



Jahresbericht 2023

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum

Die in diesem Bericht enthaltenen Angaben entsprechen den bis zur Erscheinung bekannten Sachverhalten. Alle Angaben und Berechnungen beruhen auf gewissenhafter Prüfung. Der vorliegende Jahresbericht richtet sich unabhängig von den verwendeten Personenbezeichnungen an Menschen aller Geschlechtsidentitäten.

Gender-Hinweis:

Im Sinne der besseren Lesbarkeit verzichten wir in unseren Texten weitgehend auf geschlechtsdifferenzierende Formulierungen. Die Begriffe gelten im Sinne der Gleichberechtigung grundsätzlich für alle Geschlechter. Wir verfolgen generell einen diskriminierungsfreien Ansatz. Die verkürzte Sprachform hat daher rein redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

Herausgeber:

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH
Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt

Telefon: +49 361 663 14 10
E-Mail: info@cismst.de
Internet: www.cismst.de

Verantwortlich für den Inhalt:

Prof. Dr. Thomas Ortlepp, Thomas Brock

Layout:

dotflow digital solutions GmbH, www.dotflow.com

Sonstige Fotos und Grafiken:

- CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH
- Fotodatenbank Pexels und Pixabay
- S. 28, mit KI erstellt am 4. März 2024, unterstützt von DALL-E 3
- S. 30, Universität Jena, Sebastian Ritter
- S. 69, TU Ilmenau, Silke Stauche
- S. 73, unten, ThEx, Thomas Müller

IMPRESSUM

VORWORT.....4

THEMEN

MEMS: Siliziumbasierte piezoresistive Drucksensoren	6
Montagespannungsresistente Drucksensorchips (MoDru).....	9
Entwicklung innovativer Fügetechnologien zum Aufbau hochstabiler Druckmessumformer (EFAH).....	12
Drucksensor für Ultra-Höchstdruck-Anwendungen (DS-NEMO).....	15
MEMS: Siliziumbasierte Temperatursensorik	16
Redundante Temperaturmessung bis 300°C (Redundanz).....	17
Beschreibung des Freezing out-Phänomens mittels quantenmechanischer Simulationstools (freezing out).....	19
MOEMS: Silizium-Photodioden – Multitalente der Lichtdetektion	20
Entwicklung semitransparenter optischer Sensoren (Tandemdiode).....	21
Galvanisch getrennter Inkrementalsensor (GalGIS).....	23
Hochempfindliche rauscharme Blauviolett-Avalanche-Photodioden (BVAPD).....	25
Quantentechnologien	28
Wettbewerbsfähiger Deutscher Quantenrechner (CoGeQ).....	28
Quantenprozessoren für verschlüsselte Kommunikation mit Satelliten (QuVeKS).....	30
Kompakte Sensoreinheit zur Messung von Magnetfeldern mittels Diamantfluoreszenz (KoSenDi).....	31

FORSCHUNGS- & ENTWICKLUNGSPROJEKTE

10 Jahre A_{Si}-Si_i-Defekt-Forschung	32
Miniaturisiertes Fluorimeter (MiniFLU)	36
Resonante Silizium-Differenzdrucksensoren (ReSi-DDS)	38
Inkjet-Printing galvanisch verstärkter Infrarot-Emitter (IJP-IR)	40
Komponenten und Module für die verbesserte optische Diagnostik (KODIAK)	42

TECHNISCHE INVESTITIONEN

Innovative Hochtemperatur-Technologie (EffizientPro)	44
Optimierte Entwicklungsumgebung (OPENSENS)	46
Dienstleistung zur KI-unterstützten Qualitätskontrolle (PinSpek)	48

VERANSTALTUNGEN

Messen	50
Kongresse	53
CiS Workshops	60
Mitarbeitende	64
Verbände	66
Nachwuchsförderung	76

NACHWUCHSFÖRDERUNG.....**68**

VERBÄNDE & NETZWERKE

Vereine & Verbände	74
Netzwerke, Konsortien, Wachstumskerne	76

PUBLIKATIONEN.....**78**

GREMIEN & KONTAKT.....**82**

Liebe Leserinnen und Leser,

auf dem Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft treffen Forschung und Industrie auf zahlreiche wissenschaftliche sowie ökologische und ökonomische Herausforderungen. Energiewende, Klimaschutz, Kreislaufwirtschaft, nachhaltiges Bauen und Verkehrswende, Digitalisierung und Modern Work benötigen Forschungskapazitäten, wirtschaftliche Leistungsfähigkeit sowie Zusammenarbeit mit allen Teilen der Gesellschaft, um technische Innovationen zu verwirklichen.

Vor dem Hintergrund dieser digitalen und grünen Transformation sind Sensoren unabdingbar. Als Sinnesorgane vernetzen sie die analoge mit der digitalen Welt. Vielfach bestehen sie aus Halbleitermaterialien wie Silizium und typische Messgrößen sind dann Temperatur, Druck, Beschleunigung, Gaskonzentrationen oder Lichtveränderungen. Sensoren befinden sich in vielen Alltagsgegenständen wie Smartphones, Haushaltsgeräten oder medizinischen Geräten sowie Fahrzeugen aller Art. In der Industrie sind sie allgegenwärtig und steuern Prozesse – möglichst energiesparend, ressourceneffizient und bedarfsgerecht. Sie liefern den Rohstoff für die digitale Wertschöpfung.

Der Aufbau einer klimafreundlichen Wasserstoffwirtschaft, die Dekarbonisierung von CO₂-intensiven Prozessen oder die Entwicklung von Quantentechnologien und deren Anwendungen werden nur durch den Einsatz leistungsfähiger Sensoren möglich.

Das CiS Forschungsinstitut steht mit seiner 30-jährigen Erfahrung in der Forschung und Entwicklung siliziumbasierter Sensoren, Projekt- und Industriepartnern bei der Konzeption bis hin zur Umsetzung innovativer Ideen zur Seite. Anwendungsgetrieben stellen wir uns dem Spagat zwischen Ergebnissen der Grundlagenforschung und industrieller Skalierung. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen profitieren von dieser Zusammenarbeit durch die Nutzung von For-

schungskapazitäten, technologischer Infrastruktur, begleitender Projektfinanzierung und einem damit verbundenen reduzierten Risiko bei der Entwicklung marktfähiger Produkte.

