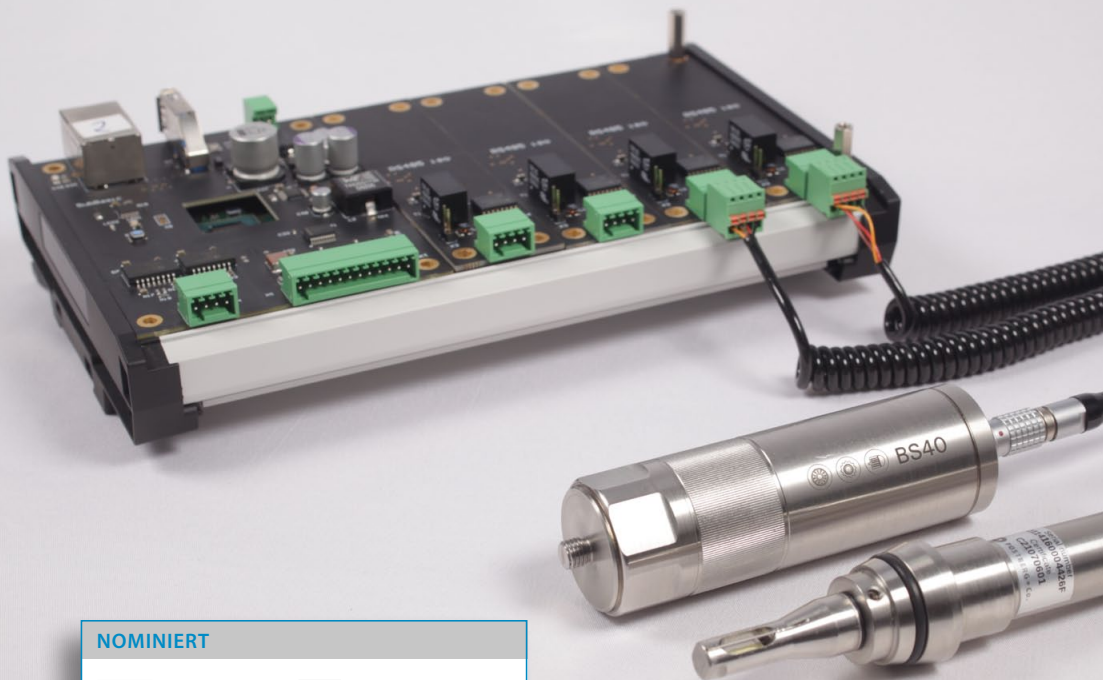
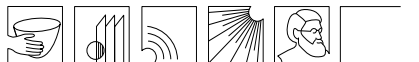




NOMINIERT



XXV. Innovationspreis Thüringen 2022



IMMS

JAHRESBERICHT

2022

3 Vorwort

5 Neuer Themenbereichsleiter Mechatronik

5 Leiterin Unternehmenskommunikation

6 Relaunch der Webseite

7 Kooperation mit der TU Ilmenau

10 Nachruf Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c.
Dagmar Schipanski

11 Stimmen aus Industrie und Forschung

14 Nachwuchsförderung am IMMS

17 Stimmen aus dem IMMS

20 Forschungsfeld Integrierte

Sensorsysteme

22 Highlight 2022

25 Fachartikel: KI unterstützt die
Entwicklung von Mikrochips

33 Fachartikel: Methode aus der Software-
entwicklung findet Bugs in Hardware

41 Forschungsfeld Intelligente
vernetzte Mess- und Testsysteme

43 Highlights 2022

58 Fachartikel: Mobiles Multisensorik-Prüf-
gerät zur Instandhaltung von Wälzlagern

65 Fachartikel: Sensorik zur Online-Über-
wachung von Membranreaktoren für
Dialyseprozesse und In-vitro-Protein-
synthese großer Probenvolumina

71 Fachartikel: Einzelphotonenzählung und
pikosekundenschnelle Messungen für
die Forschung an Quantentechnologien

77 Fachartikel: Testbench in Hardware: AMS
ASIC Scope zur Validierung KI-basierter
Simulationsmethoden im Chip-Entwurf

88 Forschungsfeld Magnetische 6D-
Direktantriebe mit nm-Präzision

89 Highlight 2022

93 Fachartikel: Neue Generation von Hub-
modulen zur vertikalen Nanopositionie-
rung mit bis zu 25 mm Verfahrenweg

99 Dienstleistungen für Forschung und
Entwicklung

100 Highlight 2022

103 Fachartikel: Vibrometrie für MEMS –
Applikationsmöglichkeiten

111 Zahlen, Strukturen und Belege

112 Das IMMS in Zahlen

114 Organisation

116 Lehrangebot

116 Veranstaltungen

119 Publikationen

123 * Förderung

126 Abkürzungen

127 Impressum, Datenschutz

› Integrierte
Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme

› Mag6D-nm-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Titelfoto: Die skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform für die Optimierung der Energieeffizienz in der Industrie „sUse“ wurde 2022 in der Kategorie „Industrie und Material“ für den XXV. Innovationspreis Thüringen nominiert.

Vorwort



Ralf Sommer und Martin Eberhardt. Foto: IMMS.

Liebe Leserinnen und Leser,

2022 wurden unsere Aktivitäten als innovative Forscher gewürdigt: Für die Sensorplattform „SUSE“ zur Optimierung der Energieeffizienz in der Industrie gab es eine Nominierung zum **Innovationspreis Thüringen 2022**. Das System wird mit dem Entwicklungspartner SONOTEC für die Markteinführung vorbereitet. Das ist neben vielen anderen ein relevantes Beispiel dafür, wie Ergebnisse aus der Forschung zur Innovation für Unternehmen werden und dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit unserer Partner zu unterstützen. Wir erhielten zudem eine **iENA-Bronzemedaille** für ein **Patent** auf einen mikroelektromechanischen Beschleunigungssensor, gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt eine weitere für ein Patent auf eine neue Dichtungsanordnung zur präziseren Wegmessung in Hightech-Anwendungen.

Die beiden letzten Lösungen entstanden im Themenbereich **Mechatronik**. Geleitet wird dieser seit Ende 2022 von Dr.-Ing. **Ludwig Herzog**. Er wird mit seinem Team das **Forschungsfeld Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision** weiter in Richtung Sub-Nanometer-Genauigkeit voranbringen. Ergebnisse zu einer neuen Generation von Hubmodulen zur vertikalen Nanopositionierung mit bis zu 25 mm Verfahrweg für industrielle Anwendungen finden Sie in diesem Bericht.

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

Im **Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme** wurden 2022 wichtige Meilensteine für die KI-basierte Entwurfs- und Testautomatisierung erreicht, mit denen Entwurf

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2022

und Test komplexer Mikroelektronik-Chips sicherer und schneller werden. In drei Fachartikeln zu effizienteren Simulationen, zur automatisierten Verifikation und zu einer Hardware-Testbench für den Chip-Entwurf werden die Ergebnisse in diesem Bericht vorgestellt.

Im **Forschungsfeld Intelligente Mess- und Testsysteme** haben wir Lösungen für Anwendungsentwicklungen u.a. in Industrie und Gesundheit erarbeitet. In drei Fachartikeln geht es um ein mobiles Multisensorik-Prüfgerät zur Instandhaltung von Wälzlagern, um Sensorik zur Online-Überwachung von Membranreaktoren für Dialyseprozesse und In-vitro-Proteinsynthese großer Probenvolumina sowie um ein Mess-System zur Einzelphotonenzählung und pikosekundenschnelle Messungen für die Forschung an Quantentechnologien.

Die strategische Ausrichtung in den Forschungsfeldern, Leitanwendungen und Zielmärkten sowie Dienstleistungen wird seit 2022 durch den **Relaunch der Webseite** sichtbar. Konzipiert und realisiert wurde dieser vom Team **Unternehmenskommunikation**, das Anfang 2022 neu strukturiert wurde und seitdem von **Beate Hövelmans** geleitet wird. Neben der Webseite lag hier der Fokus auf dem Auftakt für Videos zur Nachwuchsförderung. Darin illustrieren Erfahrungsberichte, wie wir Studentinnen und Studenten von den Basics bis zum Jobeinstieg fit für ihre Karriere in der Forschung und Entwicklung machen und so die Region stärken.

All dies und noch mehr wäre nicht möglich gewesen ohne Förderung und Unterstützung und vor allem nicht ohne unsere engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Vielen **Dank** allen, die uns den Rücken stärken und mit uns Innovationen auf den Weg bringen. Beispiele dafür finden Sie im Bericht.

Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen.

Ralf Sommer
Wissenschaftlicher Geschäftsführer

Martin Eberhardt
Kaufmännischer Geschäftsführer

4	
> Integrierte	Sensorsysteme
> Intelligente ver-	netzte Mess- u.
	Testsysteme
> Mag6D-nm-	Direktantriebe
> Inhalt	
* Förderung	

Neuer Themenbereichsleiter für Mechatronik

Dr.-Ing. Ludwig Herzog hat im Dezember 2022 die Themenbereichsleitung für Mechatronik am IMMS übernommen. Er hatte zuvor die Entwicklung bei der PRE-METEC Automation GmbH geleitet. Das international agierende Unternehmen für Automatisierungs- und Präzisionsmesstechnik aus Suhl, Thüringen, hatte in der Vergangenheit mit dem IMMS

zu Nanopositionier- und Nanomessmaschinen zusammengearbeitet. Ludwig Herzog hatte bereits sein Studium der Fahrzeugtechnik in Ilmenau samt Promotion absolviert und kehrt nun zurück, um die Forschung und Entwicklung für magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision und anwendungsspezifische mechatronische Systeme für Forschungspartner und Industriekunden gemeinsam mit dem interdisziplinär zusammengesetzten Team weiter voranzubringen.



Dr.-Ing. Ludwig Herzog, Leiter Mechatronik.
Foto: IMMS.

5

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

www.imms.de/
kontakt



Dipl.-Des. Dipl.-Hdl. Beate Hövelmans, Leiterin
Unternehmenskommunikation. Foto: Rolf
Peukert, IMMS.

Leiterin Unternehmenskommunikation

Beate Hövelmans leitet seit Anfang 2022 das neustrukturierte Team Unternehmenskommunikation am IMMS. Davor hatte sie die Presse- und Öffentlichkeitsarbeit des Instituts verantwortet und Themen wie Social Media, Video- und Cross-Media-Kommunikation initi-

iert und ausgebaut. Sie studierte an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und an der Bauhaus-Universität Weimar Wirtschaftswissenschaften und Visuelle Kommunikation. Als diplomierte Handelslehrerin und Designerin bearbeitete sie vor ihrer Zeit am IMMS Technologiethemen in der internen Kommunikation bei Bosch, brachte in einer von ihr gegründeten Firma u.a. Imagefilme, Corporate Designs und Internetauftritte auf den Weg und war beim Halbleiterhersteller X-FAB für Public und Investor Relations zuständig. In ihrer neuen Funktion wird sie die kommunikative Begleitung der IMMS-Strategie weiter ausbauen.

Jahresbericht

© IMMS 2022

Relaunch der Webseite



6

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

Im Mai 2022 ging die neue Webseite des IMMS mit neuer Struktur, neuem Design und neuen Inhalten online: **www.imms.de**. Das visuelle Konzept setzt auf Bilder für Navigation und Wiedererkennung sowie Illustration. Das Responsive Design erlaubt die Darstellung vom Desktop-Monitor bis zum Smartphone. Neue Inhalte zu Forschungsfeldern mit Kernthemen, Leitanwendungen und Zielmärkten machen die zentralen Themen der Strategie deutlich und zeigen, wie das IMMS Wissenschaft und Wirtschaft verbindet. Untermauert werden sie durch weiterführende Infos zu neuen und neustrukturierten Projekten, Publikationen, Referenzen und Pressemitteilungen. Neu aufbereitet sind die Karriereseiten inklusive besser durchsuchbarer studienbegleitender Angebote sowie die Dienstleistungen. Dazu kommen neue Seiten, wie z.B. zu Ausstattung, Organisation, Zahlen, Regularien oder eine Mediathek.

Die Inhalte sind modular aufgebaut und wechselseitig verknüpft. Sie lassen sich somit nicht nur von der Startseite aus hierarchisch erkunden, sondern auch über einen Direkteinstieg über eine Detailseite zu einem spezifischen Thema, etwa über einen externen Link von z.B. **LinkedIn** auf ein konkretes Projekt oder per QR-Code oder Kurz-URL auf einem gedruckten Flyer, die im Fall von **www.imms.de/trf** zur Detailseite über einem Chip für mobile Diagnostiksysteme zur Früherkennung von Krankheiten mithilfe von zeitaufgelösten Fluoreszenz-Messungen führt. Die Themen lassen sich je nach Bedarf und Interesse der Zielgruppe über einen kurzen, allgemeinverständlichen Anreizertext über einen fachlicher orientierten Überblick bis hin zu weiterführenden Seiten, Links und Downloads von Fachpublikationen oder Erklärvideos erschließen. Das Konzept bildet die Grundlage für eine crossmediale Kommunikation für heterogene Zielgruppen und Anlässe. Es unterstützt die Vermittlung von allgemeineren Themen bis hin zu fachspezifischen Ergebnissen und Details auf Projektebene. Die unterschiedlichen Detaillierungsgrade und fachlichen Niveaus zielen darauf ab, möglichst viele Interessengruppen abzuholen.

www.imms.de

www.imms.de/trf

www.imms.de/videos

[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 2022 hat das IMMS mit zahlreichen Fachgebieten in den Bereichen Elektro- und Informationstechnik, Maschinenbau, Informatik und Automatisierung sowie Mathematik wissenschaftliche Projekte und Fragestellungen bearbeitet. Gleichzeitig ist das IMMS stark mit der Industrie vernetzt. Zur Entwicklung international erfolgreicher Innovationen für Gesundheit, Umwelt und Industrie ist es ebenso in regionale und nationale Innovationsnetzwerke eingebunden wie in industrielle Cluster. Die Nutzung und Bündelung technologischer Kompetenzen und die Entwicklung gemeinsamer Marktstrategien liefern für die Forschungstätigkeit des Instituts und der TU Ilmenau wertvolle Praxisimpulse.

Ausgewählte gemeinsame Projekte

Quantum Hub Thüringen*: IMMS erforscht CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

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

www.imms.de/

qhub

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

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

www.imms.de/

thurAI

Bis 2026 arbeiten 13 Doktoranden, darunter einer am IMMS, in Phase II des von der DFG geförderten NanoFab-Graduiertenkollegs 2182 an Lösungen für die spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in erweiterten makroskopischen Arbeitsbereichen. Betreut werden sie von Professoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern der TU Ilmenau und des IMMS unter der Leitung des Instituts für Prozessmess- und Sensortechnik der Fakultät Maschinenbau. Das IMMS entwickelt Lösungen für ein Antriebssystem, das mehrachsige hochdynamische Bearbeitungen von Objekten mit Nanometer-Präzision ermöglichen soll.

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

Wachstums-kern HIPS* – High-Performance-Sensorsysteme für harsche Umgebungen

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

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

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

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

Das IMMS gibt als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ Impulse zur Einführung von Industrie-4.0-Technologien für die Verbesserung von Anlagen und Prozessen. Konkret lassen sich beispielsweise Maschinen und Anlagen durch drahtlose und vernetzte Sensorik nachrüsten und damit Daten für die Entwicklung von innovativen Diagnose-, Wartungs- und Servicekonzepten ermitteln und verarbeiten. Durch universelle Elektronikplattformen für Industrie-4.0-Komponenten und durch Open-Source-Software lassen sich echtzeitfähige Lösungsansätze schnell und kostengünstig realisieren.

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

Das Leistungszentrum InSignA*

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

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

9	○
› Integrierte	
Sensorsysteme	
› Intelligente ver-	
netzte Mess- u.	
Testsysteme	
› Mag6D-nm-	
Direktantriebe	
› Inhalt	
* Förderung	
○	
www.imms.de/	
angebote	



Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Dagmar Schipanski. Foto: privat.

NACHRUF

Wir nehmen Abschied von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Dagmar Schipanski

(*3. September 1943, † 7. September 2022)

Sie war stets eine Förderin des IMMS und hat das Institut mit viel Initiative begleitet von der Gründung bis heute. Etwas zu bewegen, war ihr Antrieb. Sie war immer Feuer und Flamme, etwas Neues zu machen. Sie hat strikt ihre Ziele verfolgt und konnte Menschen zusammenbringen, hat Kreativität, Ideen und deren Umsetzung gefördert.

Wir werden ihre herzliche und offene Art in guter Erinnerung behalten. Unser Mitgefühl gilt ihrer Familie.

Im Namen aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IMMS

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Sommer, wissenschaftlicher Geschäftsführer

Dipl.-Kfm. Martin Eberhardt, kaufmännischer Geschäftsführer

Dipl.-Ing. Robert Fetter, Vorsitzender des Aufsichtsrats

STIMMEN AUS INDUSTRIE UND FORSCHUNG

Alle Referenzen: www.imms.de/ref



Das in QuantumHub
Thüringen entwickelte
SPAD-EvalKit basiert auf dem
Verfahren der zeitkorrelierten
Einzelphotonenzählung und ermöglicht
Messungen mit einer zeitlichen Auflösung
von 20 Pikosekunden. Damit lassen sich Quanten-
basierte Anwendungen erforschen und neue Lösungen
für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschließen.
Mehr dazu im Fachartikel. Foto: IMMS.

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

Freistaat
Thüringen



Hier hat Zukunft Tradition.



Dipl. Ing. (DH) Andy Carius, CTO, Indu-Sol GmbH. Foto: Indu-Sol GmbH.

Andy Carius, Indu-Sol

„Für die industrielle Kommunikation und Automationsnetzwerke bieten wir von Indu-Sol Planung, Netzwerkkomponenten, Optimierung, Service und Support an, um einzelne Maschinen und Anlagen zu steuern oder komplexe Prozessabläufe in Produktion und Fertigung zu verbinden. Wir tragen damit zu einer industriellen Kommunikation bei, die reibungsfreie und kosteneffiziente Abläufe ermöglicht. Mit unserem innovativen Lösungsangebot für industrielle Netzwerke unterstützen wir unsere Kunden, die Digitalisierung ihrer Prozessebene zu meistern.“

Darum ging es auch im Forschungsprojekt BeSen. Es besteht aus einer Hardware, welche applikationsunabhängig und ohne Vorkonfiguration und Einstellungen Sensordaten aufzeichnet und diese zur Weiterverarbeitung speichert, und eine Software, welche in der Lage ist, Muster zu erkennen, einen Normalzustand festzustellen und Abweichungen davon zu melden. Das IMMS hat hier konkret dazu beigetragen, die aufgezeichneten Daten zu klassifizieren und daraus Anomalien festzustellen.

www.imms.de/embedded

Hierbei kam es auf die besonders intensive Forschungsarbeit zur Klassifizierung der Daten und daraus abgeleiteter Funktionen an, weshalb wir uns bei dieser Aufgabe an das IMMS gewandt haben. Die gemeinsame Arbeit war von vielen eigenen Ideen und sehr viel Engagement durch das IMMS geprägt und wir werden uns hier in zukünftigen Projekten, insbesondere im Bereich der Datenauswertung und Klassifizierung, gern wieder an das IMMS wenden, da wir diese Art der Zusammenarbeit sehr schätzen.“

www.imms.de/ref



Prof. Ronny Stolz, Abteilungsleiter Quantensysteme, Leibniz-IPHT, Professor für Quantenengineering an der TU Ilmenau. Foto: ©Leibniz-IPHT.



Dr. Theo Scholtes, Forschungsgruppenleiter Quantenmagnetometrie, Leibniz-IPHT. Foto: ©Leibniz-IPHT.

Prof. Ronny Stolz und Dr. Theo Scholtes, Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (Leibniz-IPHT)

„Das Team der Quantenmagnetometrie am Leibniz-IPHT erforscht und entwickelt höchstempfindliche Magnetfeldsensorik, wofür laserspektroskopisch vermessene quantenphysikalische Effekte in atomaren Dämpfen genutzt werden. Um diese Methoden aus dem Labor in relevante Anwendungsszenarien wie z.B. der Geophysik oder der Biomedizin zu überführen, realisieren wir kompakte, energiesparende und autarke Sensorsysteme. Für die Auslese eines neuen Sensortyps zur hochauflösenden Vermessung des Erdmagnetfeldes fehlte uns die Expertise zur Implementierung einer angepassten digitalen Sensorelektronik auf Basis einer integrierten FPGA-Datenerfassungsplatine. Im Kontakt mit dem IMMS wurde dessen umfangreiche Expertise im Bereich der hardwarenahen Programmierung klar und so erschien uns das IMMS als idealer Partner. Das IMMS hat die von uns benötigten Funktionalitäten z.B. eines Lock-In-Verstärkers, einer phasenstarken Rückkoppelschleife und einer aktiven Laserfrequenzstabilisierung als FPGA-Design realisiert. Dabei war die Kommunikation der Spezifikationen und des Arbeitsfortschritts ebenso problemlos wie die regelmäßige wechselseitige Abstimmung der Arbeiten. Auch die Dokumentation der Realisierung erfolgte professionell und wir sind mit den Resultaten sehr zufrieden: Der so entstandene Demonstrator zeigt im Labor bereits seine Überlegenheit gegenüber kommerziell verfügbaren Sensorsystemen und soll in Kürze in Anwendung evaluiert werden. Sehr gern wollen wir die Zusammenarbeit mit dem IMMS in zukünftigen gemeinsamen Projekten fortführen.“

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

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



NACHWUCHSFÖRDERUNG AM IMMS

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



<https://www.youtube.com/playlist?list=PLalndDF5VubGgUOX4tEzRFTEeCE8muRjW>

Studentinnen und Studenten geben in einem Video einen Überblick über ihre Arbeiten am IMMS

Wir sind so stolz auf unsere Studentinnen und Studenten! Sie bearbeiten nicht nur anspruchsvolle Themen für unsere Forschung und Entwicklung. Einige von ihnen haben sich die Zeit genommen, sich mit ihren Arbeiten per Video vorzustellen: Weil sie finden, dass sie anderen etwas von ihren praktischen Erfahrungen am IMMS mitgeben können, was im Studium und vor allem danach weiterhilft. Einen ersten Überblick gab es in einem Zusammenschnitt, der Ende 2022 online ging. Mehr über die einzelnen Personen und Themen folgt in weiteren Videos. Wir bedanken uns herzlich bei Vincent, Marie, Nikita, Laetitia, Markus, Lena und Ilmurat und bei ihren Betreuerinnen und Betreuern am IMMS!

Die Videos verweisen auf Karriereseiten und studienbegleitende Themenangebote unter www.imms.de/angebote, die mit dem Relaunch der Webseite neu strukturiert wurden:

- Entwurf und Konstruktion von Mechatronik-Systemen
- Entwurf von Steuerungs- / Regelungs-algorithmen
- Hardware-Entwurf integrierter Schaltungen
- Hardware-Entwurf von Leiterplatten
- Hardware-nahe Programmierung
- KI-Implementierung
- Simulation
- Software-Entwicklung
- Test / Charakterisierung elektro-nischer Systeme
- Test / Charakterisierung mecha-tronischer Systeme

www.imms.de/
angebote



ErstWoche an der TU Ilmenau im Oktober 2022: Zur Stadtrallye gab es am IMMS Punkte fürs Lösen von Rätseln rund um das Thema Künstliche Intelligenz. Foto: IMMS.

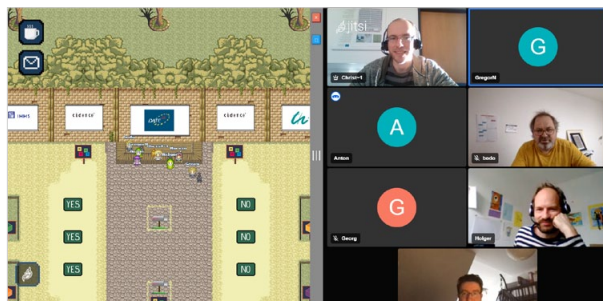
- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › Mag6D-nm-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung

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

www.imms.de/angebote

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

www.imms.de/barcamp



Das BarCamp-Organisations-Team fand sich im März 2022 am IMMS Erfurt ein, um online mit der EDA-Community neue Ideen für die elektronische Designautomatisierung zu diskutieren.

Bildquelle:
https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/can/posts/barcamp-at-date-2022

Rick Pandey, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMMS

„Im faszinierenden Bereich der Embedded AI bietet das IMMS eine inspirierende und vielseitige Arbeitsatmosphäre, die meine Kreativität und Leidenschaft beflügelt. Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern aus wissenschaftlichen und industriellen Bereichen bringt kontinuierlich neue Herausforderungen mit sich, die meinen Ideenreichtum anregen, um sie zu meistern. Ausgestattet mit modernster Technologie und einem Team, das ein breites Spektrum an Kompetenzen bietet, entwickle ich mich ständig beruflich weiter und genieße dabei die anregenden Aufgaben, die vor mir liegen.

Innerhalb der Welt der Embedded AI liegt mein Hauptfokus auf der Optimierung großer Modelle und ihrer nahtlosen Integration in intelligente Sensor- und Online-Lernsysteme. In diesem dynamischen Bereich stelle ich mich gerne der Herausforderung, diese komplexen Modelle zu verfeinern und anzupassen, um optimale Leistung in ressourcenbeschränkten eingebetteten Umgebungen zu gewährleisten.

Durch die Nutzung der Power von Embedded AI ebneten wir den Weg für intelligente, selbstlernende Geräte, die das Benutzererlebnis verbessern und die Leistung des Gesamtsystems steigern. In der faszinierenden Welt der intelligenten Sensorik besteht meine Aufgabe darin, die KI-Modelle darauf vorzubereiten, nahtlos mit Datenströmen aus vielfältigen Quellen zu interagieren. Dies beinhaltet die Feinabstimmung der Modelle, um Muster zu erkennen, Anomalien zu entdecken und in Echtzeit intelligente Entscheidungen zu treffen. Durch die Integration fortschrittlicher

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

www.imms.de/embeddedai

www.imms.de/immsvoices



Rick Pandey, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter im Themenbereich System Design.

Foto: IMMS.

Rick Pandey mit einem KI-basierten eingebetteten System für die Maschinen-diagnose. Edge-KI-Systeme wie diese werden bezüglich ihrer Energieeffizienz und Gesamtsystem-Energiemodellierung im Projekt HoLoDEC* erforscht.

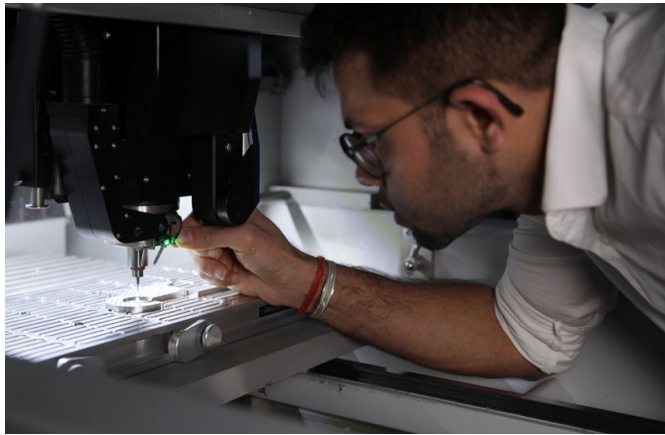


Foto: IMMS.

Algorithmen und die Nutzung neuester Fortschritte in der KI-Forschung befähigen wir unsere eingebetteten Systeme, wertvolle Erkenntnisse aus ihrer Umgebung zu gewinnen, und machen sie wirklich intelligent und reaktionsschnell.

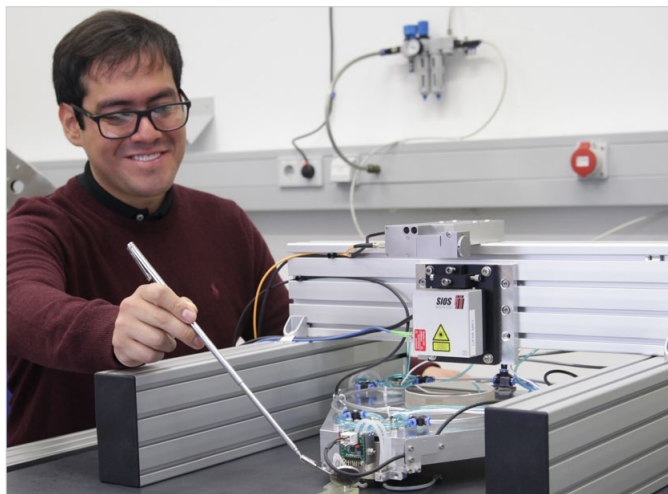
[www.imms.de/
embeddedai](http://www.imms.de/embeddedai)

Als Teil des lebendigen IMMS-Teams lasse ich mich kontinuierlich von der Synergie brillanter Köpfe und vielfältiger Expertise inspirieren. Durch die Zusammenarbeit mit anderen Experten erweitern wir gemeinsam die Grenzen des Machbaren und bringen unsere Projekte auf neue Höhen. Meine akademischen Kenntnisse bilden dabei die Grundlage, aber ich erkunde stets neue Konzepte und innovative Methoden, um noch raffiniertere Lösungen zu entwickeln. Die sich ständig weiterentwickelnde Landschaft der Embedded AI sorgt dafür, dass jeder Tag frische und spannende Herausforderungen mit sich bringt, und macht die Reise äußerst bereichernd und niemals monoton.“

Alex S. Huaman, M.Sc., Doktorand am IMMS

„Als ich zum IMMS kam, wurde ich Teil eines multidisziplinären Arbeitsteams mit hochmoderner technologischer Ausrüstung. Schon während meines Studiums war ich motiviert, an der Entwicklung von Spitzentechnologien mitzuwirken. Das hat mich dazu bewegt, ein Aufbaustudium in Elektrotechnik und in Regelungstechnik zu absolvieren. Am IMMS habe ich zum ersten Mal praktische Erfahrungen mit dem Entwurf und der Entwicklung von Spitzentechnologien gemacht. Dabei hatte ich die Gelegenheit, in einem multidisziplinären Team zu arbeiten, in dem verschiedene technische Bereiche zusammenkommen, um die Ziele des Unternehmens zu erreichen.“

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



Alex S. Huaman,
Doktorand am IMMS,
an einem Aufbau
zur Erforschung
nanometergenauer
Antriebe im Graduier-
tenkolleg NanoFab.

Foto: IMMS.

Als Ingenieur für Regelungssysteme interessiere ich mich sehr für den Entwurf und die Implementierung von Regelungsalgorithmen für mechatronische Systeme. In diesem Zusammenhang bietet mir das IMMS die Möglichkeit, komplexe dynamische Systeme zu analysieren und mit ihnen zu arbeiten sowie die Leistung von Regelkreisen für mehrachsige Bewegungssysteme mit Nanometerpräzision zu entwerfen, zu implementieren und zu bewerten. Im Themenbereich Mechatronik habe ich auch Einblicke in Disziplinen erhalten, die nichts mit meinem Forschungsfeld zu tun haben, wie z. B. unterstützter Entwurf, Messsysteme, mechanische und mechatronische Prinzipien, die alle in Synergie miteinander arbeiten. Daraus ergibt sich ein dynamisches Arbeitsumfeld, in dem ich meine Kompetenzen anwenden, erweitern und vertiefen kann, um mich neuen Herausforderungen zu stellen.

Was war mein erster Kontakt mit dem IMMS? Nach Abschluss meines Masterstudiums konnte ich ein dreimonatiges Praktikum als wissenschaftlicher Assistent absolvieren und fand eine freundliche Arbeitsatmosphäre vor. Innerhalb weniger Monate startete die TU Ilmenau in Kooperation mit dem IMMS das Promotionsprogramm der DFG, NanoFab*, 2. Generation. Es bot mir die Chance, meine wissenschaftliche Karriere durch experimentelle Validierung in den modernen Laboren und der Infrastruktur des IMMS auszubauen. In meiner Doktorarbeit beschäftige ich mich mit dem Entwurf fortschrittlicher Regelungsstrategien für hochdynamische mehrachsige Nanopositioniersysteme. Ziel ist es, einen Beitrag zur Verbesserung der Präzision dieser Maschinen zu leisten und neue Wege für die nanopräzise Fertigung zu erforschen. Nicht zuletzt bin ich hier Teil eines Teams, das wie eine Familie funktioniert, in dem sich alle zugehörig fühlen, sich gegenseitig helfen und voneinander lernen.“

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

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

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2022

FORSCHUNGSFELD

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Das IMMS hat 2022 in einem Video „CMOS-Bild-sensor-Plattform für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung mit Europium“ Details und Funktionsprinzip der am Institut entwickelten Chip-Plattform vorgestellt. Das quantitative Auslesen von Teststreifen demonstriert deren breite Anwendbarkeit in der In-vitro-Diagnostik.

Für Chip-Entwicklungen wie diese forscht das IMMS daran, Entwurf und Test mit KI sicher und kostengünstiger zu machen. KI kann die Entwickler im Prozess unterstützen, Fehler zu vermeiden und informelles Wissen automatisiert anzuwenden. Neue Methoden werden in den Fachartikeln vorgestellt.

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

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

Integrierte Sensorsysteme verbinden die analoge mit der digitalen Welt

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

Ziel: neue Anwendungen durch funktionale Integration und Miniaturisierung

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

Forschung mit kommerziellen Technologien für industrielle Verwertung

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

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

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

www.imms.de/sensor-ics

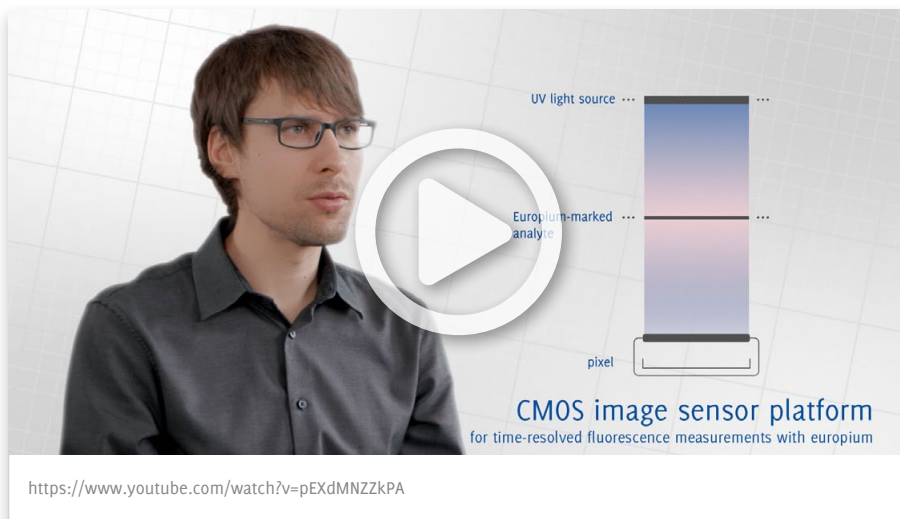
www.imms.de/biosensors

www.imms.de/ulp

www.imms.de/aidesigntest

www.imms.de/ivd

[Jahresbericht](#)



Highlight 2022 im Forschungsfeld Integrierte Sensorsysteme

Video: CMOS-Bildsensor-Plattform für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung mit Europium

Das IMMS stellt in einem Video „CMOS-Bildsensor-Plattform für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung mit Europium“ Details und Funktionsprinzip der am Institut entwickelten Chip-Plattform vor. Ziel ist es, damit über das beispielhaft demonstrierte quantitative Auslesen von Teststreifen hinaus weitere Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik in künftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu erschließen.

www.imms.de/ivd

Beispielanwendung quantitatives Auslesen von Teststreifen

In der In-Vitro-Diagnostik werden Zielanalyten zunehmend mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert, da sie sich leicht von Hintergrund- und Störsignalen unterscheiden lassen. Das IMMS hat einen Lock-In-Imager-Chip für die zeitaufgelöste Fluoreszenzbildgebung mit Europium entwickelt und in eine Beispielapplikation zum digitalen Auslesen von Streifentests integriert.

www.imms.de/asic

Diese auch Lateral-Flow-Assays (LFA) genannten Tests spielen eine wichtige Rolle für die In-vitro-Diagnostik. Sie sind kostengünstig, einfach zu handhaben und daher prädestiniert für die dezentrale und zeitkritische Diagnostik. Sie sind u.a. als Schwangerschafts- oder COVID-19-Schnelltests weit verbreitet, um qualitative Aus-

[Jahresbericht](#)
© IMMS 2022

gen (positiv oder negativ) treffen zu können. Für viele diagnostische Fragen werden jedoch quantitative Aussagen zu Konzentrationen und Verhältnissen benötigt. Gängige LFA-Reader-Kombinationen mit klassischen Farbstoffpartikeln wie Gold sind dafür nicht empfindlich genug. Neue LFA-Reader-Kombinationen mit Europium-Markern bieten weitaus höhere Ausleseempfindlichkeiten, die durch die CMOS-Imager-Plattform unterstützt werden. Durch deren Lock-In-Prinzip können aufwändige optische Filter eingespart werden.

