält das System nicht nur eine hohe Präzision bei, sondern verbessert auch seine Robustheit. So kann es mit Unsicherheiten und Störungen besser umgehen als herkömmliche Steuerungsstrategien.

Validierung des Regelungskonzepts und Ausblick

Experimente mit dem NPS6D200 zeigen, dass dieses Regelungskonzept auch bei komplexen Bewegungsaufgaben Positionierfehler im einstelligen Nanometerbereich beibehält. So kann das System komplexe Bahnen im Bereich von wenigen Nanometern bis zu mehreren Millimetern mit höchster Präzision abfahren. Abbildung 1 veranschaulicht die Leistung des Systems während einer synchronen 3D-Bewegung und zeigt die Stabilität der Nachführfehler mit Abweichungen unter 5 Nanometern. Abschließend zeigen die Untersuchungen eine technisch ausgefeilte und dennoch praktisch umsetzbare Lösung für die Regelung von Nanopositioniersystemen. Die Anwendung der vorgeschlagenen Regelungsstrategie, insbesondere die zusätzliche adaptive Rückkopplung, bietet sowohl hohe Präzision als auch eine schnelle Störungsunterdrückung. Diese Entwicklung wird zukünftige Technologien in Bereichen, die ultrapräzise Bewegungen über große Volumina erfordern, erheblich voranbringen.

www.imms.de/nmdrives

Gefördert durch


 Deutsche
Forschungsgemeinschaft


Das patentierte Regelkonzept mit erweitertem dynamischem Beobachter ermöglicht eine sehr effektive Kompensation von Störgrößen für hochdynamische Mehrkoordinaten-Direktantriebssysteme wie dieses. Es erhöht die Antriebspräzision im dynamischen Betrieb deutlich. Foto: IMMS.

iENA-Silbermedaille für Beobachter der Atome: Neues Regelungskonzept zur subnanometergenauen Positionierung

Das IMMS-Patent „Positionierungssystem mit einem Regler sowie Verfahren zu dessen Konfiguration“ wurde am 12.12.2024 zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON | Landespatentzentrum Thüringen an der Technischen Universität Ilmenau im Wettbewerb der Erfindermesse iENA mit einer Silbermedaille geehrt. Das PATON hatte Ende Oktober stellvertretend für den Erfinder Alex S. Huaman die Arbeit auf der iENA in Nürnberg in den Wettbewerb eingebracht.

Wozu man genauer als nanometergenau arbeiten muss

Technische Produkte wie Smartphones oder Medizingeräte werden immer weiter miniaturisiert. In vielen Industriebereichen wächst daher der Bedarf an Präzisionsmaschinen, um kleinste Strukturen und Objekte hochgenau zu vermessen und zu bearbeiten. Diese Maschinen können Objekte nicht nur in kürzester Zeit auf den Nanometer genau und perspektivisch noch genauer positionieren. Sie können das auch in vergleichsweise großen Arbeitsbereichen von mehreren hundert Millimetern. Übersetzt in andere Dimensionen könnte man in Peru in eine Rakete steigen, die Zielkoordinaten des Parkplatzes am IMMS eingeben, losfliegen und schnell und sicher die anvisierte Parklücke treffen, solange sie bloß 60 cm breiter ist als die Rakete.

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

www.imms.de/awards

www.imms.de/nmdrives

Jahresbericht

© IMMS 2024

Neuartiges Regelungskonzept für hochdynamische Mehrkoordinaten-Direktantriebssysteme

So ein genaues Arbeiten erlauben hochdynamische Mehrkoordinaten-Direktantriebssysteme, wie sie im IMMS entwickelt werden. Diese Systeme werden dabei in einem geschlossenen Regelkreis betrieben. Hierfür berechnet ein komplexer Regelalgorithmus aus Messdaten zum Ist-Zustand des Positionierschlittens neue Sollwerte für die Antriebe.

Das neuentwickelte Regelkonzept mit erweitertem dynamischem Beobachter ermöglicht eine sehr effektive Kompensation von Störgrößen. Es erhöht somit die Antriebspräzision im dynamischen Betrieb deutlich.

Im Einzelnen müssen Störkräfte mit diesem neuen Ansatz nicht genau gemessen werden, um kompensiert werden zu können. Zudem passt sich die Regelung adaptiv an langfristige Veränderungen der Störungen an.

Neuer Störungsschätzer ermöglicht Kompensation von Störungen

Das neuartige Regelkonzept wurde für ein nanometerpräzises Antriebssystem mit drei Antriebs- und Führungselementen entwickelt. Diese Elemente erzeugen ähnlich einem Tripod vertikale Bewegungen sowie Kippungen um die horizontalen Raumachsen. Jedes dieser drei Elemente enthält neben der aerostatischen Führung zwei parallel wirkende Aktoren, die eine Vertikalkraft auf das bewegte Teil erzeugen und übertragen. Diese miteinander verkoppelten Einzelachsen werden dabei jeweils mit Einzelachsreglern mit den genannten Eigenschaften realisiert, was die Systemkomplexität senkt.

Das Neue im Regelkonzept ist der Störungsschätzer, welcher die das System störenden Kräfte und Momente in Echtzeit abschätzt. Basis für diese Schätzung sind speziell designte Modelle sowieso Messungen kurz vor der tatsächlichen Aktuierung. Mit diesen geschätzten Störungen können über den Regler die tatsächlich wirkenden Störkräfte kompensiert werden. Damit kann einem Übersprechen zwischen den Achsen und Fehlern sowie Störeinflüssen aus der Umgebung sowie aus dem Systeminneren entgegengewirkt werden.

Deutsches Patent: DE 10 2023 118 056 B3, IP verfügbar, Patentanmelder/-inhaber: IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), Erfinder: Alex S. Huaman.

IMMS auf der Precision Fair

Das IMMS war 2024 auf der Precision Fair, der führenden Fachmesse für Hoch- und Ultrapräzisionstechnik in 's-Hertogenbosch in den Niederlanden auf dem Thüringer Gemeinschaftsstand vertreten. Geräte wie Smartphones oder medizinische Apparate werden immer leistungsfähiger und erfordern zunehmend kleinere und präzisere Mess-, Produktions- und Konstruktionsverfahren. Diese hochkomplexen Technologien lassen sich nur durch enge Zusammenarbeit realisieren. Die Messe ist eine Plattform

über Disziplinen, Unternehmen, Bildungseinrichtungen und Ländergrenzen hinweg und trägt über den internationalen Wissensaustausch bei, die technologischen Grenzen stetig zu erweitern. Das IMMS präsentierte Demonstratoren am Messestand und steuerte drei Beiträge zur begleitenden europäischen Special Interest Conference „Precision Motion Systems & Control“ bei. In diesen ging es um Untersuchungen von Luftlagerschwingungen mit Hilfe eines 3D-Nanopositionierungssystems, um die Störungsunterdrückung bei periodischen Bewegungen mit großen Anteilen konstanter Geschwindigkeit unter Verwendung eines Kippspiegel-Versuchsaufbaus sowie um die Realisierung und erreichbare Performance von kombiniert pneumatisch-elektromagnetisch aktuierten Vertikaltrieben im Nanopositioniersystem NPS6D200.



Vertreter des Mechatronik-Teams auf der Precision Fair 2024.

84

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

www.imms.de/
nmdrives



<https://youtu.be/r3PKo82sfvs>

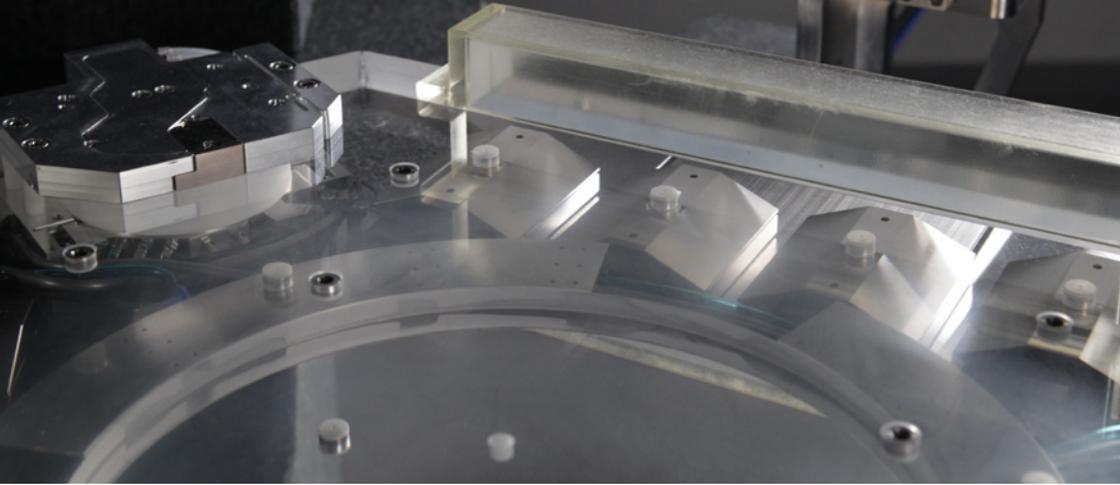
Eine der zur Precision Fair präsentierten Entwicklungen – das 6D-Nanometer-Planar-Positioniersystem NPS6D200 für hochpräzise Positionierung mit großem Bewegungsbereich.

Quelle: IMMS.

Jahresbericht
© IMMS 2024

NPS6D200 – 6D-geregeltes Direktantriebssystem

für die nanometergenaue Positionierung
im Verfahrbereich von \varnothing 200 mm x 25 mm



Am IMMS entwickeltes 6D-geregeltes Nanopositioniersystem NPS6D200: Die Detailaufnahme zeigt den Läufer mit einem der drei Hubmodule für vertikale Bewegungen bis 25 mm, Magnetbrücken und Laserinterferometer. Wichtige Meileinsteine für dieses System wurden in der internen Forschungsgruppe NextGenPos und im DFG-Graduiertenkolleg NanoFab erarbeitet. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Nicht erst in den letzten Jahren sind die Nanotechnologien auf dem Vormarsch und mittlerweile ist die Spitzenforschung in den Nanowissenschaften in den Subnanometerbereich vorgedrungen. Dabei ist es nicht nur die Halbleiterindustrie, sondern auch eine wachsende Zahl neuer Anwendungen, z.B. in der Nanooptik, Photonik oder der Biosensorik, benötigt Mess- und Fabrikationstechnologien, die eine Auflösung und Präzision von unter 10 nm bieten. So hat sich über die Weiterentwicklung des CMOS-Prozesses hinaus der Forschungsbereich der „sub-10 nm fabrication“ etabliert, der eine breite Palette neuer Anwendungen darstellt, die nanometerpräzise Positionierung erfordern. Die Abmessungen der Substrate (z.B. Wafer) und somit der benötigte Arbeitsbereich der Positioniersysteme steigt dabei beständig an. Dieser Trend ist die zentrale Triebfeder für die Weiterentwicklung und Erforschung von High-End-Mess- und Fertigungsmaschinen und für den Bedarf an mehrachsigen Positioniersystemen, welche nanometergenaue deterministische Bewegungen in großen Arbeitsbereichen ermöglichen.