Unser Institut legt den Fokus auf mikromechanische und mikrooptische Sensoren, sogenannten MEMS und MOEMS. Dabei begleiten wir Unternehmen vom Sensordesign über die Prototypenentwicklung bis hin zur Kleinserie. Im MEMS-Geschäftsfeld entwickeln wir langzeitstabile piezoresistive Drucksensoren und Silizium-Dehnmessstreifen für verschiedene Anwendungen, unter anderem zur Leckageerfassung in Wasserstoffsystemen und Sensoren zur Überwachung sicherheitsrelevanter mechanischer Verbindungselemente. Kompetenzen im MOEMS-Geschäftsfeld sind siliziumbasierte Sensoren für einen breiten Spektralbereich von Röntgen bis Infrarot, die beispielsweise zur Messung von Gaskonzentrationen in medizinischen oder industriellen Bereichen dienen. Detektoren für hochenergetische Teilchen sowie MEMS-Infrarot-Strahler und Thermopiles sind weitere Schwerpunkte. Ein neues Feld sind diamantbasierte Quantensensoren für verschiedene Anwendungen, zum Beispiel als Magnetfeldsensoren für Positionsmesstechnik und in der Rastersondenmikroskopie.

Für alle Themengebiete entwickeln wir passgenaue Aufbau- und Verbindungstechniken (AVT). Auf engstem Raum müssen hochgenau winzige Mikrosysteme montiert, kontaktiert und verkapselt werden. Durch den Einsatz neuer Materialien und einer fortschreitenden Miniaturisierung wird die Systemintegration immer komplexer und benötigt effiziente Lösungen. Dies erfordert sowohl konzeptionelles als auch technologisches Know-how sowie automatisierte Verfahren und leistungsfähiges Equipment. Umfangreiche Analytik und Messtechniken, die teilweise für spezifische Messaufgaben eigens entwickelt werden, vervollständigen das Portfolio unseres Hauses.

In diesen verschiedenen Kompetenzfeldern bearbeiteten 2023 etwa 120 Mitarbeitende 77 Forschungsvorhaben.

Unser Fokus liegt auf der Anwendungsnähe mit hohem wirtschaftlichen Potential bei der Umsetzung unserer Forschungsprojekte. Langjährige und vertrauensvolle Partnerschaften mit der Industrie sind daraus entstanden, unsere Zuverlässigkeit wird geschätzt. In den vergangenen Geschäftsjahren konnten wir weltweit neue Unternehmen von unserer Leistungsfähigkeit überzeugen und im Kundenstamm verankern.

Ihnen allen möchten wir herzlich danken für ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und Inspiration.

Wir danken auch allen Unterstützern der Europäischen Union, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Freistaat Thüringen, verbunden mit der Hoffnung verlässliche Bedingungen, kalkulierbare Förderbedingungen für Investitionen sowie konkurrenzfähige Energiepreise zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit von Forschung und Industrie zu gewährleisten.

Erfolge werden von Menschen gemacht, sagt ein Sprichwort. Mit großer Ausdauer und Engagement haben unsere Mitarbeitenden neue Herausforderungen gemeistert und Lösungen entwickelt. Wir bedanken uns ganz herzlich bei ihnen für ihren Ideenreichtum, verbindenden Teamgeist und Pragmatismus.

Unseren Gremien sagen wir Danke für ihre fortwährende Unterstützung in den vielen Jahren der gemeinsamen Verantwortung für das CiS Forschungsinstitut.

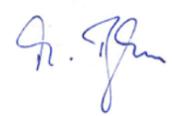
Somit können wir wieder voller Stolz auf ein erfolgreiches Geschäftsjahr 2023 verweisen und Ihnen ausge-

wählte Forschungsergebnisse vorstellen und von einigen Ereignissen exemplarisch berichten.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und laden Sie ein, mit uns Innovationen für eine wettbewerbsfähige und ressourcenschonende Industrie zu gestalten. ●



Prof. Thomas Ortlepp



Thomas Brock





MEMS: SILIZIUMBASIERTE PIEZORESISTIVE DRUCKSENSOREN

Eines der am weitesten verbreiteten Materialien in der Mikrosystemtechnik ist Silizium. Vor allem die herausragenden physikalischen, mechanischen sowie elektrischen/elektronischen Eigenschaften des Siliziums und die hohe Kompatibilität der Herstellungsverfahren zu bestehenden Halbleiterprozessen führen zu immer neuen Anwendungen. So sind in den letzten Jahrzehnten nicht nur Siliziumchips mit Analog- und Digitalelektronik, sondern auch zahlreiche halbleiterbasierte Sensoren und Aktuatoren erfolgreich in den Markt eingeführt worden.

Diese MEMS-Sensoren stellen daher einen stetig wachsenden Marktsektor dar. Zahlreiche MEMS-Technologien sind etabliert und adressieren ein großes Anwendungsspektrum mit einem Marktvolumen im Mrd. US-Dollar Bereich. Die Kombination mit weiteren Fertigungsverfahren und neuen Materialien bietet beständig ein überdurchschnittliches Wachstumspotential.

Neben neuen Prinzipien und der Kombination verschiedener Lösungen zu multifunktionalen Mikrosys-

temen werden verstärkt funktionale Verbesserungen in Verbindung mit weiter fortschreitender Verkleinerung und/oder Vereinfachung nachgefragt. Dies kann der besseren Integrierbarkeit in CMOS-Systeme, der Kombinierbarkeit mit anderen nano- und mikrotechnischen Komponenten sowie der Kostenreduktion dienen.