Funktionsprinzip der CMOS-Bildsensor-Plattform für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung mit Europium

Klassische Fluoreszenz-Messung

Kern der Plattform ist ein Fünf-Transistor-Lock-in-Pixel, das am IMMS für Fluoreszenzfarbstoffe optimiert wurde, die besonders lange nachleuchten, wie zum Beispiel das weitverbreitete Europium. Die klassische Fluoreszenz-Detektion arbeitet mit optischen Filtern. Hier bestrahlt eine UV-Lichtquelle einen Analyten, der mit einem Farbstoff markiert ist. In diesem Fall ist das Europium, das durch die UV-Strahlung angeregt wird und ein rotes Fluoreszenzlicht erzeugt. Ein optisches Filter trennt dieses Licht vom UV-Licht und lässt nur das Fluoreszenzlicht auf den Detektor.

Zeitaufgelöste Fluoreszenz-Detektion

„Die zeitaufgelöste Fluoreszenz-Detektion mit Lock-in-Pixeln, so wie wir sie implementiert haben, benötigt keine optischen Filter“, erklärt Eric Schäfer, Themenbereichsleiter für Mikroelektronik am IMMS. „Die Unterscheidung zwischen Anregungs- und Fluoreszenzlicht aufgrund der Farbe ist nicht mehr möglich – benötigen wir auch nicht, denn wir nutzen die verschiedenen Abklingzeiten der Lichtquelle und des Fluoreszenzfarbstoffes nach dem Abschalten.“ Während das Anregungslicht innerhalb von wenigen Nanosekunden abklingt, leuchtet das Europium noch mehrere 100 Mikrosekunden nach.

www.imms.de/trf

Lock-in-Pixel-Prinzip

Während der Anregung wird das Pixel gesperrt, d.h. die Ladungsträger werden abgeleitet. Danach wird das Pixel aktiviert und die aufgrund des Fluoreszenzlichts generierten Ladungsträger werden damit aufgesammelt. Da es sich bei dem Fluoreszenzlicht um sehr wenig Licht handeln kann, ist es sinnvoll, diesen Vorgang zu wiederholen und das Pixel im sogenannten Lock-in-Modus zu betreiben. Da-



für wird die Lichtquelle gepulst und synchron dazu wird das Pixel immer aktiviert, wenn das Licht abklingt. Das heißt, das Fluoreszenzsignal wird über mehrere Zyklen aufgesammelt und verstärkt, gleichzeitig wird das Rauschen reduziert. „Die Anzahl der Zyklen können wir auf die verschiedenen Lichtverhältnisse anpassen: Haben wir sehr viel Fluoreszenzlicht, weil wir beispielsweise viele Analyten haben, können wir weniger Zyklen fahren. Haben wir relativ wenig, können wir mehr Zyklen fahren“, so Schäfer weiter. „Dadurch erreichen wir einen sehr hohem Dynamikbereich.“ Nachdem der Analyt mehrfach angeregt und ausreichend Ladungsträger gesammelt wurden, wird das Sensorelement ausgelesen und anschließend für die nächste Messung zurückgesetzt.

Imager-Plattform für verschiedenste Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik

„Da wir das Sensorelement als Pixel realisiert haben, können wir damit ganze Bildsensoren aufbauen, beispielsweise für optisch abbildende Systeme oder für das Contact Imaging“ fasst Schäfer zusammen. Die Imager-Plattform bietet somit die Grundlage, um verschiedenste Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik zu erschließen. Das IMMS strebt an, mit der Plattform weitere anwendungsspezifische zeitauflösende Bildsensoren und die dazugehörigen Hardware- und Software-Module zu entwickeln.

www.imms.de/trf



KI-basierte Modellfehlerschätzung macht Simulationen effizienter **KI unterstützt die Entwicklung von Mikrochips**

Am IMMS werden mit künstlichen neuronalen Netzen Modellfehler von Verhaltensmodellen geschätzt, was für die Simulation integrierter Schaltungen essenziell ist. Bei Simulationen auf Systemebene liefert der Ansatz zuverlässige Informationen über die Gültigkeit des Modells. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Beim Entwurf mikroelektronischer Schaltungen sind Simulationen ein wichtiges Werkzeug für den Entwickler, um beispielsweise frühzeitig die Funktionsfähigkeit des Schaltungsentwurfs zu überprüfen. Die Komplexität moderner Schaltungen erfordert jedoch einen großen Rechenaufwand, um physikalisch genaue Simulationen auf der Ebene einzelner Transistoren durchzuführen. Daher werden oft vereinfachte Modelle verwendet, die nur das prinzipielle Verhalten der Schaltung beschreiben und wesentlich einfacher zur berechnen sind. Diese Vereinfachungen haben aber den Nachteil, dass in bestimmten Szenarien Modellfehler auftreten und Simulationsergebnisse fehlerhaft sein können.

Im Projekt KI-EDA hat das IMMS eine KI-gestützte Methode entwickelt, mit der während der Simulation der Modellfehler eines Verhaltensmodells abgeschätzt werden kann, um zeitweise und nur nach Bedarf auf genauere und somit rechenaufwändigere Simulationsmethoden zurückzugreifen. So kann der Geschwindigkeitsvorteil bei der Simulation von Verhaltensmodellen genutzt und gleichzeitig der Modellfehler minimiert werden.

www.imms.de/

ki-eda

Jahresbericht

© IMMS 2022

Im Gegensatz zum Zusammenlöten von Schaltungen mit einzelnen Bauteilen hat der Entwurf von integrierten Schaltungen einen Nachteil: Einmal gefertigt, hat man so gut wie keine Möglichkeit mehr, die Schaltung zu verändern und Fehler zu beheben. Während einzelne Bauteile auf einer Leiterplatte wenigstens mit etwas Mühe noch ausgetauscht werden können, werden integrierte Schaltkreise in sehr teuren Prozessen monolithisch auf Wafern gefertigt. Ohne die Möglichkeit eines „Try and Error“-Ansatzes gilt für den Entwurf integrierter Schaltungen das Gleiche wie für den Bau einer Brücke. Hier müssen Statiker bereits vor dem Bau die Stabilität und Sicherheit mithilfe von Simulationen belegen. Genauso ist es unabdingbar, beim Entwurf von integrierten Schaltungen deren Funktionsfähigkeit bereits vor der Fertigung in Hardwaresimulationen zu überprüfen.

Seit den 70ern und 80ern sind Hardwaresimulationen ein fester Bestandteil der Electronic Design Automation (EDA) und haben sich seitdem stetig weiterentwickelt. Insbesondere gibt es unterschiedliche Ansätze, Schaltungen zu simulieren. Der klassische Ansatz, für jeden einzelnen Transistor physikalisch abgeleitete Modelle zu verwenden, kann fast schon als Goldstandard der Branche bezeichnet werden. Die Ergebnisse stimmen in der Regel gut mit den Messwerten der realen Schaltung überein.

www.imms.de/eda

Dieser Ansatz hat jedoch einen Nachteil: Es ist sehr rechenaufwendig, die Gleichungen der Simulation numerisch auf Transistorlevel zu lösen. Moderne Prozessoren haben mehrere Milliarden Transistoren, sodass es so gut wie unmöglich ist, solche Simulationen für den gesamten Chip durchzuführen. Aber auch die kleineren anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen (application-specific integrated circuits, ASICs), die zum Beispiel in Autos, Kühlschränken oder Sensoren verbaut werden, sind komplex genug, dass Simulationen auf Transistorlevel mehrere Stunden oder sogar Tage dauern. Gleichzeitig werden jedoch im Entwurfsprozess viele Simulationen benötigt, um die Funktionsweise der Schaltung unter vielen Bedingungen und mit unterschiedlichen Eingaben zu testen.

Was ist ein Modellfehler und warum ist er wichtig?

Um dieses Problem zu lösen, wird ein anderer Ansatz zur Simulation von Schaltungen verwendet: Das Verhalten wird nur abstrakt betrachtet. Im zuvor erwähnten Beispiel einer Simulation der Brückenstatik können Vereinfachungen vorgenommen

werden. Der Einfluss des Windes auf die Brücke ist zwar wichtig, doch um ihre prinzipielle Tragfähigkeit zu überprüfen, kann zunächst auf komplexe Strömungsmodelle verzichtet werden. Dies macht die Berechnungen einfacher und hilft, den Entwurfsprozess zu beschleunigen. Im Bereich der EDA sind Simulationen des abstrakten Schaltungsverhaltens essenziell. Die eingesparte Rechenzeit wird im Entwurfsprozess in der Regel dafür genutzt, mehr Tests zu simulieren, frei nach der wichtigen Devise „test early, test often“. Der Grad an Abstraktion hat aber seinen Preis: Einfache Modelle der Brücke können solide Daten liefern. Ignoriert man den Wind jedoch komplett, kann es so kommen wie mit der Tacoma-Narrows-Brücke im US-Bundesstaat Washington, die 1940 spektakulär zusammenbrach.

Bei der Simulation von integrierten Schaltungen ist es also unabdingbar, Verhaltensmodelle zu nutzen. Man muss aber immer ein Auge auf die Modellfehler haben und wissen, dass unter bestimmten Bedingungen das Modell versagen kann. Nur wie ist es möglich, die Modellfehler im Blick zu behalten, ohne ständig auf rechenaufwändige Transistorlevelsimulationen zurückzugreifen?

Im Projekt KI-EDA hat das IMMS eine Methode entwickelt, mit der dieser Modellfehler während der Simulation abgeschätzt werden kann. Ein neuronales Netzwerk wurde darauf trainiert, den Modellfehler eines Verhaltensmodells einer Schaltung in Abhängigkeit der Eingaben und Ausgaben des Modells zu schätzen. Kennt man den Modellfehler, kann man zum Beispiel einfache Verhaltensmodelle nutzen, wann immer die Bedingungen es zulassen und der Modellfehler niedrig ist. Aufwändigere Transistorlevelsimulationen setzt man dann ein, wenn es auch wirklich nötig ist. Alternativ kann die Information auch verwendet werden, um die Belastbarkeit des Simulationsergebnisses abzuschätzen. Dies kann beispielsweise bei sehr lang dauernden Simulationen dazu genutzt werden, die Simulation abubrechen, sobald der Modellfehler ein Limit überschreitet. Das spart unnötige Rechenzeit für fehlerbehaftete Daten.

Wie schätzt man den Modellfehler?

In der Praxis werden integrierte Schaltungen in Blöcke unterteilt, die jeweils bestimmte Funktionen übernehmen. Diese IP-Blöcke (von engl. intellectual property block) genannten Module können einzeln oder im Zusammenspiel als kompletter Chip simuliert werden. Der Grundgedanke der Fehlerschätzung besteht darin, einem IP-Block für die Simulation ein vortrainiertes neuronales Netz in einem eigenen Block

hinzuzufügen. Dieser beeinflusst die Schaltung in keiner Weise, kann die Ein- und Ausgänge des IP-Blocks mitlesen und nutzt diese als eigene Eingangsgrößen für die Schätzung. Der Vorteil dieses Ansatzes ist es, den Fehler online während der Simulation mitzuschätzen und nicht erst im Nachhinein zu berechnen. Alle gängigen Hardware-Simulatoren sind in der Lage, diese neuronalen Netze zu berechnen, solange sie in einer entsprechenden Programmiersprache vorliegen.

Wie sieht das in der Praxis aus?

Die Methode erfordert drei Arbeitsschritte: A) die Datengenerierung, B) das Training und C) das Setup und die eigentliche Simulation. Im Folgenden werden diese Schritte anhand eines Komparators als einfache Beispielschaltung erläutert. Dieser Komparator besitzt zwei Haupteingänge und vergleicht die dort anliegenden Spannungen miteinander. Je nachdem, welche Spannung größer ist, schaltet der Komparator seinen einzigen Ausgang auf high oder low. Zudem besitzt dieser Komparator Anschlüsse für ein Reset-Signal und die Betriebsspannung, in der Summe also 5 Ein- und Ausgänge.

Datengenerierung

Als lernendes Element wurde ein mehrlagiges Perzeptron (MLP) gewählt. Das ist eine spezielle Art von künstlichen neuronalen Netzen, die einen Eingabevektor in einen Ausgabevektor umwandeln und dabei eine beliebige Anzahl an Neuronen in Zwischenschichten besitzen können. Während des Trainings werden vor allem die Gewichte der neuronalen Ein- und Ausgänge der Zwischenschichten verändert, sodass spezifische Eingangswerte des Perzeptrons mit Ausgangswerten assoziiert werden. Es handelt sich somit um eine Regression.

Um das MLP zu trainieren, werden Simulationsdaten des Verhaltensmodells einer Schaltung sowie Daten einer Transistorlevelsimulation benötigt. Werden für die beiden Simulationen übereinstimmende Eingangsdaten gewählt, kann die Differenz der Simulationsergebnisse als Maß des Modellfehlers verwendet werden. Wie bei einer Regression üblich, ist das trainierte MLP in der Lage, Zwischenwerte mit genügender Genauigkeit zu interpolieren. Eine Extrapolation, also eine Abschätzung außerhalb des gelernten Wertebereichs, muss mit Vorsicht betrachtet werden. Daher empfiehlt es sich, möglichst viele und unterschiedliche Systemzustände der Schaltung in die Simulationsdaten zu integrieren. Im Beispiel des Komparators empfiehlt es sich also,

nicht nur verschiedene Spannungen an den Haupteingängen anzulegen, sondern dabei auch die Betriebsspannung zu variieren und den Reset des Komparators auszulösen. Auf diese Weise kann das MLP das Verhalten der Schaltung auch in ungewöhnlichen Situationen kennenlernen, was insbesondere für die Abschätzung von Modellfehlern von Vorteil ist. Der Datensatz sollte den möglichen Eingaberaum gut repräsentieren, muss ihn aber nicht vollkommen abdecken.

Training

Mithilfe der Simulationsdaten wird das MLP trainiert. Dies geschieht zweckmäßigerweise in einer allgemeinen Programmiersprache wie Python. Zum einen sind Hardwarebeschreibungssprachen und Simulatoren zwar in der Lage, neuronale Netzwerke zu berechnen. Für das iterative Training fehlen ihnen jedoch entsprechende Funktionen. Zum anderen stehen für allgemeine Programmiersprachen einfach zu nutzende Werkzeuge und Erweiterungen wie scikit-learn zur Verfügung, die für das Training von MLPs optimiert sind. Das in Python programmierte und trainierte MLP muss jedoch in eine Hardwarebeschreibungssprache übertragen werden, damit es in eine Schaltung integriert werden kann. Hierfür kann zum Beispiel ein Werkzeug wie Mako verwendet werden, das aus Vorlagen und entsprechenden Parametern entsprechenden Programmcode erzeugen kann. Das trainierte MLP liegt nun als fixierter Block vor und kann in eine Schaltung integriert und simuliert werden. Das MLP wird für jede Schaltung neu trainiert und kann nicht mit ihm unbekannten IP-Blöcken kombiniert werden.

Setup und Simulation

Das neuronale Netz wird so in die Schaltung integriert, dass es die Ein- und Ausgänge des IP-Blocks mitlesen kann, das Verhalten des Schaltkreises jedoch nicht beeinträchtigt. Das auf unseren Beispielkomparator trainierte MLP benutzt also die Signale der beiden Haupteingänge des Komparators, dessen Betriebsspannung und das Reset-Signal sowie dessen Ausgang als eigene Eingänge. Daraus schätzt es den Modellfehler, der nicht in die Schaltung zurückgeführt wird (Abb. 1). Mit diesem Aufbau können nun reguläre Tests entsprechend des geplanten Entwicklungsprozesses der integrierten Schaltung durchgeführt werden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie der abgeschätzte Modellfehler genutzt werden kann. Zum einen kann er als Ersatz für ein Konfidenzintervall der Aus-

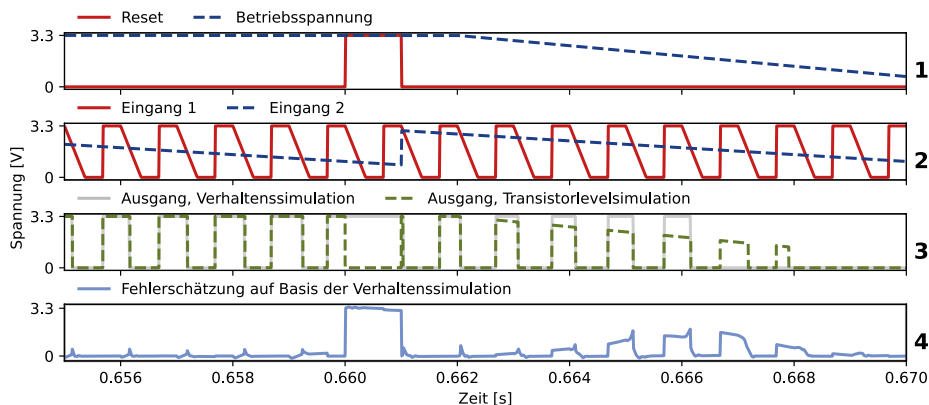


Abbildung 1: Beispiel eines Komparators: Das Schaltungselement verarbeitet 4 Eingänge (Graph 1+2). Der Ausgang wurde einmal mit einer Verhaltenssimulation und einmal mit einer Transistorlevelsimulation berechnet (Graph 3). Auf Basis der Verhaltenssimulation wurde der Fehler des Verhaltensmodells geschätzt (Graph 4). Modellfehler entstehen in diesem Beispiel, da das Verhaltensmodell die Betriebsspannung nur binär (on/off) berücksichtigt und ein anderes Verhalten während des Resets aufweist. Quelle: IMMS.

gangswerte des simulierten IP-Blocks dienen. Zum anderen kann er als Abbruchkriterium der Simulation verwendet werden. Erreicht der Modellfehler im Vorfeld definierte kritische Werte, kann die Simulation abgebrochen und mit geänderten Parametern neu gestartet werden. Dies ist insbesondere bei längeren Simulationen nützlich, bei denen ein Ergebnis sonst erst nach mehreren Stunden oder Tagen vorliegt und das Versagen des Verhaltensmodells der Schaltung analysiert werden kann. Um die Effektivität der Hardwaresimulation zu steigern, kann der Modellfehler als Messwert genutzt werden, anhand dessen dynamisch unterschiedliche Modelle für die Simulation verwendet werden. Dabei wird die Simulation mit dem schnell zu berechnenden Verhaltensmodell gestartet. Erreicht der Fehler dieses Modells ein kritisches Limit, wird die Simulation abgebrochen und automatisch mit den Zwischenwerten an dieser Stelle neu gestartet. Die neue Simulation kann entsprechend des Modellfehlers angepasst werden. So lässt sich beispielsweise die Schrittweite der Solver des Simulators verändern, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, oder der Block auf Transistorebene simulieren.

Aufwand und Nutzen – ein Tradeoff

Die verwendeten neuronalen Netze sind im Vergleich zu anderen KI-Verfahren sehr klein. Der im Beispiel verwendete Fehlerschätzer des Komparators hat insgesamt 45 Neuronen in zwei Schichten, kein Vergleich zu den ca. 80-100 Milliarden Neuronen von ChatGPT. Daher ist der Rechenaufwand, um zusätzlich zum Verhaltensmodell

auch noch den Fehlerschätzer zu berechnen, überschaubar. Im nichtoptimierten Beispiel des Komparators beträgt der zusätzliche Rechenaufwand des Fehlerschätzers im Vergleich zum Verhaltensmodell 75%. Dem steht jedoch auch ein zusätzlicher Rechenaufwand von 350% für die Simulation auf Transistorebene gegenüber. Die Fehlerschätzung gibt es also nicht kostenlos, aber das Verhaltensmodell samt Fehlerschätzer lässt sich immer noch deutlich schneller berechnen als die Simulation auf Transistorebene.

Warum schätzt man nur den Fehler und nicht gleich das ganze Verhalten der Schaltung?

Da diese Methode geeignet ist, den Fehler und damit auch das Verhalten der Schaltung abzuschätzen, stellt sich natürlich die Frage, warum das neuronale Netzwerk in der Simulation nicht gleich das gesamte Verhaltensmodell der Schaltung ersetzen kann. Dem steht vor allem ein grundlegendes Problem neuronaler Netze gegenüber: Nachvollziehbarkeit. Diese verhalten sich in Simulationen wie eine Blackbox, sodass für Menschen kausale Zusammenhänge zwischen Eingabe und Ausgabe nur schwer nachzuvollziehen sind. Im zuvor verwendeten Beispiel mit der Brücke könnte man die Statik der Brücke mithilfe eines neuronalen Netzwerks simulieren. Bricht die Brücke in der Simulation jedoch in sich zusammen, wird es schwer, den genauen Grund dafür zu ermitteln und anschließend Verbesserungen des Entwurfs abzuleiten. Zudem schafft die Nachvollziehbarkeit der Verhaltensmodelle auch Vertrauen. Im Gegensatz zu trainierten neuronalen Netzen lassen sich klassische Gleichungen leichter dokumentieren, verstehen und weitergeben. Daher ist es insbesondere in Zertifizierungsverfahren von Vorteil, dass Simulationsdaten auf konventionellen Verhaltensmodellen beruhen und nur der Modellfehler durch ein neuronales Modell abgeschätzt wird.

Ausblick: Wie geht es weiter?

Die Methode ist in der Lage, auch mit dynamischen Systemen umzugehen, indem beim Training des Modellfehlers nicht nur aktuelle Ein- und Ausgänge, sondern ein Zeitfenster betrachtet wird. Aber es gibt besondere Schaltungen, die mit dieser Methode nicht kompatibel sind: Ist das Verhalten der Schaltung nicht nur vom zeitlichen Verlauf seiner Eingänge, sondern auch von variablen intrinsischen Zuständen abhängig, kann das MLP den Modellfehler nicht korrekt schätzen.

Zudem wird mit unserer Methode derzeit ein eigenes MLP pro Ausgang des IP-Blocks benötigt. Dies liegt jedoch darin begründet, dass das verwendete Werkzeug scikit-learn nur MLPs mit einem Ausgang unterstützt und kann durch die Wahl anderer Netzwerke oder Trainingswerkzeuge gelöst werden.

Nachdem die neu entwickelte Methode ihre generelle Tauglichkeit belegt hat, wird sie am IMMS im Bereich des ASIC-Entwurfs im industriellen Rahmen getestet, um weitere Erfahrungen damit zu sammeln und sie weiterzuentwickeln.

Kontakt: Henning Siemen, M.Sc., henning.siemens@imms.de

Mehr Details:

H. Siemen, M. Grabmann and G. Gläser, „Learn from error! ML-based model error estimation for design verification without false-positives,“ 2022 18th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), Villasimius, Italy, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SMACD55068.2022.9816317.



Das Projekt KI-EDA wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Maßnahme „Mikroelektronik für Industrie 4.0 (Elektronik I4.0)“ unter der Verbundnummer es2eli4001 gefördert, das IMMS unter dem Kennzeichen 16ME0010. Partner sind die Centitech GmbH (FRABA Gruppe) und die iC-Haus GmbH.

- 32**
- [Integrierte Sensordaten](#)
- [Intelligente verteilte Mess- u. Testsysteme](#)
- [Mag6D-nm-Direktantriebe](#)
- [Inhalt](#)
- [Förderung](#)

- www.imms.de/eda
- www.imms.de/asic

- www.imms.de/ki-eda



Automatisiertes Testen mikroelektronischer Schaltungen auf Fehler

Methode aus der Softwareentwicklung findet Bugs in Hardware

Werden beim Entwurf von Mikroelektronik-Chips Fehler gemacht und diese nicht rechtzeitig entdeckt, kann das katastrophale Auswirkungen haben, etwa bei Netzwerktechnik, digitaler Lenksteuerung im Auto oder Herzschrittmachern. Das Bild zeigt ein Beispiel für zerstörte Bauelemente auf Wafer-Ebene. Quelle: IMMS.

Motivation und Überblick

Die Verifikation von Mikroelektronik-Chips ist ein wesentlicher Teil des Entwurfsprozesses und bringt besondere Herausforderungen mit sich. Die stetig steigende Komplexität der integrierten Schaltungen wird durch eine wachsende Automatisierung auf Entwurfsseite erreicht, mit der die Verifikation Schritt halten muss. Trotz teilautomatisierter Verfahren wie „constrained random testing“ bedarf es eines erfahrenen Verifikationsingenieurs, der gezielt Testszenarien entwickelt und Systemzustände prüft. Im Softwarebereich hat sich sogenanntes „fuzz testing“ etabliert, das zu testende Software mit zufällig generierten Eingaben überschüttet und dabei Fehler in der Funktion der Programme aufdecken kann. Inspiriert von diesem Verifikationsverfahren hat das IMMS im Projekt KI-EDA eine Methode entwickelt, die automatisiert mikroelektronische Schaltungen auf Bugs und Schwachstellen prüfen kann. Hierzu wird die Schaltung mit zufällig generierten Eingaben konfrontiert, die Schritt für Schritt durch genetische Algorithmen variiert werden, um fehlerhaftes und unsicheres Systemverhalten zu provozieren. Durch die zufällige Natur der generierten Eingaben ist diese Art der Suche besonders geeignet, Fehler zu finden, die von typischen, von Menschen

www.imms.de/

ki-eda

Jahresbericht

© IMMS 2022

erzeugten Testszenarien nicht gefunden werden. Mit der Methode lassen sich etablierte Verifikationsverfahren ergänzen und Verifikationsingenieure durch autonome Fehlersuchen unterstützen.

Hintergrund und Herausforderungen

Steigende Komplexität integrierter Schaltungen

Seit der ersten integrierten Schaltung vor rund 65 Jahren sind Mikroelektronik-Chips ein treibender Motor der technischen Entwicklung. Während der erste Chip von Jack Kilby 1958 noch aus einem einzelnen Flipflop bestand, enthalten moderne Prozessoren mehrere Milliarden Bauelemente. Die Komplexität dieser digitalen Schaltungen hat mittlerweile die „Raketenwissenschaft“ als Inbegriff anspruchsvoller und schwer zu überblickender Ingenieurwissenschaft abgelöst.

Wurden anfangs die Schaltungen noch per Hand entworfen, so müssen sich die Ingenieure heutzutage auf spezialisierte Software für den Entwurf von Elektronik per Electronic Design Automation, EDA, verlassen. Auch beim „kleinen Bruder“ des komplexen Hochleistungsprozessors, der anwendungsspezifischen integrierten Schaltung (application-specific integrated circuit, ASIC), werden an Größe zunehmende Logikblöcke verbaut, die uns die mittlerweile vertrauten Funktionen bringen: WiFi, Bluetooth, hoher Datendurchsatz. Dieses „Höher, Schneller, Weiter“ der Chipentwicklung wird auf Entwurfsseite durch den hohen Grad an Automatisierung ermöglicht, ohne den eine erfolgreiche und vor allem sichere Entwicklung von Chips mittlerweile undenkbar ist.

Verifikation komplexer integrierter Schaltungen bislang größtenteils erfahrungsbasiert und von Hand

Sicherheit ist hier auch das richtige Stichwort. Denn während die EDA mit erstaunlichen Methoden die Entwurfsautomatisierung vorantreibt, so bleiben die komplexen und schwer zu überschauenden Schaltungen eine große Herausforderung für Qualitätskontrolle und -management. Verifikationsingenieure müssen nicht nur sicherstellen, dass die Schaltung ihre geplante Funktion erfüllen kann. Sie müssen auch darauf achten, dass während des Betriebs keine unvorhergesehenen Zustände eintreten können und Entwurfsfehler vermieden werden. Wenn die Kamera im smarten Kühlschrank durch einen Systemfehler ausfällt, mag das ärgerlich sein. Bei Netzwerktechnik, digitaler Lenksteuerung im Auto oder Herzschrittmachern hingegen können Systemfehler katastrophale Auswirkungen haben.

Die Verifikation hat sich allerdings im Entwurfsprozess von ASICs zum Flaschenhals entwickelt, da es bisher nur schwer möglich war, die zur effizienten Fehlersuche benötigte menschliche Erfahrung und Intuition zu automatisieren. Um dieses Problem zu lösen und die Verifikation wenigstens durch eine Teilautomatisierung der Fehler-suche zu unterstützen, lohnt sich ein Blick über den Tellerrand – zum sogenannten Fuzzing, das im Bereich der Softwareverifikation schon seit Jahren erfolgreich ein-
gesetzt wird.

Lösungsansätze aus der Software-Entwicklung

Grundprinzip von Software-Fuzzern – zufällige Eingaben decken Fehler auf

Für Software ist das Grundprinzip des Fuzzing denkbar einfach und klingt zunächst banal: die zu testende Anwendung wird ohne genauere Kenntnis von korrekter Syntax oder Struktur mit zufälligen Eingaben bombardiert, um sie zum Absturz zu bringen. Anschließend kann man analysieren, wie die Eingaben den Fehler erzeugt haben und wie dies zukünftig vermieden werden kann. Dieser Ansatz wird bereits effektiv genutzt, vor allem, um sicherheitsrelevante Schwachstellen in Software zu finden. Einer der meistgenutzten Software-Fuzzer ist American Fuzzy Lop (AFL), der bereits auf eine beeindruckende Trophäensammlung blicken kann: Neben gefundenen Fehlern in Webbrowsern wie Mozilla Firefox oder dem Internet Explorer reihen sich dort auch Treffer in Programmen wie dem Adobe Reader und MySQL sowie Betriebssystemen wie Linux oder iOS ein.

Der große Vorteil von Fuzzern ist der hohe Automatisierungsgrad. Einmal gestartet, laufen Fuzzer ohne weiteres Zutun, bis sie etwas gefunden haben oder die Suche abgebrochen wird. Für größere Projekte wie dem Linux Kernel werden mehrere Fuzzer parallel für mehrere Tage oder Wochen auf die Suche geschickt.

Der Gedanke, diesen Ansatz auch für die Verifikation von elektronischen Schaltun-
gen zu verwenden, liegt nahe. Es gibt jedoch erst seit kurzem verschiedene Ansätze, Fuzzer in die Hardwareverifikation zu integrieren, z.B. [1].

Der Zufall hilft aber oft nicht weiter – das Infinite-Monkey-Theorem

Tatsächlich funktioniert Fuzzing dann doch nicht so einfach. Vielmehr erinnert die Idee, dass wenn man nur lange genug zufällig an den Eingängen eines Systems her-
umprobiert, auch etwas Vernünftiges dabei herauskommt, an das berühmte Infinite-Monkey-Theorem. Es wurde ursprünglich vom französischen Mathematiker Émile Borel 1913 aufgestellt. Dieser behauptete, dass eine Million dressierter Affen, die

10 Stunden täglich an Schreibmaschinen sitzen und auf ihnen zufällig herumtippen, innerhalb eines Jahres eine Textpassage erzeugen, die der gesamten Weltliteratur entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis eintritt, ist zwar nicht Null, es lässt sich jedoch zeigen, dass sie so gering ist, dass sie keinerlei praktische Relevanz hat. Für das Fuzzing bedeutet dies, dass es zu unwahrscheinlich ist, dass eine zufällige Abfolge von Bits beispielsweise einer defekten JPEG-Datei entspricht, die einen Fehler in der zu testenden Software auslöst.

Aus Fehlern lernen – Spielprinzip „Schiffe versenken“ provoziert die „richtigen“ Fehler

Um diesem Problem zu begegnen, verwenden die meisten Fuzzer wie AFL einen Ansatz namens „coverage-guided fuzzing“. Dahinter steckt die Annahme, dass eine zufällige Eingabe auch eine Reaktion im zu testenden Programm hervorrufen muss, um einen Fehler zu provozieren. Normalerweise reagieren Softwareanwendungen nicht auf Eingangsrauschen, sondern benötigen spezifische Dateiformate oder Kommunikationsprotokolle, um eine Ausführung zu starten. Werden die Programme nicht ausgeführt, können sie auch nicht das gesuchte fehlerhafte Verhalten zeigen. Die „Coverage“ oder Abdeckung gibt Auskunft darüber, welche Teile eines Programms auch tatsächlich ausgeführt wurden. Ein Rauschen auf den Eingängen einer Softwareanwendung führt sehr wahrscheinlich zu einer geringen Abdeckung, während die Eingabe beispielsweise einer Datei mit korrektem Dateiformat die Ausführung der entsprechenden Funktion im Programm abdeckt.

Die Information über die erreichte Programmabdeckung, die durch eine Eingabe ausgelöst wird, nutzen Fuzzer, um Eingaben zu vermeiden, die keinen Fehler hervorrufen können. Veranschaulichen lässt sich das Problem mit dem Spiel „Schiffe versenken“. Auf einem unbekannten und nicht einsehbaren Spielfeld ist ein mehrere Kästchen großes Schiff versteckt und der Spieler hat die Aufgabe, es zu finden und zu versenken. Nennt der Spieler die Koordinaten eines Kästchens, erfährt er vom Gegenspieler, ob er getroffen hat oder nicht. Der Spieler versucht nun mit zufälligen Ansagen, das Schiff einmal zu treffen um danach gezielt die benachbarten Kästchen abzusuchen und das Schiff mit Treffern auf allen zugehörigen Kästchen zu versenken. Wenn Coverage-guided-Fuzzer zufällig eine Eingabe gefunden haben, die zu einer etwas größeren Programmabdeckung als einfaches Rauschen führt, dann versuchen sie den „benachbarten“ Raum abzusuchen, indem sie die ursprüngliche Eingabe nur leicht modifizieren oder mutieren.

Da jede Programmeingabe einen Wert für eine Programmabdeckung erhält, kann man diese Werte als Landschaft auf einer Hyperebene im durch die Eingaben aufgespannten Raum betrachten. Im Gegensatz zu gängigen Optimierungsalgorithmen versucht der Fuzzer hier jedoch nicht, lokale Maxima zu finden, sondern die Berg- und Hügelkuppen abzusuchen und dabei die flachen Ebenen zu vermeiden. Aufgrund der Ähnlichkeit der Problemstellung verwenden „Coverage-guided mutation-based“-Fuzzer, wie der genannte AFL, Algorithmen aus dem Bereich der Optimierung und der Genetik, um den Eingaberaum abzusuchen und durch Mutationen neue Eingaben zu erzeugen.