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

Jahresbericht

© IMMS 2024

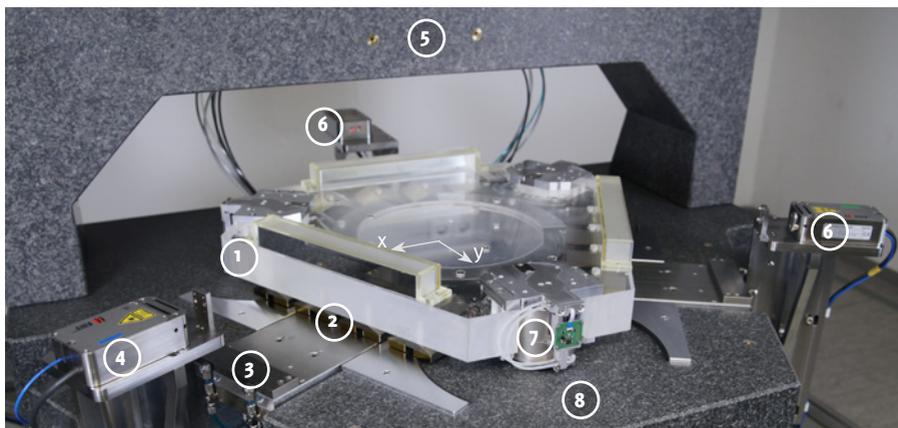


Abbildung 1: NPS6D200 (1) Läufer mit Reflektoren; (2) Magnete des planaren Direktantriebs (bewegen sich mit dem Läufer); (3) Spulen des planaren Direktantriebs (gekapselt); (4) Laserinterferometer; (5) Granitportal mit Schnittstelle für das Antastsystem; (6) Laserinterferometer; (7) Hubmodul LAU25; (8) Granitstator. Foto/Grafik: IMMS.

Um in den aktiv gesteuerten Achsrichtungen eine gute Regelbarkeit und letztendlich Regelabweichungen im Nanometerbereich zu erzielen, spielt bereits die Grundarchitektur des Bewegungssystems eine wichtige Rolle. Bei konventionell strukturierten Systemen mit seriell gestapelten Einzelachsen können lange Kraftübertragungswege, weiche Koppelstellen innerhalb der Kraftübertragung, niederfrequente mechanische Resonanzen oder auch positionsabhängige Änderungen im Systemübertragungsverhalten sehr schnell die im Antastpunkt erreichbare Positionierperformance entscheidend begrenzen. Parallelkinematik-Strukturen bringen hier ein großes Verbesserungspotential mit, vor allem, wenn sie mit einer direkten Kraftübertragung auf das bewegte Teil und einer reibungsfreien Führung desselben kombiniert werden.

www.imms.de/
nm-drives

Direktantriebsprinzip als Grundansatz

Mit dieser Grundphilosophie wurde am IMMS ein in 6 Freiheitsgraden (6D) geregeltes Nanopositioniersystem für einen Arbeitsbereich von $\varnothing 200$ mm (planar) und 25 mm (vertikal) entwickelt – das NPS6D200, siehe Abbildung 1. Die Architektur basiert auf dem Konzept eines integrierten planaren Direktantriebs für die großräumige laterale Positionierung, wie es bereits anderen Positionierlösungen des IMMS zum Einsatz kommt. Hauptidee bei der Neuentwicklung des NPS6D200 ist die Erweiterung dieses Konzepts um eine vertikale Aktuierung mit 25 mm Verfahrweg. Durch die flächige Bauform des integrierten planaren Direktantriebs kann die vertikale Verstellung direkt zwischen Stator und beweglichem Teil realisiert werden. Auf diese Weise

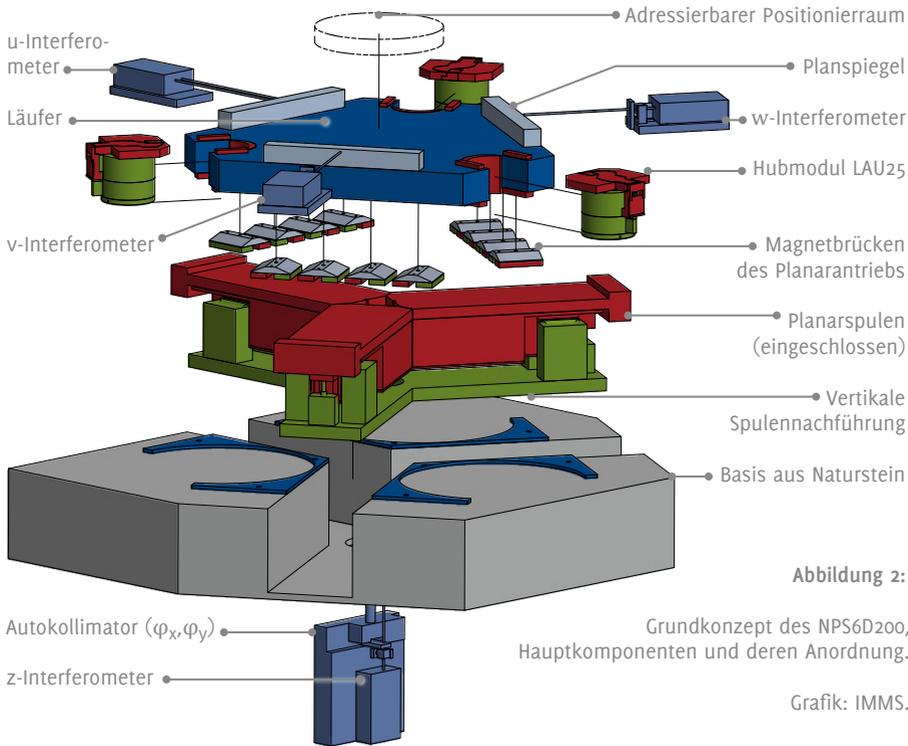


Abbildung 2:

Grundkonzept des NPS6D200, Hauptkomponenten und deren Anordnung.

Grafik: IMMS.

www.imms.de/
nm-drives

werden die Vorteile des Direktantriebsprinzips beibehalten und weiterhin können alle Antriebskräfte direkt und berührungsfrei auf denselben Körper wirken. Dieser Körper ist der so genannte Läufer, dessen Bewegung in allen sechs Freiheitsgraden (DOFs) kontrolliert wird. Die Verschiebungen in x , y , z stehen dabei für großräumige Bewegungen zur Verfügung, während die rotatorischen Freiheitsgrade φ_x , φ_y , φ_z als Nullpunkt-Regelung betrieben werden.

Gegenüber der rein planaren Positionierung ermöglicht die Vertikalverstellung einen entscheidend erweiterten Funktionsumfang des entstehenden Gesamtsystems:

- Kompensation von Führungsabweichungen in z , φ_x , φ_y
- Antastung von 3D-Objekten, geneigten Oberflächen und makroskopischen Stufenhöhen
- Anwendungen mit vertikaler Verschiebung, z. B. Fokusvariationen in der Interferometrie oder Konturfolge bei optischer oder mechanischer Antastung
- Ein-/Ausladen des Messobjekts ohne Demontage des Antast- oder Manipulationstools.
- Vertikalverstellung durch überaktuierte Hubmodule mit aerostatischer Führung

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, beruht das NPS6D200 auf einem Planarantrieb in dreieckiger Grundkonfiguration und drei Hubmodulen (Lifting and Actuating Units, LAU25), welche den Vertikaltrieb wie auch die aerostatische Führung realisieren. Der integrierte Direktantrieb zur Steuerung der planaren Bewegung bildet sich aus drei Linearaktoren in einer 120°-Anordnung, wobei jede Einheit aus stationären Flachspulen und einem mitbewegten Magnetarray besteht. Die drei Aktoren gemeinsam erzeugen die Antriebskraft in der xy-Ebene sowie das Drehmoment zur Adressierung der Rotation um die Hochachse φ_z . Zur präzisen vertikalen Bewegung des Quarzläufers sind drei Hubmodule (LAU25) an den Ecken des Dreiecks platziert und bewirken in Kombination die Verschiebung in z-Richtung und die Verkipfung in den rotatorischen Freiheitsgraden φ_x und φ_y .

Jedes LAU25-Modul vereint dabei mehrere Funktionen in einer kompakten, integrierten Bauform:

- dynamischer Antrieb mit hoher Bandbreite mittels Voice-Coil-Aktor,
- quasistatischer pneumatischer Aktor zur Gewichtskompensation,
- aerostatische Führung für reibungsfreie Bewegung,
- internes optisches Encodermesssystem zur Initialisierung.

Herzstück der Hubmodule ist ein pneumatischer Aktor, der niedrigfrequente Vertikalkräfte primär zur Gewichtskraftkompensation erzeugt. Hierzu wird der Druck in einer berührungsfrei abgedichteten Druckkammer, siehe Abbildung 3, individuell und hochgenau geregelt. Die kontaktlose Spaltdichtung der Druckkammer ist in die Gestalt der vertikalen Luftführung integriert, so dass Reibung als Störungsquelle konsequent vermieden und der Störungseintrag in das System minimiert wird. Während

www.imms.de/
nmdrives

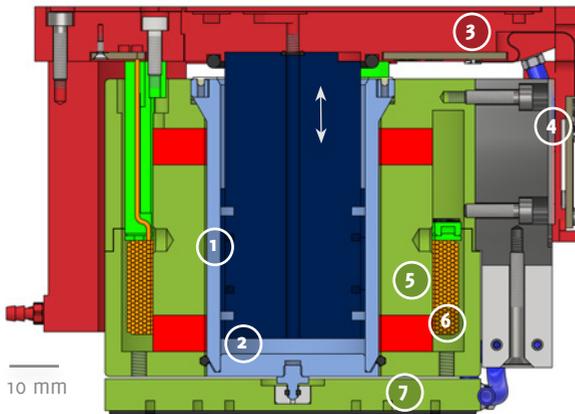


Abbildung 3:

Hubmodul LAU25 in der Schnittansicht: (1) vertikale aerostatische Buchsenführung; (2) Druckkammer der pneumatischen Gewichtsentlastung; (3) vertikal bewegtes Teil (Schnittstelle zum Läufer); (4) Encodermesssystem; (5) Voice-Coil-Aktor, Feldteil; (6) Voice-Coil-Aktor, Spulenteil (bewegt); (7) planares Luftlager.

Grafik: IMMS.

der Pneumatikaktor die statische Last trägt, erzeugt ein konzentrisch angeordneter und parallel wirkender Voice-Coil-Aktor die für die hochgenaue Regelung benötigten dynamischen Kräfte. Im Ergebnis kann durch die Hubmodule das Eigengewicht des Läufers ohne nennenswerten Leistungsumsatz in den Voice-Coil-Aktoren getragen und gleichzeitig seine Vertikalposition sehr feinfühlig verstellt werden.