Zur Messung mechanischer Größen stehen eine Reihe physikalischer Prinzipien zur Verfügung. Für miniaturisierte Sensoren auf der Basis von Silizium und MST-Technologien hat sich das piezoresistive Messprinzip als robust und vielfältig einsetzbar erwiesen. Neben dem großen und stetig wachsenden Markt für piezoresistive Drucksensoren entwickelt sich eine stark wachsende Nachfrage nach Halbleiterdehnmessstreifen. Es lässt sich feststellen, dass die technologischen Anforderungen in den Bereichen der industriellen Prozessmesstechnik, Prozessautomation, Medizintechnik und im Bereich der erneuerbaren Energien am anspruchsvollsten sind. Dabei ist zu beachten, dass der Massenmarkt zwar von großen Unternehmen dominiert wird, es aber vielfältige wirtschaftlich attraktive

Fragestellungen gibt, die mittelständischen Unternehmen hervorragende Marktchancen für innovative und teilweise hochpreisige Systemlösungen bieten.

Das CiS Forschungsinstitut hat sich in Zusammenarbeit mit Forschungspartnern und Kunden zu einem bedeutenden Entwickler und Zulieferer von hochstabilen und hochgenauen piezoresistiven Siliziumdrucksensoren entwickelt.

Parameter und ihre Abhängigkeiten

Piezoresistive Drucksensoren besitzen eine Vielzahl von Parametern mit teils gegenseitigen Abhängigkeiten, die bei der Forschung, der Entwicklung und der Fertigung von piezoresistiven Drucksensoren zu berücksichtigen sind. Das CiS Forschungsinstitut agiert hier in vielfältigen Forschungsaktivitäten, sei es mittels geförderter Forschungsvorhaben oder mittels kundenfinanzierter Projekte.

Die Parameter lassen sich in die Gruppen: mechanische Parameter, elektrische Parameter, dynamische Parameter sowie das Temperatur- und das Stabilitätsverhalten einordnen. Jede dieser Gruppen enthält diverse Einzelparameter, die mit Parametern ihrer und anderer Grup-

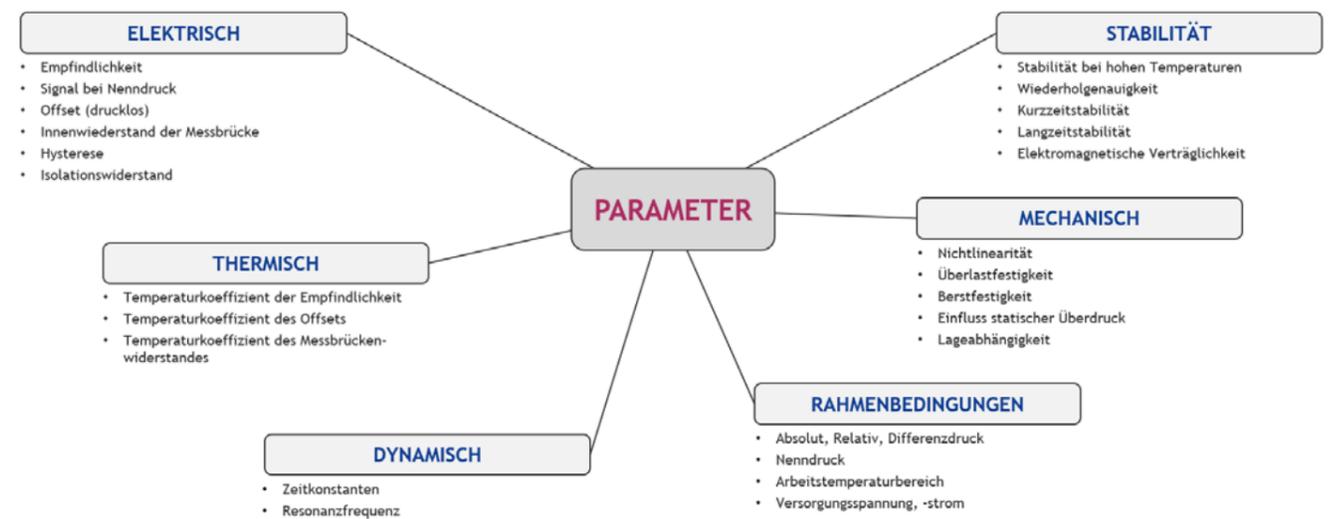
pen in Wechselwirkung stehen können. Ein Beispiel ist die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Fläche der Biegeplatte und deren Dicke. Auch die Nichtlinearität des Sensorsignales ist von diesen Größen abhängig, wodurch sich eine Korrelation zwischen Sensitivität und Nichtlinearität ergibt.

Entwicklungstrends

Wasserstoff in Kombination mit regenerativen Energien gewinnt als Energieträger zunehmend an Bedeutung. Er stellt jedoch durch seine Neigung zur Diffusion durch die meisten Materialien, Entwickler von Sensor-komponenten vor besondere Herausforderungen.

Piezoresistive Drucksensoren besitzen das Potential, hinsichtlich Driftverhalten, Langzeitstabilität sowie der Möglichkeit der Selbstüberwachung wesentliche Vorteile zu bieten, die für die Entwicklung von Messsystemen und deren Einsatz in der kritischen Infrastruktur genutzt werden können.

Zudem kann durch eine geeignete Auslegung der Kennlinien des Drucksensorchips der Ressourceneinsatz (Energiebedarf der Kalibrierung, notwendiges Kalibrierausrüstung) gegenüber der Herstellung von marktüblichen Chips wesentlich reduziert werden. Ermöglicht werden auch längere Wartungsintervalle,



Einflussgrößen auf die Performance eines Drucksensorelementes

welche die verfügbare Einsatzzeit der Messsysteme vergrößern und damit Ressourcen für die Wartung einsparen.

Durch geeignete Sensordesigns und unter Berücksichtigung der Material-Eigenschafts-Beziehungen während des Designprozesses können kundenspezifische Anforderungen für piezoresistive Sensorelemente in besonderer Weise Berücksichtigung finden und somit einen signifikant höheren Kundennutzen generieren. Diese ständig wachsenden Ansprüche münden in Entwicklungsstrategien und Fertigungsgenauigkeiten, die weit über den Anforderungen und Standards der Mikroelektronik hinausgehen.