Fuzzing Hardware im Chip-Entwurf

Herausforderung: bekannte Ansätze zur Übertragung von Software-Fuzzern für Mixed-Signal-Schaltungen ungeeignet

Wenn Fuzzing effektiv zur Fehlersuche in komplexer Software verwendet werden kann, warum sollte das dann nicht auch im Bereich der Hardwareentwicklung funktionieren? Im Unterschied zur Software-Entwicklung können die Chips während des Entwurfs nicht direkt getestet werden, da sie oftmals noch nicht als physische Schaltung vorliegen. Sie müssen daher aufwendig mit programmierbaren Logikbausteinen (FPGA) emuliert oder mit entsprechender Software am Computer simuliert werden. Das erfordert nicht nur umfangreiche Rechenleistung. Ein Hardware-Fuzzer muss auch eine Vielzahl von Simulationssoftware, Datenformaten und mathematischen Algorithmen in einem Arbeitsablauf miteinander verbinden.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden zuletzt mehrere Vorschläge publiziert:

- Verwendung von Software-Fuzzern und deren Anpassung an Simulationssoftware für Hardware. Das hat den Vorteil, auf bereits etablierte und effiziente Fuzzer zurückgreifen zu können [1].
- Verwendung von optimierter Simulationssoftware für Hardware oder FPGA-Prototypen. Dadurch können die Simulationen beschleunigt oder sogar umgangen werden, was das Fuzzing deutlich beschleunigt [2].

Leider haben diese beiden Vorschläge Nachteile, die insbesondere den Entwurf von ASICs betreffen. Deren Funktion beruht oft auf dem Zusammenspiel analoger und digitaler Schaltungselemente, die zusammen betrachtet werden müssen. Während optimierte Hardwaresimulatoren und FPGA-Prototypen nur reine digitale Schaltungen simulieren bzw. emulieren können, sind sogenannte „Mixed-Signal“-Simulationen

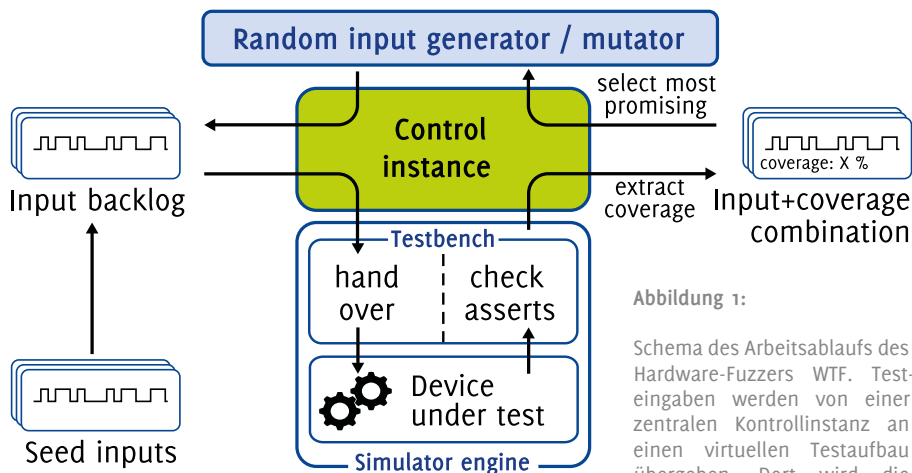


Abbildung 1:

Schema des Arbeitsablaufs des Hardware-Fuzzers WTF. Testeingaben werden von einer zentralen Kontrollinstanz an einen virtuellen Testaufbau übergeben. Dort wird die Schaltung simuliert, d.h. über-

prüft, ob die Eingaben die Schaltung in einen unerwünschten Zustand versetzen können. Für jede Eingabe wird ermittelt, welche Teile der Schaltung aktiv waren. Mit dieser Information werden durch Mutation und Selektion vorhergehender Eingaben neue Testfälle generiert. Dadurch erzeugt der Fuzzer nur Testfälle, die auch eine Aktivität in der Schaltung auslösen. Grafik: IMMS.

deutlich aufwendiger und können nicht direkt von FPGA-Prototypen ersetzt werden. Zudem ist die Anpassung von Software-Fuzzern für die Hardwareverifikation sehr aufwendig und unflexibel. Darüber hinaus ist der bisher publizierte Ansatz ebenfalls auf die Verwendung für rein digitale Schaltungen beschränkt.

„What the Fuzz“ (WTF) – der Hardware-Fuzzer des IMMS zur Entwicklung von Mixed-Signal-Chips

Im Projekt KI-EDA hat das IMMS einen Hardware-Fuzzer entwickelt, der zwar auf die erprobten Software-Fuzzer verzichtet, dafür jedoch sehr modular aufgebaut ist und sich auch für die Mixed-Signal-Eigenschaften von ASICs eignet (Abb. 1).

Der Fuzzer besitzt mehrere austauschbare Module, die von einer zentralen Instanz koordiniert werden und alle Arbeitsschritte des Fuzzers abdecken:

- Verwaltung der Eingaben
- Simulator
- Auslesen der Abdeckung (Coverage)
- Mutator und Optimierungsstrategie

Wie alle Fuzzer arbeitet WTF iterativ. Zu Beginn müssen unerwünschte Fehlerzustände der Schaltung definiert werden, nach denen der Fuzzer suchen soll. Dies kann zum Beispiel die Anforderung sein, dass sich die Schaltung nicht gleichzeitig sowohl im Lese- als auch im Schreibmodus befinden darf.

www.imms.de/
ki-eda

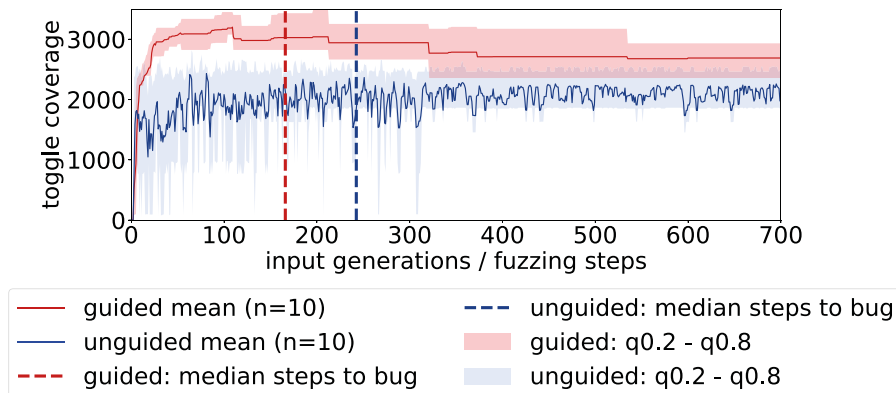


Abbildung 2: In diesem Beispiel wird dem Fuzzer eine Schaltung mit einem absichtlich eingebauten Fehler präsentiert, um zu messen, wie schnell der Fuzzer den Fehler finden kann. Die Daten beinhalten je 10 Durchläufe des Fuzzers, der jedes Mal automatisiert und nacheinander hunderte Testfälle generiert. Im Vergleich zum un gelenkten Fuzzing (Blau) mit rein zufällig erzeugten Testeingaben findet der gelenkte Fuzzer (Rot) den versteckten Fehler im Schnitt deutlich schneller (gestrichelte Linien). Er generiert die Eingaben nicht komplett neu, sondern mutiert und selektiert vorherige. So kann er evolutionär Testfälle erzeugen, die größere Teile der Schaltung aktivieren (höhere Coverage) und erhöht jeweils die Chance, den Fehler zu finden. Grafik: IMMS.

Während einer Hardware-Simulation wird das Verhalten der Schaltung bei einer bestimmten Eingabe analysiert, auf Fehlerzustände geprüft und anschließend ermittelt, welche Teile der Schaltung dabei aktiv waren. Das ist die Abdeckung, die diese Eingabe erreicht hat. Entsprechend einer Optimierungsstrategie wird nun eine Mutation ausgewählt und damit eine neue Eingabe erzeugt. Diese wird wieder in einer Hardwaresimulation der Schaltung übergeben, diese auf Fehlerzustände geprüft und die erreichte Abdeckung ermittelt. Um die nächste Eingabe zu generieren, werden die beiden zuvor erreichten Abdeckungen miteinander verglichen. Wurde die Abdeckung durch die letzte Mutation verringert, wird diese abgelehnt und eine neue Eingabe auf Basis der ursprünglichen Eingabe erzeugt. Konnte die Abdeckung durch die letzte Mutation erhöht werden, wird die neue Eingabe mutiert, um die nächste Generation der Eingabe zu erzeugen. Ob Mutationen angenommen werden oder nicht, wird durch die Optimierungsstrategie entschieden und kann z.B. bei einem heuristischen Approximationsverfahren wie dem Simulated-Annealing-Ansatz stochastisch erfolgen. Als Mutationen werden typische genetische Methoden eingesetzt, die sich insbesondere bei digitalen Eingaben gut veranschaulichen lassen. So kann z.B. die Eingabe 1011 durch den Austausch eines einzelnen Bits modifiziert werden (z.B. 0011) oder eine Position abgeschnitten (101), angehängt (10110) oder eingefügt (10101) werden. Derzeit unterstützt WTF die Simulationssoftware Cadence Xcelium und Icarus Verilog.

Der Funktionsumfang kann jedoch durch den modularen Aufbau des Fuzzers leicht erweitert werden. Insbesondere lassen sich neue Optimierungsstrategien integrieren.

Ausblick

Der Hardware-Fuzzer WTF befindet sich momentan noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase, hat aber bereits seine Funktionalität an Beispielschaltungen belegen können [3]. Der Vorteil vom „coverage-guided fuzzing“ zeigt sich gut im Vergleich zum „unguided fuzzing“, bei dem Testeingaben für die zu testende Schaltung komplett zufällig generiert werden (Abb. 2). In einem Versuch wurde WTF an einer Beispielschaltung getestet, in die am IMMS absichtlich ein Fehler eingebaut wurde. Dank des Feedbacks der durch die Testeingaben erreichten Abdeckung kann WTF effizient Testfälle mit höherer Abdeckung generieren und damit schneller den in der Schaltung versteckten Fehler finden.

Nachdem der Fuzzer die generelle Anwendbarkeit des Fuzzing-Konzepts im Bereich der Hardwareverifikation belegen konnte, wird er nun mit am IMMS entwickelten industriellen Chips getestet. Auch die von anderen Forschergruppen publizierten Ansätze werden sich nun dem Praxistest unterziehen müssen. Da sich „coverage-guided fuzzing“ im Softwarebereich erfolgreich als Verifikationsmethode etabliert hat, wird es spannend zu sehen, ob dies auch im Hardwarebereich gelingt.

Kontakt: Henning Siemen, M.Sc., henning.siemens@imms.de

Literatur:

[1] T. Trippel, K. G. Shin, A. Chernyakhovsky, G. Kelly, D. Rizzo, and M. Hicks, “Fuzzing hardware like software,” 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2102.02308>
[2] K. Laeuffer, J. Koenig, D. Kim, J. Bachrach, and K. Sen, “Rfuzz: Coverage-directed fuzz testing of rtl on fpgas,” in International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 2018, pp. 1–8.
[3] H. Siemen, J. Lienke, and G. Gläser, “Hot Fuzz: Assisting verification by fuzz testing microelectronic hardware”, in 20th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), 2023

GEFÖRDEBT VOM



Das Projekt KI-EDA wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Maßnahme „Mikroelektronik für Industrie 4.0 (Elektronik I4.0)“ unter der Verbundnummer es2eli4001 gefördert, das IMMS unter dem Kennzeichen 16ME0010.

40

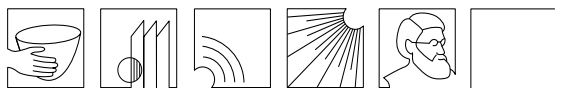
- › Integrierte Sensorsysteme
- › Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme
- › Mag6D-nm-Direktantriebe
- › Inhalt
- * Förderung



FORSCHUNGSFELD

INTELLIGENTE VERNETZTE MESS- UND TESTSYSTEME

NOMINIERT



XXV. Innovationspreis Thüringen 2022

Die skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform für die Optimierung der Energieeffizienz in der Industrie „sUSe“ wurde 2022 in der Kategorie „Industrie und Material“ für den XXV. Innovationspreis Thüringen nominiert. Das Projekt sUSe wurde unter dem Kennzeichen ZF4085709P08 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Jahresbericht

© IMMS 2022

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

Für immer leistungsfähigere Sensoren bearbeiten wir folgende Forschungsfragen:

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

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

Mit unseren Lösungen adressieren wir folgende Anwendungen:

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

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

Highlights 2022 im Forschungsfeld Intelligente vernetzte Mess- und Testsysteme

IMMS für den XXV. Innovationspreis Thüringen 2022 nominiert:

Skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform für die Optimierung der Energieeffizienz in der Industrie

Das IMMS wurde für die skalierbare Ultraschall- und Volumenstrom-Sensorplattform „sUse“^{*} zur Optimierung der Energieeffizienz in der Industrie mit einer Nominierung in der Kategorie „Industrie und Material“ für den XXV. Innovationspreis Thüringen 2022 am 30.11.2022 in Weimar gewürdigt. Das System wird 2023 mit dem Entwicklungspartner SONOTEC GmbH für die Markteinführung vorbereitet.

XXV. Innovationspreis Thüringen 2022 am 31.11.2022 in Weimar. Foto: STIFT.





Dr.-Ing. Tino Hutschenreuther, Jonathan Josue Gamez Rodriguez und Sebastian Uziel, v.l.n.r., mit der für den XXV. Innovationspreis Thüringen 2022 nominierten Sensorplattform „sUse“. Foto: STIFT/GMM AG. <https://www.youtube.com/watch?v=B7tZ0f84J48>

Plattform hilft, Energie für Druckluft in der Industrie zu sparen

„Schon vor der Energiekrise hat die Industrie Leckagen in Druckluftleitungen bekämpft, da sie die meisten energetischen Verluste und damit auch unnötige Kosten verursachen. Mit Blick auf die aktuelle Preisentwicklung ist es für Unternehmen umso wichtiger, solche Undichtigkeiten zu finden, Verluste zu bewerten und Maßnahmen für die Instandhaltung einzuleiten,“ erklärt Dr. Tino Hutschenreuther, Themenbereichsleiter für System Design am IMMS. Bis zu 10% der elektrischen Energie werden in den verschiedensten Industrien allein dafür verwendet, Druckluft zu erzeugen, beispielsweise um Maschinen und Zylinder anzutreiben, Werkstoffe oder Kleinteile zu befördern, Form- oder Gussteile zu kühlen, Gastanks durchzuspülen oder Abluft-, Ventilations- und Trocknungssysteme zu betreiben.

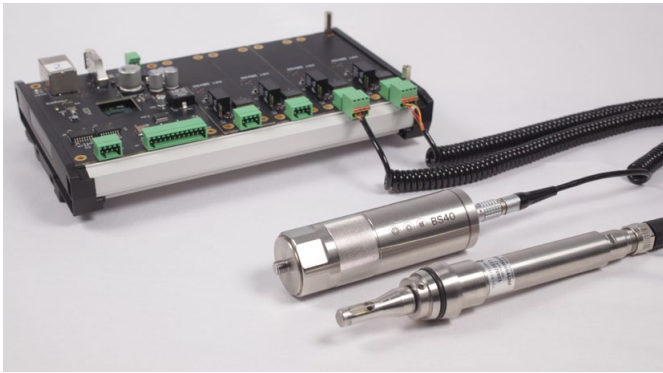
30% dieser Druckluft gehen bis dato im Durchschnitt aufgrund von Leckagen verloren. Um solche Verluste deutlich zu senken, hat das IMMS die sUse-Elektronikplattform für eine automatisierbare Lösung für die Sensoren der Kooperationspartner SONOTEC GmbH und Postberg+Co. GmbH entwickelt. Das sUse-System aus Plattform und Sensoren kann in industriellen Druckluftsystemen nachgerüstet werden, um sie permanent zu überwachen, die Energieeffizienz zu verbessern und CO₂-Emissionen einzusparen.

www.imms.de/
suse

System vereint weltweit erstmalig hybride Sensorik und Datenfusion in einem Gerät für ein ganzheitliches und kontinuierliches Monitoring

Bislang werden Lecks in Druckluftsystemen von meist extern beauftragten Service-Technikern mit Einzelsensorik bzw. verschiedenen Geräten gemessen, analysiert, ge-

Jahresbericht
© IMMS 2022



Die für den XXV. Innovationspreis Thüringen 2022 nominierte, am IMMS entwickelte sUse-Hardware-Plattform für das Druckluftmonitoring mit Ultraschallsensor von SONOTEC (links) und Volumenstromsensor von Postberg (rechts).

Foto: IMMS.

- 45** 
- › *Integrierte Sensorsysteme*
 - › *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
 - › *Mag6D-nm-Direktantriebe*
 - › *Inhalt*
 - * *Förderung*

ortet und in Berichten dokumentiert. Ein kontinuierliches Monitoring findet in der Regel nicht statt und die Daten lassen sich weder vernetzen oder an ERP-Systeme anbinden.

Die am IMMS entwickelte sUse-Plattform bildet die Basis eines weltweit neuartigen, ganzheitlichen Monitoring-Systems für Druckluftsysteme. Es besteht aus der Plattform und mehreren, über ein Druckluftsystem verteilten, vernetzten und fest installierbaren Ultraschall- und Volumenstrom-Sensoren. Zum einen messen Volumenstromsensoren des Partners Postberg die Menge an durchfließender Druckluft an verschiedenen Stellen im System. Diese wird zu jener Menge in Beziehung gesetzt, die in das Druckluftsystem eingespeist wird. Zum anderen werden durch die ebenso im System integrierten Ultraschallsensoren der SONOTEC GmbH Leckagen akustisch geortet und deren Verlust bewertet. Mit der sUse-Plattform werden sämtliche Daten unterschiedlichster Sensoren zusammengeführt und digital verarbeitet. Durch diese Datenfusion ist eine umfassende Bewertung möglich, denn jetzt werden Leckagestellen und Gesamtvolumenstrom gemeinsam betrachtet. Dadurch lässt sich der Anteil der Verluste am gesamten Verbrauch an Druckluft genau zuordnen. „Mit diesem völlig neuen Konzept, Druckluftverluste ganzheitlich zu bewerten, können sich Betriebe mit fundierten Daten auf die großen Baustellen konzentrieren,“ erklärt Hutschenreuther weiter. „Denn etwa 70 Prozent der Druckluftverluste sind im Schnitt auf etwa 10 Prozent der Lecks zurückzuführen, die man nun gezielt zuerst mit Instandhaltungsmaßnahmen beseitigen kann.“

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

Elektronikplattform, KI-basierte Signalverarbeitung, Kommunikationslösung, Leistungsmerkmale

Da Druckluft für viele Anwendungen, wie z.B. für verschiedene Aktionen eines Industrieroboters, an wechselnden Stellen in unterschiedlicher Menge zugeführt wird,  [Jahresbericht](#) © IMMS 2022

müssen sUse-Plattform und alle zugehörigen Sensoren zeitsynchron arbeiten. Daher hat das IMMS bei der Konzeption der Hardware-Komponenten einen modularen Ansatz verfolgt. Die Sensoren erfassen über einen Synchronisationsmechanismus zeitgleich Daten, um die Echtzeitfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Die vom IMMS implementierten Algorithmen dienen dazu, die verschiedenen Kanäle innerhalb des Systems zu bewerten und eine Aussage zu treffen. Über einen Erweiterungssteckplatz können KI-Beschleuniger nachgerüstet und somit die Verarbeitungsleistung erheblich erhöht werden.

Diese Edge-KI-Plattform zur dezentralen Datenverarbeitung wird für jeden Messpunkt des Monitoring-Systems eingesetzt. Um das System sehr flexibel für verschiedene Anwendungen anpassen zu können, ohne Änderungen an der Hardware vornehmen zu müssen, wurden vom IMMS die Komponenten zur Signalverarbeitung mit einer modellbasierten Entwurfstechnologie entwickelt und auf dieser Basis die Anwendungsalgorithmen für die FPGA-Integration konfiguriert. Für die Integration in Instandhaltungssysteme wurden geeignete Kommunikationsschnittstellen und -protokolle implementiert und die entsprechende Kommunikationsfähigkeit der Plattform hergestellt. Im Einzelnen bietet die Plattform eine komplett digitale Datenstruktur, Abtastraten bis 400 kHz für eine synchrone und phasengenaue Abtastung für analoge und digitale Sensoren, breitbandige Messungen, austauschbare Algorithmen, skalierbare Rechenleistung, Sensordatenfusion, Kalibrierfunktion, Cloud-Integration und Vernetzung über verschiedene Techniken und Protokolle sowie die Anbindbarkeit an ERP-Systeme.

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

www.imms.de/
vernetztmessen

www.imms.de/
embedded

Markteinführung 2023 und Potenzial für weitere Anwendungen

„Mit Blick auf die aktuelle Dynamik beim Thema Energiesparen kommt die 2023 geplante Markteinführung zum richtigen Zeitpunkt,“ sagt Michael Münch, Geschäftsführer der SONOTEC GmbH. Über das Monitoring von Druckluftsystemen hinaus sehe er auch vielseitige Einsatzpotenziale in der vorausschauenden Instandhaltung (Predictive Maintenance), der Prozessüberwachung und der Qualitätssicherung. Die modulare Plattform-Architektur sei zudem so entwickelt, dass sich sehr spezifische Marktanfragen mit unterschiedlichen Sensorkombinationen effektiv bearbeiten ließen. „Wir gehen davon aus, dass sich mit der Technologie völlig neue Marktsegmente erschließen lassen“, so das Fazit von Münch.

www.imms.de/
suse



Installationsarbeiten Ende Juni 2022 für die prototypischen Sensorknoten im Ilmenauer Stadtgebiet zur testweisen automatischen und funkbasierten Lampenüberwachung als SmartCity-Testaufbau des IMMS im Projekt thurAI. Foto: IMMS.

Ilmenauer Straßenlampen auf Sendung mit funkbasiertem Monitoring-System: Erster SmartCity-Testaufbau des IMMS im Projekt thurAI* installiert

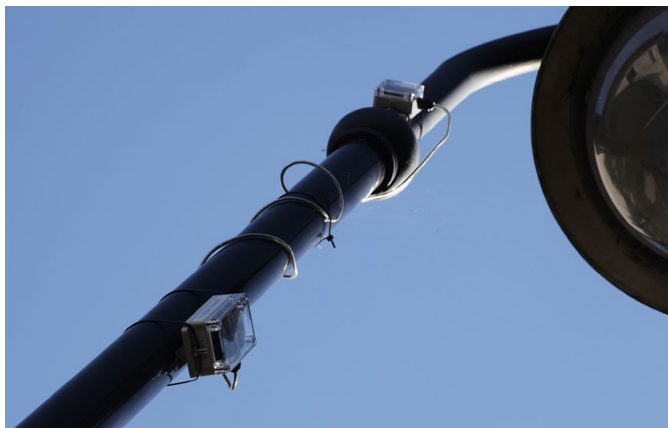
[www.imms.de/
thurAI](http://www.imms.de/thurAI)

Das IMMS hat einen ersten nachrüstbaren Sensorsystem-Prototyp zur testweisen automatischen und funkbasierten Lampenüberwachung entwickelt. Ende Juni 2022 wurden die Geräte im Auftrag der Stadt Ilmenau an drei Straßenlampen verschiedener Leuchtmittel im Stadtgebiet installiert.

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

Bislang sporadische Meldungen oder teure Lösungen

„Momentan erfährt die Stadt Ilmenau meist über die Bürger, wenn Lampen flackern oder kaputt sind. In vielen Fällen liegt der Ausfall der entsprechenden Lampen dann schon einige Zeit zurück“, erklärt Frau Dr. Silvia Krug vom IMMS. Lars Stelow, der Leiter des Ilmenauer Sport- und Betriebsamts, verweist in diesem Zusammenhang auch auf den Mängelmelder auf den Internetseiten der Stadt Ilmenau. Ein bisher ungelöstes Problem sei jedoch die zeitnahe und automatische Erfassung defekter und flackernder Straßenlampen im gesamten Stadtgebiet und den umliegenden Ortsteilen, um schnell handeln zu können. Daher strebe die Stadt Ilmenau für die Zukunft eine zeitnahe automatisierte Lösung an, die betroffene Lampen direkt meldet. „Existierende Lösungen der Hersteller sind sehr kostenintensiv, man müsste die Lampen dafür auch austauschen. Deshalb sollen die Straßenlampen mit zusätzlichen Überwachungssystemen kostengünstig nachgerüstet werden“, so Krug weiter.



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

Foto: IMMS.

Nachrüstbarer Sensorsystem-Prototyp zum Lampen-Monitoring

Das IMMS mit Sitz in Ilmenau hat für dieses Problem im Projekt thurAI erste nachrüstbare Sensorsystem-Prototypen für eine solche Lampenüberwachung entwickelt. Das kürzlich installierte Testsystem besteht aus je zwei Lichtsensoren, die die Funktion der Lampe selbst periodisch überwachen und auch die Lichtverhältnisse der Umgebung messen können. „Diese Informationen werden auf einem lokalen Gerät, dem Sensorknoten, von einem Mikrokontroller gesammelt, aufbereitet und anschließend über Funk an ein bereitstehendes sogenanntes Gateway, also an einen Empfänger, gesendet“, erläutert Krug, die das Projekt thurAI am IMMS leitet. „Als Funktechnologie setzen wir auf das moderne Übertragungsverfahren LoRaWAN, das Long Range Wide Area Network, weil diese Technologie unabhängig von Mobilfunkbetreibern genutzt werden kann und trotzdem vergleichsweise große Reichweiten bietet.“

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

KI soll Erkennung defekter Lampen immer weiter verbessern

Das LoRa-Gateway ist mit dem Internet über Mobilfunk verbunden und leitet die anfallenden Sensordaten transparent an einen Server weiter. „Der Server verarbeitet die Daten und stellt auch erste Diagramme dazu bereit.

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

Mit diesen echten Daten wollen wir die vorhandenen Algorithmen, die defekte Lampen erkennen, immer weiter verbessern“, führt Krug weiter aus. Ziel sei es, den Betriebszustand aller überwachten Lampen bereitzustellen. Wenn dann alle Information z.B. auf einer Internetseite angezeigt würden, dann könne man diese auch den Bürgern zugänglich machen.

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

ProQuaOpt* – KI-basierte Regelung zur Online-Optimierung von Spritzgießprozessen hinsichtlich der Ressourceneffizienz

Beim manuellen Einrichten von Maschinen kaum Zeit für Prozessoptimierungen

Spritzgießen ist das verbreitetste Verfahren, um Kunststoffteile für praktisch alle Anwendungsgebiete herzustellen. Dabei ist ein hoher Durchsatz und die Vermeidung von fehlerhaften Ausschussteilen wichtig, um als Hersteller am Markt bestehen zu können. Dazu werden üblicherweise die Maschinen durch Fachpersonal so eingestellt, dass sie gute Teile produzieren.

Das geschieht allerdings einmalig zum Start der Fertigung eines Teils und die Maschine läuft anschließend mit konstanten Parametern. Ändern sich jedoch die

Das IMMS entwickelt eine KI-basierte Regelung zur ressourceneffizienten Online-Optimierung des Spritzgießens, dem verbreitetsten Verfahren zur Herstellung von Kunststoffteilen für praktisch alle Anwendungsgebiete. Foto: IMMS.



Umgebungsbedingungen (z.B. die Umgebungstemperatur durch offene Tore), kann momentan keine Reaktion erfolgen und das Risiko für Fehlteile steigt. Außerdem werden die Einstellungen auf Basis von Erfahrungswerten vorgenommen. Ob diese dem optimalen Betriebspunkt hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs bei guter Produktqualität entsprechen, ist im laufenden Betrieb unklar.

Ziel ist die Optimierung des Spritzgießprozesses durch KI

Ziel des Projektes ProQuaOpt ist es, KI-Methoden für die automatisierte Produktivitäts- und Qualitätsoptimierung des Spritzgießprozesses einsetzbar zu machen. Dafür wird ein Produkt-Prozess-Qualitätsregelkreis entwickelt, der aus einer Regelstrecke an der Spritzgießmaschine, einem Messglied zur Qualitätsprüfung und einem KI-basierten Regler bestehen wird.

Der Regelkreis ermöglicht neben der Reaktion auf veränderte Umgebungsbedingungen auch die kontinuierliche Optimierung des Prozesses in Bezug auf Ressourceneffizienz. Der Regler gibt, wenn nötig, kleine Anpassungen vor, die den Prozess am optimalen Betriebspunkt halten sollen. Über die Qualitätsprüfung wird ein internes Feedback an den Regler zurückgegeben. Die Anpassungen orientieren sich dabei stark an Schritten, die auch ein Experte durchführen würde.

IMMS entwickelt KI-basierte Regelung

Im Projekt ProQuaOpt wird das IMMS seine Kompetenzen im Bereich der Signalerfassung und -aufbereitung für KI-Anwendungen sowie die Entwicklung KI-basierter Vorhersagemodelle kombinieren, um eine inline sowie autonom den Prozess optimierende Regelung zu entwickeln.

Die Regelung wird je nach Eingabeparametern die Spritzgießmaschine optimal einstellen, ohne die Qualität zu beeinträchtigen, und kann auch auf externe Störungen reagieren. Dadurch wird der Spritzgießprozess effizienter und es fällt weniger Ausschuss an.



Für automatisierbare Prozesse, Dienstleistungen und Anlagen erforscht das IMMS in HoLoDEC u.a. energieeffiziente Edge-KI-Systeme mit Gesamtsystem-Energiemodellierung, um beispielsweise Bestandsanlagen mit kabellosen Sensoren für Condition Monitoring oder Füllstanderkennung nachrüsten zu können. Foto: IMMS.

HoLoDEC* gestartet: Ultra-Low-Power-Architekturen (ULP) und Schaltungskonzepte sowie energieeffiziente Edge-KI-Systeme mit Gesamtsystem-Energiemodellierung

Digitalisierung und Künstliche Intelligenz ermöglichen viele neue Anwendungen, indem Prozesse, Dienstleistungen und Anlagen zunehmend automatisierbar werden. Der Schlüssel hierfür ist das „Internet of Things“ (IoT) mit einer rasant wachsenden Datenmenge, die durch eine steigende Zahl angebundener Geräte und Sensoren bereitgestellt wird. Diese Hardware soll zum einen immer ressourcen- und energieeffizienter arbeiten und zum anderen vor allem bei sicherheitskritischen Anwendungen schnell reagieren und dabei von der Datenerfassung bis zur Analyse vertrauenswürdig sein. Das soll erreicht werden, indem der Datenverkehr an sich begrenzt wird und Daten mehr und mehr nahe am Ort der Entstehung per Edge Computing und somit weniger in der Cloud verarbeitet werden.

Hierfür forscht das IMMS im Projekt HoLoDEC zum einen an Ultra-Low-Power-Architekturen (ULP) und deren effizientem und automatisiertem Entwurf und zum anderen an Edge-KI-Systemen, die eine energieoptimierte Leistungsverteilung zwischen Sensor und Edge-Computing ermöglichen werden. Die Ansätze aus beiden Schwerpunkten werden in zwei Demonstratoren validiert, einem zum Condition Monitoring und einem RFID-Sensor-Transponder-IC mit ULP-Sensor-Frontend.

Für Designhäuser und Chipentwickler wird es zunehmend schwieriger, optimale bzw. energieoptimierte integrierte Schaltungen und Systeme zu entwickeln, da diese immer komplexer und die Personalressourcen immer knapper werden. Das IMMS forscht daher in enger Kooperation mit der Hochschule Reutlingen und dem Fraunhofer IIS/EAS daran, über generatorbasierte, also programmierte Abläufe, die Entwicklung von analogen oder gemischt analog/digitalen Schaltungsblöcken zu beschleunigen.

Im Zuge dessen sollen auch Modelle automatisch generiert werden, um z.B. nichtfunktionale Eigenschaften wie den Energiebedarf frühzeitig im Systementwurf betrachten zu können. Beides ist notwendig, da mit den derzeit üblichen Methoden der Energiebedarf eines Systems erst gegen Ende des Entwurfsprozesses bekannt wird und sich daher im Architekturentwurf kaum berücksichtigen lässt. Auf Systemebene ist der Hebel für Optimierungen am größten. Nutzen kann man ihn jedoch in den seltensten Fällen, da weitreichende Änderungen in der Mikroarchitektur bzw. Topologie z.T. in mehreren Iterationen notwendig wären und diese wie der gesamte Entwurf analoger Komponenten nach wie vor von Hand gemacht werden müssten.

Das IMMS forscht daran, mit automatisierten Designs und Modellen die Entwurfszeiten und -unsicherheiten zu verringern. Ziel ist es, den Entwurf so zu beschleunigen, dass dieser mehrfach durchlaufen werden kann, um den Energiebedarf eines Systems frühzeitig optimieren zu können.

Das IMMS wird mit diesem neuen Vorgehen zum automatisierten Entwurf besonders energiesparende Schaltungskonzepte untersuchen und entwerfen sowie mit einem Demonstrator für ein RFID-Sensor-Transponder-IC mit ULP-Sensor-Frontend validieren und mit Ergebnissen manueller Entwürfe desselben Chips vergleichen. Mit dem Demonstrator wird eine Lösung adressiert, mit der mit sehr geringem Energiebudget möglichst passive, also batterieless betreibbare, integrierte Sensorsysteme realisierbar sind, die sich in kostengünstigen Halbleitertechnologien fertigen lassen.

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

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

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

Energieeffiziente Edge-KI-Systeme mit Gesamtsystem-Energiemodellierung

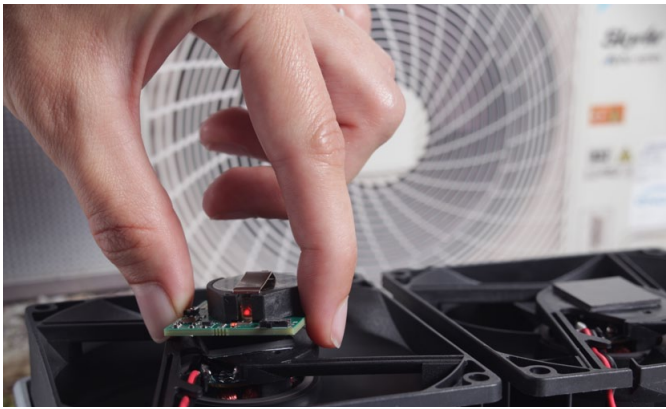
Um KI-Algorithmen auf ressourcenbeschränkten Geräten für IoT-Anwendungen optimal nutzen zu können, forscht das IMMS in HoLoDEC an energieeffizienten Edge-KI-Systemen mit energieoptimierter Leistungsverteilung zwischen möglichst viel sensornaher Datenverarbeitung und möglichst geringer Auslagerung von Aufgaben in das Netzwerk.