Rein kraftgekoppelte Läuferführung durch 6D-Regelung

Der Läufer aus Quarzglas stellt nicht nur das bewegte Teil des Antriebssystems dar, sondern beinhaltet auch die Reflektoren für die hochaufgelöste Weg- und Winkelmessung über Laserinterferometer und einen 2D-Autokollimator. Die Maschinenmetrologie ist dabei definiert durch die Anordnung der Reflektoren (am Läufer) und der Messköpfe (am Stator). Die Closed-Loop-Regelung der Läuferposition auf Basis dieser 6DOF-Messung bewirkt, dass die Ablaufeigenschaften der verschiedenen Luftführungen nicht als Positionierfehler wirksam werden und die Genauigkeit der Läuferbewegung lediglich durch die Maschinenmetrologie und die erreichbare Regelungsperformance bestimmt wird.

Kenndaten des NPS6D200-Systems im Überblick:

– xyz-Bewegungsbereich: $\varnothing 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$	– xyz-Messauflösung: 20 pm	www.imms.de/
– xy-Geschwindigkeit: 50 mm/s	– bewegte Masse: 36 kg	nmdrives
– z-Geschwindigkeit: 2 mm/s	– Nutzlast: 5 kg	
– Beschleunigung: 250 mm/s ²		

3D-Nanopositionierung im Punkt-zu-Punkt-Betrieb und auf Trajektorien

Beim Betrieb mit konstantem Sollwert erreicht das NPS6D200 eine RMS-Regelabweichung von weniger als 1 nm in allen drei Achsrichtungen, siehe Abbildung 4. Diese Closed-Loop-Performance wird einerseits durch konsequente Umsetzung des Direktantriebsprinzips, die Vermeidung intern generierter Störeinflüsse und nicht zuletzt auch durch eine speziell entwickelte 6D-Regelung des überaktuierten Gesamtsystems ermöglicht. Eine Positionierung mit Schrittweiten auf Nanometer-Level ist dadurch ebenso möglich wie auch die gleichzeitige und synchronisierte Bewegung

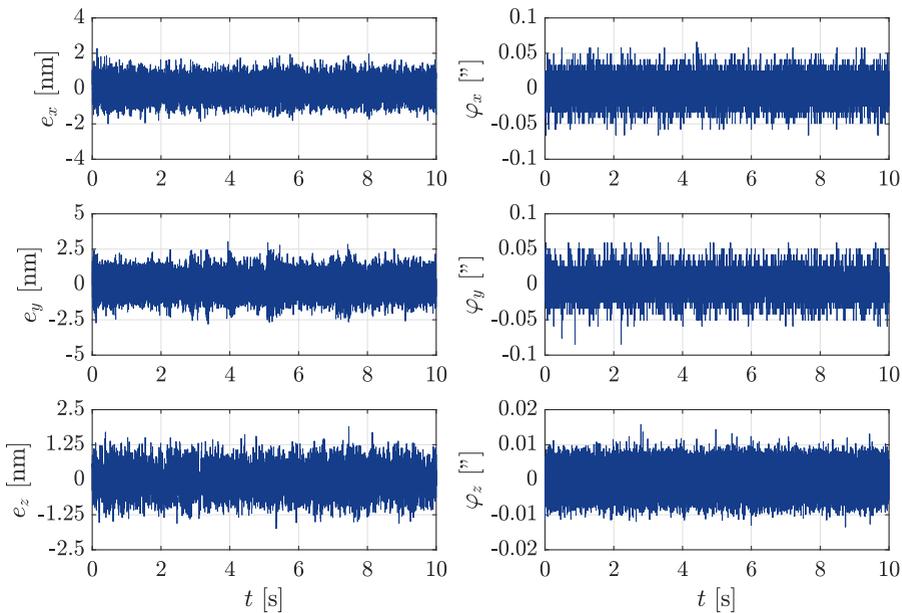


Abbildung 4: Positionszeitsignal im geregelten Betrieb mit konstantem Sollwert. Die RMS-Regelabweichung beträgt $e_x = 0,47$ nm, $e_y = 0,68$ nm, $e_z = 0,41$ nm (Abbildung links) sowie $e_{\varphi_x} = 11,21$ m", $e_{\varphi_y} = 9,83$ m", $e_{\varphi_z} = 3,03$ m" (Abbildung rechts). Grafik: IMMS.

in allen drei Achsen entlang komplexer 3D-Trajektorien mit Nanometerpräzision. Bei skalenerübergreifenden Helixtests mit Abmessungen von 40 Nanometern bis hin zu 40 Millimetern werden Bahnabweichungen im niedrigen einstelligen Nanometerbereich erreicht – Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Verlauf der Läuferposition bei einer $\varnothing 40$ nm x 20 nm Helix. Gleichzeitig ist trotz der hohen bewegten Masse nur eine

www.imms.de/
nmdrives

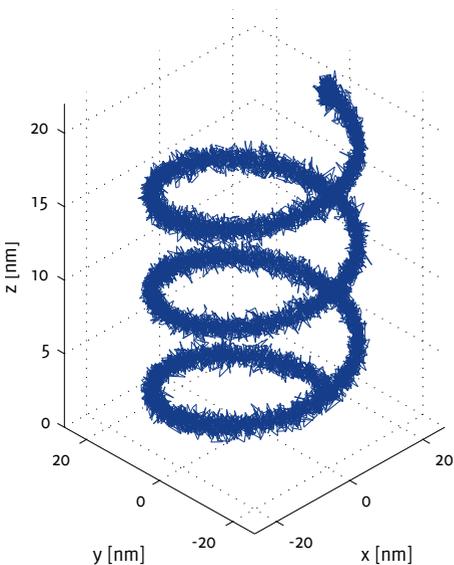


Abbildung 5:

Positionsmesssignal einer
3D-Trajektorie, Helix:
 $\varnothing 40$ nm x 20 nm (Höhe),

RMS-Bahnfehler dabei:

$e_x = 0,71$ nm,
 $e_y = 0,88$ nm,
 $e_z = 0,39$ nm.

Grafik: IMMS.

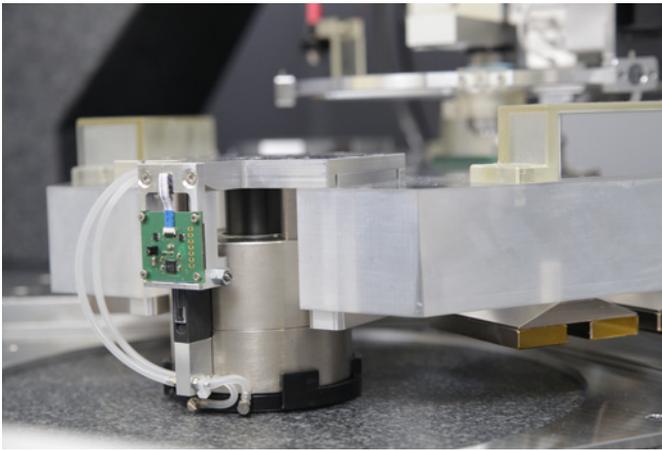


Abbildung 6:

Eines der drei im NPS6D200 integrierten LAU25-Hubmodule für vertikale Bewegungen bis 25 mm.

Foto: IMMS.

sehr geringe Stromaufnahme von wenigen Milliampere bei den Vertikalaktoren zu beobachten. Dieses Positioniervermögen demonstriert die Eignung des NPS6D200 für Nanopositionieraufgaben in großen 3D-Arbeitsbereichen, bei gleichzeitig sehr geringer Wärmeentwicklung und einem minimiertem Störeintrag in das Messvolumen. Mit dieser Kombination empfiehlt sich das System als Positionierplattform für Nanotechnologie-Anwendungen, die einerseits eine derart präzise Positionskontrolle zwischen Tool und Substrat bis zur Wafergröße erfordern und andererseits auf einen minimierten Störeintrag in den Interaktionsbereich angewiesen sind, beispielsweise die waferbasierte Inspektion, long-range AFM-Scans oder die sub-10-nm-Fabrikation.

www.imms.de/
nmdrives

Kontakt: Steffen Hesse, steffen.hesse@imms.de



Gefördert durch
DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Teile der präsentierten Arbeiten entstanden in der internen Forschungsgruppe NextGenPos und dem Graduiertenkolleg NanoFab. Die interne Forschungsgruppe „Next Generation Positioning“ (NextGenPos) wurde 2024 durch den Freistaat Thüringen gefördert. Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ (NanoFab) wurde 2024 unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

www.imms.de/
nanofab



Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester

Untersuchungen an einem Shaker zur Vibrationsanregung für die Forschung an der Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Energy-Harvester wandeln Umgebungsenergie wie Vibrationen in elektrische Energie, um somit beispielsweise energieautarke Funk-Sensor-Knoten an dezentralen oder schwer zugänglichen Orten zu betreiben und die dafür notwendigen Wartungs- bzw. Installationskosten zu minimieren. An Energy Harvestern wird seit etwa 30 Jahren geforscht, behaupten konnten sie sich bislang nur in sehr wenigen Nischenanwendungen. Das Ziel des Projektes ECo-Harvester war es daher, die Leistungsfähigkeit von elektrodynamischen Energy Harvestern mit einer Gesamtsystemoptimierung zu steigern. Voraussetzung dafür ist die ganzheitliche mathematische Modellierung aller Systemkomponenten, sodass künftig die mechanischen und elektrischen Teilsysteme nicht länger getrennt entworfen werden. Hierfür wesentlich ist es zum einen, Systemkomponenten auf der Grundlage physikalischer Effekte und ihres Wechselspiels zu beschreiben. Zum anderen ist es notwendig, die Erkenntnisse zur vereinheitlichten Modellierung auf einem angepassten Abstraktionsgrad und zur Behandlung mit einem angepassten Simulations- bzw. Entwurfswerkzeug zusam-

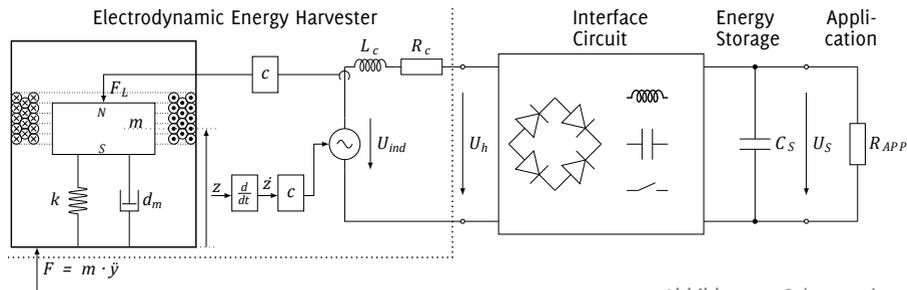


Abbildung 1: Schema eines elektro-dynamischen Energy-Harvesters mit Schnittstellenschaltung. Grafik: IMMS / Hahn-Schickard.

menzuführen. Gemeinsam mit dem Projektpartner Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. wurden hierfür verschiedene Optimierungsmöglichkeiten untersucht, durch die eine Vielzahl an Parametern in einer möglichst kurzen Laufzeit variiert werden können. Ergebnis ist ein Designtool, das für verschiedene Harvester-Topologien optimale geometrische Abmessungen automatisch berechnet.