Simulationen des Designs und der Eigenschaften mikroelektronischer und mikro-elektromechanischer Bauelemente und -systeme sind heute essentieller Bestandteil der kosten- und zeiteffizienten Herstellung. Hierfür sind zahlreiche, meist kommerzielle und damit auch kostenintensive Programme und Programmpakete verfügbar. Diese bieten jedoch nur Lösungen für

einzelne Teilschritte innerhalb des gesamten Designflow bzw. Entwicklungsprozesses an.

Aufgrund unterschiedlicher Softwareentwicklungsphilosophien einzelner Hersteller sind Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Programmen häufig nicht vorhanden, so dass Daten zwischen den einzelnen Programmen entweder nicht oder nur mit einem erheblichen Aufwand transferiert werden können. Das trifft insbesondere auf die Entwicklung mikro-elektromechanischer Bauelemente (MEMS) zu, für die ein hoher Grad an Flexibilität für die zum Teil parallel zu entwickelnden bzw. anwendungsspezifisch zu modifizierenden Komponenten und Systeme erforderlich ist. Üblicherweise wird, bedingt durch die verfügbaren Simulationstools, zunächst druck- und temperaturabhängig mit FEM-Berechnungen die Verteilung der mechanischen Spannungen im Drucksensorchip bzw. im aufgebauten Drucksensorelement berechnet. Damit sind vor allem die Verteilungen der mechanischen Spannungen im Bereich der piezoresistiven Widerstände im Drucksensor-Chip bekannt. Parallel wird mit

FEM-Halbleitertechnologie-Simulatoren das Dotierungsprofil und mit einem Device-Simulator temperaturabhängig der Widerstandswert der piezoresistiven Widerstände daraus bestimmt.

Die Widerstände werden auf dem Chip zu einer Widerstandsbrücke verschaltet. Mit den entlang der Widerstände ermittelten Stress-Werten und den korrespondierenden Piezokoeffizienten wird danach lokal über der Länge eines jeden Widerstandes der Wert der lokalen Widerstandselemente (korrigiert mit der lokalen piezoresistiven Widerstandsänderung) berechnet. Die bei Simulationen üblicherweise angesetzten Piezokoeffizienten sind allgemeine, tabellarische Werte und entsprechen nur näherungsweise den konkret realisierten Dotierungs- und Temperaturbedingungen. Für eine präzisere Simulation sind genauere Werte der Piezokoeffizienten unabdingbar, diese wurden in Projekten erarbeitet. Mit diesen Daten können die Eigenschaften neu zu entwickelnder piezoresistiver Sensoren einschließlich deren Temperaturverhalten deutlich genauer vorhergesagt werden.

Ebenfalls wird der Einfluss der Temperatur nur über einen mittleren Widerstands-Temperaturkoeffizienten berücksichtigt und damit der Einfluss der Temperatur auf die Verteilung der beweglichen Ladungsträger, die gegenüber dem Feld der mechanischen Spannung umverteilt werden, nicht umfassend berücksichtigt.

Die Überwindung dieser Limitationen in der Simulation piezoresistiver Silizium-Drucksensoren und anderer MEMS-Bauelemente ist ein Forschungsschwerpunkt am CiS Forschungsinstitut und ermöglicht einem ganzheitlichen Designflow, in dem ausgehend vom Sensor-Layout, über die Generierung eines Bauelemente-Modells, die Berechnung der lokalen mechanischen Spannungen und der daraus resultierenden lokalen Piezokoeffizienten letztendlich die elektrischen Parameter des Bauelementes integriert sind.

Das bedingt die Realisierung gleicher Standards der Datenübergabe zwischen den einzelnen Simulationstools. Diese beinhalten die quantenmechanische Berechnung der Piezokoeffizienten, der Dotierkonzentrationen und Leitfähigkeiten in Abhängigkeit von Kristallorientierung, Druck und Temperatur.

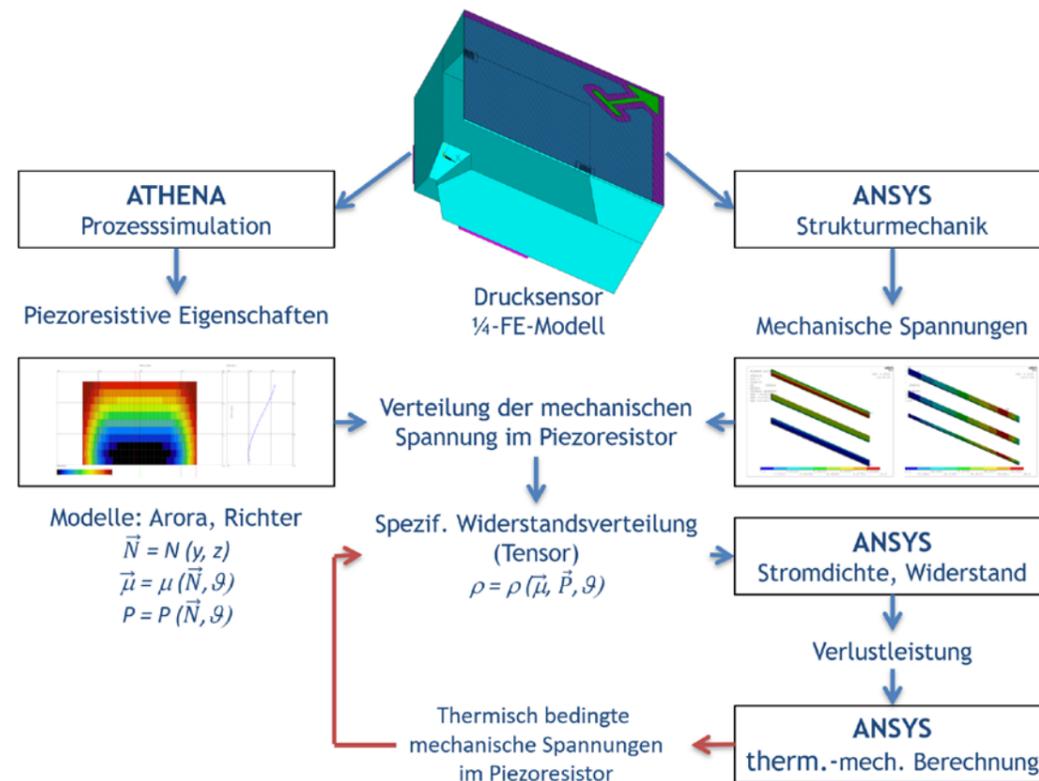
Die Performance eines Sensorelementes wird u.a. durch den eigentlichen Chip aber auch durch die Einflüsse der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) bestimmt. Die stabile mechanische Befestigung des Silizium-Sensorchips auf einem mechanischen Träger inklusive Druckzuführung und die elektrische Kontaktierung der Bondpads auf dem Chip sowie gegebenenfalls eine entsprechende Verkapselung sichern die Funktionsfähigkeit und minimieren die Einflüsse der Umgebung.