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

[Jahresbericht](#)

Das IMMS arbeitet hierfür federführend an der systemübergreifenden Optimierung des Energieverbrauchs von verteilten Sensorsystemen mit. Schwerpunkte sind Hard- und Software-Entwurf, die energetische Modellierung eingebetteter Systeme, Konzepte und Verfahren für das Energiemanagement von Sensor und Gesamtsystem, die Untersuchung und Implementierung von Algorithmen zur Anomalie-Detektion auf Ultra-Low-Power-Komponenten sowie von Algorithmen zur automatischen Datenextraktion und -reduktion hinsichtlich ihres Informationsgehalts und Einflusses des Energieverbrauchs im Sensor. Die Algorithmen werden komprimierte Sensordaten liefern, die dann an die Edge-KI-Plattform übertragen werden. Um Daten unterschiedlicher Sensoren miteinander zu kombinieren, werden Algorithmen für die Fusionierung dieser Daten untersucht und implementiert. Weiterhin erarbeitet das IMMS Energieverbrauchsmodelle der einzelnen Sensorsysteme und des Gesamtsystems.

Um KI-Algorithmen möglichst sensornah und ohne aufwändigen Datentransport zu einer Cloud zu nutzen, forscht das IMMS an Optimierungen von Edge-KI-Systemarchitekturen auf Basis definierter Anforderungen. Hintergrund ist, dass Modelle und Algorithmen nicht mehr nur auf leistungsfähigen Servern mit viel Speicherplatz laufen, sondern auf Mikrocontrollern eingesetzt werden sollen, für die diese aber weder entwickelt wurden noch 1:1 übertragbar sind und dementsprechend angepasst werden müssen. Die aktuelle Forschung beschränkt sich allerdings oft auf die Entwicklung eines leistungsfähigen Modells auf einem Server. Ziel ist es, auf ersten Untersuchungen zur Optimierung für Mikrocontroller und für energetisches Einsparpotenzial aufzubauen und KI-Algorithmen für ressourcenbeschränkte Geräte zu erschließen. Die genannten Ansätze werden in einem Demonstrator zum Condition Monitoring überprüft.



Der nachrüstbare KI-basierte Sensor zur Lüfterüberwachung ist ein kleines Sensorsystem, das Defekte an Lüfterschaukeln oder Lagern erkennt, klassifiziert und visualisiert. Die Sensorsignalauswertung erfolgt mit einer auf einem Mikrocontroller implementierten KI-basierten Datenverarbeitung.
Foto: IMMS.

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

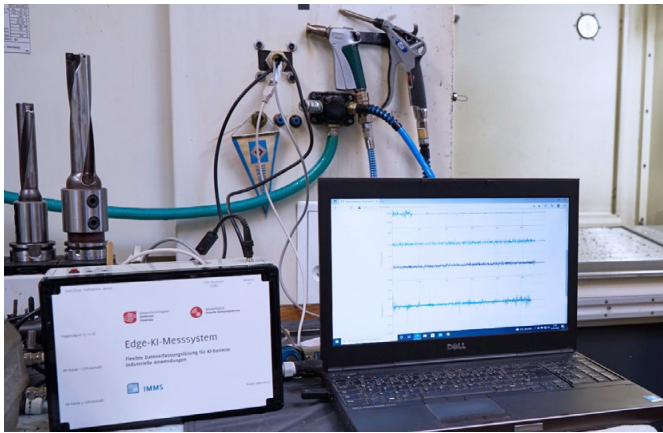
Aktivitäten des IMMS im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“*

Veranstaltungen und Infoangebote für KMU

2022 hat das IMMS als „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ im „Mittelstand-Digital Zentrum Ilmenau“ 10 Vorträge, 15 Online-Seminare, 14 Stammtische, und 5 Fachworkshops sowie 49 Informations- und Werkstattgespräche zur Digitalisierung angeboten, um kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von Digitalisierungs- und KI-Lösungen zu unterstützen. Darüber hinaus waren die Modellfabriken in 36 regionalen Veranstaltungen von Branchennetzwerken, auf regionalen Messen etc. präsent. Im bundesweiten Netzwerk „Mittelstand Digital“ gab es weitere 30 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, Diagnosen 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 Diagnosen, 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.

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



Flexible Datenerfassungslösung für KI-basierte industrielle Anwendungen. Mit der Elektronikplattform können mehrkanalige Mess- und Trainingsdaten in industriellen Fertigungsumgebungen für verschiedene Fragestellungen aufgenommen und KI-basiert ausgewertet werden.

Foto: GFE.

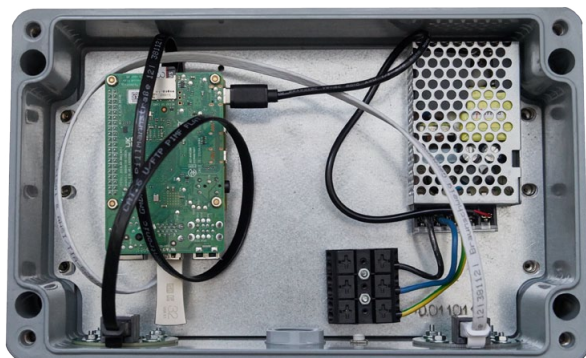
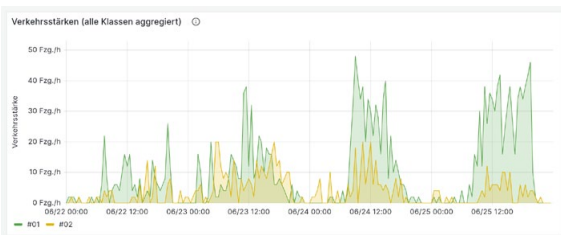
Parallel zu den Veranstaltungen entstanden verschiedene News und andere Veröffentlichungen, z.B. über die Zusammenarbeit mit Unternehmen in Projekten oder zu Demonstratoren, die auf den Webseiten des Zentrums, über Newsletter und über die Sozialen Medien an Interessenten verteilt werden.

Neue Demonstratoren und Digitalisierungsprojekte

Neben den verschiedenen Veranstaltungen wird in der „Modellfabrik Smarte Sensorsysteme“ am IMMS auch an Demonstrations- und Umsetzungsprojekten gearbeitet. Einsatzmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz (KI) in produzierenden KMU wurden in verschiedenen Projekten bzw. Demonstratoren gezeigt.

- Der **nachrüstbare KI-basierte Sensor zur Lüfterüberwachung** ist ein kleines Sensorsystem, das Defekte an Lüfterschaukeln oder Lagern erkennt, klassifiziert und visualisiert. Die Sensorsignalauswertung erfolgt mit einer auf einem Mikrocontroller implementierten KI-basierten Datenverarbeitung.
- Die **flexible Datenerfassungslösung für KI-basierte industrielle Anwendungen** ist eine Elektronikplattform für die flexible mehrkanalige Aufnahme von Mess- und Trainingsdaten in industriellen Fertigungsumgebungen, an die über verschiedene Messkanäle und Datenschnittstellen unterschiedliche Sensorsysteme angeschlossen und deren Signale mit KI-basierten Verfahren ausgewertet werden können.
- Die **RFID-basierte Werkstückidentifikation und -lokalisierung** in automatischen Zuführsystemen, z.B. in Fräsbearbeitungszentren, erlaubt die automatische Auswahl passender Bearbeitungsprogramme, Werkzeuge etc. Im Projekt wurden verschiedene RFID-Tags und ein kompakter RFID-Reader erprobt, um die technische Umsetzbarkeit und eine hohe Erkennungsrate in Abhängigkeit verschiedener Fertigungsrandbedingungen zu evaluieren.

www.imms.de/
md



Im Projekt wurde gemeinsam mit der comNET GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie eine intelligente Audiosensorlösung für 5 Standorte im Berger Feld in Gelsenkirchen umgesetzt. Sie erfasst Verkehrsströme und Lärmbelastigungen und hilft dabei, die öffentliche Sicherheit zu verbessern. Der Hardwareaufbau wurde mittels kostengünstiger und aktuell lieferbarer Komponenten realisiert. Grafik/Fotos: IMMS/comNET.

- **Intelligente vernetzte Sensorsysteme** kamen auch in einem Obstbaubetrieb zum Einsatz, um pflegerische und Bewässerungsmaßnahmen für Apfelbäume besser planen zu können und den Ertrag und die Qualität trotz klimatischer Veränderungen aufrecht zu erhalten bzw. erhöhen zu können.
- Mit den **intelligenten akustischen Sensoreinheiten für Smart Cities** werden Geräusche in der Stadt erfasst, KI-basiert ausgewertet und zentral gesammelt. Dabei werden Geräuschklassen mit zugeordneten Lautstärkeprofilen gebildet. Sie dienen der Erfassung von Verkehrsströmen und Lärmbelastigungen sowie der Verbesserungen der öffentlichen Sicherheit.

www.imms.de/
md



Vernetzte Sensorsysteme im Obstanbau: Damit lassen sich Maßnahmen für Pflege und Bewässerung besser planen sowie Ertrag und Qualität trotz klimatischer Veränderungen aufrechterhalten bzw. erhöhen. Foto: IMMS.

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 Ge-

rätetechnik Thüringen eG (ELMUG), dem Zentrum Digitale Transformation Thüringen (ZeTT) und dem Thüringer Zentrum für Lernende Systeme und Robotik (TZLR).

Darüber hinaus bildet das Ilmenauer Zentrum gemeinsam mit dem in Chemnitz, dem ScaDS.AI (Center for Scalable Data Analytics and Artificial Intelligence) Dresden/Leipzig und weiteren Partnern den KI-Hub Sachsen-Thüringen. Der KI-Hub widmet sich dem Transfer von Ergebnissen der KI-Grundlagenforschung aus dem ScaDS.AI und den Partnern über die Mittelstand-Digital-Zentren in die Unternehmen. Zugleich bündeln die die Mittelstand-Digital-Zentren die Anforderungen der KMU, damit diese in der Grundlagen- und angewandten Forschung Berücksichtigung finden.

57

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



www.imms.de/
md

digitalzentrum-chemnitz.de

scads.ai

ki-hub-sachsen-thueringen.de



Mobiles Multisensorik-Prüfgerät zur Instandhaltung von Wälzlagern

Mit dem von IMMS und SONOTEC entwickelten dreikanaligen Multisensorik-Prüfgerät Trib.US lassen sich defekte Wälzlager identifizieren und analysieren. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Wälzlager sind aus keinem Industriezweig wegzudenken. Als Kugel- oder Kegelrollenlager führen sie umlaufende oder sich schwenkend bewegende Maschinenelemente wie Wellen, Achsen oder Räder und übertragen Lasten zwischen Komponenten. Eingesetzt werden sie in Motoren und Getrieben oder an Pumpen und Wellen u.a. in Konsumgütern, Windkraftanlagen, Industrierobotern oder in Transportrollen für Förderbänder.

Ist ein Wälzlager defekt, kann eine ganze Anlage ausfallen. Verschleiß an Wälzlagern und dessen Ursache rechtzeitig zu erkennen ist wichtig, um Ausfallkosten und Folgeschäden an Anlagen vermeiden zu können. Problematisch ist jedoch, dass Wälzlager oft so verbaut sind, dass sie sich nicht ohne weiteres oder nur sehr aufwendig prüfen und warten lassen. Im Projekt Trib.US haben das IMMS und die SONOTEC GmbH daher eine integrierte mobile Lösung entwickelt, die bei Prüfungen für Instandhaltungsentscheidungen an Wälzlagern unterstützt. Ergebnis ist ein Smartphone-ähnliches Gerät mit drei Sensorkanälen. Damit lassen sich Defekte ge-
nauer lokalisieren und deren Ursachen schneller bestimmen, um Stillstandzeiten in der Produktion zu reduzieren oder zu verhindern.

www.imms.de/

tribus

Jahresbericht

© IMMS 2022

Das Gerät erfasst mit Ultraschall-, Beschleunigungs-, Drehzahl- und Temperatur-Sensoren Abweichungen in den Signalen, welche defekte Wälzlager von den normallau-
fenden unterscheiden. Durch Korrelation und Sensordatenfusion lassen sich Rück-
schlüsse zu Defekten ziehen und diese Information direkt in Echtzeit auf dem Gerät
anzeigen. Dadurch kann während des Betriebes einer Maschine geprüft werden, wel-
che Lager defekt sind. Dies ermöglicht einen geplanten proaktiven Austausch und
verhindert kostspielige ungeplante Stillstände und Reparaturen.

Das IMMS hat hierfür eine echtzeitfähige Plattform sowie die Algorithmen zur Si-
gnalbewertung und Korrelation entwickelt und realisiert, der Partner SONOTEC GmbH
die Ultraschallsensorik, das Userinterface sowie die dazugehörige Managementsoft-
ware für die Instandhaltung.

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

Mehrwert durch mehr Kanäle – das „dreikanalige SONAPHONE“ Trib.US

Ein Wälzlager wird typischerweise mit einem Ultraschallsensor überwacht. Damit
kann über einfache Kennzahlen auf Schäden geschlossen werden. Möglich ist das
bereits mit dem von IMMS und SONOTEC entwickelten SONAPHONE®. Dieses ein-
kanalige portable digitale Ultraschallprüfgerät wird unter anderem für die Lecksuche
an Druckluftleitungen, die Prüfung von Kondensatableitern in Dampfsystemen, die
Detektion von elektrischen Teilentladungen und zunehmend auch für die Maschi-
nenprüfung eingesetzt. Allerdings ist dieses Gerät nur bedingt für die Analyse von
Wälzlagerschäden geeignet, da nur ein Sensorkanal verfügbar ist.

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

Um Schadensbilder an Wälzlagern und deren Ursachen zu analysieren, ist eine
komplexere Datenauswertung der Ultraschallsignale notwendig. Eine Eingrenzung
des Schadens auf bestimmte Bauteile oder Bereiche des Wälzlagers ist enorm hilf-
reich bei der Ursachenanalyse. Ziel ist schließlich, nicht nur das defekte Lager zu
finden und auszutauschen, sondern vor allem dessen Ursache herauszufinden. Nur
so können Maßnahmen ergriffen werden, die diesen Fehler beheben und einen er-
neuten Schaden verhindern.

Hier hilft eine mehrkanalige Ultraschallprüfung, bisher ungenutztes Potenzial in
der Datenverarbeitung auszuschöpfen. In dem von IMMS und SONOTEC entwickel-
ten Trib.US-Gerät werden dazu drei Sensorkanäle synchron verarbeitet und dabei
zwei Ultraschalldatenströme mit einem Referenzsignal verknüpft. Über zwei breit-
bandige Ultraschall- und einen zusätzlichen Multifunktionskanal werden erstmals
Informationen aus Fehler- und Schadensdetektion in einem Gerät kombiniert. Die
Datenerhebung erfolgt simultan und damit schneller und erleichtert dadurch die
Auswertung. Durch mehrere Kanäle kann beispielsweise anhand von Wiederhol-

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

Jahresbericht
© IMMS 2022

frequenzen in Kombination mit der Drehzahl festgestellt werden, ob ein Außen- oder Innenringschaden am Wälzlager vorliegt. Instandhaltungsentscheidungen und korrektive Maßnahmen lassen sich so schneller treffen.

Integration und Zeitsynchronisation der Ultraschallkanäle

Die Zeitsynchronisation mehrerer Ultraschallsensoren spielt eine entscheidende Rolle bei der korrekten und präzisen Korrelation von Ultraschallsignalen für die Lokalisierung und Ursachenanalyse. Die Zeitsynchronisation bezieht sich auf den Prozess, bei dem verschiedene Sensoren oder Geräte ihre internen Zeitgeber abstimmen. Damit wird sichergestellt, dass sie zeitlich kohärente Daten erfassen, um die Signale der Sensoren miteinander in Beziehung setzen zu können. Beim mehrkanaligen SONAPHONE® werden Breitband-Sensoren verwendet, z.B. BS10 für Luftultraschall oder BS40 für Körperschall. Diese Sensoren verfügen über eigene Taktquellen. Somit können Phasenunterschiede bei der Analog-Digital-Wandlung entstehen.

Um die synchrone Abtastung der Signale zu gewährleisten, wurde am IMMS ein Synchronisationskommando in die echtzeitfähige Plattform implementiert. Das Handgerät sendet in festen Zeitabständen dieses Kommando an die Sensoren und synchronisiert somit die Zeitbasis. Die Synchronisation erfolgt in einem festen Zeitraster von 16 ms. Dazu wurde die Firmware der Sensoren und das FPGA-Design entsprechend angepasst.

Für die Einbindung der Referenzsensoren wurde am IMMS eine analoge Schaltung zur Anpassung der Signale entwickelt sowie die Anbindung von Drehzahl- und Temperatursensoren implementiert. Die Integration in das digitale Gerät wurde von SONOTEC realisiert. Zur Analog-Digital-Wandlung wurde der interne AD-Wandler des für die Hardware-Plattform gewählten programmierbaren Logikbausteins (FPGAs) verwendet. Die vom Sensor gelieferten Werte müssen je nach Sensortyp anders verarbeitet werden. Die entsprechenden Verarbeitungsalgorithmen wurden ebenfalls in den FPGA integriert und das Interface zum Messkern überarbeitet. Gleichzeitig wurde auch die entsprechende Datenverarbeitung im Messkern implementiert und die Interfaces zu FPGA und App aufgebaut.

Algorithmen zur Korrelation

Die Signal-Korrelation bezieht sich auf den Prozess der Analyse und Auswertung von zwei oder mehreren Signalen, um Informationen über ihre Ähnlichkeit, Phasenverschiebung und zeitliche Beziehung zu erhalten. Bei der Lokalisation einer Schallquelle werden zwei Ultraschallsignale erfasst, die von Mikrofonen oder Sensoren an

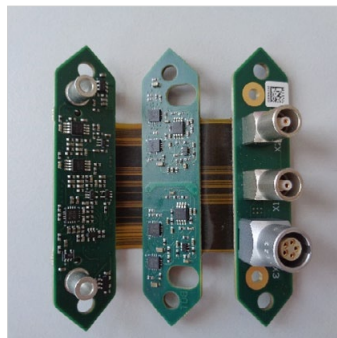


Abbildung 1: 3D-Darstellung der dreikanaligen Erweiterungsplatine für das SONAPHONE® und realisierte Hardware. Grafik: IMMS, Foto: SONOTEC.

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

verschiedenen Positionen empfangen werden. Die Korrelation der Signale ermöglicht es, die Zeitverzögerung und Phasenverschiebung zwischen den Signalen zu bestimmen, was zur Bestimmung der Quellenposition verwendet werden kann.

Aus dem Zeitpunkt der eintreffenden Signale kann der Zeitunterschied (TDoA – Time difference of arrival) bestimmt werden. Dieser Zeitunterschied kann mit Hilfe einer Kreuzkorrelation errechnet werden. Das IMMS hat mehrere Methoden zur Kreuzkorrelation von Ultraschallsignalen untersucht und bezüglich der Implementierbarkeit verglichen. Der Algorithmus GCC-PHAT (Generalized cross-correlation) ist eine Methode, die wenig Rechenaufwand benötigt. Die Kreuzkorrelationsberechnungen eines solchen Algorithmus können durch die Anwendung von Signalen im Frequenzbereich weiter verbessert werden. Mit der Nutzung der Fourier-Transformation für die Faltung der Signale kann die Implementierung weiter optimiert werden. Der ausgewählte Algorithmus wurde prototypisch implementiert und seine Eignung für die Lokalisation einer Signalquelle nachgewiesen.

Umsetzung in ein Funktionsmuster

Für die Anbindung der Sensoren wurde am IMMS eine neue dreikanalige Erweiterungsplatine für das SONAPHONE® entworfen. Sie stellt die elektrische Anbindung zu den Sensoren her. In einem ersten Schritt wurde die bestehende einkanalige Version erweitert. Es wurde die Schnittstellelektronik für den Anschluss von zwei digitalen Ultraschallsensoren und einem Referenzkanal implementiert.

Um auch kompakte analoge Sensoren, wie z.B. die Körperschallsonde T20 oder Beschleunigungssensoren, mit dem mehrkanaligen Prüfgerät nutzen zu können, wurde in einem zweiten Schritt die Signalelektronik der digitalen Sensoren auf die Erweiterungsplatine integriert. Das betrifft unter anderem die AD-Wandlung und Filterung der Ultraschallsignale. Durch die kleinere Bauform, eine entsprechende

www.imms.de/sonaphone

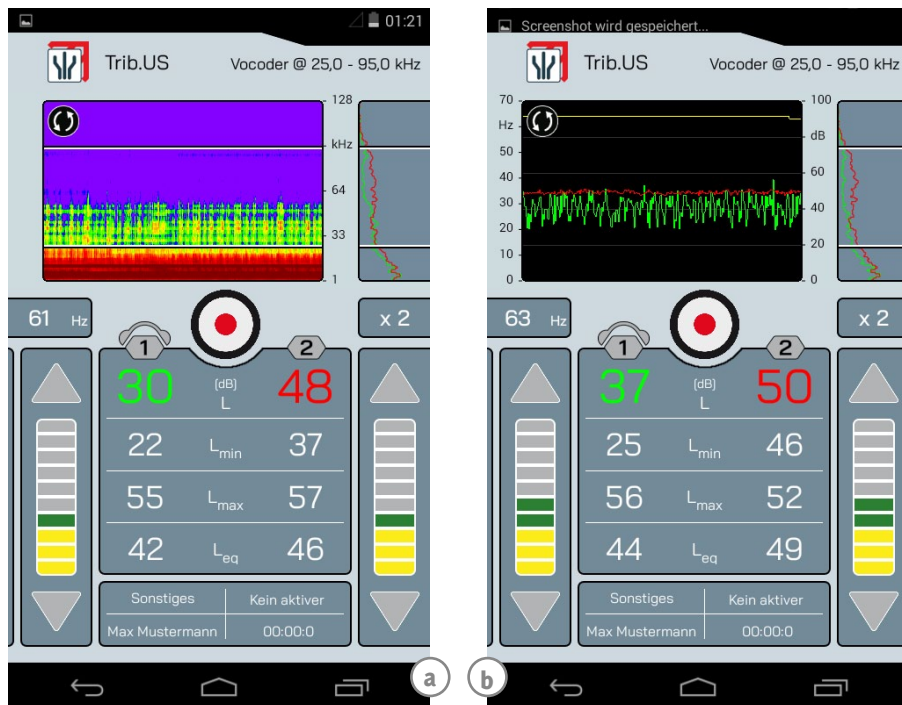


Abbildung 2: Trib.US-App-Oberfläche mit (a) Anzeige der Frequenzanteile im Ultraschallbereich und (b) der Pegelverläufe zweier synchroner Kanäle/Sensoren für Prüfobjekte, wie z.B. Wälzlager, sowie des dritten Referenzkanals mit der Drehzahl. Quelle: SONOTEC.

Anpassung des Gehäuses und die Verlagerung von Verarbeitungslogik zur Erweiterungsplatine wird die Sensorbenutzung erleichtert, die Sensorkosten reduziert und die Plattform für eine Vielzahl verschiedener anderer Sensoren geöffnet (z.B. Schwingungssensoren). In Abbildung 1 ist der 3D-Entwurf der Elektronik dargestellt. Diese beinhaltet die Signalverarbeitung, die Verstärkung, Filterung und AD-Wandlung der zwei analogen Ultraschallsignale sowie die Schnittstellenelektronik für den Referenzkanal samt Spannungserzeugung. Die Herausforderung dabei war die Platzierung und Verdrahtung der Komponenten auf dem geringen Bauraum von ca. 70 x 20 x 10 mm³). Dazu wurde eine sechslagige Starflex-Platine entworfen, bei der drei starre Leiterplatteenteile für die Platzierung der Komponenten mittels Flexbereichen verbunden sind. Die Platine kann, wie in Abbildung 1 dargestellt, gefaltet und der Bauraum so optimal genutzt werden.

Die App für die Anzeige der Messwerte wurde von SONOTEC entwickelt. Abbildung 2 zeigt die implementierte Oberfläche der Trib.US-App. Unten links und unten rechts werden die derzeitigen Signalamplituden in Balkenform angezeigt. Dazwischen werden die Pegelwerte beider Kanäle dargestellt. Die Kanäle sind farblich abgestuft: Werte von Kanal 1 sind Grün, Werte von Kanal 2 hingegen Rot. In der Mitte der



Abbildung 3: Mehrkanaliges Prüfgerät mit zwei Ultraschallsensoren und einem Drehzahlsensor am Lagerdemonstrator. Foto: SONOTEC.

Oberfläche, links über dem grünen Balken, befindet sich ein Feld mit der Anzeige der Werte des langsamen Kanals, wie z.B. des angeschlossenen Drehzahlsensors. Oben befindet sich ein Anzeigefeld, in dem die Frequenzspektren (lila hinterlegt) oder die Pegelverläufe (schwarz hinterlegt) der schnellen Kanäle 1 und 2 sowie der Referenzkanal angezeigt werden können.

Demonstrator / Prüfstand

Zur Demonstration und Validierung des mehrkanaligen Ultraschallprüfgerätes wurde von SONOTEC ein Test- und Prüfstand aufgebaut. Damit können die korrekte Funktion der einzelnen Sensoren und die synchrone Erfassung der einzelnen Kanäle überprüft und verifiziert werden. Der Prüfstand kann anschließend auch zur Demonstration der Funktionen des Systems genutzt werden.

Der Demonstrator besteht aus einem regelbaren Elektromotor, welcher über einen Riemen eine Welle antreibt. Die Welle wiederum sitzt in zwei Kugellagern. Eines dieser Kugellager wurde bewusst präpariert. Dazu wurde an einer Stelle im Laufband (Außenring) der Kugeln mit einem Gravierlaser eine genau definierte (und exakt reproduzierbare) Beschädigung eingefügt. Die Ultraschallemission und das Vibrationsmuster des entsprechenden Kugellagers ist damit verändert. An der Welle wurden außerdem Reflektorstreifen für den Berührungslosen LED-Drehzahlsensor angebracht. In der Trib.US-App sind die Unterschiede zwischen defekten und intakten Lager in den Pegelwerten und Verläufen (grün und rot) zu erkennen, vgl. Abbildung 3.

Im Projekt Trib.US wurde ein mobiles Prüfgerät mit 3 Sensorkanälen, davon 2 breitbandige Ultraschallkanäle und 1 zusätzlicher Multifunktionskanal, für die Lokalisierung von schadhaften Bauteilen in Wälzlagern entwickelt. Das IMMS hat dafür Hardware zum Anschluss von 3 Sensoren realisiert sowie die Vorverarbeitung und die Korrelation von Ultraschall-Kanälen, um die Funktion des Systems zur Ortung und Analyse von Schallquellen zu ermöglichen. Der Prototyp wird von SONOTEC für die Serienfertigung vorbereitet, die voraussichtlich Mitte/Ende 2024 startet. Das Gerät lässt sich durch den autarken Betrieb auch für andere Anwendungsfälle einsetzen, wie z.B. für die Prüfung von Ventilen oder Transportrollen. Diese sollen in einem nächsten Schritt demonstriert werden.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt Trib.US wurde unter dem Kennzeichen KK5048102ATo gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

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

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

Sensorik zur Online-Überwachung von Membranreaktoren für Dialyseprozesse



und In-vitro-Proteinsynthese großer Probenvolumina

Abbildung 1: Im Projekt Sensomem hat das IMMS den Prototyp für ein System entwickelt, mit dem sich biochemische Reaktionen, wie Dialyse oder Proteinsynthese, mit Hilfe von Sensoren während der Reaktion im Labor überwachen lassen und Prozesswiederholungen vermieden werden. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Biochemische Reaktionen im Labor, wie Dialyse, Proteinsynthese oder die Kultivierung von Zellen, spielen u.a. bei patientenspezifischen Therapien eine große Rolle. Die Herstellung dieser Proteine in Membranreaktoren mit großen Volumina mit mehr als 20 ml je Charge steht dabei noch am Anfang. Derzeit werden meist kleine Mengen erzeugt. Die Reaktionen laufen langsam ab und können bis zu einer Woche dauern. Bislang kann erst danach durch eine Analyse der Proben überprüft werden, ob die gewünschten Ergebnisse erzielt wurden. Ist das nicht der Fall, muss der Prozess wiederholt werden, was zu unerwünschten Verzögerungen führt.

Um schon während der Reaktion bewerten zu können, ob alles planmäßig verläuft, wurde im Projekt Sensomem an einem sensorüberwachten Membranreaktor gearbeitet. Dabei werden verschiedene Sensoren in Form eines Panels entweder in den Reaktor oder die umgebende Pufferlösung eingeführt und überwachen dort mehrere Kenngrößen. Dadurch wird es möglich, Abweichungen im Reaktionsverlauf frühzeitig zu erkennen und das Laborpersonal zu informieren. Die Herausforderun-

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

Jahresbericht

© IMMS 2022

gen bestehen zum einen darin, dass im Reaktor nicht viel Platz ist, also eher kleine Sensoren genutzt werden müssen. Zum anderen müssen die Sensoren Kontakt mit der Flüssigkeit haben, dürfen jedoch selbst durch diese keinen Schaden nehmen und die Reaktion auch nicht negativ beeinflussen. Der kleine Bauraum bedingt auch, dass viele handelsübliche Geräte hier nicht einsetzbar sind, da die Sonden für Behälter mit 20 ml Volumen zu groß sind.

Das IMMS hat im Projekt die Elektronik für das Panel und die entsprechende Messschaltung zur Auswertung der Sensoren entwickelt. Ein Schwerpunkt lag dabei im energieoptimierten Betrieb der Elektronik. Mit dem entwickelten Konzept lassen sich mehrere Messschaltungen parallel betreiben, um mehrere Reaktoren mit mehreren Messgrößen analysieren zu können.

Sensorsystem zur Online-Überwachung von Reaktionen in Membranreaktoren

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

Zusammen mit den Partnern scienova und Fraunhofer IZI wurden Sensoren für den Einsatz im Membranreaktor ausgewählt. Konkret wurden die Temperatur und die Leitfähigkeit als wichtige Kenngrößen identifiziert. Das Fraunhofer IZI unterstützte zudem bei der Prüfung der verwendeten Materialien und der Entwicklung des Reaktors, um sicherzustellen, dass die verwendeten Materialien biokompatibel sind und keinen Einfluss auf die Reaktion haben.

Herausforderungen

Das IMMS entwickelte Konzepte, um die genannten Größen mit den spezifischen Sensoren zu messen. Dieser Schritt war insbesondere für die Leitfähigkeitsmessung notwendig, da das System eine hohe Auflösung und einen großen Messbereich abdecken sollte. Die Herausforderung bestand darin, mit beiden Extrempunkten des Messbereichs umzugehen, da die resultierenden Signale sehr klein werden können. Außerdem stellte die Energieversorgung auf kleinem Bauraum eine weitere Herausforderung dar. Um im Laborbetrieb möglichst nicht zu stören, sollte das gesamte Sensorsystem inkl. Batterie / Akku so klein wie möglich gehalten werden. Knopfzellen waren als kleinste Option aufgrund der benötigten Energie für die Messschaltung jedoch nicht einsetzbar. Hier konnte das IMMS seine Kompetenzen in der energetischen Optimierung eingebetteter Systeme einsetzen und die Schaltung so trimmen, dass sie möglichst wenig Energie benötigt. Diese Anpassungen ermöglichten eine Einsparung von 30 % gegenüber der initialen Version sowie von 60 % gegenüber kommerziell verfügbarer Alternativen.

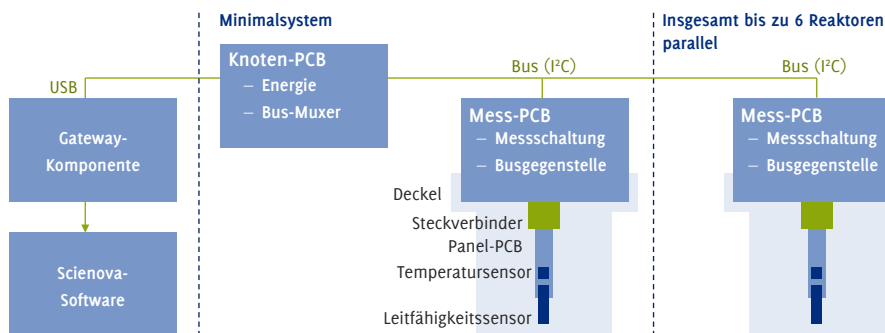


Abbildung 2: Systemkonzept für Sensorsystem zur Online-Überwachung von Reaktionen in Membranreaktoren. Grafik: IMMS.

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

* Förderung

Lösungskonzept

Das vom IMMS entwickelte Systemkonzept sieht einen Aufbau aus 3 Komponenten vor. Dabei ist für jeden zu überwachenden Reaktor ein Mess-PCB mit allen notwendigen Komponenten für die Messung der Leitfähigkeit und ein Sensor-Panel, auf dem die Sensoren sitzen, vorgesehen. Diese werden über einen I²C-Bus mit der Trägerplatine verbunden, welche die Energie bereitstellt und die Steuerung der Mess-PCBs übernimmt. Abbildung 2 zeigt das schematisch.

Wichtig hierbei ist, dass für das Panel besondere Anforderungen bestehen. Damit die Elektronik keinen Schaden nimmt, wenn sie mit der Flüssigkeit im Reaktor Kontakt hat, muss das Panel vergossen werden, ohne dass die Sensoren und die Anschlüsse beeinträchtigt werden. Die Vergussmasse muss zudem biokompatibel sein, d.h. sie darf keinen negativen Einfluss auf die auszuführende Reaktion haben. Darüber hinaus muss das Panel sterilisierbar sein, um zu gewährleisten, dass der Reaktorinhalt nicht durch das Panel kontaminiert wird.

Softwareseitig wurde ein Konzept entwickelt, dass nacheinander alle angeschlossenen Module anspricht und eine automatische Messbereichsumschaltung für jede Leitfähigkeitsmessung beinhaltet. Um den Energieverbrauch zu minimieren, können zudem alle Messgruppen einzeln an- und abgeschaltet werden.

Prototyp und empirische Untersuchungen

Im Projekt wurde mit verschiedenen Prototypen gearbeitet, um parallel unterschiedliche Aspekte des Systems zu untersuchen. Dazu gehörten Untersuchungen, ob die Elektronik durch die im Membranreaktor arbeitenden Magnetrührer und durch den Klimaschrank beeinflusst wird. Hier konnte gezeigt werden, dass sich das Sensorsystem ohne Einschränkungen mit den Laborgeräten verwenden lässt.

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

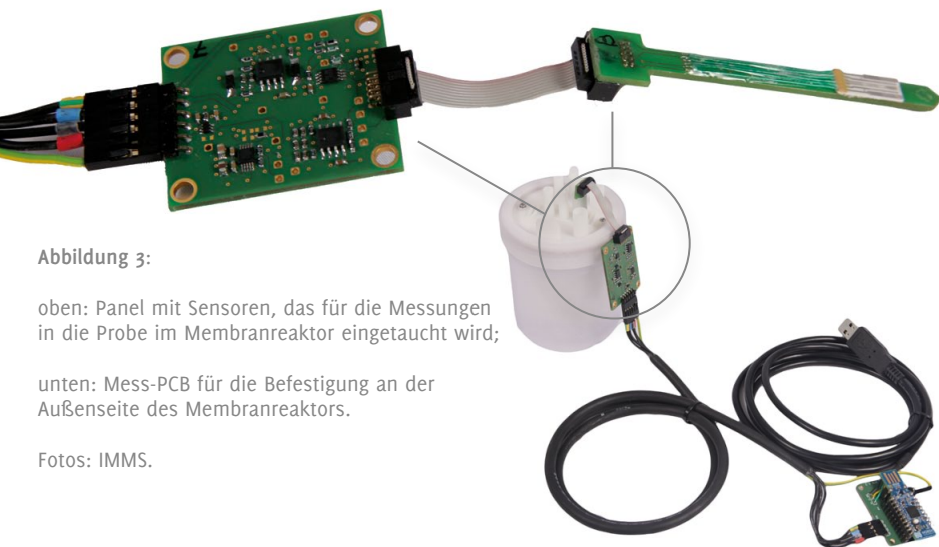


Abbildung 3:

oben: Panel mit Sensoren, das für die Messungen in die Probe im Membranreaktor eingetaucht wird;

unten: Mess-PCB für die Befestigung an der Außenseite des Membranreaktors.