Designtool zur Modellierung der mechanisch-elektrischen Wandlung

Der Schwerpunkt der Arbeiten am IMMS lag auf der Modellierung der mechanisch-elektrischen Wandlung. Elektro-dynamische Wandler beruhen auf der elektromagnetischen Induktion infolge eines zeitlich veränderlichen Magnetfeldes innerhalb einer Spule. In typischen Anordnungsstrukturen wird dabei die Relativbewegung zwischen der Spule und einem konstanten Magnetfeld genutzt. Die Anzahl der Spulen und Magneten sowie ihre Anordnung zueinander und die Ergänzung von verschiedenen magnetischen Rückschlüssen sind variabel.

Das IMMS hat in Eco-Harvester ein Designtool entwickelt, welches für verschiedene Topologien eine automatische Berechnung optimaler geometrischer Abmessungen durchführt. Begonnen wurde es in der Forschungsgruppe Green-ISAS und aktuell um eisenbehaftete Topologien erweitert. Das Tool optimiert die elektrische Ausgangsleistung abhängig vom verfügbaren Wandlervolumen sowie der gegebenen Anregung und berücksichtigt Nebenbedingungen, wie z.B. die Mindestspannung.

Gemäß Abbildung 1 wird die bewegte Masse (m) mittels einer Federsteifigkeit (k) in Resonanz zur dominierenden Frequenz der Anregung betrieben. Diese Bewegung wird einerseits mechanisch (d_m) und andererseits über die Lorentzkraft (F_L) elektrisch bedämpft. Die induzierte Spannung ergibt sich aus dem Produkt der Ge-

schwindigkeit der Masse und dem Kopplungsfaktor (c). Der Proportionalitätsfaktor zwischen Lorentzkraft und dem Spulenstrom ist ebenfalls derselbe Kopplungsfaktor.

Für das automatisierte Designtool wurden am IMMS verschiedene Möglichkeiten untersucht, wie der Kopplungsfaktor bei eisenbehafteten Strukturen modelliert werden kann. Für die Berechnung wird neben der Windungszahl der Spule auch die zeitliche Änderung des von der Spule umfassten magnetischen Axialflusses benötigt. Aufgrund der Quellenfreiheit des Magnetfeldes kann dies auf eine Berechnung des Radialfeldes innerhalb des Wickelfensters zurückgeführt werden. Für eisenfreie Topologien ist dies analytisch lösbar, bei eisenbehafteten Strukturen ist infolge der Feldverzerrung eine Finite-Elemente-Modellierung (FEM) notwendig. Für die Einbindung der FEM-Rechnungen in den Optimierungsprozess wurden zwei Ansätze untersucht und verglichen: die Abbildung der radialen Flussdichte mithilfe eines neuronalen Netzwerkes und die direkte FEM-Kopplung während der Optimierung.

Optimierung mit neuronalem Netz

Für die Anwendung eines neuronalen Netzwerkes mittels Multi-Layer-Perceptron-Regression wurde zunächst untersucht, mit welchen charakteristischen Größen die radiale magnetische Flussdichte abstrahiert werden kann. Es zeigte sich, dass der Mittelwert im gesamten Wickelfenster durch den Verlauf in der Spulenmitte angenähert werden kann. Die Kennlinie der Spulenmitte wird durch ungleichmäßig verteilte Stützstellen mit einer erhöhten Dichte im Bereich der maximalen Flussdichte abgebildet. Die Anzahl an Stützstellen hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse, aber auch auf den Rechenaufwand. In den durchgeführten Untersuchungen wurden 9 oder 11 Stützstellen und eine Spline-Interpolation benutzt, um Abweichungen unter 2% zu erreichen. Für die untersuchten Topologien wurden jeweils alle Designparameter variiert und die Feldergebnisse mittels ANSYS Maxwell erzeugt und gespeichert. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Daten wurden jeweils pro Topologie auf die Minimal- und Maximalwerte skaliert und dienten als Trainingsdaten für die Untersuchung verschiedener neuronaler Netzwerke.

Im Ergebnis konnten mit dieser Methode sehr gute Übereinstimmungen zwischen dem abgeleiteten Modell und den Originaldaten erzielt werden. Jedoch nehmen die Abweichungen stark zu, wenn die Daten extrapoliert werden müssen. Damit ist das Modell nur auf einem trainierten Größenbereich zulässig. Auch für neue Topologien

müssen wieder neue Trainingsdaten erzeugt werden, was je nach verfügbarer Rechentechnik mehrere Tage bis Wochen dauert.

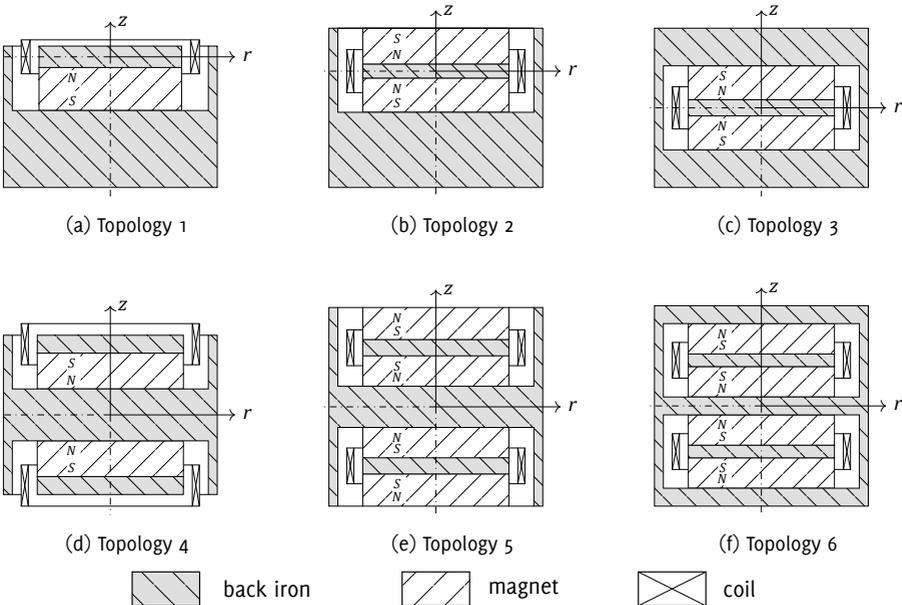
Optimierung per Finite-Elemente-Kopplung

Als zweite Methode wurde die direkte FEM-Kopplung während des Optimierungsprozesses in Python implementiert. Hierzu wurde die Python-Bibliothek PyAEDT eingesetzt, welche das Interface zwischen Python und dem Programm Ansys Electronics Desktop bereitstellt und während der Projektlaufzeit eine rasante Entwicklung nahm. Um eine schnelle FEM-Rechnung in jedem Optimierungsschritt zu erreichen, wurden Untersuchungen zu notwendigen, aber nicht zu rechenintensiven Vernetzungseinstellungen durchgeführt. Insbesondere die Spulenfenster, in denen das Feld ausgewertet wird, werden initial vernetzt, sodass der automatische Vernetzer auf drei Iterationen beschränkt werden kann.

Ergebnisse

In das Designtool ist die Variante mit der direkten Kopplung eingeflossen, da diese für den im Projekt durchgeführten Vergleich verschiedener Topologien infolge der modularen Erweiterungsmöglichkeiten am zielführendsten umgesetzt werden konnte.

Abbildung 2: Implementierte Topologien in aufsteigender Komplexität. Grafik: IMMS.



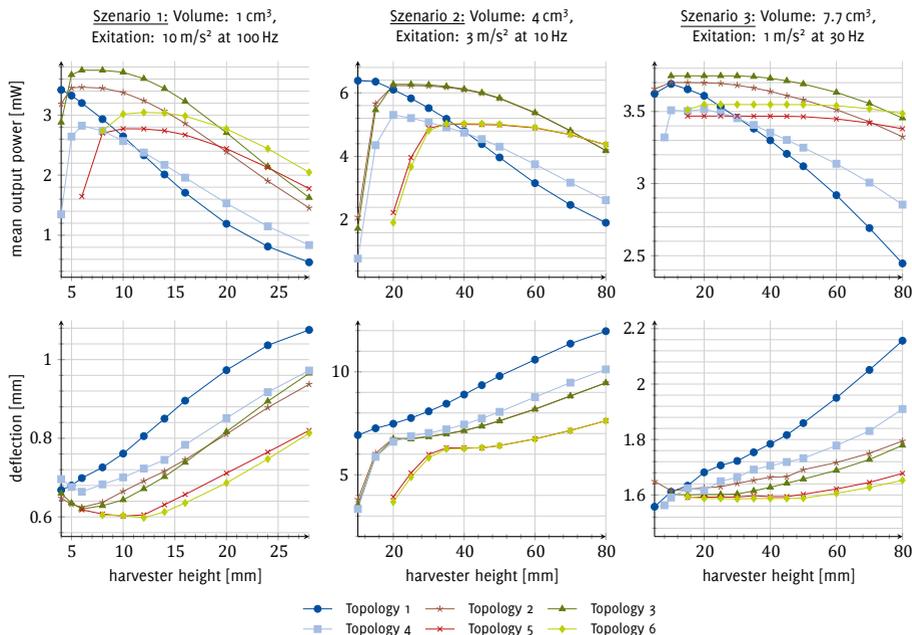


Abbildung 3: Exemplarische Vergleichsstudie. Für die betrachteten Randbedingungen erzeugt Topologie 3 (siehe Abbildung 2) die maximale Ausgangsleistung pro Volumen. Grafik: IMMS.

Die derzeit untersuchten Topologien sind in Abbildung 2 dargestellt. Es handelt sich um Standardtopologien für einen zylindrischen Bauraum und mit zunehmender Komplexität, insbesondere im Hinblick auf die Produktion.

Mit Hilfe des entwickelten Designtools wurden für verschiedene Einsatzbedingungen die Topologien hinsichtlich ihrer Eignung bei verschiedenen Randbedingungen und Aspektverhältnissen untersucht. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen an eisenlosen Strukturen konnte in der aktuellen Studie kein signifikanter Unterschied zwischen der Eignung der Topologien für Szenarien mit relativ kleinen Auslenkungen im Vergleich zu großen Auslenkungen festgestellt werden. In allen Szenarien konnte gezeigt werden, dass für die betrachteten Randbedingungen die Topologie 3 mit zwei gegensinnigen Magneten und einem geschlossenen Rückschluss die maximale Ausgangsleistung pro Volumen erzeugt, vgl. Abbildung 3. Bei Beschränkung des Aspektverhältnisses können auch andere Topologien bessere Ergebnisse erzeugen insbesondere bei sehr flachen oder sehr hohen Strukturen.

Mit dem in ECo-Harvester erarbeiteten Stand ist das IMMS in der Lage, anwendungs-spezifische Designs nach Kundenanfragen in kürzester Zeit zu erstellen. Zudem sind die erreichten Ergebnisse¹ die Basis für skriptbasierte FEM-Analysen mit pyAnsys. Diese bieten neben Energy Harvesting auch auf anderen Gebieten eine hohe Flexibilität und Automatisierbarkeit im Vergleich zur klassischen GUI-basierten Modellierung. Durch Python-Skripte lassen sich wiederholbare Workflows erstellen, Parametervariationen effizient durchführen und komplexe Simulationsprozesse automatisieren. Das führt zu einer signifikanten Zeitersparnis besonders bei Serienanalysen oder Optimierungsaufgaben.