Das Drucksensorsignal darf durch diese Montage nicht oder nur minimal beeinflusst werden. Mechanische Verspannungen im Chip, welche nicht durch den zu messenden Druck, sondern durch die mechanische Befestigung des Chips auf dem Träger entstehen, sollen möglichst geringe Auswirkungen auf die auf dem Silizium-Chip befindliche piezoresistive Widerstandsmessbrücke zeigen.

Weitere Untersuchungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung von Alternativen zur etablierten aber mit Nachteilen behafteten Drahtbondtechnologie.

Der Marktbedarf für Druckmessungen im Bereich größer 700 bar liegt vor allem im industriellen Bedarf. Für diese hohen Druckbereiche kommen vorwiegend Verformungskörper aus Stahl zum Einsatz, meist mit einem darauf befindlichen Dünnschicht-Dehnmessstreifen. Diese Bauformen sind hinsichtlich der Minimierung der Baugröße limitiert und bieten derzeit nur geringe Chancen, Kosten und Energieverbrauch zu reduzieren. Siliziumbasierte MEMS-Sensorchips können auch in diesem Druckbereich mit ihren Vorteilen überzeugen.

Die Ergebnisse von Forschungsprojekten bilden die Grundlage für die Akquise und Durchführung von kundenspezifischen Entwicklungsprojekten für Gerätehersteller und fließen so in Produkteentwicklungen und -verbesserungen dieser Transferunternehmen ein. ●



Modellierungsworkflow für piezoresistive Drucksensoren

Montagespannungsresistente Drucksensorchips (MoDru)

Mikromechanische piezoresistive Druckaufnehmer bestehen in der gebräuchlichsten Bauform aus einer Biegeplatte, die durch die anliegende Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite verformt wird. An den Rändern ist die Biegeplatte fest eingespannt. In der Mitte der Einspannung treten die größten mechanischen Spannungen auf, weshalb an diesen Positionen piezoresistive Messwiderstände angeordnet werden, um die größte Empfindlichkeit zu erreichen.

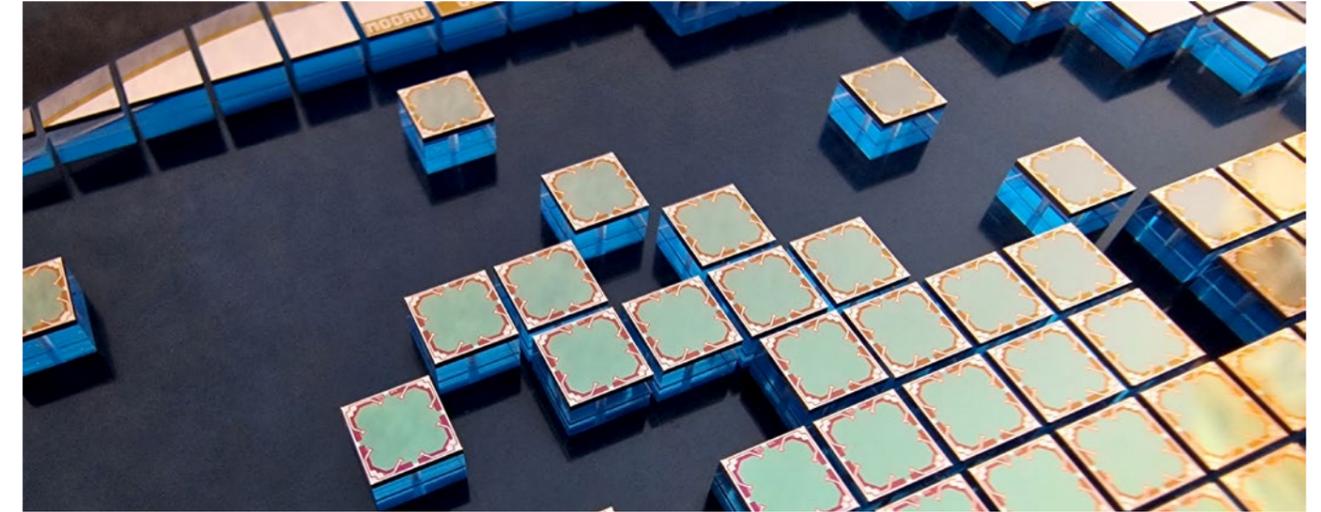
An den Rändern der Biegeplatte sind jeweils zwei Longitudinal- und zwei Transversalwiderstände angeordnet, die elektrisch als Wheatstone'sche Messbrücke verschaltet sind. Durch diese in Sensoren häufig verwendete Schaltung werden Einflüsse, die auf alle Widerstände gleichermaßen wirken, wie z. B. der Temperatureinfluss, in erster Näherung eliminiert.

Die Herstellung solcher Drucksensoren erfolgt in einem hochparallelen Halbleiterprozess auf Wafer-Level. Dabei werden auf der Vorderseite des Wafers die Messwiderstände einschließlich ihrer elektrischen Kontaktierung hergestellt. Auf der Wafer-Rückseite werden die Membranen erzeugt, indem ein Teil des Wafers bis zur vorgesehenen Dicke der Biegeplatte weggeätzt wird. Ein als „1st-Level-Packaging“ bezeichneter Prozessschritt beschreibt die Verbindung der Waferrückseite mit einem zweiten Wafer, der zur mechanischen Stabilisierung des späteren Sensorchips dient. Dieser Wafer kann wie der Sensorwafer aus Silizium oder auch aus Glas bestehen. Im Falle eines Verstärkungswafers aus Glas kommt es trotz Verwendung eines speziellen Glasmaterials, das weitgehend an den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Siliziums angepasst ist, zu einem thermomechanischen Mismatch. Dieser kann bei ungünstiger Anordnung des Sensorchips bei Temperaturänderungen zu Fehlersignalen führen.