Fotos: IMMS.

Nach dem Aufbau des Prototyps aus allen drei Komponenten wurde dieser ausgiebig charakterisiert und die entsprechenden Anpassungen der Software durchgeführt. Die Abbildungen 1 und 3 zeigen den Prototyp, wie er in einem Reaktor installiert wird mit dem Panel im Inneren des Bechers, dem Mess-PCB am Becher und der Auswerteeinheit, die per Kabel beliebig positioniert werden kann, z.B. auch außerhalb eines Klimaschranks. Für den Prototyp wurde auf eine Energieversorgung per Batterie verzichtet und stattdessen eine USB-Schnittstelle sowohl für die Datenübertragung zum PC als auch die Energieversorgung genutzt.

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

Mit Hilfe von kommerziellen Leitfähigkeitsstandardlösungen wurde anschließend das System bewertet und kalibriert. Dazu wurde ein kommerzielles Leitfähigkeitsmessgerät als Vergleichsbasis verwendet. Bei den Messungen zeigte sich, dass unterschiedliche Kombinationen von Mess-PCB und Panel leicht abweichende ADC-Werte für die Leitfähigkeit aufweisen und deshalb jede Kombination eine eigene Kalibrierung erfordert. Dies ist jedoch auf Softwareseite abbildbar und wurde für die Prototypen manuell angepasst. Die Kalibrierung ist für jeden Messbereich durchzuführen, da je nach Messbereich die Konfiguration der Messschaltung in Bezug auf Anregespannung und Messwiderstände abweicht. Mit Hilfe mehrerer Referenzlösungen wurden diese Messbereiche experimentell bestimmt und so gewählt, dass jeweils ein Puffer bei der Überlappung der Bereiche entsteht. Abbildung 4 zeigt die gemittelten Ergebnisse der durchgeführten Versuche für unterschiedliche Einstellungen. Dabei ist auch zu sehen, dass die Schaltung bei manchen Einstellungen oder bei zu hohen Werten in ein nichtlineares Verhalten übergeht. Dies ist für den

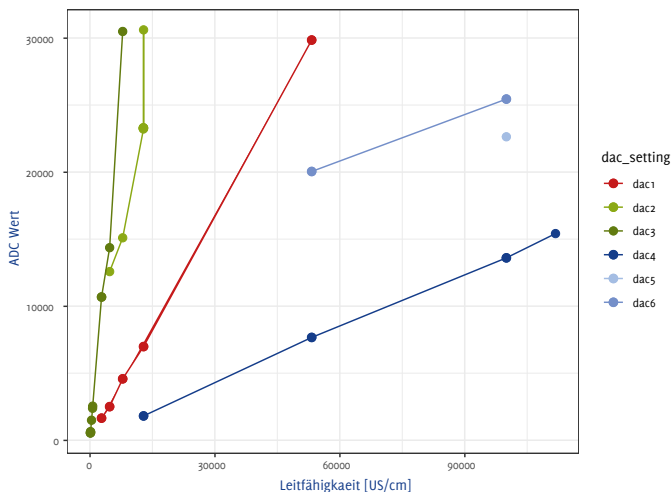


Abbildung 4:

Gemittelte Ergebnisse der durchgeführten Versuche für unterschiedliche Einstellungen. Die Schaltung geht bei manchen Einstellungen oder bei zu hohen Werten in ein nichtlineares Verhalten über. Diese Ergebnisse lieferten die Basis für die Wahl der Einstellungen.

Grafik: IMMS.

› **Integrierte Sensorsysteme**

› **Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme**

› **Mag6D-nm-Direktantriebe**

› **Inhalt**

* **Förderung**

laufenden Betrieb zu vermeiden. Daher wurden die entsprechenden Einstellungen nicht genutzt und die Bereiche so gewählt, dass über den gesamten Messbereich ein lineares Verhalten gegeben ist.

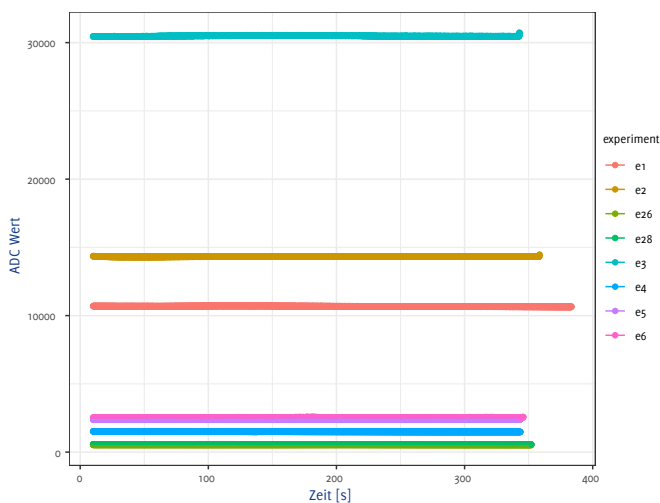
www.imms.de/
vernetztmessen

Bewertung der Lösung

Nach erfolgter Kalibrierung konnte gezeigt werden, dass die Schaltung konstante Werte für die entsprechenden Referenzlösungen liefert, siehe Abbildung 5. Somit war der Funktionsnachweis erfolgreich. Damit ist es erstmals möglich, eine Reaktion live zu verfolgen und sowohl den Verlauf von Leitfähigkeit und Temperatur zu beobachten. Dies ist ein erster Schritt auf dem Weg zur Überwachung spezifischer Reaktionen.

Abbildung 5:

Diese konstanten Werte für die Leitfähigkeit für entsprechende Referenzlösungen zeigen den erfolgreichen Funktionsnachweis für die Live-Überwachung der Reaktionen nach der Systemkalibrierung.



Grafik: IMMS.

Das entwickelte System ist in der Lage, zwei kritische Größen in Bezug auf biochemische Reaktionen in einem Membranreaktor während der Reaktion zu beobachten und auszuwerten. Der entstandene Prototyp zeigt daher das Potenzial solcher Lösungen.

Das System befindet sich im Prototyp-Stadium. Es sind daher weitere Anpassungen notwendig, um es in ein Produkt zu überführen. Hier ist insbesondere eine Methode zur Selbstkalibration der Leitfähigkeitsmessung anhand von Prüflösungen zu nennen. Diese sollte wie bei handelsüblichen Geräten verfügbar sein. Dazu muss eine Funktion im System integriert werden, die eine entsprechende Messung auf Basis einer Referenzlösung durchführt und die Berechnungskoeffizienten entsprechend anpasst.

Für die Proteinsynthese sind weitere Größen wichtig, insbesondere pH-Wert und Sauerstoffsättigung in der Lösung. Daher ist zukünftig eine Erweiterung des Systems um diese Größen anzustreben. Im aktuellen Projekt konnte dies noch nicht erfolgen, da die benötigten kleinen Sensoren für diese Größen noch nicht verfügbar sind.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Projekt SensoMem wurde unter dem Förderkennzeichen ZF4085711CR9 im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

www.imms.de/sensomem



Einzelphotonenzählung und pikosekundenschnelle Messungen für die Forschung an Quantentechnologien

Das in QuantumHub Thüringen entwickelte SPAD-EvalKit basiert auf dem Verfahren der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung und ermöglicht Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Pikosekunden. Damit lassen sich Quanten-basierte Anwendungen erforschen und neue Lösungen für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschließen. Foto: IMMS.

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

Für Quantentechnologien aus Thüringen erforscht das IMMS CMOS-basierte Einzelphotonendetektoren

Quantentechnologien werden als eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft betrachtet. Sie ermöglichen die Entwicklung hocheffizienter Technologien, die die Leistungsfähigkeit konventioneller Systeme weit übertreffen können. Durch die Kontrolle einzelner Quanten, also kleinster Licht- und Energiebausteine, werden disruptive Anwendungen ermöglicht, zum Beispiel für Quantencomputer, abhörsichere Kommunikation oder Quantensensorik. Das IMMS erforscht hierfür den Einsatz von kommerziell erhältlichen, siliziumbasierten Einzelphotonendetektoren, sogenannter SPADs (Single-Photon Avalanche Diode). Sie lassen sich in einer Standard-Halbleitertechnologie (CMOS) kostengünstig herstellen und ermöglichen daher hochintegrierte, miniaturisierte Lösungen. Die SPADs werden zur Wandlung einzelner Photonen in elektrische Signale eingesetzt und erlauben einen Betrieb bei Raumtemperatur ohne große und aufwändige Kühlsysteme.

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

Das IMMS hat in Zusammenarbeit mit der X-FAB ein SPAD-Evaluations-Kit entwickelt. Das kostengünstige, handflächengroße USB-Gerät namens SPAD-EvalKit benötigt keine zusätzliche Spannungsversorgung und ist in Abbildung 1 illustriert. Es basiert auf dem Verfahren der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung (engl. Time-Correlated Single

[Jahresbericht](#)
© IMMS 2022

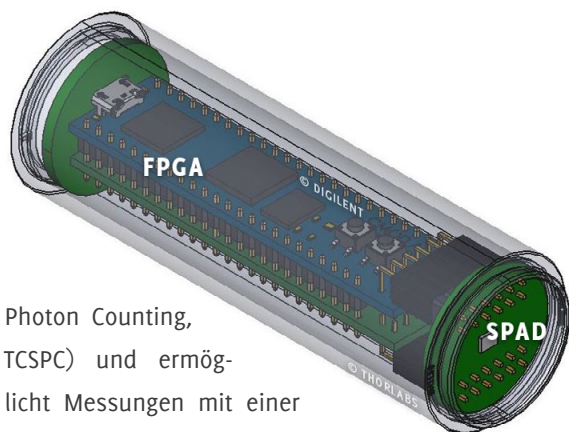


Abbildung 1:

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

Grafik: IMMS/Digilent/Thorlabs.

Photon Counting, TCSPC) und ermöglicht Lichtmessungen mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Piko-sekunden. Das hierfür genutzte und in diesem Artikel vorgestellte TCSPC-Verfahren ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf der Intensität von Lichtpulsen zu beurteilen. Damit lassen sich Einzelphotonenquellen aufbauen, Lichtpulse mit sehr kleinen Lichtleistungen charakterisieren oder Abstände messen und somit Grundlagen für Quanten-basierte Anwendungen legen. Mit dem Verfahren können u.a. neue Lösungen für die In-vitro-Diagnostik bzw. Medizintechnik erschlossen werden, wie z.B. miniaturisierte Lumineszenz- und Fluoreszenz-Messtechnik.

Zur Interpretation der Sensorsignale ist eine statistische Auswertung erforderlich. Für das erste SPAD-EvalKit wird diese durch einen programmierbaren Logikbaustein (FPGA) übernommen. Dieses Bauelement ist ein Zwischenschritt für die spätere Chip-Entwicklung. Per FPGA kann man die Abläufe für die Sensorsignalverarbeitung vorgeben, aber vor allem die gewünschte Schaltungsstruktur abbilden, die für Tests und Optimierungen noch flexibel anpassbar ist.

Damit wurde die Basis für die Integration eines solchen optischen Sensorelements in Verbindung mit der erforderlichen Auswertelektronik in einen Mikroelektronikchip gelegt, die in Anwendungsentwicklungen anderer Forschungsprojekte einfließt.

Schnelle Lichtimpulse mit klassischen Verfahren nicht ausreichend charakterisierbar

Schnelle Lichtimpulse sind für viele Anwendungen bis in den Nano- oder Pikosekundenbereich notwendig. Lichtquellen, die diese Impulse erzeugen, müssen daher charakterisiert werden. Denn ohne Gewissheit über die Beschaffenheit des anregenden Signals ist eine sinnvolle Bewertung der Reaktion eines optischen Systems darauf oft nur mit beträchtlichen Einschränkungen oder gar nicht mehr möglich. Insbesondere bei fluoreszenzbasierten Bioanalytikverfahren in der Medizintechnik oder bei Time-of-Flight-Anwendungen wie im Automotive-Bereich ist dieses Wissen essenziell. Für

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

www.imms.de/
ivd

www.imms.de/
modtest

Messungen, bei denen eine sehr schnelle Lichtquelle verwendet wird, muss deshalb zunächst die Lichtquelle selbst charakterisiert werden.

Hierfür werden klassischerweise schnelle Photodioden verwendet. Das dann mit einem Oszilloskop aufgenommene Signal erlaubt es zwar, im zeitlichen Amplitudenverlauf Pulsbreiten bis herunter in den Nanosekundenbereich zu bewerten. Das Grundrauschen des Oszilloskops beschränkt jedoch den erreichbaren Dynamikbereich sehr. Oft wird daher die Impulsantwort der Photodiode nichtlinear verzerrt.

Prinzip der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung vermeidet unerwünschte Effekte

Um diese Effekte zu vermeiden, benutzt das am IMMS in Zusammenarbeit mit der X-FAB entwickelte SPAD-EvalKit ein grundlegend anderes Verfahren – die zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung (engl. Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC). Hierbei wird die Impulsantwort der Lichtquelle nicht als wertekontinuierlich, sondern als wertediskret angesehen. Des Weiteren wird die Impulsantwort nicht in einem einzigen Durchgang gemessen, sondern durch wiederholte Anregung und statistische Bewertung der Ergebnisse vieler Messdurchläufe akkumuliert. Das TCSPC-Verfahren baut grundlegend darauf auf, dass das Leuchten der Lichtquelle keineswegs ein kontinuierlicher und deterministischer Prozess ist, sondern es sich dabei um die stochastisch verteilte Emission einzelner Photonen handelt. Die Impulsantwort der Lichtquelle ist nichts weiter als die Wahrscheinlichkeitsdichte der Zeitpunkte, an welchen Photonen aus der Lichtquelle ausgelöst werden. Die Messung – oder aus statistischer Sicht richtiger: Schätzung – einer Wahrscheinlichkeitsdichte erfolgt mittels Histogramm über die Zeitpunkte, zu welchen Photonen aus der Lichtquelle ausgelöst werden.

Charakterisierung schneller Pulslichtquellen mittels FPGA und SPADs

Ein System zur Messung einer Lichtquelle mittels TCSPC benötigt also erstens einen Einzelphotonendetektor, welcher die aus der Lichtquelle emittierten Photonen aufängt. Zweitens braucht es einen hinreichend genauen Zeit-Digital-Wandler (engl. Time-to-Digital Converter, TDC). Dieser misst die Zeitdifferenz zwischen Anregung und Auftreffen des ersten Photons und inkrementiert die zugehörige Histogrammklasse. Nachdem hinreichend viele, d.h. mehrere Hunderttausend, TDC-Werte im Histogramm akkumuliert wurden, entspricht das Histogramm der tatsächlichen Impulsantwort der Lichtquelle. Dieses Verfahren ist keine Erfindung der jüngeren Jahre, sondern wurde in der heute verwendeten Form bereits im Jahre 1961 beschrieben.¹ Lange Zeit benötigte es jedoch äußerst sperrige Geräte, um einen derartigen Aufbau

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme

› Mag6D-nm-Direktantriebe

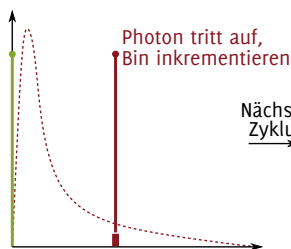
› Inhalt

* Förderung

› Inhalt

* Förderung

Anregung

Nächster
Zyklus

Anregung

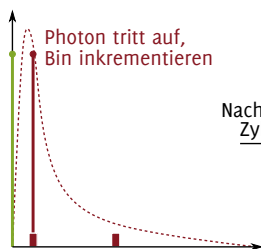
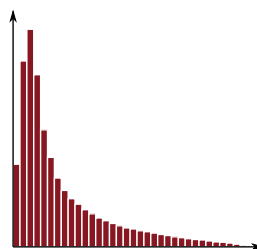
Nach vielen
Zyklen

Abbildung 2: Zyklen des TCSPC-Verfahren zur Erstellung des Histogramms. Grafik: IMMS.

in Betrieb zu nehmen. Am IMMS konnte mithilfe der jetzt kommerziell erhältlichen, siliziumbasierten Einzelphotonendetektoren (sog. Single-Photon Avalanche Diode, SPAD) in X-FAB-Technologie ein äußerst kompaktes Gerät entwickelt werden, welches TCSPC-Messungen durchführt. Der Zeit-Digital-Wandler (TDC) ist derzeit in einem Field Programmable Gate Array (FPGA) implementiert. Dieser programmierbare Logikbaustein bildet alle Strukturen der angestrebten integrierten Schaltung ab, mit der sich das System aus SPAD-Sensor und Auswerteelektronik weiter miniaturisieren und somit für neue Quanten-basierte Anwendungen erschließen lässt.

Idee der Totzeitglieder ermöglicht preiswerten FPGA-Einsatz

Da die höchste sinnvolle Taktfrequenz gegenwärtiger FPGAs im Bereich einiger Hundert Megahertz liegt, ist es nicht möglich, einen TDC mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 20 Pikosekunden durch eine einfache Zählerlogik zu implementieren. Eine Lösung, die diese Genauigkeit erreicht, bietet allerdings der folgende Ansatz: Es werden bestimmte Hardware-Grundbausteine der rekonfigurierbaren FPGA-Logik als Totzeitglieder, d.h. Digitalstrukturen mit einer bekannten Laufzeitverzögerung, verwendet. Es wird gemessen, wie viele dieser Totzeitglieder das Startsignal durchlaufen konnte, bevor das Stoppsignal gesetzt wurde. Damit ist die Zeitauflösung des TDC nicht durch den Referenztakt, sondern durch die Gatterlaufzeit dieser als Totzeitglieder dienenden Hardware-Bausteine diktiert.

Ergebnisse

Damit ist das System in der Lage, die Impulsantwort der Lichtquelle, also die Intensitätsverteilung über der Zeit, zu messen. Mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 20 Pikosekunden können auch sehr kurze Lichtpulse im Nanosekunden-Bereich charakterisiert werden. Der Dynamikbereich des akkumulierten Histogramms liegt nach moderater Integrationszeit bei 80 dB und ist damit deutlich besser als der Dynamikbereich eines GHz-Oszilloskops – letzterer liegt bei einer typischen Auflösung von

www.imms.de/

modtest

Jahresbericht

© IMMS 2022

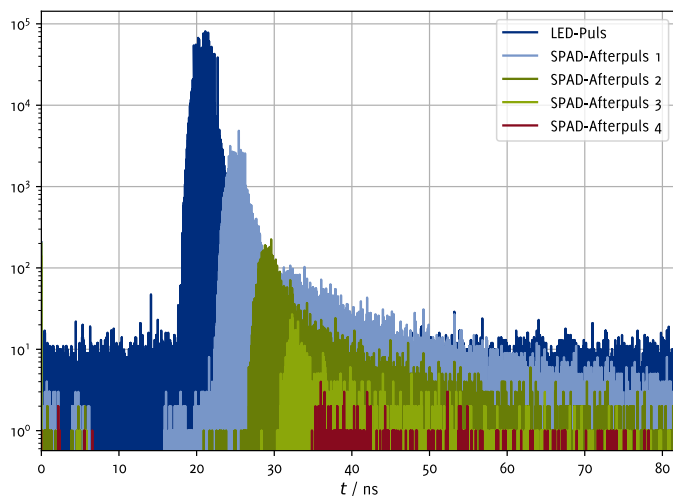


Abbildung 3:

Beispiel-Histogramm für die Messung von Impulsantworten einer LED-Lichtquelle per TCSPC-Verfahren. Der unerwünschte Effekt des Afterpulsings der SPAD kann herausgefiltert werden. Er ist hier getrennt dargestellt für SPAD-Afterpuls 1 – 4.

Grafik: IMMS.

7 Bit (ENOB) rauschbedingt bei höchstens 40 dB. Um den hohen Dynamikbereich ausnutzen zu können, wird die Ordinatenachse eines TCSPC-Histogramms sinnvollerweise mit einer logarithmischen Skalierung versehen.

Mit dem entwickelten SPAD-EvalKit können auch unerwünschte Effekte der Lichtquelle und des Detektors beobachtet und quantifiziert werden. So kann z.B. das Afterpulsing der SPAD durch geeignete Korrelation herausgefiltert werden, vgl. Abbildung 3. Dieser unerwünschte Effekt wird durch den Detektor verursacht: Nachdem dieser ein Photon erfasst hat, können aufgrund der in einer Halbleiterschicht eingeschlossenen Ladungsträger unmittelbar weitere Pulse emittiert werden, die allerdings keinem Photon zuordenbar sind. Dieser Effekt wird als Afterpulsing (Nachpulsen) bezeichnet. Mit dem SPAD-EvalKit kann dieses Afterpulsing entweder für den normalen Betrieb ausgeblendet oder zur Charakterisierung des Detektors gezielt extrahiert werden.

Zudem lassen sich Störeffekte der Lichtquelle untersuchen, die deutlich unter 1% des Spitzenwertes der Impulsantwort liegen. Ein Beispiel sind spontane Emissionen einer angeregten Laserdiode. Bei der Messung mit einer schnellen Photodiode und einem Oszilloskop wäre der Anteil dieser unerwünschten spontanen Emissionen aufgrund des begrenzten Dynamikbereichs des Oszilloskops nur sehr eingeschränkt messbar. Dies ist insbesondere für In-vitro-Diagnostikanwendungen, in welchen die Laserdiode zur Anregung einer biologisch oder chemisch verursachten Fluoreszenz verwendet werden soll, kritisch. Die Wiederverwendung und Weiterentwicklung des Systems im Projekt FluoResYst zeigte bereits, dass dies mit dem SPAD-EvalKit ebenfalls charakterisiert werden kann.

www.imms.de/

ivd

Jahresbericht

© IMMS 2022

Kostengünstiges, handflächengroßes USB-Gerät mit Potenzial zu weiterer Miniaturisierung

Das TCSPC-Verfahren ist zur Charakterisierung schneller Lichtquellen hervorragend geeignet und zeigt u.a. Effekte auf, die bei der Messung der Impulsantwort durch Photodiode und Oszilloskop nicht sichtbar wären. Das gemeinsam mit der X-FAB entwickelte System erlaubt die Messung von <1 ns breiten Lichtpulsen mit einem Dynamikbereich von 80 dB. Die Kombination aus FPGA-TDC und CMOS-SPAD erlaubte die Verkleinerung des TCSPC-Messaufbaus von einem zuvor äußerst sperrigen Messaufbau zu einem kostengünstigen, handflächengroßen USB-Gerät, welches ohne externe Spannungsversorgung auskommt. Das System ist vollständig in einem Objektivtubus mit einem Durchmesser von einem Zoll untergebracht. Dadurch kann es auch durch eine Vielzahl kommerziell erhältlicher optischer Komponenten (z.B. Linsen, Filter) ergänzt werden. Im Forschungsprojekt FluoResYst kam das Messsystem bereits zur Charakterisierung schneller Laserlichtquellen zum Einsatz. Hierdurch konnte die Machbarkeit zur Entwicklung eines SPAD-basierten ASICs zur Detektion von Tuberkulose erfolgreich bewertet werden.

Kontakt: Jakob Hampel, M.Sc., jakob.hampel@imms.de

Freistaat
Thüringen



Hier hat Zukunft Tradition.

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

1 L. M. Bollinger, G. E. Thomas. Measurement of the Time Dependence of Scintillation Intensity by a Delayed-Coincidence Method. Rev. Sci. Instrum., Jan. 1961.



Testbench in Hardware: AMS ASIC Scope zur Validierung KI-basierter Simulationsmethoden im Chip-Entwurf

Abbildung 1: Am IMMS entwickeltes AMS ASIC Scope mit Einschubmodulen. Die Analog-Mixed-Signal-Testplattform (AMS) für anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) ist der Kern einer neuartigen Validierungsumgebung, die analoge und digitale Parameter erzeugen und messen kann. Foto: IMMS.

Hardware-Testbench zum Chip-Entwurf: Motivation und Überblick

Für den Entwurf komplexer Schaltungen entwickelt IMMS KI-basierte Methoden

Mikroelektronische Systeme aus analogen und digitalen Komponenten erfassen, verstärken, digitalisieren und übertragen elektrische, mechanische, optische, chemische oder biologische Parameter. Sie ermöglichen somit unterschiedlichste Anwendungen, wie z.B. neuartige intelligente, autonome Produktionssysteme oder Sensorsysteme für die In-vitro-Diagnostik. Der Entwurf solcher integrierten Mixed-Signal-Schaltungen wird immer komplexer, da für neue Anwendungen immer mehr oder immer präzisere Analogkomponenten auf einem Chip vereint werden müssen. Designfehler sind so gut es geht zu vermeiden, bevor ein Entwurf in die zeit- und kostenintensive Halbleiterproduktion übergeben wird.

Das IMMS forscht daher an verschiedenen Methoden zur KI-basierten Entwurfs- und Testautomatisierung, um den Entwicklungsprozess von integrierten Sensorsystemen sicherer und kostengünstiger zu machen. Beispielsweise werden mithilfe von KI effiziente Simulationsmodelle erstellt, die das Verhalten der Schaltung deutlich besser abbilden als mit herkömmlichen Methoden und somit Korrekturen und Optimierungen am Entwurf vor der Fertigung ermöglichen. Mit neuronalen Netzen werden z.B. sehr effektiv nichtfunktionale Eigenschaften in bereits vorhandene Ver-

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

Jahresbericht

© IMMS 2022

haltensmodelle integriert, die somit Bestandteil der Software-basierten Simulationsumgebung, der Testbench, werden. Sie erhöhen die Designsicherheit bereits sehr effektiv.

Rückkopplung vom Test zur Simulation: neue Plattform zur Fehleranalyse und -vermeidung

Trotz alledem werden nach der Herstellung der Chips bei deren Test und Charakterisierung Fehler gefunden, deren Ursachen z.T. schwer zu ermitteln sind. Denn die softwarebasierte Simulation und die hardwarebasierte Charakterisierung lassen sich derzeit meist nur manuell koppeln. Der Grund dafür ist, dass die Datenformate inkompatibel sind und somit das reale Schaltungsverhalten wegen seiner hohen Komplexität nur mit viel Aufwand simulativ abgebildet werden kann.

Um Fehler im Entwurf durch Simulationen noch besser verhindern zu können, müssen die Simulationsmethoden bezüglich ihrer Anwendbarkeit validiert und optimiert werden. Zu diesem Zweck hat das IMMS das AMS ASIC Scope entwickelt, eine Analog-Mixed-Signal-Testplattform (AMS) für anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASIC). Es ist der Kern einer neuartigen Validierungsumgebung, die analoge und digitale Parameter erzeugen und messen kann. Ein modularer Ansatz ermöglicht eine auf den ASIC zugeschnittene Konfiguration. Die Messumgebung spiegelt mit physischen Teststrukturen die Anforderungen und Parameter der simulativen Testbench aus der Design-Software wider. Die neue Plattform ermöglicht so nicht nur automatisierte Testabläufe auf realen Schaltkreisen, sondern eine gemeinsame Beschreibung von Testfällen und Parametervariationen, also eine Rückkopplung von Simulation und Test. Die Ergebnisse dieser Tests sind vergleichbar mit Simulations- und Testdaten aus der Designumgebung. Sie können daher genutzt werden, Modelle aus dem Design zu validieren und zu verbessern. Bei auftretenden Schwachstellen wird die Suche nach der Ursache vereinfacht, indem Simulationsdaten und Messergebnisse direkt vergleichbar sind.

Testbench in Hardware für Verbesserungen in Test und Design

Mit dem „AMS ASIC Scope“ werden sich Simulationen und Tests aus der Designumgebung für die meisten Testfälle auf realen Schaltkreisen anwenden lassen. Die entwickelte Hardware implementiert dieses Konzept durch ein Modulsystem mit einer Haupteinheit zur Ansteuerung verschiedener modularer Einzelkarten für einzelne spezifische Aufgaben. Das System soll zukünftig die Entwicklung neuer ASICs unterstützen.

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

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

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

Jahresbericht

Die Kompatibilität von Simulation und realer Messung, die das Testsystem mit sich bringt, bietet große Vorteile sowohl im Test als auch im Design:

- Testentwicklung stark vereinfacht, da Simulationsstimuli verwendbar
- Evaluierung der Modelle aus Entwicklungsumgebung durch direkte Vergleichbarkeit
- Fehler-Identifikation wird vereinfacht, Abweichungen zwischen Simulation und Test können wieder in die Entwurfsumgebung zurückgeführt werden

Anforderungen

Um mit dem AMS ASIC Scope lernende Algorithmen im Simulations- und Charakterisierungskontext einsetzen zu können, werden verschiedene Anforderungen an die Datenerfassung und -speicherung in beiden Fällen erfüllt. Die Datensätze werden unter gleichen Bedingungen erfasst und in kompatiblen Formaten gespeichert. Messsystem und Simulationsumgebung weisen somit identische Schnittstellen und Datenstrukturen auf.

Für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zwischen Entwicklungs- und physischer Umgebung erfüllt das AMS ASIC Scope folgende Anforderungen:

- Generierung und Messung analoger Spannungen und Ströme
- Eingabe und Ausgabe digitaler Signale
- Lesen und Schreiben von Daten über digitale Kommunikationsprotokolle
- hohe Timing-Genauigkeit
 - . parallele Ablaufsteuerung / testspezifische Programmierung jedes Moduls
 - . Modulsynchronisation
 - . keine Timing-Verzögerungen durch das Betriebssystem
- schnelle Datenverbindung zwischen Steuereinheit und Modulen (>10 MBit/s)

Konzept der Plattform

Um die Anforderungen bezüglich der Schaltkreis- und Simulationsparameter zu erfüllen, sind schaltkreisspezifische Spannungen und Ströme bereitzustellen und Signalisierungen zu erzeugen, die Funktionen aktivieren. Die zu untersuchenden Werte können digital und analog vom Testobjekt ausgegeben und gemessen werden. Hierfür hat das IMMS eine flexibel konfigurierbare Test-Plattform mit analogen und digitalen Ein- und Ausgabefunktionen (AMS) entwickelt.

Das Verhalten des ASIC wird gleichzeitig durch Stimulierung mit Eingangssignalen und die Beobachtung seiner Ausgangssignale bewertet. Diese Messung stellt das Äquivalent zur Verhaltensbeschreibung einer Testbench dar. Mit diesem Vorgehen

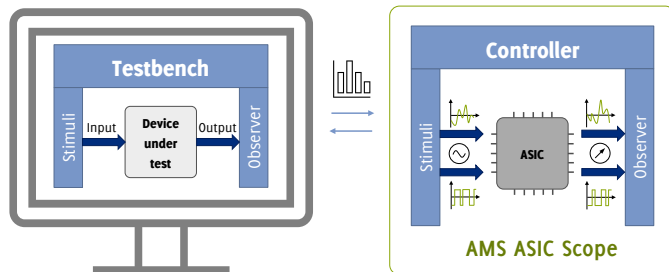


Abbildung 2:

Schema zur Kompatibilität zwischen AMS ASIC Scope und Testbench.

Grafik: IMMS.

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

können Tests vergleichbar zur Simulation in Hardware nachgebildet werden. Dafür ist es notwendig, einen Schaltkreis sowohl mit analogen als auch digitalen Signalen zu stimulieren.

Das entwickelte AMS ASIC Scope erfüllt diese Funktionen durch einen modularen Ansatz. Eine für Schaltkreis und Test zugeschnittene Konfiguration ist so einfach realisierbar. Module des Messsystems sind somit austauschbar und an jeweilige Messanforderungen eines ASIC anpassbar. Eingebettet in einem Einschub-Tischgehäuse lassen sich die Module im Eurokarten-Format einfach und sicher montieren. Gesteuert werden die Komponenten des Messsystems über ein Main-Modul. Dieses lässt sich für die Ansteuerung des Messsystems per Netzkabel mit einem PC koppeln, vgl. Abbildung 1.

Die elektrische Verbindung zu den Modulen des Systems wird über eine passive Backplane geschaffen. Diese Trägerplatine mit Steckverbindern für die Einschubbaugruppen bietet Leitungen für Daten, Signalisierung und Strom. Alle Module werden mit einer Festspannung (24V) betrieben. Spezifische Spannungen für die Schaltung der Module werden je Modul lokal erzeugt.

Eine parallele Ablaufsteuerung wird durch programmierbare Logikbausteine (FPGAs) auf den Modulen realisiert. Diese bekommen ihre modulspezifischen Messabläufe vom Main-Modul mitgeteilt und können über vorhandene Signalisierungsleitungen miteinander synchronisiert werden. Nach einem Messdurchlauf werden Messergebnisse vom Main-Modul zurückgelesen. Jedes Modul kann somit speziell für eine Messaufgabe zugeschnitten werden. Folgende Modulimplementierungen sind hierfür u.a. möglich:

- Digitalkarte
- Analog-Karte
- Oszilloskop-Funktion
- AWG (Arbitrary Waveform Generator) Funktion
- Stromversorgung mit hoch-dynamischer Messfunktion
- Source-Measurement-Funktionalität

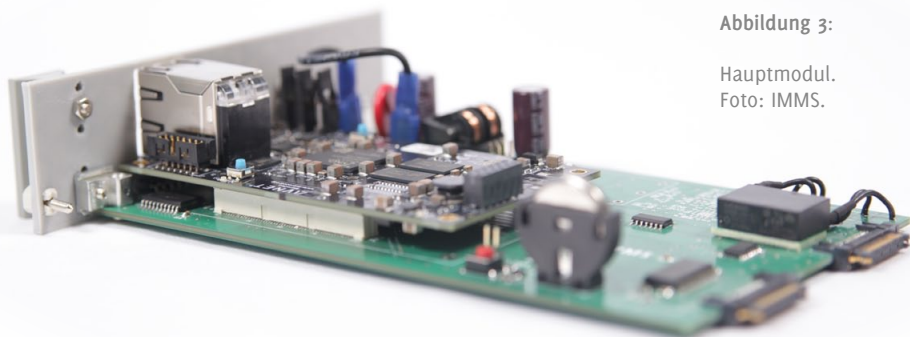


Abbildung 3:

Hauptmodul.
Foto: IMMS.