Kontakt: Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de

Gefördert durch



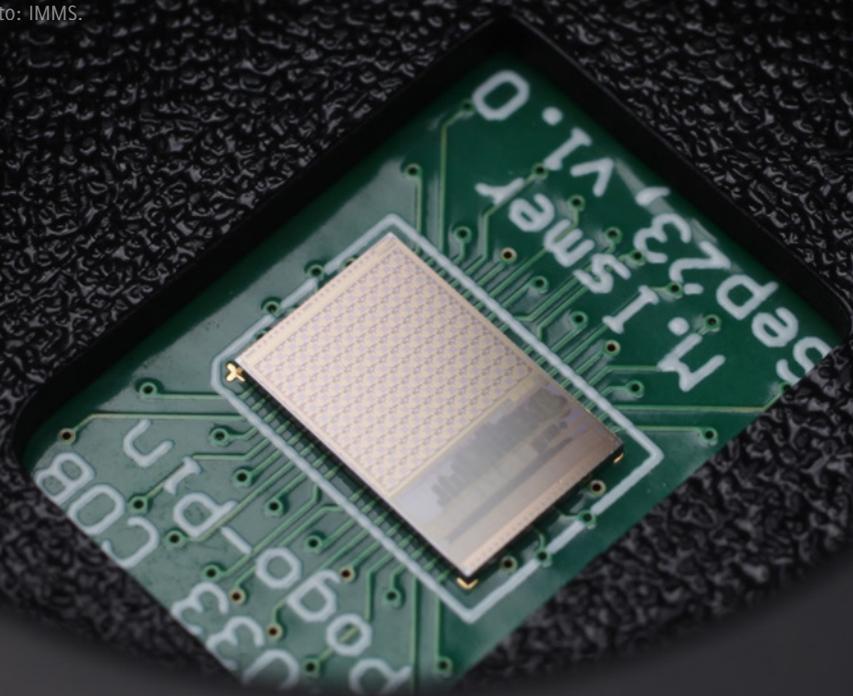
Das Projekt ECo-Harvester wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 452215927 gefördert.

¹ Leistritz, Bianca, and Ludwig Herzog. 2025. „Automated Design Methodology for Electromagnetic Energy Harvesters“ *Sensors* 25, no. 11: 3358. <https://doi.org/10.3390/s25113358>

ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE

Testaufbau für den im Projekt FluoResYst entwickelten SPAD-basierten Sensor zum zeitaufgelösten Auslesen von Fluoreszenz-markierten DNA-Mikroarrays.

Foto: IMMS.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

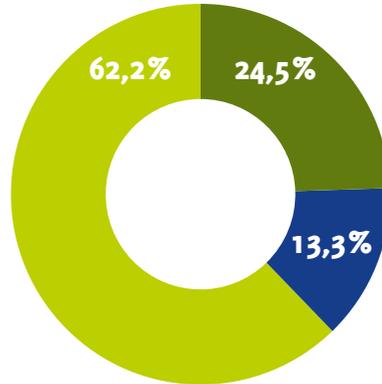
Das Projekt FluoResYst wurde 2024 im Rahmen des Förderprogramms Photonik-Forschung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 13N15807 gefördert.

Das IMMS in Zahlen

Am IMMS waren zum Ende des Geschäftsjahres 2024 98 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** verschiedenster Nationalitäten und Fachrichtungen tätig.¹

Hiervon waren 61 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 24 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 87 % aller Beschäftigten. Darüber hinaus waren 4 von 13 der Administration zugeordneten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter direkt wissenschaftsunterstützend eingesetzt.

Personalstruktur

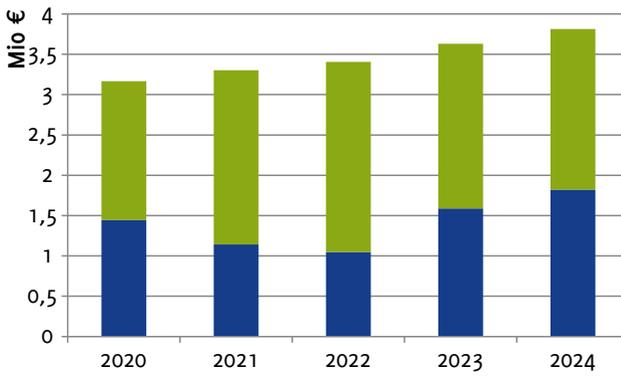


Wissenschaft | studentische Mitarbeit | Administration / Auszubildende

Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Geschäftsjahr am IMMS insgesamt 38 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 2 Bachelorarbeiten und 5 Masterarbeiten. 7 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben und 3 davon haben ihre Promotion 2024 erfolgreich abgeschlossen.

Das Geschäftsjahr hat sich wirtschaftlich gut entwickelt. Die Drittmittel erträge konnten gegenüber den bereits hohen Erträgen des Vorjahres nochmals gesteigert werden. Motor des Wachstums war dabei die industrielle Auftragsforschung (Industrieprojekte), die einen Höchststand erreicht hat, mit einem Anstieg gegenüber dem Vorjahr um 15 %. Es wurden im Geschäftsjahr etwa 66 Industrieprojekte bearbeitet. Aufgrund der (begrenzten) Personalkapazität blieben die Erträge aus öffentlich geförderten Forschungsprojekten (Förderprojekte) auf dem Niveau des Vorjahres. Im Geschäftsjahr 2024 konnten 4 öffentlich geförderte Forschungsprojekte (Förderprojekte) begonnen werden und es waren insgesamt 15 in der Umsetzung.

¹ Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2024 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit weiter zurückliegenden Berichten ist daher nur bedingt möglich.



Projekterträge

100

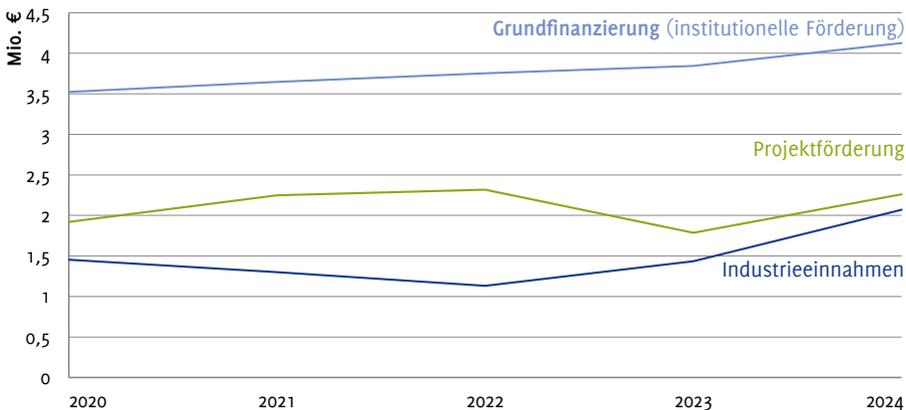
- > Integrierte Sensorsysteme
- > Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- > nm-präzise 6D-Direktantriebe
- > Inhalt
- * Förderung

Die vom Freistaat Thüringen geförderten internen Forschungsgruppen mit ihren für die strategische Weiterentwicklung des IMMS wichtigen Forschungsthemen konnten im Geschäftsjahr 2024 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die Finanzierung (Einnahmen) des Instituts bestand auch im Geschäftsjahr 2024 aus den drei Finanzierungsbausteinen öffentlich geförderte Forschungsprojekte (Förderprojekte), industrielle Auftragsforschung (Industrieprojekte) und institutionelle Förderung des Freistaats Thüringen. Die Förderung des Freistaats bleibt dabei die unverzichtbare Grundlage für die Forschungstätigkeit des IMMS. Jedoch nimmt die Bedeutung der industriellen Auftragsforschung für das Wachstum des Instituts zu.

www.imms.de/funding

Finanzierungssäulen





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

www.imms.de/
 org

Aufsichtsrat zum 31.12.2024

- **Vorsitzender:** Herr Dr. ¹Sebastian STARK, Referatsleiter Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- **Stellv. Vorsitzende:** Frau ¹Dr. Mandy KANDLER, Stellv. Referatsleiterin Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (TMWWDG)
- Herr Dr. Gabriel KITTLER, CEO X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, CEO X-FAB MEMS Foundry GmbH, CEO X-FAB Global Services GmbH, Kuratoriumsmitglied Fraunhofer IISB Erlangen
- Herr Andreas ROHWER, Referatsleiter Thüringer Finanzministerium
- Herr Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Kai-Uwe SATTLER, Präsident Technische Universität Ilmenau, Mitglied Verwaltungsrat TÜV Thüringen e.V., Kuratoriumsmitglied Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung (STIFT)
- 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 in Erfurt und Melexis Dresden GmbH

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

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

www.imms.de/
org

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
- Technische Elektrodynamik, Vorlesung
- Projektseminar TET

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

Veranstaltungen

Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

19.02.2024 – **KI-Frühstück** – Thüringer Zentrum für Existenzgründungen und Unternehmertum, IHK Erfurt, *Vortrag*, Erfurt

25.02.2024 – **TuZ 2024** – 36. ITG/GMM/GI-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, Darmstadt

05.03.2024 – **EBL 2024** – 12. GMM/DVS-Fachtagung: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten – Nachhaltigkeit und Energieeffizienz mit smarterer Elektronik, *Vortrag*, Fellbach

17.03.2024 – **CSTIC 2024** – Conference of Science & Technology for Integrated Circuits (CSTIC) in conjunction with SEMICON China 2024, *Vortrag*, Shanghai, China

19.03.2024 – **EASS 2024** – 12. GMM-Tagung Energieautonome Sensorsysteme, *Vortrag*, Freiburg

26.03.2024 – **ZAKI-Workshop** – KI verändert Produktionsprozesse, *Vortrag*, Jena

09.04.2024 – **edaWorkshop 2024** – edaWorkshop24 and the European Nanoelectronics Applications, Design & Technology Conference (ADTC), *Vortrag, Poster*, Dresden

17.04.2024 – **POCT** – Point-of-Care Diagnostics: Innovations from assays, microfluidics to production, *Poster*, Leipzig

24.04.2024 – **IT-KOM** – Kontaktmesse der Angewandten Informatik, FH Erfurt, *Vortrag, Messestand, Demonstrator*, Erfurt

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

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2024

29.05.2024 – **IEEE MetroInd4.0&IoT 2024** – IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, *Vortrag*, Florenz

03.06.2024 – **ISSW 2024** – The International SPAD Sensor Workshop & SPAD Sensor School, *Vortrag*, Trento, Italy

04.06.2024 – **IEEE RFID 2024** – 18th Annual International Conference on RFID, *Vortrag*, Boston, MA

04.06.2024 – **Tage der vertrauenswürdigen Elektronik 2024** – Ergebnispräsentationen der Forschungsprojekte der Förderrichtlinien für vertrauenswürdige Elektronik (ZEUS) und zukunftsfähige Spezialprozessoren und Entwicklungsplattformen (ZuSE) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), *3 Poster*, München