Die Kombination aus Si-Wafer und Verstärkungswafer wird als Waferverbund bezeichnet, das Äquivalent auf Chiplevel wird Wandlerkern genannt.

Primäres Ziel war es, den Einfluss mechanischer Spannungen auf das Messsignal, die durch die Montage des Sensorchips auf einen Träger entstehen, durch ein geeignetes Chipdesign zu minimieren. Dabei geht es weniger um reproduzierbare, zeitinvariante Störsignale, die im Rahmen der Kalibrierung eliminiert werden,

sondern um Signale, die aufgrund von Relaxationsprozessen ihre Intensität mit der Zeit ändern. Diese Fehler sind für Driften und instabile Sensorsignale verantwortlich.



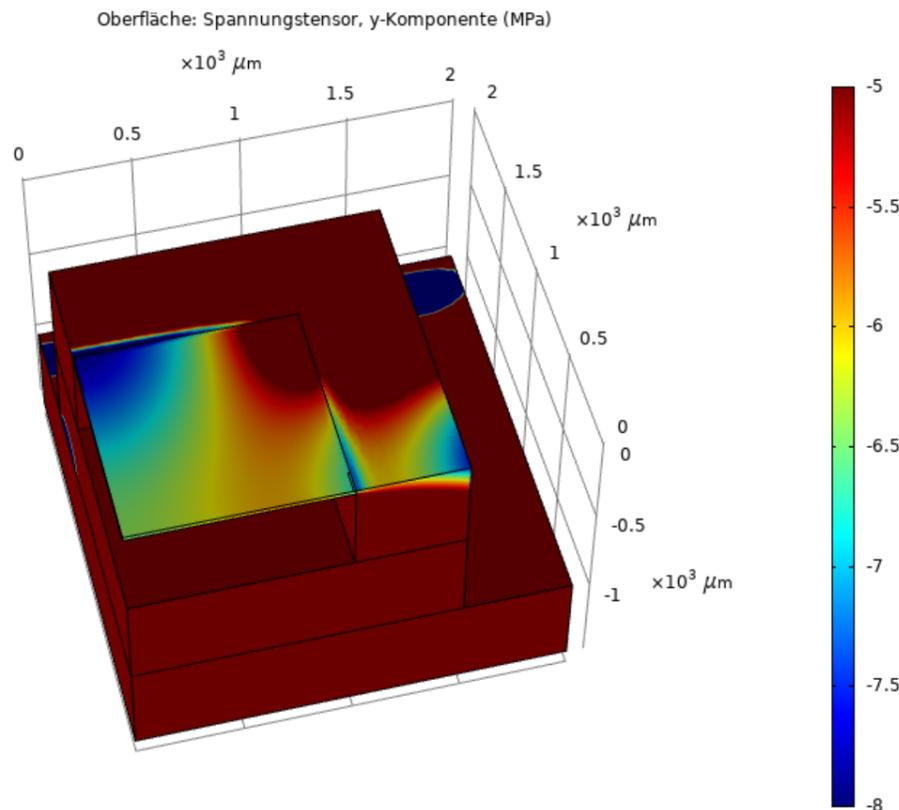
Drucksensorwandlerkerne

Der Lösungsansatz war, durch ein geeignetes Layout der Messbrücke auf dem Chip, insbesondere durch die exakte Positionierung der Messwiderstände, die durch die Montagespannungen verursachten Widerstandsänderungen in der Brückenschaltung zu kompensieren. Zudem wurden die Wirkungsketten für Messfehler, die aus der Aufbau- und Verbindungstechnik piezoresistiver Drucksensor-Chips resultieren, untersucht. Auf Basis der Ergebnisse wurden die Entwurfsmodelle für derartige Chips so verbessert, dass zukünftige Entwicklungen geringere Messfehler und eine erhöhte Stabilität aufweisen.

Mit den im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelten Tools konnten Drucksensor-Chips design und

prozessiert werden, die sich durch signifikant reduzierte Einflüsse aus der Aufbau- und Verbindungstechnik auszeichnen. Dies eröffnet Spielräume für Montage-Technologien und ermöglicht gleichzeitig die Drift der Sensoren zu reduzieren und größere Genauigkeiten zu erreichen.

Die erarbeiteten Tools für die Simulation der Sensoren mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM) sind geeignet für die zielgerichtete Auslegung von Sensoren mit reduziertem Montagespannungseinfluss. Es besteht noch Verbesserungspotential bezüglich der Präzision der Simulationsergebnisse, dies erfordert jedoch genauere Kenntnis der Materialparameter. Dennoch können mit den erarbeiteten Methoden die Parameter von Drucksensor-Wandlerkernen vorhergesagt und präziser auf die Ziel-Applikation von Kunden abgestimmt werden. ●



Verformung und Verspannung eines exemplarischen 1/4 Drucksensor-Chips bei thermisch induzierter Belastung von $\Delta T = 100 \text{ K}$

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt Montagespannungsresistente Drucksensorchips (MoDru) wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
Förderkennzeichen: 49MF190171

Entwicklung innovativer Füge Technologien zum Aufbau hochstabiler Druckmessumformer (EFAH)

Die MEMS-basierten piezoresistiven Drucksensoren sind gegenüber anderen Drucksensorarten besonders empfindlich und signalstabil. Daher werden sie überwiegend dort Einsatz finden, wo höchste Anforderungen an die Genauigkeit und Langzeitstabilität der Druckmessung bestehen.

Um auf Basis der piezoresistiven Sensoren Druckmessumformer aufzubauen, sind auf mehreren Ebenen Fügeprozesse nötig, die zu Performanceverlusten führen können.

Der Lösungsansatz bestand darin, die Rückwirkung der Montagespannungen auf das Sensorsignal durch innovative Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnik zu minimieren bei unverändertem Chipdesign.