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

Komponenten der Plattform

Hauptmodul

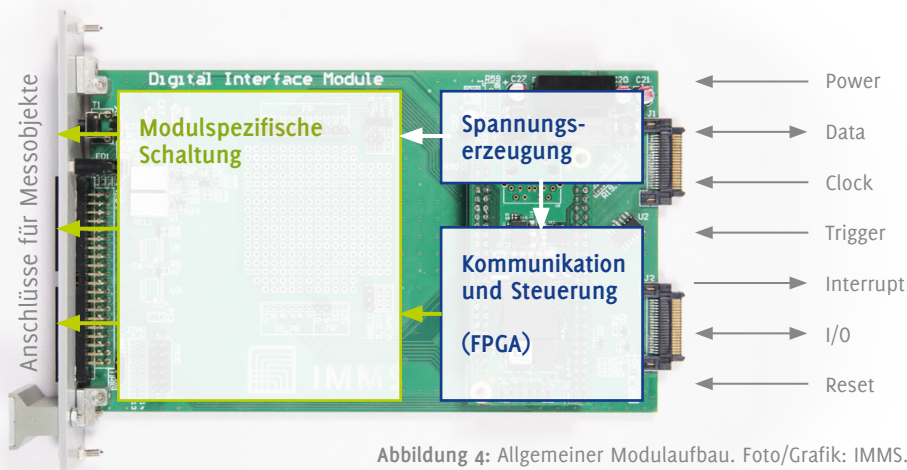
Dieses Modul ist ein fester Bestandteil und die zentrale Komponente zur Versorgung und Ansteuerung des Messsystems.

Eine Recheneinheit bietet ein Interface zur Kontrolle der Messplattform und mit ihr werden für einen Test einzelne Messabläufe für die Funktionsmodule erstellt. Während eines Tests ist das Main-Modul für die zeitliche Synchronisierung der Module verantwortlich. Anschließend werden Ergebnisse von Modulen gesammelt und aufbereitet.

Die Spannungsversorgung des AMS ASIC Scope erfolgt mit einem 24-V-Netzteil über einen Anschluss am Hauptmodul. Filter und Sicherung auf dem Main-Modul dienen als Schutz vor der Beschädigung weiterer Systemkomponenten bei Verpolung, Kurzschluss und weiterer Störeinflüsse.

Für die Datenverarbeitung und Systemansteuerung dient ein System on Module (SOM) in Form eines ZYNQ-Controllers, welcher FPGA und PC vereint. Per Ethernet-Kommunikationsschnittstelle zu anderen IT-Systemen wird ein Interface zum Konfigurieren und Ansteuern des Systems bereitgestellt.

Der FPGA-Teil des ZYNQ implementiert die Schnittstelle für die digitale Datenübertragung zu den Funktionsmodulen in Form eines QSPI-Masters. Durch vier parallele Datenleitungen werden Kommunikationsgeschwindigkeiten $> 10\text{MB/s}$ erreicht. Mehrere Slave-Select-Signale ermöglichen die gezielte Adressierung einzelner Funktionsmodule. Zusätzlich werden im FPGA-Teil Clock- und Trigger-Signale zur Synchronisierung der Funktionsmodule erzeugt.



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

Funktionsmodule

Die Funktionsmodule des AMS ASIC Scope ermöglichen dem System erst die eigentliche Funktionalität, indem Ein- und/oder Ausgaben digitaler und analoger Signale ermöglicht werden.

Eine einheitliche Struktur von Hardware und FPGA-Designs der Module standardisiert innerhalb des Testsystems die digitale Anbindung zum Main-Modul und die Modulansteuerung. Eine Minimierung des Entwicklungsaufwandes wird so erreicht, da große Teile der Hardware, des FPGA-Designs und der Software wiederverwendet werden können. Der grundsätzliche Hardwareaufbau aller Module folgt einer einheitlichen Struktur:

Spannungserzeugung

Ausgehend von einem 24V-Gleichspannungseingang werden alle modulspezifischen Spannungen erzeugt. Immer vorhanden ist ein 3,3V-Regler, welcher die Spannung für das FPGA bereitstellt. Je nach Funktionsschaltung werden ein oder mehrere weitere Spannungsregler benötigt.

Kommunikation und Steuerung

Ein Logikbauelement in Form eines FPGA stellt die Verbindung zur Backplane und damit zum Hauptmodul dar. Mit dieser digitalen Verbindung werden Programmabläufe (Messabläufe) und Ergebnisse mit dem Main-Modul ausgetauscht. Die digitale Ansteuerung von Schaltkreisen, welche zur Wandlung von analog auf digital und umgekehrt stattfinden, wird von diesem SOM aus kontrolliert.

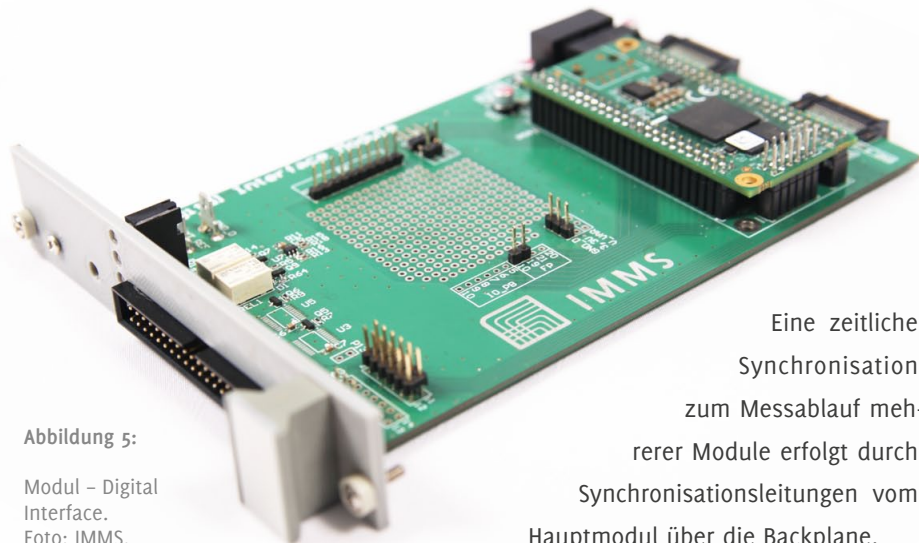


Abbildung 5:

Modul – Digital
Interface.

Foto: IMMS.

Eine zeitliche
Synchronisation
zum Messablauf meh-
rerer Module erfolgt durch
Synchronisationsleitungen vom
Hauptmodul über die Backplane.

Modulspezifische Schaltung

Ca. 2/3 der Modulfläche ist für die modulspezifische Schaltung ausgelegt. In diesem Bereich ist die eigentliche Schaltung für Stimuli und Observer vorgesehen. Diese beinhaltet die analoge Schaltung sowie die Wandlung der Signale zwischen dem analogem Bereich und den digitalen Daten des FPGA.

Digital-IO mit Level-Shift Input/Output

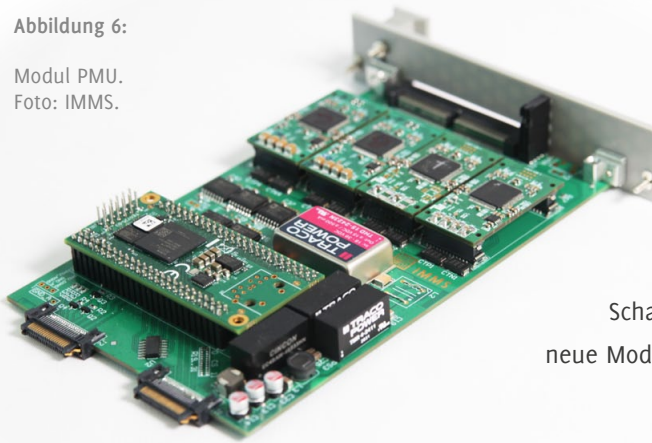
Dieses Modul wurde erstellt, um digitale Signale zu erzeugen und aufzunehmen. Das erlaubt eine Modulimplementierung, welche im Hinblick auf die digitale Signal-erzeugung und -aufnahme vielseitig einsetzbar ist:

- Erzeugung vordefinierter Abläufe digitaler Signale (Pattern Generator)
- Aufnahme digitaler Signalabläufe (Logik Analyzer)
- Erzeugung standardisierter Bus-Signale (z.B. I²C, SPU, USART) zur digitalen Kommunikation mit Schaltkreisen

Das Modul verfügt über 16 Digitalkanäle, welche frei entsprechend der jeweiligen Anwendung konfiguriert werden können. Zusätzlich kann die High-Level-Spannung der Digitalsignale definiert werden. Das geschieht entweder über ein externes Spannungs-Referenz-Signal oder alternativ durch einen Digital-Analog-Converter auf dem Modul, der vom FPGA gesteuert wird. Die Logik-Spannung kann damit im Bereich von 1,2 V bis 5,5 V konfiguriert werden.

Abbildung 6:

Modul PMU.
Foto: IMMS.



Zusätzlich befindet sich auf dem Modul ein Entwicklungsbereich, der Aufbauten zum Debuggen des Systems selbst sowie die Entwicklung von Schaltungskomponenten für neue Module ermöglicht.

PMU-Modul (Parametric Measurement Unit)

Ziel des PMU-Moduls (Parametric Measurement Unit) ist die Erzeugung und Messung von Spannungen und Strömen. Als Vier-Quadranten-Quelle kann dieses Modul auch als elektronische Last eingesetzt werden.

Das Modul beinhaltet vier SOMs mit PMU-ICs. Einer dieser PMU-Kanäle ermöglicht die Erzeugung von Spannungen und Strömen mit optionaler Begrenzung der kompletären Größe. Die Messung der Spannungen und Ströme wird durch integrierte Messverstärker und ADC realisiert. Weitere Eigenschaften dieser SOMs sind:

- Spannung
 - . Bereich = -11 V bis $+11\text{ V}$
 - . DAC – Genauigkeit 16 BIT & $\pm 10\text{ mV}$
 - . ADC – 24-Bit Auflösung ($\pm 10\text{ }\mu\text{V}$)
- Strom
 - . 5 selektierbare Strombereiche ($\pm 5\text{ }\mu\text{A}$ bis $\pm 50\text{ mA}$)
 - . Bereich = -50 mA bis $+50\text{ mA}$
 - . Genauigkeit je nach Strombereich
 $\pm 2,5\text{ nA}$ ($5\text{ }\mu\text{A}$ -Bereich) bis $\pm 0,5\text{ mA}$ (50 mA Bereich)
- Kanäle konfigurierbar als Vier-Quadranten-Quellen und -Senken mit Möglichkeiten zur Begrenzung von Strom und Spannung

Insgesamt beinhaltet ein PMU-Modul 16 Kanäle, welche individuell nach den genannten Eigenschaften konfiguriert werden können. Dieses AMS-ASIC-Scope-Modul eignet sich somit hervorragend als Analog-Baustein, um Quellen oder Senken aus der Simulationsumgebung auf reale IC-Tests anzuwenden.

Die Messung der Stromaufnahme eines digitalen Schaltkreises stellt sich häufig als große Herausforderung heraus, weil verschiedene Betriebsmodi meist sehr große Unterschiede in der Leistungsaufnahme darstellen. Je nach Art eines Schaltkreises ist es auch nur selten möglich, ICs in statische Betriebszustände mit zeitlich konstanter Leistungsaufnahme zu versetzen.

Ziel des Power-Supply-Moduls ist es, diese Herausforderungen zu lösen, indem über einem sehr großem Messbereich der zeitliche Verlauf der Stromaufnahme eines Messobjektes gemessen wird. Dabei darf jedoch die Betriebsspannung des Messobjektes nicht durch die Strommessung beeinflusst werden. Es soll mit diesem Modul möglich sein, die Stromaufnahme von Schaltkreisen bei verschiedenen Zuständen aufzunehmen und zu digitalisieren.

Es wurden für dieses Modul zwei verschiedene Verfahren für Strom-Spannungswandlung erforscht und charakterisiert. Dadurch entstanden zwei Analog-Messadapter mit verschiedenen Verfahren zur messtechnischen Verstärkung des Stroms:

Eine logarithmischer Messverstärker ermöglicht die Digitalisierung der Stromaufnahme mit sehr hoher Dynamik ohne den Bedarf für eine Bereichsumschaltung. Artefakte durch Umschaltzeiten zwischen Messbereichen können somit gänzlich vermieden werden, denn bei der logarithmischen Verstärkung mit anschließender Digitalisierung wird keine Bereichsumschaltung benötigt.

Eine lineare Wandlung mit mehreren Messbereichen vermeidet zusätzliche Ungenauigkeiten, welche durch nichtlineare Effekte auftreten. Jedoch müssen immer alle Bereiche digitalisiert werden, da erst nach der Digitalwandlung der valide Messbereich der Strommessung erfolgt. Eine Umschaltung der analogen Messbereiche ist auch in diesem Schaltungskonzept nicht notwendig.

Das Modul erlaubt mit der erstellten Messverstärkung einen Messbereich von 10 nA bis 10 mA bei einer Abtastrate von bis zu 10 MS/s. Die verschiedenen Messeinschübe können sehr nah am Testobjekt platziert werden, um Störeinflüsse zu verringern.

Abbildung 7:



Power Supply
Module.

Foto: IMMS.

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

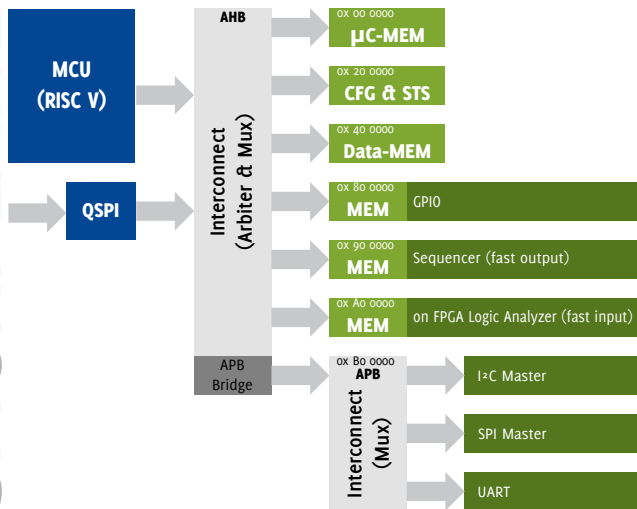


Abbildung 8:
FPGA-Struktur.
Grafik: IMMS.

FPGA-Konzept

Ein einheitliches FPGA-Design mit modularem Aufbau soll die verschiedenen Module auf Ebene der Hardwarebeschreibungssprache vereinen. Das implementierte Design weist Ähnlichkeiten zu einem Microcontroller-Design auf und implementiert auf gleiche Weise einen adressbasiertes Bus-System (AHB = Advanced High-performance Bus).

Auf der Master-Seite des Bus-Systems befindet sich ein Microcontroller-Kern und ein Protokollwandler für externen Zugriff vom Main-Module des AMS ASIC Scope. Diese Bus-Master haben Zugriff auf Speicher-Bereiche, Konfigurationsregister und weitere modulspezifische Komponenten.

Der Protokollwandler ist ein QSPI-Slave-auf-AHB-Master-Konverter. Dieser erlaubt einen direkten Bus-Zugriff auf Slave-Komponenten des AHB. Es können darüber beispielsweise der Programmspeicher für den Microcontroller oder Messabläufe und -ergebnisse übertragen werden.

Der Microcontroller erhält seine Programmierung über einen definierten Speicherbereich, welcher vom AHB zugänglich ist. Er kann durch Registerzugriffe auf andere-Slave Komponenten dessen Funktionen bedienen und führt auf diese Weise einen Messablauf durch, welcher dem Modul zugewiesen wurde.

Als Bus-Slave-Komponenten gibt es neben den vordefinierten Speicherbereichen folgende Bausteine:

- GPIO-Register
 - . direkte Kontrolle von GPIO-Pins (General Purpose Input / Output)
 - . Ansteuerung von Parallel-Interfaces
- serielle Kommunikationsprotokolle (SPI, UART, I²C, ...)
- Sequenzer für schnelle GPIO-Interaktionen
- Timer zur Synchronisation durch Signalisierung von Hauptmodul
- Logic Analyzer für ein schnelles Logging von digitaler Inputs

Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt KI-EDA wurde ein neuartiges und modulares Testsystem entwickelt, das zukünftig die Entwicklung neuer ASICs unterstützen wird, indem Simulationen und Tests aus der Designumgebung auch auf realen Schaltkreisen angewandt werden. Die entwickelte Hardware implementiert dieses Konzept durch ein Modulsystem mit einem Main-Modul zur Ansteuerung verschiedener modularer Einzelkarten für einzelne spezifische Aufgaben. Deren Kombination ergeben ein Setup, das für die jeweilige Anwendung speziell zugeschnitten ist. Damit werden die Anforderungen an Tests erfüllt und es ermöglicht die Abdeckung der meisten Testfälle am echten Schaltkreis durch:

- Erzeugung und Aufnahme digitaler Signale
- digitale Kommunikation über serielle Bussysteme
- analoge Spannungsversorgung mit Messung des Versorgungsstroms (bis 10 mA bei 10 MS/s)
- Vier-Quadranten Quellen mit bis zu ± 10 V und ± 50 mA mit Messung von Strom und Spannung

Im Laufe des Projektes KI-EDA wurde die gesamte Hardware des AMS ASIC Scope konzipiert, entwickelt und aufgebaut. Außerdem wurde ein modulares Hardwaredesign für die Logik-Komponenten der Module (FPGAs) erstellt. Die Weiterentwicklung des AMS ASIC Scope im Folgeprojekt HoLoDEC wird die Software-Implementierung beinhalten, um das Ziel „Die Testbench, aber in Hardware“ zu verwirklichen.

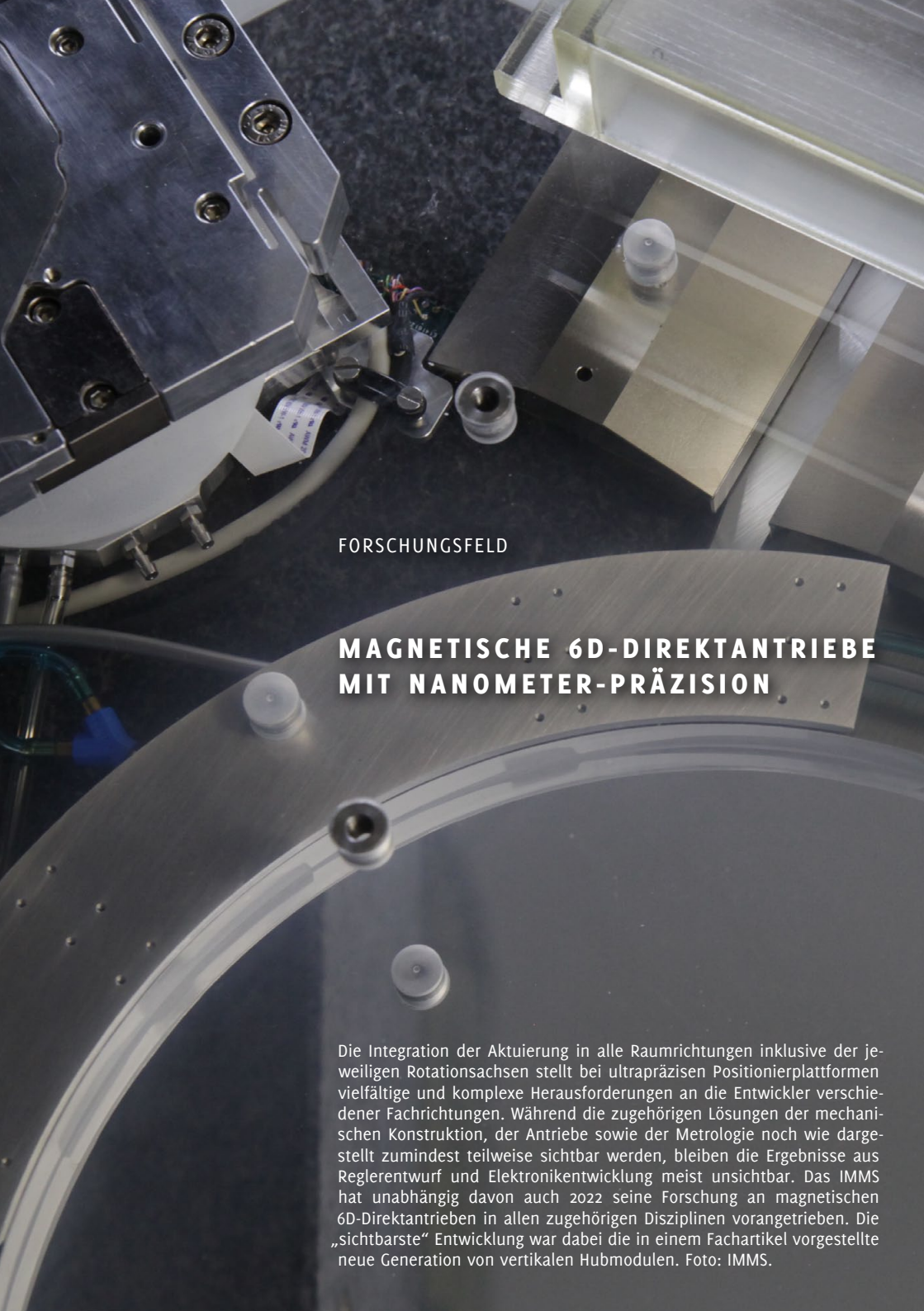
Kontakt: Tom Reinhold, M.Sc., tom.reinhold@imms.de

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



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FORSCHUNGSFELD

MAGNETISCHE 6D-DIREKTANTRIEBE MIT NANOMETER-PRÄZISION

Die Integration der Aktuierung in alle Raumrichtungen inklusive der jeweiligen Rotationsachsen stellt bei ultrapräzisen Positionierplattformen vielfältige und komplexe Herausforderungen an die Entwickler verschiedener Fachrichtungen. Während die zugehörigen Lösungen der mechanischen Konstruktion, der Antriebe sowie der Metrologie noch wie dargestellt zumindest teilweise sichtbar werden, bleiben die Ergebnisse aus Reglerentwurf und Elektronikentwicklung meist unsichtbar. Das IMMS hat unabhängig davon auch 2022 seine Forschung an magnetischen 6D-Direktantrieben in allen zugehörigen Disziplinen vorangetrieben. Die „sichtbarste“ Entwicklung war dabei die in einem Fachartikel vorgestellte neue Generation von vertikalen Hubmodulen. Foto: IMMS.

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

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

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

Highlight 2022 im Forschungsfeld

Magnetische 6D-Direktantriebe mit Nanometer-Präzision

PTB und IMMS erhalten iENA-Bronzemedaille für neue Dichtungsanordnung zur präziseren Wegmessung in Hightech-Anwendungen

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

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und das IMMS wurden am 17.05.2022 für ihre Entwicklung „Dichtungsanordnung für eine teilweise im Vakuum angeordnete Interferometerstrecke“ mit einer Bronzemedaille im Wettbewerb der Er-findermesse iENA zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON – Landespa-tentzentrum Thüringen an der Technischen Universität Ilmenau geehrt. Auf der iENA wurden über 350 Erfindungen aus 17 Ländern bereits vom 04. – 07.11.2021 vorgestellt. Pandemiebedingt schuf das PATON, das die Arbeit auf der iENA präsentiert und in den Wettbewerb eingebracht hatte, den Erfinderinnen und Erfindern im Mai dieses Jahres den feierlichen Rahmen für die persönlichen Auszeichnungen und die Vorstel-



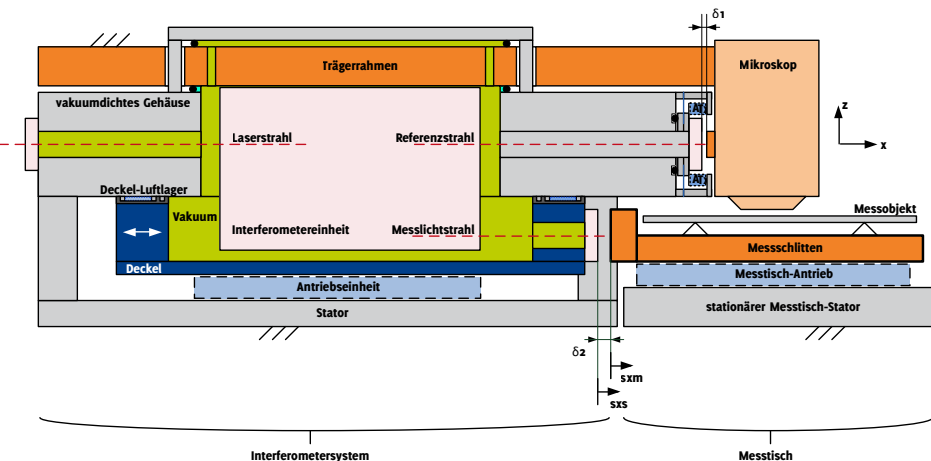
Dr. Jens Flügge (links), PTB, und Steffen Hesse (rechts), IMMS, wurden im Wettbewerb der Erfindermesse iENA mit einer Bronzemedaille für die neue Dichtungsanordnung zur präziseren Wegmessung in Hightech-Anwendungen geehrt. Foto: IMMS.

lung ihrer Beiträge. Dr. Jens Flügge, Leiter des Fachbereiches „Dimensionelle Nanometrologie“ an der PTB, und Steffen Hesse, Spezialist für Präzisionsantriebssysteme am IMMS, präsentierten stellvertretend für das Erfinderteam ihre Lösung. Diese trägt dazu bei, dass sich künftig nanometergenau zu bearbeitende Hightech-Produkte einfacher herstellen lassen, wie z.B. in der Halbleiterfertigung. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen lässt sich mit der Erfindung der eigentliche Produktionsprozess bei gleichzeitig höherer Messgenauigkeit aus dem Vakuum heraushalten.

www.imms.de/nmdrives

Bedarf an Präzisionsmaschinen wächst

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. Ein Beispiel dafür sind Belichtungsmasken, mit denen in der Halbleiterfertigung nanometergenaue Strukturen für Mikroelektronik-Chips realisiert werden.



Vereinfachte Schnittansicht des Interferometersystems mit einer beispielhaften Ausführungsform einer Dichtungsanordnung sowie einem angekoppelten Messtisch. Grafik: IMMS.

Interferometer ermöglichen hochpräzise Messungen, müssen aber im Vakuum arbeiten

Für Präzisionsmessungen an diesen Objekten, insbesondere auch für Längenmessungen im Nanometerbereich, werden Interferometer eingesetzt. Für die Messung werden Interferenzen detektiert, die bei der Überlagerung von Lichtwellen auftreten. Bei hohen Präzisionsanforderungen wirken sich bereits minimale Änderungen des Brechungsindex in Luft aufgrund von Temperatur, Druck und Feuchte negativ aus. Um diese dominierende Fehlerquelle zu vermeiden, ist eine Anordnung der Interferometer im Vakuum von Vorteil. Viele Messobjekte und Prozesse sind jedoch für den Einsatz im Vakuum nur begrenzt geeignet. Daher werden seit langem Interferometer eingesetzt, deren Strahlengang weitgehend im Vakuum verläuft und dazu von einem Metallbalg gekapselt ist.

Neue Dichtungsanordnung trennt Vakuum fürs Interferometer vom Antrieb und ermöglicht präzisere Messungen

Die von IMMS und PTB entwickelte alternative Dichtungsanordnung bietet ein Interferometergehäuse mit einem luftgelagerten Deckel. „Durch Absaugkanäle und Dichtspalte konnten wir das Vakuum im Deckel berührungsfrei abdichten“, erklärt Steffen Hesse vom IMMS. Deckel und Gehäuse sind dadurch reibungsfrei zueinander verschiebbar – und das nicht nur in Messrichtung, sondern auch quer dazu.

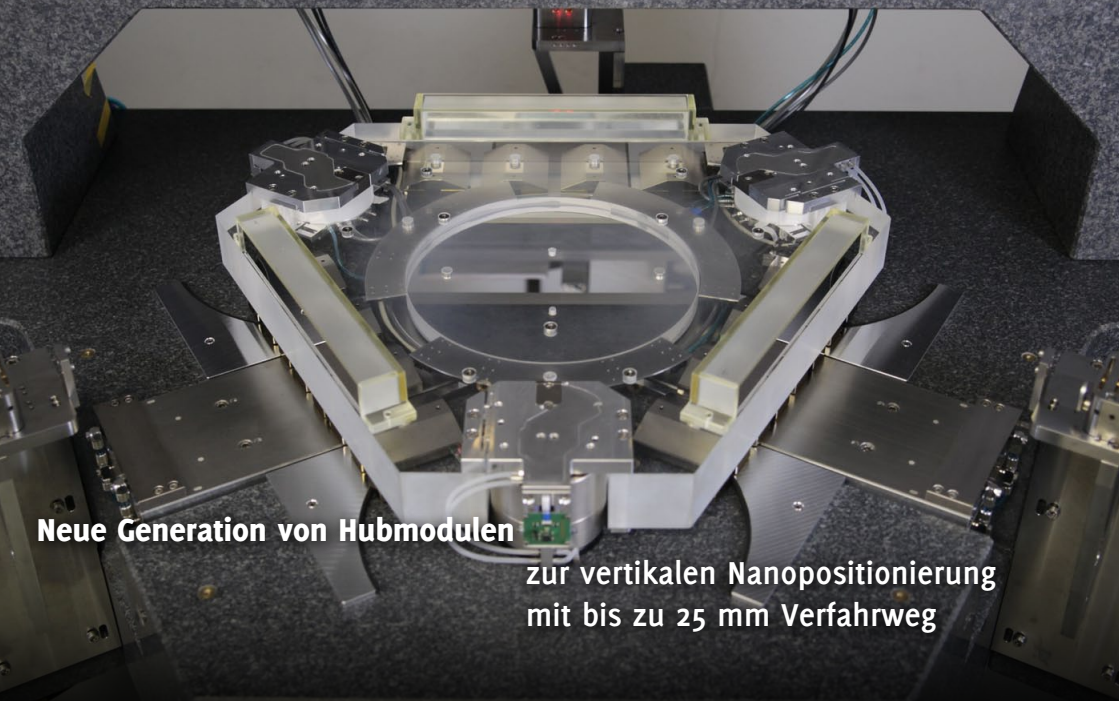
www.imms.de/nmdrives

„Auf diese Weise kann der Deckel, der den Messstrahl einkapselt, der Bewegung des Messobjekts sehr genau nachgeführt werden, was für eine hochgenaue Erfassung der Messobjekt-Position unbedingt erforderlich ist. Die neuartige Dichtungsanordnung reduziert so wie die herkömmliche Balg-Lösung die Messunsicherheit eines interferometrischen Messsystems, ohne auch das Antriebssystem mit dem zu bewegenden Objekt im Vakuum betreiben zu müssen. Im Vergleich zu den bekannten Lösungen können auch andere störende Einflüsse auf das Messergebnis erheblich reduziert werden. „Hierzu trägt auch die vollständig differentiell ausgelegte Interferometeroptik bei“, so Dr. Jens Flügge von der PTB. „Wir haben durch die Interferometeranordnung zusätzlich die Abmessungen der Koppelung zwischen Messobjekt, Sensorik und Interferometer verkürzt, was die Empfindlichkeit gegen Variationen der Umgebungsbedingungen wie Schwingungen und Temperatur verringert. Durch die geschickte Aufnahme der durch das Vakuum entstehenden Kräfte vermeiden wir unerwünschte Verformungen der Optik und des Metrologierahmens, die die Messungen verfälschen könnten.“ Das System kann problemlos auch in zweidimensionalen Anwendungen genutzt werden. Ein auf das Design angepasstes, vollständig differentielles Interferometer mit unter 10 Pikometer Rauschen und Nichtlinearitäten wurde erfolgreich in Betrieb genommen.

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

Deutsches Patent: DE 10 2019 117 636 B3, **Patentanmelder/-inhaber:** IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH); Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), **Erfinder:** Steffen Hesse, Michael Katzschmann, Hans-Ulrich Mohr, Dr. Christoph Schäffel (IMMS); Dr. Jens Flügge (PTB)

www.imms.de/patent



Neue Generation von Hubmodulen

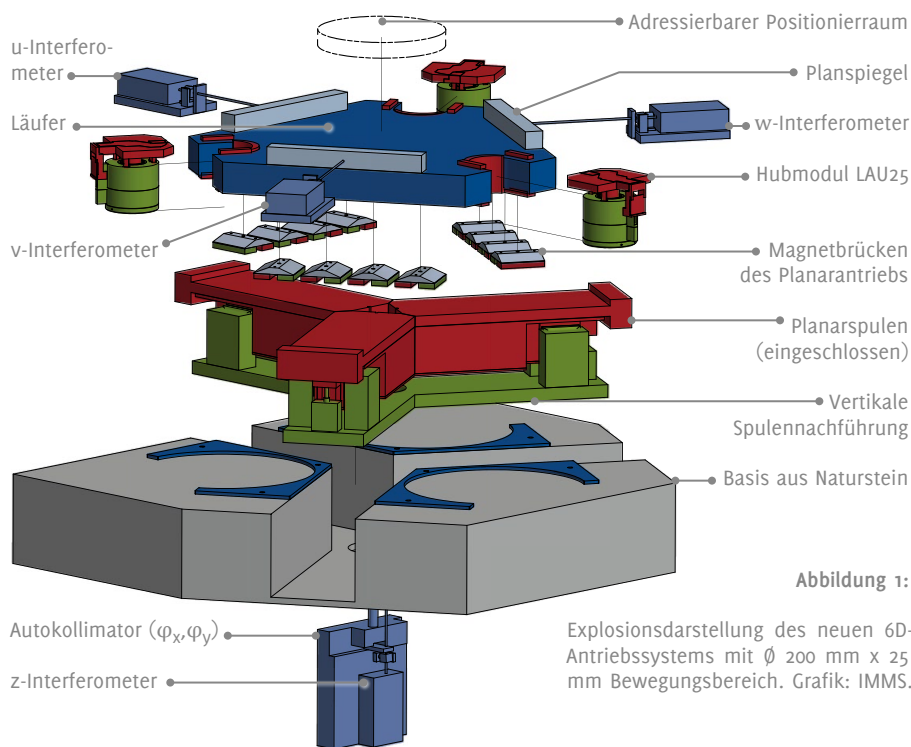
zur vertikalen Nanopositionierung
mit bis zu 25 mm Verfahrweg

Am IMMS wurden neue Hubmodule für jeweils bis zu 15 kg Tragfähigkeit und 25 mm Hub entwickelt und als vertikale Nanopositionierer in ein 6D-Antriebssystem integriert, die ein praktisch leistungsloses Tragen der Nutzlast mit einer Nanometer-Positionierfähigkeit kombinieren. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Für Positioniersysteme mit Nanometer-Positioniergenauigkeit gibt es in den letzten Jahren eine stetig wachsende Zahl von Anwendungen. In der Halbleiterfertigung und vielen damit verbundenen Hochtechnologiebereichen wird mittlerweile eine Positionierauflösung im Sub-Nanometerbereich angestrebt. Aber auch in der Präzisionsfertigung mechanischer Komponenten, der Optikinspektion oder bei der Qualifizierung von Sensorsystemen verschieben sich die Anforderungen von einigen zehn Nanometern zunehmend in den unteren Nanometerbereich. Gegenüber der lateralen Bewegung des Objekts nimmt dabei die Vertikalpositionierung noch einmal eine besondere Rolle ein, da hier die mitunter beachtliche bewegte Masse permanent, jedoch möglichst ohne Wärmeemission zu tragen ist. Am IMMS wurden neue Hubmodule für jeweils bis zu 15 kg Tragfähigkeit und 25 mm Hub entwickelt und als vertikale Nanopositionierer in ein 6D-Antriebssystem integriert, die ein praktisch leistungsloses Tragen der Nutzlast mit einer Nanometer-Positionierfähigkeit kombinieren.