06.06.2024 – **Chipdesign Germany** – Designinitiative Mikroelektronik, *Poster*, Hannover

29.06.2024 – **HAM RADIO 2024** – Internationale Amateurfunk-Ausstellung, *Vortrag*, Friedrichshafen

02.07.2024 – **SMACD 2024** – International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), *3 Vorträge*, Volos, Griechenland

05.08.2024 – **FPGA Ignite Summer School** – Networking, lectures and a hackathon on designing a custom RISC-V SoC, *Poster*, Heidelberg

06.08.2024 – **5 Jahre EXPRESS** – Mitteldeutsches Netzwerktreffen des Experimentierfelds EXPRESS, *4 Poster*, Meißen

03.09.2024 – **Ergebniskonferenz der digitalen Experimentierfelder** – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), *Vortrag*, Berlin

22.10.2024 – **8. Thüringer Maschinenbautag** – Herausforderung Arbeitskräftemangel – was können Unternehmen tun? Best Practice und neue Wege, *Vortrag, Messestand, Demonstrator*, Erfurt

23.10.2024 – **ICPE 2024** – The 20th International Conference on Precision Engineering, *Vortrag*, Sendai, Japan

07.11.2024 – **Bernburger Bewässerungstag** – Nachhaltigkeit im Bewässerungslandbau – Digitale Erfahrungen und Lösungen, *2 Poster, Demonstratoren*, Bernburg

12.11.2024 – **euspen SIC** – euspen Special Interest Conference: Precision Motion Systems & Control, *1 Vortrag, 2 Poster*, 's-Hertogenbosch, The Netherlands

25.11.2024 – **DSS 2024** – 17. Dresdner Sensor-Symposium, *Poster*, Dresden

05.12.2024 – **Meister trifft Maschine** – Das Handwerksfestival. Tagung mit Begleit- ausstellung, *Vortrag, Ausstellungsstand*, Erfurt

06.12.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot** – Künstliche Intelligenz und Nachhaltigkeit
– Wie KI helfen kann, Energie und Ressourcen einzusparen, *Vortrag, Organisation,*
online

18.12.2024 – **IEEE RFID-TA 2024** – Forum for advancing RFID technology and practice,
Vortrag, Daytona Beach, FL, USA

Workshop-Angebote / IMMS als Gastgeber / Veranstalter / Mitinitiator

16.01.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot KI-Stammtisch** – „Wie die Projekte SPEAKER
und OpenGPT-X eine dialogorientierte KI ‚made in Germany‘ vorantreiben“, *Mitver-*
anstalter, Moderation, Ilmenau

03.04.2024 – **Forschungstag für Jugendliche**, *Veranstaltung am IMMS, Ilmenau*

18.04.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot Industrieforum Smarte Fertigung I** – „Digita-
ler Zwilling und digitaler Produktpass“, *Organisation, Moderation, Saalfeld*

25.04.2024 – **Girls’Day 2024**, *Veranstaltung am IMMS, Ilmenau*

11.06.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot KI-Stammtisch** – „TEEMSC – Ein selbstler-
nender Ansatz um energieeffiziente Maschinendiagnose auf Mikrocontrollern zu
ermöglichen“, *Organisation und Moderation, online*

05.09.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot 4. IT-Security-Day** – „Für die Zukunft ge-
wappnet: Handlungsempfehlungen und Lösungen“, *Mitveranstalter, Erfurt*

10.09.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot KI-Stammtisch** & Meetup der AWS-MeetUp-
Gruppe Ilmenau mit dem BVMW – „KI und Wissensmanagement in Unternehmen“,
Organisation, Moderation, Ilmenau

10.09.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot Industrieforum Smarte Fertigung II** – „Digi-
taler Zwilling und digitaler Produktpass“, *Organisation, Moderation, Kölleda*

19.09.2024 – **edaBarCamp: EPISODE VI** – Return of the edaBarCamp, *Mitveranstalter,*
Teilgeber, Neubiberg/München

14.10.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot Cross-Cluster-Woche 2024** – CCIT-Auftaktver-
anstaltung „Resilient durch Kooperation“, *Mitveranstalter, Ausstellungsstand, Erfurt*

06.11.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot KI-Stammtisch** mit Navigator-Bus, *Organisa-*
tion, Ilmenau

08.11.2024 – **Lange Nacht der Wissenschaften** – Mitmachangebote zur Langen Nacht,
fürs Studium und darüber hinaus: Thüringer Hochschulen bei CiS, Fraunhofer-Zent-
rum, IMMS, Melexis und X-FAB, *Veranstaltung am IMMS, Demonstratoren, Erfurt*

28.11.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot Digitale und physische Sicherheit im Unter-**
nehmen – Live-Demonstration, *Organisation, Moderation, Ilmenau*

06.12.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot Künstliche Intelligenz und Nachhaltigkeit**

– Wie KI helfen kann, Energie und Ressourcen einzusparen, *Vortrag, Organisation, online*

10.12.2024 – **Mittelstand-Digital-Angebot KI-Stammtisch** – „Signalauswertung beim akustischen Prozessmonitoring von Laserschweißprozessen im Ultraschallbereich: Braucht es dafür KI?“, *Organisation, Moderation, online*

Messen und Ausstellungen

08.04.2024 – **16. Erfurter TechnologieDialog** – Forschungs- und Industriezentrum Erfurt e.V., *Messestand, Demonstratoren, Erfurt*

17.04.2024 – **Data Week Leipzig 2024** – K-M-I Transfertag, *Ausstellungsstand, Demonstrator, Leipzig*

24.04.2024 – **IT-KOM** – Kontaktmesse der Angewandten Informatik, FH Erfurt, *Vortrag, Messestand, Demonstrator, Erfurt*

07.05.2024 – **HAW-Messe** – Firmenkontaktmesse der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, *Messestand, Demonstratoren, Hamburg*

14.05.2024 – **Karriereperspektiven für Ingenieur_Innen** – Informations- und Netzwerkveranstaltungen für Studierende der Universität Duisburg-Essen, *Messestand, Demonstratoren, Duisburg*

15.05.2024 – **InnoCON Thüringen 2024** – TransferXThüringen: Wissen teilen. Innovationen schaffen, *Messestand, Demonstratoren, Weimar*

04.06.2024 – **Fachtagung des SaaleWirtschaft e.V.** – Künstliche Intelligenz und IT-Sicherheit, *Ausstellungsstand, Demonstrator, Rudolstadt*

18.06.2024 – **erwicon** – Erfurter Wirtschaftskongress: Innovationen in Aktion – entdecken.erleben.gestalten, *Ausstellungsstand, Erfurt*

19.06.2024 – **Career Dates** – Firmenkontaktmesse der Leibniz Universität Hannover, *Messestand, Demonstrator, Hannover*

26.09.2024 – **DGFT-Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“**, *Ausstellungsstand, Demonstratoren, Dresden*

16.10.2024 – **elmug4future 2024** – Technologiekonferenz zu „Wasserstoff und Messtechnik“, *Ausstellungsstand, Demonstratoren, Erfurt*

22.10.2024 – **8. Thüringer Maschinenbautag** – Herausforderung Arbeitskräftemangel – was können Unternehmen tun? Best Practice und neue Wege, *Vortrag, Messestand, Demonstrator, Erfurt*

23.10.2024 – **inova 2024** – Karriereforum an der TU Ilmenau, *Messestand, Demonstrator*, Ilmenau

29.10.2024 – **6. Thüringer KI-Forum** – Innovationen, Trends und Erfahrungen – KI als Motor für Thüringen, *Messestand, Demonstrator*, Erfurt

13.11.2024 – **Precision Fair** – The premier trade fair for high and ultra-precision technology, *Messestand, Demonstrator*, 's-Hertogenbosch, The Netherlands

05.12.2024 – **Meister trifft Maschine** – Das Handwerksfestival. Tagung mit Begleit-ausstellung, *Vortrag, Ausstellungsstand*, Erfurt

Videoproduktionen

Perspektivwechsel: Größte statt kleinste „Platine“ am IMMS „rausgebracht“;
<https://youtu.be/g43-D-yKcxU>

6D-Nanometer-Planar-Positioniersystem für hochpräzise Positionierung mit großem Bewegungsbereich; <https://youtu.be/r3PKo82sfvs>

Lange Nacht der Wissenschaften in Erfurt 2024; <https://youtu.be/yBNx18nzxHQ>

Begutachtete Veröffentlichungen

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

High-Sensitive Demodulator with Built-in Negative Offset Comparator for Passive UHF RFID Tags, Rohit KESHARWANI¹. Andre JÄGER¹. Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. Eric SCHÄFER¹. *IEEE RFID-TA 2024, Forum for advancing RFID technology and practice, Daytona Beach, FL, USA, December 18–20, 2024.* DOI: in progress. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Impact of Real-World Energy Consumption Variance on Internet of Things Node Lifetime Predictions. Silvia KRUG^{1,2}, Tino HUTSCHENREUTHER¹, Hannes TOEPFER^{1,3}. Mattias O’NILS². *Electronics 2024, 13, 4578.* DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13234578>.

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ³Technische Universität Ilmenau, Advanced Electromagnetics Group, Ilmenau, Germany.

Investigation of distance measurement reproducibility for a long-range nanopositioning machine combined with a laser focus sensor, Davi Anders BRASIL¹. Steffen HESSE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Ludwig HERZOG¹. Thomas FRÖHLICH². Thomas KISSINGER². *20th International Conference on Precision Engineering (ICPE2024), Sendai, Japan, October 23–26, 2024.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany.

Towards Measuring and Forecasting Noise Exposure at the VELTINS-Arena in Gelsenkirchen, Germany, Pitchapa NGAMTHIPWATTHANA¹. Marco GÖTZE². András KÁTAI¹. Jakob ABEßER¹. *2024 IEEE 5th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2), Erlangen, Germany, 30 September – 2 October, 2024, pp. 1–8, DOI: [https:// doi.org/10.1109/IS262782.2024.10704088](https://doi.org/10.1109/IS262782.2024.10704088).* ¹Fraunhofer Institute for Digital Media Technology (IDMT), Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

www.imms.de/
publ

NPS6D200 – A Long Range Nanopositioning Stage with 6D Closed Loop Control, Steffen HESSE¹. Alex HUAMAN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Bianca LEISTRITZ¹. Ludwig HERZOG¹. Appl. Sci. 2024, 14, 6972. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14166972>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Set the Clock: A Synthesizable Clock Manager, Jonas LIENKE¹. Florian KÖGLER¹. Eric SCHÄFER¹. Georg GLÄSER¹. 2024 20th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Volos, Greece, July 02-05, 2024. pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/SMACD61181.2024.10745390>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Propagation Delay Estimation for Mixed-Signal Modeling of Comparators, Martin GRABMANN¹. Eric SCHÄFER¹. Georg GLÄSER¹. 2024 20th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Volos, Greece, July 02-05, 2024. pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/SMACD61181.2024.10745467>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Integrating Multiple Knowledge-based Automation Methodologies into the A/MS IC Design Flow, Benjamin PRAUTSCH¹. Ralf SOMMER^{2,3}. Jürgen SCHEIBLE⁴. Uwe EICHLER¹. Lorenz RENNER². Till MOLDENHAUER⁴. Matthias SCHWEIKARDT⁴. Yannick UHLMANN⁴. 2024 20th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Volos, Greece, July 02-05, 2024. pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/SMACD61181.2024.10745465>. ¹Division Engineering of Adaptive Systems, Institute for Integrated Circuits, Fraunhofer IIS/EAS, Dresden, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³Technische Universität Ilmenau, Electrical Engineering and Information Technology, Electronic Circuits and Systems Group, Ilmenau, 98693, Germany. ⁴Electronics & Drives, Reutlingen University, Reutlingen, Germany.