Daher wurden für die besonders kritische Verbindung zwischen Drucksensor-Wandlern und dem elektrisch-mechanischen Prozessanschluss neue innovative Füge Technologien entwickelt und folgende Füge Technologien betrachtet:

- Eutektisches Au-Si-Bonden,
- Glasfritte-Bonden,
- Lotfugung

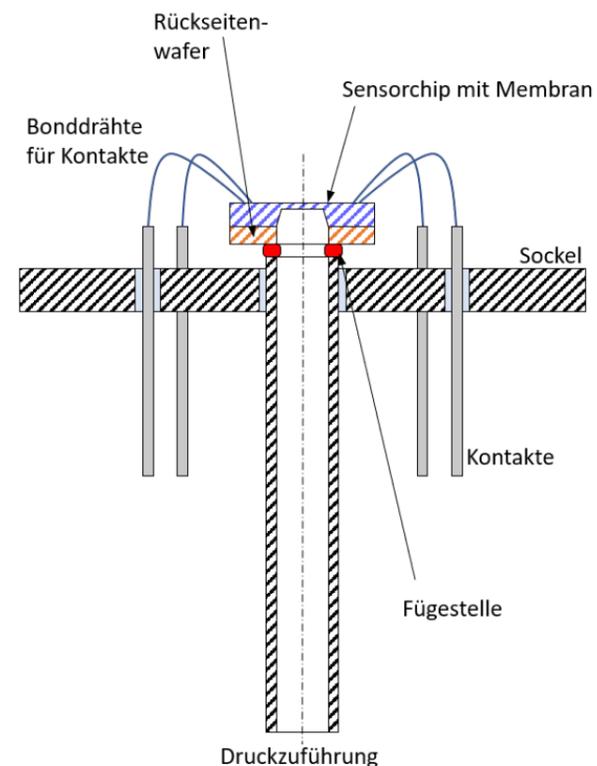
Parallel dazu wurde auch der Prozessanschluss so optimiert, dass Montagespannungen minimiert werden, das Messelement von Quereinflüssen entkoppelt wird, und eine prozesssichere effiziente Montage erfolgen kann. Hierzu wurden mittels FEM-Simulationen Materialkombinationen und Bauteilgeometrie optimiert.

Im Ergebnis wurde die Signalstabilität gegenüber mechanischen und thermischen Einflüssen sowie Feuchtigkeit nicht nur auf Wandlerkernebene sondern auch im Gesamtsystem (Druckmessumformer) erhöht und die Druckfestigkeit sowie die Dichtigkeit auch unter höheren Temperaturen sichergestellt.

Dadurch wird es möglich, piezoresistive Drucksensoren in neuen Anwendungsfeldern zu etablieren oder

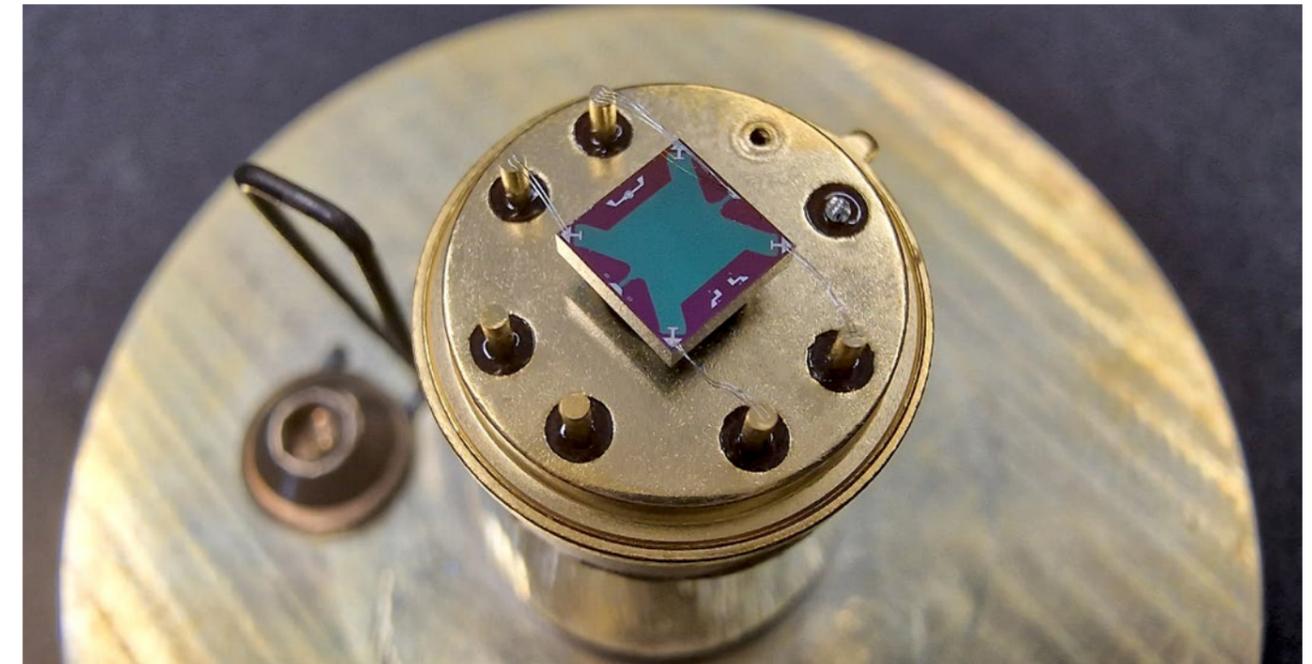
bei gleichen Zielparametern miniaturisierte, kostengünstigere Systeme anzubieten. Zusätzlich wird eine weitere Wertschöpfungsstufe über die Entwicklung und Fertigung von Wandlerkernen hinaus für das CiS Forschungsinstitut erschlossen. Dies unterstützt vor allem kleine und mittelständische Unternehmen, hochstabile Druckmessumformer zu entwickeln.

Um die Versuchsreihen messtechnisch einordnen zu können, wurden als erstes Standardaufbauten umgesetzt. Dabei wurde ein standardisierter und erprobter Sockel und ein in der Industrie verwendeter Epoxidklebstoff verwendet.