[www.imms.de/
k4pnz](http://www.imms.de/k4pnz)



6D-Direktantrieb für noch größere Stellbereiche

In aktuellen Forschungsarbeiten realisiert das IMMS ein neuartiges Nanopositioniersystem mit einem gegenüber früheren Antrieben drastisch vergrößertem Arbeitsbereich. Der planare Bewegungsbereich wächst auf Ø 200 mm, während der verfügbare vertikale Hub von ehemals 10 auf 25 mm ansteigt. Damit entsteht ein 6D-Antriebssystem, welches noch größere Objekte, wie beispielsweise Wafer, Masken oder Optiklinsen, als Teil einer Fabrikations- oder Inspektionsanwendung in den drei Raumachsen und der jeweiligen Rotation um diese Achsen hochpräzise im Raum positionieren kann.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen das realisierte Nanopositioniersystem: Das bewegte Objekt, der Läufer, ist ein großer zentraler Körper aus Quarzglas mit seitlichen Spiegelflächen. Die Position des Läufers wird in allen 6 Freiheitsgraden über Laserinterferometer und Autokollimatoren kontaktlos und nanometergenau gemessen. Läuferunterseitig sind Dauermagnete montiert, auf welche durch Planarspulen die horizontalen Antriebskräfte aufgebracht werden können. Durch eine sternförmige Anordnung dieser Antriebseinheiten kann der Läufer kontaktlos und feldgeführt in

www.imms.de/inpos

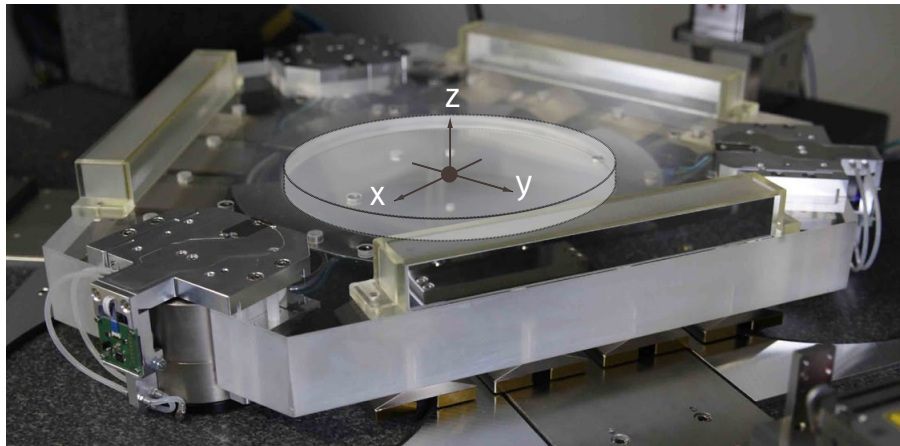


Abbildung 2: Foto des aufgebauten Antriebssystems; der adressierbare Positionierraum ist entsprechend markiert. Foto: IMMS.

der xy-Ebene positioniert werden. Für die vertikale Positionierung in z-Richtung wurde eine neue Generation von Hubmodulen entwickelt, welche an den drei Eckpunkten des Läufers platziert sind und dort jeweils die reibungsfreie planare Führung des Läufers und gleichzeitig auch seine feinfühlig vertikale Verstellung ermöglichen. Auf diese Weise werden die z-Position und die Winkellage des Läufers hochpräzise durch die drei Hubmodule eingestellt. Bei großem vertikalem Hub werden zudem die planaren Antriebsspulen der Läuferbewegung nachgeführt, um deren Effizienz über den gesamten Hub durch Konstanthalten des Luftspaltes beizubehalten. Neben dem integrierten planaren Antriebssystem stellen die eigens entwickelten Hubmodule die funktionellen Kernkomponenten dieses 6D-Antriebskonzeptes dar. Die Integration mehrerer Funktionen (Tragen, Führen, Antreiben, Messen) in eine hochintegrierte und kompakte Bauform ermöglicht den Schritt vom planaren System (3D) zu einer geregelten 6D-Positionierung des Läufers.

Neue Hubmodule für mehr Last und mehr Hub

Das Entwurfs-Know-how für die neue Generation der Hubmodule basiert auf der langjährigen Forschungstätigkeit des IMMS auf diesem Gebiet und einem daraus entstandenen Entwicklungsleitfaden. Dieser ermöglicht einen schnellen und zielgerichteten Entwurf der Positioniermodule für neue Hub- und Lastspezifikationen und geänderte Randbedingungen. Für das vorliegende Konzept verteilen sich die Läufermasse von ca. 40 kg und die Nutzlast von 5 kg auf alle drei Hubmodule in etwa gleich, sodass jedes mit ca. 150 N belastet wird. Einhergehend mit der gestiegenen Last und dem größeren Hub steht gegenüber früheren Anwendungen auch ein größerer Bauraum (ca. $\varnothing 85$ mm x 90 mm) zur Verfügung. Dies erlaubt eine bessere

www.imms.de/
nm drives

Anpassung der enthaltenen Aktorelemente an die Lastsituation und eine bessere Integration der anderen Funktionskomponenten.

Kernelemente eines jeden Hubmoduls sind die zwei parallel arbeitenden Aktoren: Ein pneumatischer Zylinder kompensiert primär und quasistatisch die Gewichtskraft und ein elektromagnetischer Aktor erzeugt die präzisen und dynamischen Stellkräfte zur Positionierung. Der Pneumatik-Aktor sitzt dabei konzentrisch im Inneren des elektromagnetischen Aktors. Dadurch liegen beide Aktorkräfte auf derselben Wirkachse und eine äußerst kompakte Bauform wird ermöglicht.

Im ersten Schritt des neuen Entwurfs wird die pneumatische Gewichtskraftkompensation an die zu tragende Last angepasst und die reibungsfreie Vertikalführung konstruktiv darin integriert. Die Auslegung und Fertigung der Luftlagerkomponenten erfolgt hier gemeinsam mit dem langjährigen Entwicklungspartner, dem Luftlager-spezialisten AeroLas. Der umliegende Bauraum wird durch einen Optimierungsalgorithmus und darin enthaltene Finite-Elemente-Magnetfeldsimulationen auf die Komponenten des elektromagnetischen Antriebs aufgeteilt. Ziel der Optimierung ist es, die Abwärme im Betrieb auf ein Minimum zu begrenzen, um thermische Störungen der Maschinenmetrologie gering zu halten. Das Ergebnis der Simulationen in Abbildung 3 zeigt die finale Geometrie der Spule (Coil), der Eisenrückschlussteile (Fe) und der Dauermagnete (M). Diese Dimensionierung führt dazu, dass die Magnetfeldlinien den Bewegungsbereich der Spule (weißer Rahmen) sehr gleichmäßig durchdringen.

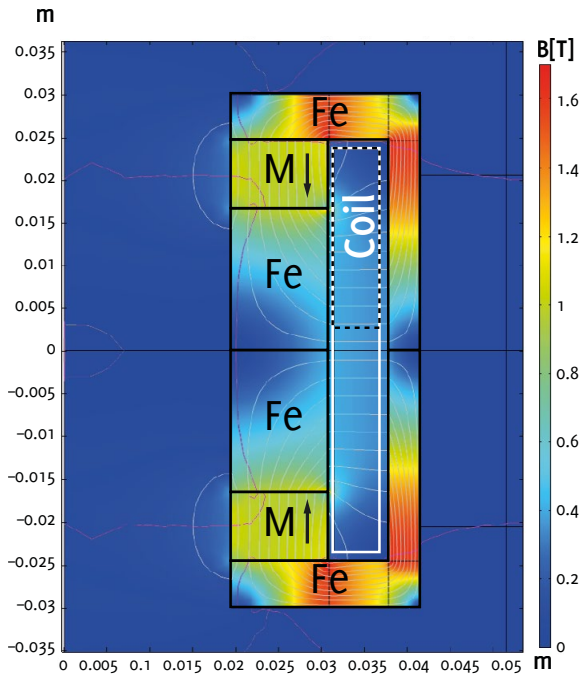


Abbildung 3:

Magnetische Feldsimulation (M: Magnet, Fe: Eisenrückschluss, weißer Rahmen: Bewegungsbereich der Spule, Coil: Spule beispielhaft am oberen Ende des Bewegungsbereichs)

Diagramm: IMMS.

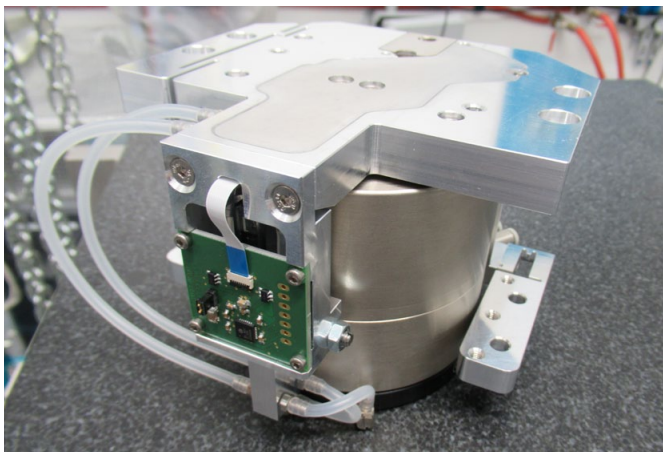


Abbildung 4:

Fertig montiertes
Hubmodul für 25
mm Hub und 15 kg
Traglast.

Foto: IMMS.

Neben der pneumatischen und elektromagnetischen Auslegung werden im Zuge der Konstruktion die elektrischen und pneumatischen Zu- und Ableitungen weitgehend in das Innere der Mechanik verlegt und auf eine einzige Schnittstelle zusammengeführt. Bei der Montage der Hubmodule am Läufer werden über diese universelle Schnittstelle sämtliche benötigten Versorgungsleitungen verbunden.

Implementierung und Validierung der Hubmodule als vertikale Nanopositionierer

Am Läufer montiert und in die Steuerungsperipherie implementiert sind die drei Hubmodule in der Lage, den Läufer vertikal (z-Richtung) und in den zwei Kippachsen (r_x , r_y) zu positionieren. Abbildung 5 zeigt die ersten Ergebnisse für die Regelabweichung bei konstanter Sollposition (links) wie auch während des Abfahrens einer in z-Richtung ansteigenden Soll-Trajektorie (rechts).

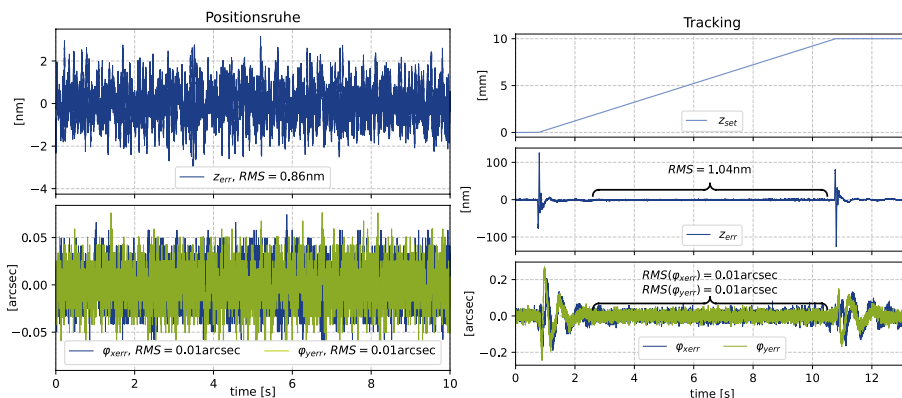


Abbildung 5: Messergebnisse für den vertikal geregelten Betrieb mit drei Hubmodulen am Läufer. links: Regelabweichung der Vertikalposition (z_{err}) und zwei Kippwinkel (φ_{xerr} , φ_{yerr}) bei konstantem Sollwert; rechts: Soll-Trajektorie und zugehörige Regelabweichungen beim Abfahren einer Trajektorie. Diagramme: IMMS.

Während des Stillstands an einer Sollposition sind die Regelabweichungen der Vertikalposition (z_{err}) und der Kippwinkel ($\varphi_{x\text{err}}, \varphi_{y\text{err}}$) sehr gering. Der quadratische Mittelwert (RMS) dieser Fehlersignale liegt bei nur 0,86 nm bzw. 0,01 Bogensekunden. Während der Vertikalbewegung von 0 bis 10 mm mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 5 rechts) steigt der RMS-Wert der z-Regelabweichung nur marginal auf 1,04 nm an. Lediglich in Beschleunigungs- und Bremsphasen treten nennenswerte Abweichungen von der Solltrajektorie auf, welche in der derzeitigen Konfiguration kleiner als 150 nm sind und durch zusätzliche regelungstechnische Maßnahmen (Vorsteuerung, Ruckbegrenzung, etc.) weiter reduziert werden können.

Fortschreitende Entwicklung hin zu einem 6D-Nanopositioniersystem

Auf Antrieb konnte mit den neu entwickelten Vertikalantrieben eine Positionskontrolle auf Nanometer-Level erreicht werden. Dies bestätigt den gewählten Design-Ansatz und die Eignung der gefundenen integrierten Lösung als kombiniertes Antriebs- und Führungselement zur vertikalen Nanopositionierung. Gleichzeitig wurde mit diesen Arbeiten auch der Entwicklungsleitfaden zur Auslegung und Optimierung derartiger Vertikalaktoren weiter ausgebaut, verfeinert und um eine erfolgreich realisierte Designvariante für 25 mm Hub ergänzt.

Die Hubmodule und die bereits damit erzielten Teilergebnisse sind somit ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg zur Inbetriebnahme des in 6D geregelten Gesamtsystems.

Ein solches 6D-Nanopositioniersystem stellt mit dem großen planaren und vertikalen Verfahrensbereich somit eine ausgezeichnete Basis für die Implementierung von High-Tech-Antast- oder Manipulationssystemen, wie beispielsweise Atomkraftmikroskopie, dar und eröffnet ganz neue Einsatzszenarien für derartige High-Tech-Applikationen.

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

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

Kontakt: Dr.-Ing. Ludwig Herzog, ludwig.herzog@imms.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Projekt K4PNP+Z wurde unter dem Kennzeichen ZF4085714J09 gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

[www.imms.de/
k4npz](http://www.imms.de/k4npz)



Dienstleistungen

**Für Forschung
und Entwicklung**

Idee / Konzept

Entwurf / Entwicklung

Charakterisierung / Test

Fertigungsüberleitung

Berücksichtigung von Industrienormen und Qualifizierung

Risiko- und Qualitätsmanagement

Das IMMS unterstützt seine Partner bei der Entwicklung von der Idee bis zur Serienreife. Das Bild zeigt ein Beispiel für eins der am IMMS entwickelten und bis zur Serie begleiteten eingebetteten Systeme: die intelligente Strommesszange EMCheck® ISMZ I. Foto: IMMS.

Wir begleiten unsere Kunden bei ihrem gesamten Forschungs- und Entwicklungsprozess von der Idee über den Entwurf von Bauelementen und Baugruppen bis hin zum eingebetteten System einschließlich Systemintegration, Prototypenbau und Überführung zur Serienreife sowie Fertigungsüberleitung. Wir unterstützen unsere Kunden vom Konzept bis zur Serie mit einem Komplettangebot oder mit Teilleistungen für

- Integrierte Schaltungen: www.imms.de/asic
- IC-Entwurfsmethoden: www.imms.de/eda
- Test und Charakterisierung: www.imms.de/test
- Entwicklung eingebetteter Systeme: www.imms.de/embedded
- Entwicklung mechatronischer Systeme: www.imms.de/mechatronics
- MEMS – Simulation, Design und Test: www.imms.de/mems
- FE-Modellierung und Simulation: www.imms.de/fem

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

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

Beispiel: Dienstleistungsangebot für MEMS – Simulation, Design und Test

Das Dienstleistungsangebot für mikroelektromechanische Systeme (MEMS) ist auf Simulation, Design und Test fokussiert. Wir entwickeln als Designhouse für die offene Technologieplattform XMB-10 von X-FAB in einem teilautomatisierten Entwurfsprozess Beschleunigungssensoren entsprechend der Kundenspezifikation. Beim Test von MEMS fokussieren wir uns auf die vibrometrische Untersuchung von Sensoren. Das umfasst einerseits Funktionaltests, z.B. von Resonatoren bis 1,2 GHz, sowie andererseits die indirekte Parameteridentifikation. Aus vibrometrischen Messdaten und FE-Parameterrechnungen lassen sich so u.a. Materialspannungen von balken- und membranbasierten Sensoren bestimmen. Wir unterstützen seit langem vor allem Forschungseinrichtungen im Bereich MEMS. Einen Teil der Forschungsergebnisse konnten wir in den letzten Jahren bereits erfolgreich in Produkte unserer Industriepartner transferieren.

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



Steffen Michael wurde für seine Erfindung „Mikroelektromechanischer Beschleunigungssensor“ mit einer Bronzemedaille im Wettbewerb der Erfindermesse iENA geehrt.

Foto: IMMS.

IMMS erhält iENA-Bronzemedaille für mikroelektromechanischen Beschleunigungssensor

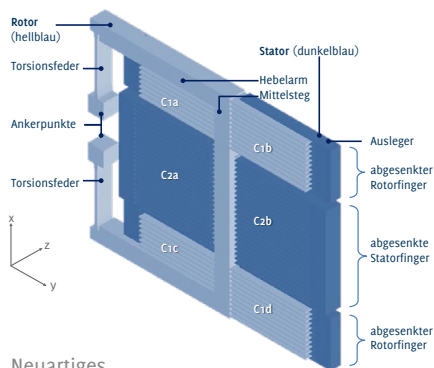
Das IMMS wurde am 29.11.2022 für die Entwicklung „Mikroelektromechanischer Beschleunigungssensor“ mit einer Bronzemedaille im Wettbewerb der Erfindermesse iENA zur Thüringer Auszeichnungsveranstaltung des PATON – Landespatentzentrum Thüringen an der Technischen Universität Ilmenau geehrt. Das PATON hatte Ende Oktober die Arbeit stellvertretend für den Erfinder Steffen Michael auf der iENA in Nürnberg präsentiert und in den Wettbewerb eingebracht.

Das neuartige Design dieses mikroelektromechanischen Beschleunigungssensors ist in Bezug auf Prozesstoleranzen optimiert und erreicht für die Prozessfamilie XMB10 von X-FAB eine hohe Sensitivität auf kleinster Fläche. Beides ermöglicht Produzenten z.B. aus dem Automobil- oder Kommunikationsbereich, die mit kostengünstigen Standardtechnologien herstellbaren MEMS-Sensoren in Chipgröße in ihre Systeme zu integrieren. Um Beschleunigungen mit miniaturisierter Messtechnik erfassen zu können, werden mikroelektromechanische Sensorsysteme (MEMS) eingesetzt. Das Patent ermöglicht das Design effizienter z-Beschleunigungssensoren in der XMB10-Technologie, mit denen Messungen von Beschleunigungen aus der Sensorebene heraus möglich werden.

Dazu werden Kammstrukturen genutzt, mit denen Beschleunigungen aus der Sensorebene heraus über ein kapazitives Messverfahren detektiert werden. Kapazitive MEMS-Beschleunigungssensoren bestehen aus Kammelektroden mit ineinandergreifenden Fingerstrukturen. Beschleunigungen werden durch die Verschiebung einer an einer Feder aufgehängten Rotor-Elektrode (seismische Masse) gegenüber einer Stator-Elektrode erfasst. Dabei tritt eine Kapazitätsänderung auf, die direkt oder differentiell elektronisch ausgewertet werden kann.

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

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

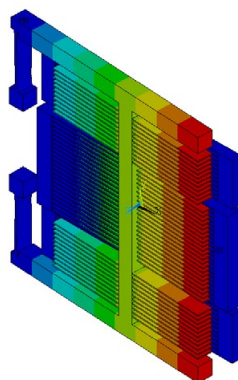


Neuartiges
Sensordesign des z-
Beschleunigungssensors. Grafik: IMMS.

```

EMSI = -210E-09
SMI = -543E-11
MSI = -210E-09
MSI = -543E-11
+1.65E-10
+5.48E-10
+6.64E-10
+9.03E-10
+1.14E-09
+1.38E-09
+1.62E-09
+1.86E-09
+2.10E-09
ANSYS 2020 R2
BUI118 20.2
ELECT NO. 1
INDIC. SCOUTCH
STEP=1
SUB =1
TIME=1
UD
POST=0
PowerGraphics
BPAZD=1
AVR2D-Mat.

```



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

Sie wird in der XMB10-Technologie für die Messung von Beschleunigungen vertikal zur Sensorebene über abgedünnte Fingerstrukturen für Rotor- und Statorfinger erreicht. Um eine hohe Sensitivität bei minimierter Fläche des Sensors zu erreichen, werden Torsionsfedern genutzt. Die Rotorelektrode besteht aus einem Rahmen mit zwei parallelen Hebelarmen und einem zwischen den Hebelarmen verlaufenden Mittelsteg. Die Hebelarme sind jeweils an einer von zwei Torsionsfedern aufgehängt. Der Mittelsteg verläuft parallel und mit Abstand zu den Torsionsfedern. In diesem Design wird die Kapazitätsänderung durch die Änderung der Fläche sich gegenüberliegender Elektroden erzielt.

Mit dem neuen Design werden Beschleunigungen aus der Sensorebene heraus mit einer hohen Sensitivität und auf einer kleinen Sensorfläche messbar. Gleichzeitig weist die Sensorebene selbst in x-y-Richtung eine hohe Steifigkeit und der Sensor eine geringe Fehleranfälligkeit auf. Durch die konstruktive Gestaltung lässt sich der Beschleunigungssensor mit kosteneffizienten MEMS-Technologien in hohen Stückzahlen fertigen. Zudem kann das Design mit weiteren Bauteilen oder Beschleunigungssensoren, z.B. zu einem 3D-Sensor, kombiniert werden.

Das Patent erlaubt unterschiedliche Sensorbauformen, die sich mit der gleichen MEMS-Technologie fertigen lassen. Somit kann z.B. die seismische Masse optimiert, die an den Torsionsfedern auftretenden Momente gleichmäßiger verteilt und parasitäre Einflüsse verringert werden. Ein auf das Design angepasstes System wurde erfolgreich in Betrieb genommen.

www.imms.de/
mms

www.imms.de/
patent

Deutsches Patent: DE 10 2020 119 371 B3, Patentanmelder/-inhaber: IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), Erfinder: Steffen Michael

Jahresbericht
© IMMS 2022

Vibrometrie für MEMS – Applikationsmöglichkeiten



Messplatz zur Erfassung von 3D-Schwingungen an MEMS. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) durchdringen als Sensoren seit mehreren Jahren in immer stärkerem Ausmaß viele Bereiche des täglichen Lebens. Sie sind beispielsweise im Automobil als Reifendrucksensoren oder Beschleunigungssensoren für Airbags und Navigationsgeräte ebenso zahlreich zu finden wie in Smartphones mit MEMS-basierten Mikrofonen und Beschleunigungssensoren.

www.imms.de/

mems

Solche Anwendungen werden in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Das damit korrespondierende hohe Wachstum im Sensormarkt geht dabei einher mit großem Kostendruck einerseits und hohen Qualitätsanforderungen andererseits an die analog zu Mikroelektronik-Chips auf Wafer-Ebene gefertigten MEMS. Deren Qualität wird in der Regel möglichst frühzeitig geprüft, um Ausschussraten von Baugruppen oder gar fertigen Systemen wie Smartphones zu minimieren.

Für Qualitätsprüfungen in der Sensorproduktion sind neben elektrischen Messverfahren zerstörungsfreie optische Messverfahren ein wichtiges Werkzeug. So lassen sich mit Mikroskop-basierten Verfahren z.B. laterale Abmessungen bestimmen und somit die Fertigungsprozesse evaluieren. Klassische optische Messverfahren erlauben es jedoch nicht, Materialparameter wie die Materialspannung oder lokale

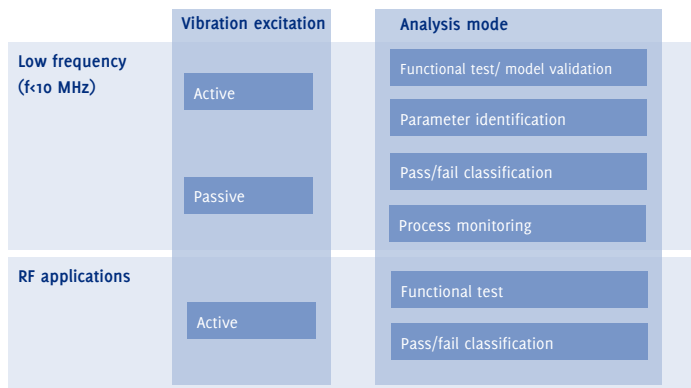


Abbildung 1:

Applikations-
möglichkeiten
der Vibrometrie.

Grafik: IMMS.

Inhomogenitäten wie innere Membranrisse unterhalb geschlossener Deckschichten zu erfassen. Die Vibrometrie misst berührungslos Eigenfrequenzen der MEMS-Strukturen, die in Schwingungen versetzt und dabei mit einem Laser untersucht werden. Die für jede MEMS-Struktur charakteristischen Frequenzen in ausgesendeten und reflektierten Laserstrahlen werden anhand des Dopplereffekts analysiert. Damit ist es möglich, Inhomogenitäten oder Materialspannungen durch die Auswertung der gemessenen Eigenfrequenzen zu bestimmen. Die kurze Messzeit von weniger als 0,1 s bei optimierten Test-Setups prädestiniert die Vibrometrie darüber hinaus auch aus Kostengründen für die Qualitätskontrolle in der Sensorproduktion über den gesamten Produktionszyklus von der Waferfertigung bis hin zu gepackagten Sensoren. Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der Vibrometrie auf dem Gebiet der MEMS zeigt Abbildung 1.

Das IMMS hat eine langjährige Expertise auf dem Gebiet der Vibrometrie und bietet Kunden mit dem vorhandenen Messequipment aus mehreren Vibrometern sowie halbautomatischen Probestations die Möglichkeit, vibrometrische Messungen sowohl begleitend zum Entwurfsprozess von Sensoren als auch für die Qualitätssicherung ganzer Wafer durchzuführen. Auch Finite-Elemente(FE)-Simulationen zur Parameteridentifikation und zur Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit interessierender Parameter von den Eigenfrequenzen können ebenfalls am IMMS durchgeführt werden.

Bei der Anwendung des vibrometrischen Messverfahrens sind drei Bereiche relevant:

- die Schwingungsanregung der oftmals passiven, d.h. ohne Funktionselemente zur Schwingungsanregung versehenen Sensorstrukturen,
- das applikationsspezifische Postprocessing der Messdaten des Vibrometers sowie

- das Prozessmonitoring der relevanten Sensorparameter über die verschiedenen Fertigungsschritte hinweg, einschließlich der Detektion von Prozessfehlern wie z.B. Membranrissen.

Im Folgenden wird auf diese drei Komponenten sowie die Applikationsmöglichkeiten ausführlicher eingegangen.

Anregung der Eigenfrequenzen

Voraussetzung für die vibrometrische Messung der Eigenfrequenzen ist deren Anregung. Während bei Sensoren wie Resonatoren oder Inertialsensoren die Schwingungsanregung aufgrund von Funktionselementen wie piezoelektrischen Schichten oder kapazitiven Kammstrukturen ein inhärentes Merkmal ist, besitzen eine Vielzahl von z.B. membranbasierten Sensoren keine Funktionselemente zum Erzeugen mechanischer Kräfte. Bei solchen passiven Sensoren muss die Schwingungsanregung extern erfolgen. Dazu existieren zwei unterschiedliche Verfahren. Zum einen lassen sich Schwingungen von Sensorstrukturen mittels eines Lasers thermisch anregen, zum anderen ist eine elektrostatische Anregung in einem Frequenzbereich bis zu 10 MHz möglich. Dazu wird eine an einen Hochvoltverstärker angeschlossene Elektrode in einem Abstand von wenigen Mikrometern über der Sensoroberfläche positioniert. Die mit Hinblick auf eine möglichst große elektrostatische Kraft flächige, auf einem Glasträger aufgebrachte Elektrode ist aus durchsichtigem Material (ITO – Indium Zinn Oxid), um den Strahlengang des Vibrometers nicht zu beeinträchtigen.

Applikationsmöglichkeiten der Vibrometrie

Offensichtliche Applikationen sind Funktionstests von Sensoren, bei denen Frequenzen Teil deren Funktionalität sind, z.B. Resonatoren. Darüber hinaus gibt es für die Vibrometrie eine Vielzahl weiterer Anwendungsmöglichkeiten.

Neben der Detektion von Fertigungsfehlern wie Membranrissen ist das vor allen Dingen die indirekte Identifikation von Geometrie- und Materialparametern über Mess- und Simulationsdaten. Mit einer Softwarelösung des IMMS lassen sich dabei aus Messwerten einerseits und Simulationsdaten andererseits automatisiert Materialparameter bestimmen.

Dass mithilfe der Vibrometrie Materialparameter bestimmt werden können, ist ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen kontaktlosen zerstörungsfreien Messverfahren. Ein weiterer Vorteil der Vibrometrie ist zudem, dass sie prozessbegleitend von der Waferfertigung bis hin zum Packaging zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden kann.

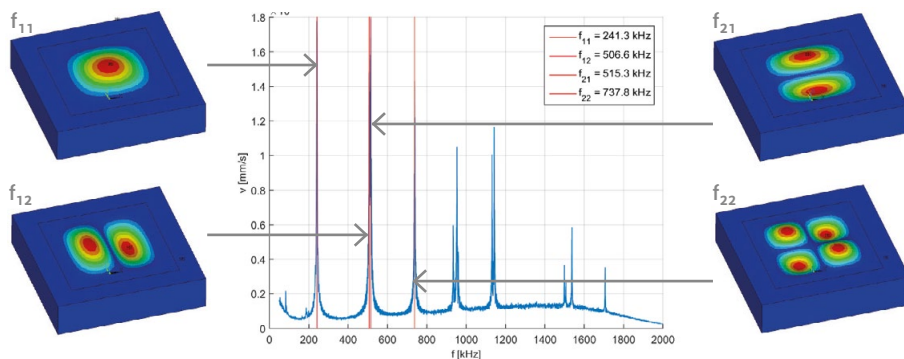


Abbildung 2: FRF mit gesplitteten Frequenzpeaks. Grafik: IMMS.

Gut-/schlecht-Klassifizierung

Eine einfache Möglichkeit der Anwendung ist die Klassifizierung von guten und schlechten Sensoren basierend auf einer „Lernphase“ mit guten und schlechten Referenzsensoren. Wenn sich die Eigenfrequenzen von funktionierenden und defekten Sensoren unterscheiden, kann aus der Messung von einer signifikanten Anzahl guter Referenzsensoren die Standardabweichung als Kriterium für die Gut-/schlecht-Klassifizierung in der Sensorproduktion bestimmt werden.

Nominell symmetrische Sensorstrukturen wie z.B. kreisförmige oder quadratische Membranen weisen eben aufgrund dieser Symmetrie eine Vielzahl von Eigenfrequenzpaaren auf, die bei einem gleichen Wert zueinander phasenverschoben sind. Bei Asymmetrien spalten sich diese Frequenzpaare auf. Solche aufgespaltenen Frequenzpaare lassen sich nutzen, um Defekte wie Membranrisse oder das Auftreten asymmetrischer Materialspannungen, wie sie z.B. infolge von Packaging-Prozessen auftreten können, zu detektieren.

Parameteridentifikation

Das Verfahren der indirekten Parameteridentifikation basiert einerseits auf der vibrometrischen Messung der Eigenfrequenzen sowie andererseits auf den Simulationsdaten einer Modalanalyse, um die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von den interessierenden Geometrie- und Materialparametern zu bestimmen. Mittels einer Optimierung werden dann aus den gemessenen Daten die Sensorparameter ermittelt.

Das Verfahren erlaubt je nach zu untersuchender Struktur die Identifikation von ein bis im Regelfall maximal drei Parametern. Aus der Anzahl der zu identifizierenden Parameter leitet sich dann dementsprechend die minimale Anzahl der zu messenden Eigenfrequenzen ab. Lassen sich mehr Eigenfrequenzen messen als notwendig, kann aus diesen ein geschätzter Identifikationsfehler (EIE) bestimmt werden.

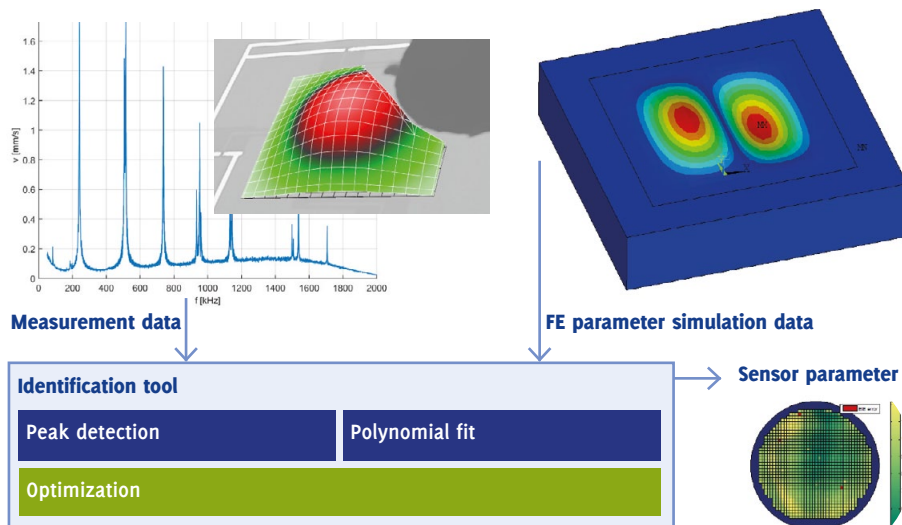
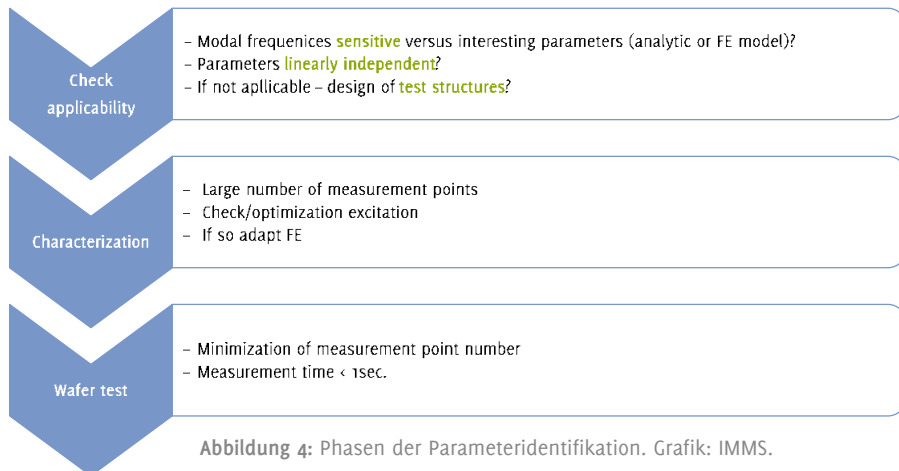


Abbildung 3: Struktur der Parameteridentifikation: Grafik: IMMS.