109 
> Integrierte
Sensorsysteme
> Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
> nm-präzise 6D-
Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
publ

Enhancing Chemiluminescence-Detection with Dark-Count Rate Optimization Strategies for SPADs in Conventional CMOS Technologies, Benjamin SAFT¹. Alexander ZIMMER². Maximilian WIENER¹. Mirjam SKADELL². Eric SCHÄFER¹. *ISSW 2024, The International SPAD Sensor Workshop @ the SPAD SENSOR SCHOOL, Trento, Italy, June 3 – 6, 2024*. In IISS Online Library: <https://imagesensors.org/2024-international-spad-sensor-workshop/>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Semiconductor Foundries GmbH, Erfurt, Germany.

A Charge Pump System with Controlled Input Impedance for Optimized RFID Energy Harvesting, Rohit KESHARWANI¹. Andre JÄGER¹. Martin GRABMANN¹. David SCHREIBER¹. Georg GLÄSER¹. Hani ABDULLAH¹. Eric SCHÄFER¹. *2024 IEEE International Conference on RFID (RFID), Boston, MA, USA, June 4-6, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1109/RFID62091.2024.10582749>*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

TEEMSC – Trainable Energy Efficient Machine Diagnosis using Singular Values and Canonical Crosscorrelation, Rick PANDEY¹. Sebastian UZIEL¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Silvia KRUG^{1,2}. *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, Florence, Italy, May 29-31, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.010T61288.2024.10584173>*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Department of Computer and Electrical Engineering, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

Investigations on tip-based large area nanofabrication and nanometrology using a planar nanopositioning machine (NFM-100), Jaqueline STAUFFENBERG¹. Johannes BELKNER¹. Denis DONTSOV². Ludwig HERZOG³. Steffen HESSE³. Ivo W. RANGELOW^{1,4}. Ingo ORTLEPP¹. Thomas KISSINGER¹. Eberhard MANSKE¹. *2024 Meas. Sci. Technol. 35 085011, DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad4668>*. ¹Institute for Process Measurement and Sensor Technology, Department for Mechanical Engineering, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, Ilmenau, Germany. ²SIOS Meß-

technik GmbH, Am Vogelherd 46, 98693 Ilmenau, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ⁴nano analytik GmbH, Ehrenbergstraße 1, 98693 Ilmenau, Germany.

110 
> Integrierte Sensorsysteme
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> nm-präzise 6D-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
publ

Enhancing Apple Cultivar Classification Using Multiview Images, Silvia KRUG^{1,2}. Tino HUTSCHENREUTHER². *J. Imaging* 2024, 10, 94. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging10040094>, ¹Department of Computer and Electrical Engineering, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

A Retrofit Streetlamp Monitoring Solution Using LoRaWAN Communications, Sören SCHNEIDER¹. Marco GÖTZE¹. Silvia KRUG^{1, 2}. Tino HUTSCHENREUTHER¹. *Eng* 2024, 5, 513-531, DOI: <https://doi.org/10.3390/eng5010028>, ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Department of Computer and Electrical Engineering, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

SPAD-Based Sensor IC for chemiluminescence assays in microfluidic channels, Alexander ZIMMER¹. Benjamin SAFT². Maximilian WIENER². Jakob HAMPEL². Mirjam SKADELL¹. Eric SCHÄFER². *Conference of Science & Technology for Integrated Circuits (CSTIC), Shanghai, China, March 17-18, 2024*, DOI: <https://doi.org/10.1109/CSTIC61820.2024.10531988>, ¹X-FAB Global Services GmbH, Erfurt, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Vortrag und Posterpräsentation

Miniaturisierte CMOS-basierte Multi-Sensor-Plattform für die Analytik und Diagnostik, Alexander HOFMANN¹. Florian KÖGLER¹. Elisa HILBRECHT¹. Victoria DIMOVA¹. Eric SCHÄFER¹. *17. Dresdner Sensor-Symposium, 25. – 27. November 2024, Dresden*, DOI: <https://doi.org/10.5162/17dss2024/P38>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Disturbance rejection in periodic motion with enhanced constant velocity transitions using a tilt-mirror test setup, Alex S. HUAMAN¹. Michael KATZSCHMANN¹. Stefan HESSE¹. Ludwig HERZOG¹. *euspen Special Interest Conference: Precision Motion Systems and Control, Brabantallen, 's-Hertogenbosch, The Netherlands, November 12-13, 2024*. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

111

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

www.imms.de/
publ

Experimental investigation of air bearing noise by means of a 3D nanopositioning system, Parastoo SALIMITARI¹. Steffen HESSE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Alex S. HUAMAN¹. Ludwig HERZOG¹. *euspens Special Interest Conference: Precision Motion Systems and Control, Brabanthallen, 's-Hertogenbosch, The Netherlands, November 12-13, 2024.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

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

NPS6D200 – Realization of high precision long stroke vertical actuation in conjunction with a planar direct drive, Steffen HESSE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Alex S. HUAMAN¹. Davi-Anders BRASIL¹. Ludwig HERZOG¹. *euspens Special Interest Conference: Precision Motion Systems and Control, Brabanthallen, 's-Hertogenbosch, The Netherlands, November 12-13, 2024.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Neue Ansätze in der Kunststoffproduktion – Ein KI-basiertes Assistenzsystem für den Spritzgießprozess, Dominik SCHRAML¹. Silvia KRUG². *Thüringer Maschinenbautag, Erfurt, 22. Oktober 2024.* ¹Steinbeis Qualitätssicherung und Bilderverarbeitung GmbH, Ilmenau. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Methoden der digitalen Entwicklungsstadienerkennung im Wein- und Obstbau, Silvia KRUG¹. Martin SCHIECK². *Ergebniskonferenz der digitalen Experimentierfelder (Express), 4. September 2024, Berlin.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Universität Leipzig, Institut für Wirtschaftsinformatik, 04109 Leipzig, Germany.

Clock Gate Insertion with a Yosys-based Netlist Modification Tool, Manuel JIRSAK¹. Adrian PITTERLING¹. Jonas LIENKE¹. Georg GLÄSER¹. *FPGA Ignite Summer School, 5. – 9. August 2024, Heidelberg, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Wie wird mein Unternehmen KI-ready? Bedarfsgerechte Analyse- und Unterstützungspotenziale für KMU durch eine institutionsübergreifende Zusammenarbeit, Sebastian GERTH^{1, 4}. Martin FOLZ^{2, 4}. Wolfram KATTANEK^{3, 4}. *Mittelstand-Digital Magazin „Wissenschaft trifft Praxis“, Ausgabe 22, „KI-Readiness“.* ¹Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau (TU Ilmenau). ²Mittelstand-Digital Zentrum Chemnitz (TU Chemnitz). ³Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau (IMMS GmbH). ⁴KI-Hub Sachsen-Thüringen.

www.imms.de/
publ

Jahresbericht

Einstieg in die HF-(Mess-)Technik, Björn BIESKE¹. *HAM Radio, Internationale Amateurfunk-Ausstellung, 28. – 30. Juni 2024, Friedrichshafen, Germany.*

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

DI-Meta-X: Bridging the Gap with Meta Formats, Georg GLÄSER¹. Melanie WILHELM².

Robert FISCHBACH³. Detlef BILLE⁴. Jan MEHNER⁵. Peter KREUTZIGER⁶. *Auftaktveranstaltung Chipdesign Germany, 6. – 7. Juni 2024, Hannover.*

¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²X-FAB Global Services GmbH, Erfurt, Germany. ³Technische Universität Dresden, Dresden, Germany. ⁴EDC Electronic Design Chemnitz GmbH, Chemnitz, Germany. ⁵i-ROM GmbH, Neukirchen bei Chemnitz, Germany. ⁶AMAC ASIC- und Mikrosensoranwendung Chemnitz GmbH, Chemnitz.

VE-ARiS: Elektronischer Knowhow-Schutz für innovative Sensorsysteme. Abwehr von Reserve-Engineering auf IC-Ebene, Projektkonsortium VE-ARiS (iC-Haus GmbH. Wachendorff Automation GmbH & Co. KG. IMMS GmbH). *Tage der vertrauenswürdigen Elektronik 2024, 4. – 5. Juni 2024, München*

VE-ARiS: Alberich und die Tarnkappenfabrik. SKAW – Schaltungskopierbarkeitsanalysewerkzeug, Adrian PITTERLING¹. Florian KÖGLER¹. Georg GLÄSER¹. *Tage der vertrauenswürdigen Elektronik 2024, 4. – 5. Juni 2024, München.*

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

What The Fuzz (WTF): A Framework for Fuzz Testing ASIC Designs, Henning SIEMEN¹. Georg GLÄSER¹. *Tage der vertrauenswürdigen Elektronik 2024, 4. – 5. Juni 2024, München.*

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

Effect of spent mushroom compost mulch and irrigation treatment on growth, yield and fruit quality of sweet cherry in a summer-dry climate, Martin PENZEL¹. Claudia KUHAUPT². Maria BAMBERG³. Silvia KRUG^{4,5}. *European Horticulture Congress EHC, Symposia „Fruit Production Systems for Sustainable and Resilient Development“, Bucharest, Romania, May 12-16, 2024.*

¹Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau Erfurt, Germany. ²Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Erfurt, Germany. ³Thüringer Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, Erfurt, Germany. ⁴IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ⁵Department of Computer and Electrical Engineering, Mid Sweden University, Holmgatan 10, 851 70 Sundsvall, Sweden.

Integration of Chemiluminescence-based SPARCL® Assay on Microfluidic Platform with SPAD-based CMOS Line Sensor IC for Rapid Cytokine Detection, Benjamin SAFT¹.

Biljana GJUROVA². Pia SCHOLZ². Ana Leonor Heitor LOPES². Alexander ZIMMER³. Mirjam SKADELL³. Susann ALLELEIN². Eric SCHÄFER¹. *POCT Meeting 2024, 17. – 18. April 2024, Leipzig.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Fraunhofer IZI, Leipzig, Germany. ³X-FAB Global Services GmbH, Erfurt, Germany.

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

Analog EDA Using Knowledge-Based Methods, Ralf SOMMER¹. Jürgen SCHEIBLE³. Benjamin PRAUTSCH². Lorenz RENNER¹. Till MOLDENHAUER³. Yannick UHLMANN³. *edaWorkshop 2024 and the European Nanoelectronics Applications, Design & Technology Conference (ADTC), 9. – 10. April 2024, Dresden, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik-

und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS, Dresden, Germany. ³University Reutlingen, Germany.

Trust is good, monitoring is better: An FPGA/TEE-Based Monitoring-Approach to Malware Detection and Prevention, Friederike BRUNS¹. Georg GLÄSER². Florian KÖGLER². Jonas LIENKE². Nithin Ravani NANJUNDASWAMY³. Gregor NITSCHKE³. Behnam Razi PERJIKOLAEI¹. Jörg WALTER¹. *edaWorkshop 2024 and the European Nanoelectronics Applications, Design & Technology Conference (ADTC), 9. – 10. April 2024, Dresden, Germany.* ¹OFFIS e.V. Institut für Informatik Oldenburg. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme

gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ³DLR Institut für Systems Engineering für zukünftige Mobilität.

SPAD-Elektronik für Quantentechnologie, Michael MEISTER¹. *InnoLOG: Mitteldeutschland – Europäischer Hotspot der Mikroelektronik und Quantentechnologie, 4. April 2024, Erfurt, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH,

Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme mit KI in der Produktion, Peter HAUSCHILD¹. Tino HUTSCHENREUTHER². *Workshop zum Themenschwerpunkt „KI-Geschäftsmodelle“ mit dem Thema „KI verändert Produktionsprozesse“, 26. März 2024, ZAKI, Zentrum für Angewandte künstliche Intelligenz, Jena.* ¹Fraunhofer Institut für Digitale

Medientechnologie IDMT, Leistungszentrum InSignA. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme ge-

www.imms.de/
publ

Jahresbericht

An Improved Architecture for a Fully Digital UHF RFID PIE-Stream Data Recovery Circuit, Georg GLÄSER¹. Björn BIESKE¹. Jonas LIENKE¹. Martin GRABMANN¹. Haní ABDULLAH¹. David SCHREIBER¹. André JÄGER¹. Eric SCHÄFER¹. *EASS – Energieautonome Sensorsysteme 2024*, 12. GMM-Tagung, Freiburg, Germany, 19. – 20. März 2024, pp. 37-39, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10659690>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

115 ○
> Integrierte Sensorsysteme
> Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
> nm-präzise 6D-Direktantriebe
> Inhalt
* Förderung

Systematische Evaluation des Energieverbrauches von Funksensorknoten während der Entwicklungsphase als Werkzeug für energieeffizientes System-Design, Alexander JURIN¹. Silvia KRUG¹. Sebastian UZIEL¹. 12. GMM/DVS-Fachtagung, *Elektronische Baugruppen und Leiterplatten (EBL 2024)*, 5. – 6. März 2024, Fellbach, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Evaluierung und Test von GNSS-Empfängern mit realen und synthetischen Satellitensignalen, Björn BIESKE¹. Uwe STEHR². Matthias HEIN². Syed N. HASNAIN². 36. ITG / GMM / GI-Workshop *Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen (TuZ 2024)*, 25. – 27. Februar 2024, Darmstadt, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²Thuringian Center of Innovation in Mobility, RF & Microwave Research Group, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany.

Fachartikel in Zeitschriften

Testsystem für die Charakterisierung analoger und digitaler Strukturen – Mixed-Signal-Analyse wird mobiltauglich, Tom REINHOLD¹. *Elektronik*, 24.2024, 26. November 2024, Seite 70 – 73, ePaper: wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/ELE?catalogName=ELE2424D. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

Energieautarkes System behält Feinstaub permanent im Blick, Falk EISENREICH¹. Marco GÖTZE¹. Silvia KRUG¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Kathrin VEIGEL². *in elektronik-net.de*, 22. August 2024, www.elektroniknet.de/smarter-world/energieautarkes-system-behaelt-feinstaub-permanent-im-blick.219767.html. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²elektroniknet.de, Redaktion.

www.imms.de/
publ

Jahresbericht

© IMMS 2024

Miniaturisierter CMOS-ISFET-Sensor für die Analytik und Diagnostik, Alexander Hofmann¹. *DeviceMed, Das Community-Magazin, Jahrgang 20, Ausgabe 3, Juli 2024, Seite 34 – 36, ISSN 1860-9414 | 69029, www.device-med.de/miniaturisierter-cmos-isfet-sensor-fuer-die-analytik-und-diagnostik-a-8083cd6a17f177898150dcafd09543c/. 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

Nachrüstbares Monitoring – Defekte Straßenlampen clever ausfindig machen, Sören Schneider¹. Marco Götze¹. Silvia Krug¹. Kathrin Veigel². *in elektroniknet.de, 9. Juli 2024, www.elektroniknet.de/smarter-world/defekte-strassenlampen-clever-ausfindig-machen.218803.html. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany. ²elektroniknet.de, Redaktion.*

Pikosekundenschnelle Lichtmessungen für die Quantenforschung – Einzelphotonen präzise messen, Jakob Hampel¹. *Elektronik, 04.2024, 20. Februar 2024, Seite 60 – 63, ePaper: wfm-publish.blaetterkatalog.de/frontend/mvc/catalog/by-name/ELE?catalogName=ELE2404D. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH, Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.*

www.imms.de/publ

Erteilte Patente

Positionierungssystem mit einem Regler sowie Verfahren zu dessen Konfiguration, Alex S. Huaman. DE 10 2023 118 056 B3.

www.imms.de/patent

- Das Verbundprojekt **DI-Meta-X** wurde vom Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) unter dem Kennzeichen **16ME0976** gefördert.
- Das Projekt **VE-ARIS** wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **16ME0242** gefördert.
- Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben **ProQuaOpt** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **01IS22019E** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.
- Das Verbundprojekt **VE-VIDES** wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **16ME0246** gefördert.
- Das Projekt **FluoResYst** wurde 2024 im Rahmen des Förderprogramms Photonik-Forschung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen **13N15807** gefördert.
- Das Projekt **Waldmonitor** wurde vom Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) über den Projektträger Forschungszentrum Jülich (PTJ) unter dem Kennzeichen **03WIR3607A** gefördert.



- Das IMMS brachte sich in das Leistungszentrum **InSignA** ein, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft des Freistaats Thüringen (TMWWDG) gefördert wurde. Der »**InSignA Innovation HUB (iHUB)**« ist ein vom TMWWDG getragenes Projekt des Landes Thüringen, mit dem (Aus-)Gründungen im Bereich intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme in Thüringen, aber auch darüber hinaus, gefördert werden.



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



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

- Das Projekt **OptoMed Vakuum-Luftlager** wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **16KN118229** gefördert.



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Projektträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

118

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> nm-präzise 6D-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

– Das Projekt **ECo-Harvester** wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer **452215927** gefördert.

Gefördert durch



Deutsche
Forschungsgemeinschaft

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

– Die interne **KI-Forschungsgruppe** wurde durch den Freistaat Thüringen gefördert.



– Die interne Forschungsgruppe **NextGenPos** wurde durch den Freistaat Thüringen gefördert.

– Die interne Forschungsgruppe **TIRELESS** wurde durch den Freistaat Thüringen gefördert.

– Das IMMS wurde für die Begleitung von Aktivitäten im **InSignA Innovation Hub (iHUB)** gefördert. IHUB ist ein Projekt des Landes Thüringen, mit dem (Aus-)Gründungen im Bereich intelligente Signalanalyse- und Assistenzsysteme in Thüringen und darüber hinaus gefördert werden.

– Das Verbundprojekt **ScoreChip** wurde über das Förderprogramm des Freistaats Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI) als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Thüringen Verbund Dynamik gefördert und über die Europäische Union kofinanziert unter der Verbundnummer 1001607, das Teilprojekt „Entwicklung eines Mikrofluidikscanners für PoC-Anwendungen auf Basis von SPAD-Sensoren“ unter der Vorhabensnummer **2024 VFE 0059**.

www.imms.de/
funding



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Jahresbericht

© IMMS 2024

6D *6 Degrees of Freedom*

ADRC *Active Disturbance Rejection Control*

AFM *Atomic Force Microscopy*

AHB *AMBA High-performance Bus (AMBA: Advanced Microcontroller Bus Architecture)*

API *Application Programming Interface*

ASIC *Application-specific Integrated Circuit*

BLE *Bluetooth Low Energy*

CCA *Canonical Crosscorrelation Analysis*

CLIA *Chemilumineszenz-Immunoassay*

CMOS *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

CNN *Convolutional Neural Networks*

CPU *Central Processing Unit*

CSV *Comma-Separated Values*

DOFs *Degrees of Freedom*

DWD *Deutscher Wetterdienst*

EDA *Electronic Design Automation*

FEM *Finite-Elemente-Modellierung*

FFT *Fast Fourier Transformation*

FPGA *Field Programmable Gate Array*

gRPC *Google Remote Procedure Calls*

HDL *Hardware Description Language*

I²C *Inter-Integrated Circuit*

IC *Integrated Circuit*

IoT *Internet of Things*

JSON *JavaScript Object Notation*

KI *künstliche Intelligenz*

KMU *kleine und mittlere Unternehmen*

LSTM-AD *Long Short-Term Memory Anomaly Detection*

MCU *Microcontroller Unit*

MinIO/S3 *Cloud-Speicher*

MQTT *Message Queueing Telemetry Transport*

PCB *Printed Circuit Board*

PMT *Photomultiplier Tube*

QSPI *Quad Serial Peripheral Interface*

RAM *Random-Access Memory*

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

RMS *Root Mean Square*

ROM *Read-only Memory*

SELFOC[®] *Self-Focusing Micro Optics*

SoC *System on a Chip*

SPAD *Single-Photon Avalanche Diode*

SPI *Serial Peripheral Interface*

SQL *Structured Query Language*

SVD *Singular Value Decomposition*

TPU *Tensor Processing Unit*

WORM *Write-Once Read-Many*

> *Integrierte*

Sensorsysteme

> *Intelligente ver-*

netzte Mess- u.

Testsysteme

> *nm-präzise 6D-*

Direktantriebe

> *Inhalt*

* *Förderung*



Herausgeber / Anbieterkennzeichnung

**IMMS Institut für Mikroelektronik-
und Mechatronik-Systeme
gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH)**
Ehrenbergstraße 27
98693 Ilmenau, Deutschland
+49.3677.87493.00 *Telefon*
+49.3677.87493.15 *Fax*
imms@imms.de
www.imms.de
www.imms.de/imprint

Vertretungsberechtigt:

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

Rechtsform:

Gesellschaft mit beschränkter Haftung

Registergericht: Amtsgericht Jena

Registernummer: HRB 303807

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer

gem. § 27a UStG: DE 177 527 119

Analyse verlinkter Inhalte mit Matomo

Für die in der digitalen Version dieses Berichts mit www.imms.de verlinkten Inhalte nutzen wir Matomo für die anonymisierte Analyse und die Verbesserung unserer Webseite. Die Open-Source-Software Matomo folgt den geltenden Datenschutzbestimmungen und ist nach

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

Externe Links

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

Lektorat

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer
Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt
Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Druck: www.BRANDTDRUCK.de

Alle Rechte sind vorbehalten.
Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.