Aus der gemessenen Frequenzantwort lassen sich die Parameter Eigenfrequenzwert, -amplitude sowie Güte extrahieren, bei mehreren Messpunkten zudem die Eigenform. Für die Parameteridentifikation genutzt wird in jedem Fall der Eigenfrequenzwert. Wenn die Bestimmung des Innendrucks einer Kavität von Interesse ist, fließt zudem die Güte in die Parameteridentifikation ein. Die Modenformen werden insbesondere bei nahe beieinanderliegenden Frequenzen betrachtet, da hier der Einfluss von Materialspannungen zu einer veränderten Reihenfolge gegenüber der nominellen führen kann. Aus Frequenzwert, -güte und -form lassen sich alle interessierenden Parameter bestimmen. Für eine zusätzliche Betrachtung der Frequenzamplituden ergibt sich daher keine Notwendigkeit. Zudem wird eine aufwendige Berechnung der Schwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Anregung, insbesondere wenn diese extern erfolgt, vermieden.

Phasen der Identifikation

Das Verfahren der Parameteridentifikation lässt sich in drei Phasen unterteilen. Zunächst muss untersucht werden, ob mit dem Verfahren die gesuchten Parameter mit der geforderten Auflösung bestimmt werden können. Dementsprechend findet vor der Parameteridentifikation eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Eigenfrequenzen versus der interessierenden Parameter statt. Bei einfachen Strukturen bzw. für prinzipielle Untersuchungen können dabei analytische Formeln zum Einsatz kommen, bei komplexeren Strukturen sind FE-Programme geeignet für eine solche Sensitivitätsanalyse. Weist die zu untersuchende Struktur



nicht die gewünschte Empfindlichkeit auf, lassen sich die gewünschten Parameter ggf. mittels speziell designter Teststrukturen bestimmen.

Um den Sensor kennenzulernen, erfolgt in der Charakterisierungsphase die Frequenzmessung mittels eines dichten Netzes von Messpunkten. Dies geht einher mit der Auswahl geeigneter Frequenzmodi für die Identifikation sowie einer Validierung und ggf. Anpassung des FE-Modells. In der abschließenden dritten Phase erfolgt die Verfahrensoptimierung für den Einsatz in der Waferproduktion u.a. durch die Minimierung der Anzahl der Messpunkte mit Hinblick auf eine kurze Messzeit, die im Ergebnis im Regelfall deutlich kleiner als eine Sekunde ist.

Beispiel – Parameteridentifikation quadratischer Membranen

Beispiele für die Parameteridentifikation lassen sich gut anhand der Formel zur Berechnung von Eigenfrequenzen fest eingespannter quadratischer Membranen mit Materialspannung darstellen. Dabei ändern die gegenüber realen Sensoren vereinfachten Einspannbedingungen nichts an der prinzipiellen Aussage zu Parameterabhängigkeiten

$$f_{m,n} = \frac{1}{2a\sqrt{\rho}} \sqrt{(m^2 + n^2)\sigma + \frac{Eh^2(m^2 + n^2)^2\pi^2}{12a^2(1 - \nu^2)}}$$

mit dem Elastizitätsmodul E , der Dichte ρ , der Querkontraktionszahl ν , der Membrandicke h und -größe a sowie der intrinsischen Spannung σ . Relevant für die Möglichkeiten der Parameteridentifikation ist das Verhältnis vom Geometrie- zum Spannungsterm unter der Wurzel. Ist dieses Verhältnis sehr groß wie bei Drucksen-

soren, lässt sich z.B. die Membrandicke bei gegebener Membrangröße bestimmen. Bei sehr dünnen membranbasierten Sensoren wie Mikrofonen oder Thermopiles ist das Verhältnis umgekehrt. Durch den im Vergleich zum Geometrieterm sehr großen Spannungsterm ist das Verfahren prädestiniert für eine genaue Identifikation der Materialspannung.

Entwicklung von Teststrukturen

Für die Nutzung gemessener Eigenfrequenzen zur Bestimmung von Material- oder Geometrieparametern muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass die Eigenfrequenzen eine funktionale Abhängigkeit von den interessierenden Sensorparametern aufweisen. Sollen mehrere Parameter identifiziert werden, müssen diese zudem linear voneinander unabhängig sein. Sind diese Voraussetzungen bei den gegebenen Sensorstrukturen nicht erfüllt, besteht jedoch die Möglichkeit der Parameteridentifikation mittels speziell für die vibrometrische Messung designter Teststrukturen oder der kombinierten Auswertung von zwei unterschiedlichen Strukturen.

Ein Beispiel für linear abhängige Parameter sind die Dicke und Größe stressfreier quadratischer Membranstrukturen: Mittels der Eigenfrequenzwerte lässt sich nur das Verhältnis von Dicke zu Größe bestimmen, aber nicht die Werte selbst. Um eine Identifikation mehrerer Parameter handelt es sich de facto auch bei der nominellen Identifikation eines Parameters wie z.B. der Membrandicke, wenn die prozessbedingten Toleranzen der Modelleingangsgrößen wie z.B. bei der Membrangröße beim Kaliumhydroxid-Ätzen dazu führen, dass eine hinreichend genaue Bestimmung des interessierenden Parameters nicht mehr möglich ist. Ein Lösungsansatz zur Identifikation der Membrandicke ist hier die kombinierte Auswertung mehrerer quadratischer Teststrukturen unterschiedlicher Dimensionen. Durch die Messung der ersten drei Eigenfrequenzen von zwei unterschiedlich großen quadratischen Membranen lassen sich so Membrandicke und -größen bestimmen.

Die Identifikation von E-Modul und Materialspannung mittels balkenbasierter Strukturen ist ein weiteres Beispiel für den Lösungsansatz der kombinierten Auswertung von Messdaten unterschiedlicher Strukturen. Da sich in einem beidseitig eingespannten Balken E-Modul und Materialspannung nicht gleichzeitig mit hoher Genauigkeit identifizieren lassen, wird zunächst an einseitig eingespannten und damit per se spannungsfreien Strukturen wie einem Cantilever das E-Modul bestimmt und darauffolgend die Materialspannung im beidseitig eingespannten Balken.

Wie bei den Beispielen für die Parameteridentifikation bereits gezeigt, lassen sich Zugspannungen insbesondere bei sehr dünnen Membran- und Balkenstrukturen mit-

tels vibrometrischer Messungen hochgenau identifizieren. Bei Druckspannungen ist die Identifikation jedoch nur möglich, solange die Knickspannung noch nicht überschritten wurde, denn bei ausgeknickten Strukturen sind deren Eigenfrequenzen quasi konstant. Der Lösungsansatz, um bei solchen hohen Druckspannungen die Nutzung des Verfahrens trotzdem zu ermöglichen, ist das Design von Teststrukturen mit Segmenten, bei denen sich unter Nutzung von Relaxationsprozessen während des Freistellens eine Zugspannung einstellt. Ein Beispiel für eine solche Teststruktur ist ein Rhombus mit Mittelsteg. Der druckverspannten äußeren Schenkel des Rhombus führen zu einer Zugverspannung des Mittelstegs, der zur vibrometrischen Messung bzw. Identifikation der Materialspannung genutzt werden kann.

Zusammenfassung

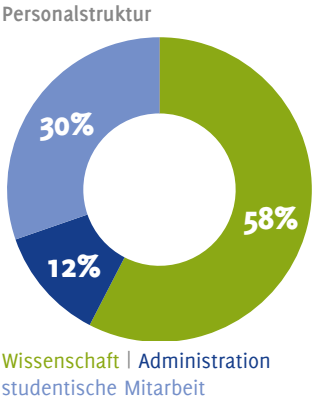
Das IMMS ermöglicht Kunden aufgrund seiner Expertise sowie der entwickelten Software-Tools die Anwendung der Vibrometrie auf dem Gebiet der MEMS. Das umfasst die Schwingungsanregung passiver MEMS durch ein devicespezifisches Setup sowie das „Übersetzen“ der gemessenen Frequenzantwort in für die Entwicklung und Prozessierung relevante Parameter wie die Materialspannung mittels Extraktion von Frequenzpeaks sowie anschließender Parameteridentifikation. Die entwickelten FE-Bibliotheksmodule erlauben darüber hinaus eine effiziente Modellierung membran- und balkenbasierter Membranstrukturen für den Entwurf von verfahrensspezifischen Teststrukturen zur Identifikation von Geometrie- und Materialparametern.

Kontakt: Dipl.-Ing. Steffen Michael, steffen.michael@imms.de

ZAHLEN, STRUKTUREN UND BELEGE

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

Zum Ende des Geschäftsjahres 2022 waren am IMMS 99 **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** verschiedenster Nationalitäten und Fachrichtungen tätig. Hiervon waren 57 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und 30 Studentinnen und Studenten in der Forschung und Entwicklung beschäftigt. Dies entspricht einem Anteil von rd. 88 % aller Beschäftigten. Darüber hinaus waren 4 von 12 der Administration zugeordneten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter direkt wissenschaftsunterstützend eingesetzt.



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

Im Rahmen der Ausbildung in praxisorientierter Forschung wurden im Verlauf des Geschäftsjahres 2022 am IMMS insgesamt 56 Studentinnen und Studenten betreut, darunter 8 Bachelorarbeiten und 7 Masterarbeiten, und 6 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren als Doktoranden an einer Universität eingeschrieben.

Trotz des spürbar zunehmenden Wettbewerbs um die hervorragenden Köpfe ist es gelungen, im Jahr 2022 noch weitere Forscherinnen und Forscher für die Mitarbeit am IMMS zu gewinnen, jedoch konnte der geplante Bedarf an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern nicht vollständig gedeckt werden.

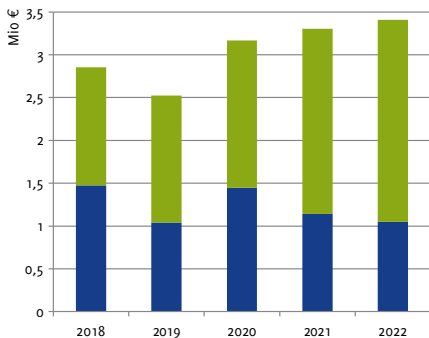
Das Geschäftsjahr war wie auch in den Vorjahren von der Durchführung öffentlicher Forschungsprojekte und durch den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie (industrielle Auftragsforschung) geprägt. Das Wachstum der Vorjahre konnte fortgesetzt werden, so sind die **Drittmittelerträge** (Projekterträge) 2022 gegenüber dem Vorjahr um rd. 3 % gestiegen.

Das öffentlich geförderte Projektgeschäft (Förderprojekte) ist im Vergleich zum Vorjahr nochmals weiter ausgebaut worden. So lagen die Erträge aus öffentlichen Projektzuschüssen um 9 % über dem Vorjahreswert.

1 Die Beschäftigtenzahlen sind zum Stichtag 31.12.2022 ohne Vollzeitäquivalent ausgewiesen. Ein Vergleich mit vorherigen Berichten ist daher nur bedingt möglich.

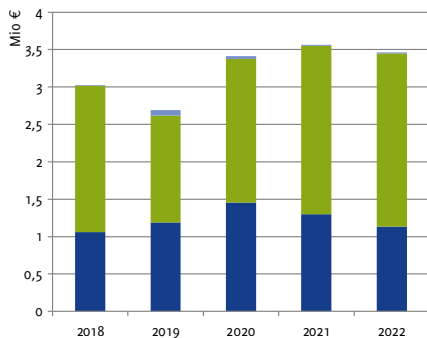
Projekterträge

Industrieprojekte / Förderprojekte



Projekteinnahmen:

Industrieprojekte / Förderprojekte / Sonstige

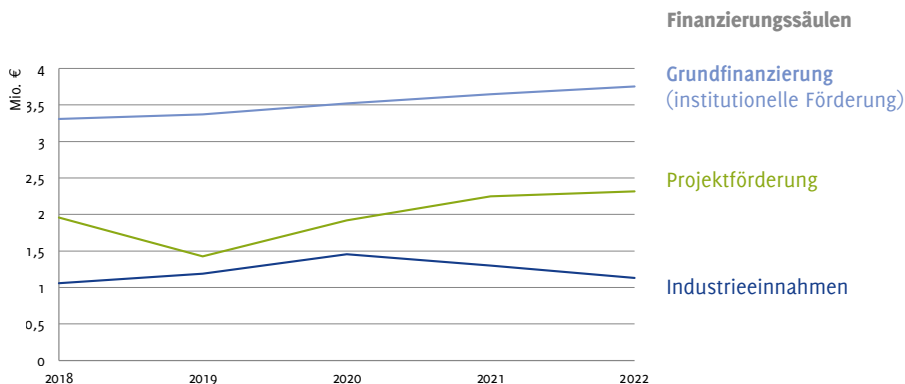


2022 wurden 2 öffentlich geförderte Forschungsprojekte begonnen. Die Erträge aus industrieller Auftragsforschung (Industrieerträge) blieben im Geschäftsjahr 2022 um rd. 8 % hinter den hohen Vorjahreserträgen zurück. Wie in den Vorjahren war die industrielle Auftragsforschung weitgehend durch eine Vielzahl vom Umfang her kleiner Aufträge der KMU Thüringens geprägt (rd. 50%).

Die Projekteinnahmen lagen insgesamt rd. 3 % unter dem Vorjahreswert. Die Verteilung der gesamten **Drittmiteleinnahmen** (Projekteinnahmen) auf Einnahmen aus Förderprojekten und Einnahmen aus der industriellen Auftragsforschung entspricht im Wesentlichen der Verteilung der Erträge.

Auch 2022 konnten in den vom Freistaat Thüringen geförderten internen Forschungsgruppen wesentliche Forschungsthemen für die strategische Weiterentwicklung des Instituts verfolgt werden. Die **institutionelle Förderung** (Grundfinanzierung) des Freistaats Thüringen bildete unverändert eine wesentliche Voraussetzung für die Innovationskraft des Instituts.

www.imms.de/funding





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

www.imms.de/org

Aufsichtsrat*

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

* zum 31.12.2022

- **Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin HOFFMANN, Chair of Microsystems, Ruhr Universität Bochum, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik
- **Stellvertretender Vorsitzender:** Prof. Dr. mont. Mario KUPNIK, Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktion, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST)
- Jörg DOBLASKI, Chief Technology Officer, X-FAB Semiconductor Foundries GmbH
- Dr. Alfred HANSEL, Geschäftsführer oncgnostics GmbH
- Prof. Dr. Doris HEINRICH, Institutsdirektorin, Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V.
- Prof. Dr. Peter HOLSTEIN, Transferunternehmer, Steinbeis-Transferzentrum Technische Akustik und angewandte Numerik
- Dr. Peter MIETHE, Geschäftsführer PosaNova GmbH
- Univ.-Prof. Dr. Jens MÜLLER, Technische Universität Ilmenau, Vizepräsident für Internationale Beziehungen und Transfer sowie Leiter des Fachgebietes Elektroniktechnologie, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang NEBEL, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät II Department für Informatik, Abteilung Eingebettete Hardware-/Software-Systeme, Vorstandsvorsitzender edacentrum e.V., OFFIS – Institut für Informatik 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

* zum 31.12.2022

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

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

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

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

› Integrierte

Sensorsysteme

› Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

› Mag6D-nm-
Direktantriebe

› Inhalt

* Förderung

Veranstaltungen

www.imms.de/
events

Konferenzen / Veranstaltungen mit Beiträgen des IMMS

27.02.2022 – **TuZ 2022**, 34. ITG/GI/GMM-Workshop Testmethoden und Zuverlässigkeit von Schaltungen und Systemen, *Vortrag*, online

09.03.2022 – **Vertrauenswürdige Elektronik 2022**, Digitale Fachkonferenz des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), 2 *Vorträge*, online

10.05.2022 – **21. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2022**, begleitende Konferenz der SENSOR + TEST 2022, *Vortrag*, Nürnberg

30.05.2022 – **EUSPEN 2022**, euspen's 22nd International Conference & Exhibition, *Vortrag*, Genf

12.06.2022 – **SMACD 2022**, International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods, and Applications to Circuit Design, *Vortrag*, Villasimius, Sardinia, Italy

15.06.2022 – **CIVEMSA 2022**, The IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications, *Vortrag*, Chemnitz

28.06.2022 – **Silicon Saxony Day**, Zukunftstechnologien und Unternehmenslösungen aus den Bereichen Hardware, Software und Connectivity, *Vortrag, Ausstellungsstand, Demo*, Dresden

Jahresbericht

© IMMS 2022

22.08.2022 – **CCTA 2022**, 6th IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2 Vorträge, Trieste / hybrid

15.09.2022 – **FGSN 2022**, Fachgespräch Sensornetze 2022 der GI/VDE-ITG-Fachgruppe Kommunikation und Verteilte Systeme (KuVS), Vortrag, Berlin

22.09.2022 – **Stammtisch Vorausschauende Wartung** des Smart System Hub Dresden, Vortrag, Moderation, online

27.09.2022 – **elmug4future**, Technologiekonferenz „Energieversorgung – Komplexer Wachstumsmarkt im Wandel“, Vortrag, Messestand, Friedrichroda

29.09.2022 – **FED-Konferenz**, 30. Konferenz des Fachverbandes für Design, Leiterplatten- und Elektronikfertigung (FED), Vortrag, Potsdam

09.11.2022 – **Künstliche Intelligenz heute und morgen**, Veranstaltung der VR-Bank Rudolstadt mit KMU, Vortrag, Rudolstadt

15.11.2022 – **EUSPEN 2022**, Euspen Special Interest Group Meeting: Precision Motion Systems & Control 15th – 16th November 2022, Vortrag, 's-Hertogenbosch, Niederlande

Workshop-Angebote/IMMS als Gastgeber/Veranstalter/Mitinitiator

11.01.2022 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Vortrag, Organisation, Moderation, online

25.01.2022: – **Retrofitting**, Veranstaltungsreihe der Modellfabrik Smarte Sensorsysteme (IMMS GmbH) des Mittelstand-Digital-Zentrums Ilmenau (Mittelstand-Digital), Teil 1/3: Datenerfassung durch Retrofitting, Mitveranstalter, Vortrag, online

08.02.2022 – **Retrofitting**, Veranstaltungsreihe Mittelstand-Digital, Teil 2/3: Datenanbindung durch Retrofitting, Mitveranstalter, Vortrag, online

10.02.2022 – **Stammtisch Vorausschauende Wartung**, Smart Systems Hub, Vortrag, online

08.03.2022 – **Retrofitting**, Veranstaltungsreihe Mittelstand-Digital, Teil 3/3: Datenverarbeitung durch Retrofitting, Mitveranstalter, Vortrag, online

16.03.2022 – **BarCamp @ DATE 2022**, BarCamp on electronic design automation (EDA), microelectronics and (embedded) systems design, Workshop, online

17.03.2022 – **Decarbonisierung der Wirtschaft**, Expertenrunde der TU Ilmenau, der ELMUG eG, dem PolymerMat e.V. und Mittelstand-Digital, Mitveranstalter, Ilmenau

13.09.2022 – **KI-Entwicklerstammtisch**, Mitveranstalter, Co-Moderation, online

15.09.2022 – **Fachkräftemangel**, Expertenrunde der TU Ilmenau, der ELMUG eG, dem PolymerMat e.V. und Mittelstand-Digital, Mitveranstalter, Co-Moderation, Vortrag, IMMS Ilmenau

05.10.2022 – **Ersti-Woche** zum Studienbeginn an der TU Ilmenau, *Stadt-Rallye-Station*, IMMS Ilmenau

11.10.2022 – **KI-Entwicklerstammtisch**, *Mitorganisation und Co-Moderation*, Ilmenau

10.11.2022 – **Mikro- und Nanotechnologien** – Umsetzung von High-Tech auch im Mittelstand möglich? Expertenrunde der TU Ilmenau, der ELMUG eG, dem Polymer-MatPolymerMat e.V. und Mittelstand-Digital, *Mitveranstalter*, Ilmenau

06.12.2022 – **Stammtisch Smarte Sensorsysteme**, Mittelstand-Digital, *Mitveranstalter*, *Vortrag*, IMMS Ilmenau

07.12.2022 – **Netzwerkabend** von Mittelstand-Digital und BVMW Ilm-Kreis, *Mitveranstalter*, 2 *Vorträge*, IMMS Ilmenau

14.12.2022 – **Stammtisch Smarte Sensorsysteme**, Mittelstand-Digital, *Veranstalter*, *Vortrag und Moderation*, Ilmenau

Messen und Ausstellungen

08.04.2023 – **elmug4you** – Leistungsschau der ELMUG-Mitglieder, *Ausstellungsstand*, online

28.06.2022 – **Silicon Saxony Day**, Zukunftstechnologien und Unternehmenslösungen aus den Bereichen Hardware, Software und Connectivity, *Vortrag*, *Ausstellungsstand*, *Demo*, Dresden

29.06.2022 – **Neue Wirtschaft Mitte**, Thüringer Wirtschaftskonferenz, *Ausstellungsstand*, Erfurter Kreuz

06.07.2022 – **Infoveranstaltung des Leistungszentrums InSignA**, *Ausstellungsstand*, *Demo*, Ilmenau

12.10.2023 – **6. Thüringer Maschinenbautag**, *Ausstellungsstand*, *Demo*, Erfurt

26.10.2022 – **inova2022**, Karriereforum an der TU Ilmenau, *Messestand*, *Demo*, Ilmenau

27.10.2022 – **iENA 2022** Internationale Fachmesse Ideen Erfindungen Neuheiten, Präsentation und Erfinderwettbewerb über das PATON | Landespatentzentrum Thüringen, *Messestand*, Nürnberg

04.11.2022 – **Thüringer KI-Forum**, *Ausstellungsstand*, Erfurt

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

Videoproduktionen für Demonstratoren / Online-Veranstaltungen

– **Neue IMMS-Webseite ist online: www.imms.de**, Videoclip für LinkedIn und YouTube zum Relaunch der IMMS-Webseite, <https://www.youtube.com/watch?v=j05YHIC66M4>

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

- **CMOS-Bildsensor-Plattform für die zeitaufgelöste Fluoreszenzmessung mit Europium.** Das Video soll die Kommunikation für das Ziel unterstützen, über das beispielhaft demonstrierte quantitative Auslesen von Lateral-flow-Teststreifen hinaus weitere Anwendungen in der In-vitro-Diagnostik in künftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu erschließen. <https://www.youtube.com/watch?v=pEXdMNZZkPA>
- **Praktika/Jobs/Bachelor-/Master-Arbeiten:** IMMS-Studentinnen und Studenten mit einem Überblick, Start der Videoreihe, in der aus studentischem Blickwinkel Interesse für eine Mitarbeit am IMMS geweckt werden soll; umfangreiche Dreharbeiten in 2022 für Interviews für die studentische Videoreihe. https://www.youtube.com/watch?v=cAlv_HAk1ZE

Publikationen

Begutachtete Veröffentlichungen

www.imms.de/publ

An IoT-based Sensor System to Capture Flower Bud Growth in Spring, Silvia KRUG^{1,2}, Tino HUTSCHENREUTHER¹. 19. GI/ITG KuVS Fachgespräch Sensornetze (FGSN 2022) 15. September 2022, Berlin, Germany, pp. 37-40, DOI: <https://doi.org/10.34702/mncp-qb18>. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University Sundsvall, Sweden.

Robust Tracking Control with L1 Adaptive Augmentation for a Long Stroke Vertical Nanopositioning System: Part II, Alex S. HUAMAN¹, Johann REGER². 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2022, pp. 621-627, DOI: <https://doi.org/10.1109/CCTA49430.2022.9965993>, 22 - 25 August, 2022, Trieste, Italy. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ²Control Engineering Group, Technische Universität Ilmenau, P.O. Box 10-05-65, D-98684, Ilmenau, Germany.

Robust Tracking Control with L1 Adaptive Augmentation for a Long Stroke Vertical Nanopositioning System: Part I, Alex S. HUAMAN¹, Johann REGER². 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2022, pp. 614-620, DOI: doi.org/10.1109/CCTA49430.2022.9966103, 22 - 25 August, 2022, Trieste, Italy. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

²Control Engineering Group, Technische Universität Ilmenau, P.O. Box 10-05-65, D-98684, Ilmenau, Germany.

MARIA KELLNER². Maximilian KREY³. Alireza NIKPOURIAN². Jörg PEZOLDT⁴. Steffen MICHAEL². Hannes TÖPFER³. Stefan KRISCHOK¹. Katja TONISCH¹. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 345, 2022, 113784, ISSN 0924-4247, DOI: doi.org/10.1016/j.sna.2022.113784. ¹FG Technische Physik 1, Institut für Mikro- und Nanotechnologien (IMN MacroNano(R)), Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, Ilmenau, 98684, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ³FG Theoretische Elektrotechnik, Institut für Mikro- und Nanotechnologien (IMN MacroNano(R)), Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, Ilmenau, 98684, Germany. ⁴FG Nanotechnologie, Institut für Mikro- und Nanotechnologien (IMN MacroNano®), Technische Universität Ilmenau, Postfach 100565, Ilmenau, 98684, Germany.

Measurement Precision of a Planar Nanopositioning Machine with a Range of Motion of $\varnothing 100$ mm, Jaqueline STAUFFENBERG¹. Ingo ORTLEPP¹. Johannes BELKNER¹. Denis DONTSOV². Enrico LANGLOTZ². Steffen HESSE³. Ivo RANGELow⁴. Eberhard MANSKE¹. *Applied Sciences*. 2022; 12(15):7843. DOI: doi.org/10.3390/app12157843. ¹Production and Precision Measurement Technology Group, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Straße 1, 98693 Ilmenau, Germany. ²SIOS Meßtechnik GmbH, Am Vogelherd 46, 98693 Ilmenau, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ⁴nano analytik GmbH, Ehrenbergstraße 1, 98693 Ilmenau, Germany.

Lock-In Pixel CMOS Image Sensor for Time-Resolved Fluorescence Readout of Lateral-Flow Assays, Alexander HOFMANN¹. Benjamin SAFT¹. Peggy REICH¹. Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. Max TRÜBENBACH². Alexander ROLAPP¹. Marco REINHARD¹. Friedrich SCHOLZ². Eric SCHÄFER¹. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 535-544, Aug. 2022, DOI: doi.org/10.1109/TBCAS.2022.3192926. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ²Senova Gesellschaft für Biowissenschaft und Technik mbH, Germany.

Trade-off between Spectral Feature Extractors for Machine Health Prognostics on Microcontrollers, Umut ONUS¹. Sebastian UZIEL¹. Tino HUTSCHENREUTHER¹. Silvia KRUG^{1,2}. 2022 *IEEE 9th International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 2022, pp. 1-6, DOI: doi.org/10.1109/CIVEMSA53371.2022.9853642, 15 - 17 June 2022, Chemnitz, Germany. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ²Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden.

Spotting the gap in the design flow for superconducting electronic devices, Frank FELDHOFF¹. Georg GLÄSER². Hannes TOEPFER¹. 2022 *18th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 2022, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD55068.2022.9816318, 12 - 15 June 2022, Villasimius, Sardinia, Italy. ¹Technische Universität Ilmenau, Advanced Electromagnetics Group, Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Teaching the MOSFET: A Circuit Designer's View, Carsten GATERMANN¹. Ralf SOMMER¹, 2. 2022 *18th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 2022, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD55068.2022.9816264, 12 - 15 June 2022, Villasimius, Sardinia, Italy. ¹Technische Universität Ilmenau, Germany. ²IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Learn from error! ML-based model error estimation for design verification without false-positives, Henning SIEMEN¹. Martin GRABMANN¹. Georg GLÄSER¹. 2022 *18th International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*, 2022, pp. 1-4, DOI: doi.org/10.1109/SMACD55068.2022.9816317, 12 - 15 June 2022, Villasimius, Sardinia, Italy. ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Nanofabrication and -metrology by using the nanofabrication machine (NFM-100), Ingo ORTLEPP¹. Jaqueline STAUFFENBERG¹. Anja KRÖTSCHL¹. Denis DONTSOV². Jens-Peter ZÖLLNER¹. Steffen HESSE³. Christoph REUTER¹. Steffen STREHLE¹. Thomas FRÖHLICH¹. Ivo W. RANGELOW¹. Eberhard MANSKE¹. *In Novel Patterning Technologies 2022 (Vol. 12054, pp. 76-87)*. SPIE, DOI: doi.org/10.1117/12.2615118. ¹Technische Universität Ilmenau, Germany. ²SIOS Meßtechnik GmbH, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

121 
› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› Mag6D-nm-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

www.imms.de/
publ

Jahresbericht

© IMMS 2022

Operation and performance evaluation of vertical nanopositioners for 10 mm stroke in a 3D lift and tilt test setup, Steffen HESSE¹. Michael KATZSCHMANN¹. Alex S. HUAMAN¹. Stephan GORGES¹. Eberhard MANSKE². *euspen – Special Interest Group Meeting: Precision Motion Systems and Control, 15th – 16th November 2022, s-Hertogenbosch, The Netherlands, NL.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ²Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany.

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

Machine-Learning im PCB-Entwurf: Open-Source zwischen Forschung, Potential und Alltag, Georg GLÄSER¹. *30. Konferenz des Fachverbandes für Design, Leiterplatten- und Elektronikfertigung (FED), 29. - 30. September 2022, Potsdam, Germany.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), Ehrenbergstraße 27, 98693 Ilmenau, Germany.

KI für energieeffiziente Sensorsysteme – Effiziente Überwachung von Maschinen und Anlagen, Sebastian UZIEL¹. *elmug4future, Technologiekonferenz, 27. - 28. September 2022, Friedrichroda, Thüringen*

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

Fachartikel in Zeitschriften

Wissenstransfer im Forschungsprojekt EXPRESS, Valentin KNITSCH¹. Rikard GRASS². Hannes MOLLENHAUER². Silvia KRUG³. Tino HUTSCHEREUTHER³. Juliane WELZ¹. *B&B Agrar, Die Zeitschrift für Bildung und Beratung, 2/2022, S. 22 – 23, DOI: doi.org/10.24406/publica-189.* ¹Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, Leipzig, Germany. ²Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Echtzeitanalyse und Prognose des Wasserhaushalts im Weinbau, Hannes MOL-LENHAUER¹. Martin SCHIECK². Silvia KRUG³. Valentin KNITSCH⁴. *IM+io, Fachmagazin, März 2022, Heft 01, ISSN 1616-1017, Seite 32 – 35.* ¹Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department Monitoring- und Erkundungstechnologien, 04318 Leipzig, Germany. ²Universität Leipzig, Institut für Wirtschaftsinformatik, 04109 Leipzig, Germany. ³IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany. ⁴Fraunhofer Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, 04109 Leipzig, Germany.

Intelligente Layoutverarbeitung: KI für ASIC- und PCB-Layouts, Georg GLÄSER¹. Julian KUNERS¹. *Elektronik 03.2022, 09.02.2022, S. 42 – 45.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Machine-Learning-basierte Messdatenanalyse für ASICs. Testen auf der Überholspur, Tom REINHOLD¹. Georg GLÄSER¹. *Elektronik 01/02.2022, 26.01.2022, S. 46 – 48.* ¹IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Germany.

Offengelegte Patente

Positionierungssystem zur dreidimensionalen Positionierung eines Objektes sowie Verfahren zu seinem Betrieb, Steffen HESSE. Christoph SCHÄFFEL. Michael KATZSCH-MANN. Bianca LEISTRITZ. Stephan GORGES. Jorge Amado Gonzalez WHITTINHAM. DE 10 2021 103 220 A1

Elektrochemischer Sensor zur kapazitiven Bestimmung von Ladungsträgern und Ladungsträgeränderungen in einem Medium, Alexander HOFMANN. DE 10 2020 123 949 A1

* Förderung

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



123 
› Integrierte
Sensorsysteme
› Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme
› Mag6D-nm-
Direktantriebe
› Inhalt
* Förderung

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

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

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

[Jahresbericht](#)
© IMMS 2022

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



124

> **Integrierte**
Sensorsysteme

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

> **Mag6D-nm-**
Direktantriebe

> **Inhalt**

* **Förderung**

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



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



- Das Projekt **Trib.US** wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Kennzeichen **KK5048102AT0**.
- Das Projekt **sUSe** wurde unter dem Kennzeichen **ZF4085709P08** gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.



- Das Projekt **SensoMem** wurde unter dem Förderkennzeichen **ZF4085711CR9** im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.



- Das Projekt **K4PNP+Z** wird unter dem Förderkennzeichen **ZF4085714J09** im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

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

Jahresbericht

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

Mittelstand-Digital

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

125

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

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

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

- Das Forschungsvorhaben **thurAI** wird durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen **2021 FGI 0008** gefördert.
- Die Arbeiten im Forschungsvorhaben **Quantum Hub Thüringen** werden durch den Freistaat Thüringen über die Thüringer Aufbaubank unter dem Kennzeichen **2021 FGI 0042** gefördert.

Freistaat
Thüringen 
Hier hat Zukunft Tradition.

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

EFRE 
EUROPA FÜR THÜRINGEN
EUROPÄISCHER FONDUS FOR REGIONALE ENTWICKLUNG


EUROPÄISCHE UNION

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

ADC Analog-Digital-Konverter

AFL American Fuzzy Lop (Software-Fuzzer)

AHB Advanced High-Performance Bus

AI Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)

ASIC Application-specific Integrated Circuit, applikationsspezifische integrierte Schaltung

CMOS Complementary metal-oxide Semiconductor, komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter

DAC Digital-Analog-Konverter

EDA Electronic Design Automation, rechnergestützte Entwurfsautomatisierung

ERP Enterprise-Resource-Planning

FPGA Field Programmable Gate Array, programmierbare Logik-Gatter-Anordnung

FRF Frequency Response Function, Frequenzantwort

GPIO General Purpose Input/Output, Allzweckeingabe/-ausgabe

I²C Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus

IC Integrated Circuit, integrierte Schaltung

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, weltweiter Berufsverband von Ingenieuren

IoT Internet of Things, Internet der Dinge

IP Intellectual Property, geistigem Eigentum

ITO Indium-Zinn-Oxid

KI Künstliche Intelligenz

KMU Kleine und mittlere Unternehmen

LFA Lateral Flow Assay, Streifentest

MEMS Mikroelektromechanische Systeme

MLP mehrlagiges Perzeptron

PCB Printed Circuit Board, Leiterplatte

PMU Parametric Measurement Unit

QSPI Quad-SPI (Serial Peripheral Interface), (Digital-)Bussystem mit vier Datenleitungen

RFID Radio-Frequency Identification

RMS Root Mean Square, quadratischer Mittelwert

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

SoM System-on-Module, Schaltung mit Systemfunktionen auf einem Modul

SPAD Single Photon Avalanche Diodes, Einzelphotonendetektoren

TCSPC Time-Correlated Single-Photon Counting, zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung

TDC Time-to-Digital Converter, Zeit-Digital-Wandler

ULP Ultra Low Power

USB Universal Serial Bus

UV Ultraviolettstrahlung

WTF What the Fuzz, Hardware-Fuzzer, am IMMS entwickeltes Verifikationsverfahren

Herausgeber / Anbieterkennzeichnung
nach § 5 TMC, § 2 DLVO

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

Vertretungsberechtigt:

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

Rechtsform:

Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Registergericht: Amtsgericht Jena
Registernummer: HRB 303807
Umsatzsteuer-Identifikationsnummer
gem. § 27a UStG: DE 177 527 119

Analyse verlinkter Inhalte mit Matomo

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

den Empfehlungen des Unabhängigen
Landeszentrums für Datenschutz (ULD)
konfiguriert. **Unsere Datenschutzerklä-
rung finden Sie unter [www.imms.de/
datenschutzerklaerung.html](http://www.imms.de/datenschutzerklaerung.html).**

Externe Links

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

Lektorat

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

Gestaltung, Grafik, Satz und Fotografie

Dipl.-Hdl. Dipl.-Des. Beate Hövelmans

Druck: www.BRANDTDRUCK.de

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

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

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

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

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