Prinzipaufbau eines piezoresistiven Si-Drucksensors auf einem Sockel

Im Anschluss an die ersten Grundlagenversuche mit Standardklebstoffen wurden weitere Versuchsreihen mit Hochleistungsfügeverbindungen durchgeführt.



Aufbau Si-Drucksensorchip auf Sockel

Gemessen wurde dabei die Drift des Messsignals. Die Beaufschlagung mit einem Temperatursprung erzeugte dabei eine Materialalterung. Die Driftänderung stellt ein Maß für die mechanischen Verspannungen im System dar und sollte minimal sein.

Eutektische Legierungen zeichnen sich durch einen niedrigen Schmelzpunkt aus, den sogenannten eutektischen Punkt. Nach Abschluss des Fügevorgangs und der dadurch geänderten Mischungszusammensetzung der eutektischen Partner aufgrund von Diffusionsprozessen, steigt der Wiederaufschmelzpunkt deutlich an. Nach Analyse der Materialeigenschaften wie Härte, Rauheit und Wärmeleitfähigkeit der Materialien, wurde die AuSi-Verbindung als bestmögliche Fügeverbindung im Bereich der eutektischen Verbindungen ausgewählt. Die Verbindung von Gold mit Silizium zeichnet sich dabei durch hohe mechanische Festigkeit, Stabilität gegen Temperaturwechselbelastungen und, bedingt durch ihren hohen Edelmetallgehalt, sehr gute Korrosionsbeständigkeit aus.

Um den Prozessablauf zu definieren, fanden im Vorfeld zahlreiche Einzelversuche statt, um die Prozessparameter zu finden und an die neue Haltevorrichtung anzupassen. Hier standen Parameter wie Vorheiztem-

peraturen von Substrat und Chip sowie Kräfteinstellungen für den Pick-&-Place-Prozess im Vordergrund. Anschließend mussten die Temperaturen des Aufheizens sowie des Abkühlvorganges sowohl des Collets als auch der Substratheizung so festgelegt werden, dass ein optimales Anfließen des Eutektikums gewährleistet werden kann.

Die anschließenden Messergebnisse der eutektischen Verbindung zeigten eine im Vergleich mit Epoxidklebstoff deutlich geringere Drift.

Die Glaslotverbindung ist in Bezug auf die Materialoberflächen relativ tolerant gegenüber unterschiedlichsten Materialien. Der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE) von Glaslot liegt nahe am CTE von Silizium, sodass hier gutes Anschmelzen zu erwarten ist. Schwierigkeiten können sich hingegen mit dem zweiten Fügepartner, dem elektrisch-mechanischen Prozessanschluss ergeben. Dieser ist häufig aus Edelstahl oder Kovar.

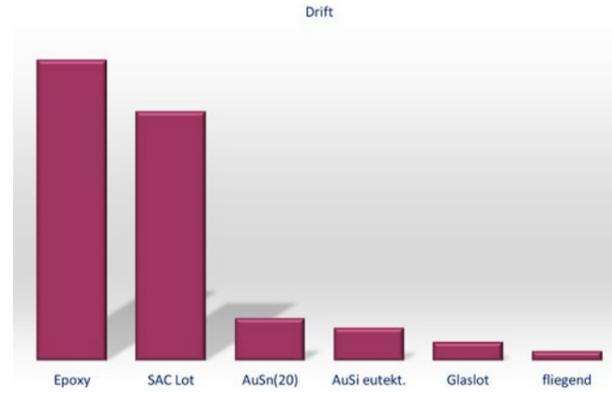
Nach der Etablierung eines geeigneten Dosiervorgangs, konnten erste Tests zur Vorkonditionierung der Glaslotmaterialien vorgenommen werden. Eine Verfahrensentwicklung zum automatisierten

Pick-&-Place-Prozess der Druckwandlerkerne auf den elektrisch-mechanischen Prozessanschluss wurde adaptiert.

Aufwendiger verliefen die Umschmelzversuche zur Eruiierung der optimalen Bondtemperatur. Versuche mit Glaslot auf unterschiedlichen Sockelmaterialien zeigten, dass die mechanischen Verspannungen zwischen Edelstahl und dem Glaslot groß waren. Versuchsreihen mit dem Grundmaterial Kovar waren dagegen erfolgreicher. Durch die Optimierung einiger Parameter im Fügeprozesses konnte ein optimaler Glaslotprozess nachgewiesen und etabliert werden.

Um Fügestellen resistent gegen Medieneinflüsse zu machen und zudem hochtemperaturfeste Verbindungen zu schaffen, sind Metalllote eine gängige Wahl. Hier überzeugen die häufig genutzten SAC-Lote mit guter Verarbeitbarkeit und Medienresistenz. Weitere Metalllote mit einer erhöhten Schmelztemperatur wie SnSb(10), PbAg(1,5)Sn(1) oder auch das AuSn(20) wurden getestet. Für die Ankontaktierung an den Chip ist bei Metallloten in der Regel eine Metallisierung der Siliziumoberfläche notwendig, was einen zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Im Vergleich der Metalllote untereinander schneidet AuSn(20) bezüglich des Signaldrifts besonders gut ab. Das SAC-, SnSb(10)- sowie das PbAg(1,5)Sn(1)-Lot



Schematischer Vergleich der Sensordriften für Klebstoffe (Epoxy), Metalllote (SAC, AuSn), eutektisches Bonden sowie Glaslot und fliegenden Aufbau

liegen zum Teil deutlich darüber. Die Leckagemessung der Metalllote zeigt einen ähnlichen Trend. AuSn(20) erreichte eine Dichtheitsrate von ca. 80 % und lag damit deutlich über den Werten der anderen Metalllote.

Ein Vergleich der Drift bei Temperaturbelastung zeigte, dass eutektisches Bonden, metallische Lotverbindungen, hier im speziellen die AuSn(20)-Verbindung, und Glaslotverbindungen deutlich geringere Driften durch die Rückwirkung der Montagestelle auf die Messbrücke aufwiesen als Standardklebeverbindungen. Zusätzlich wurden Chips im „fliegenden Aufbau“ gemessen, d.h. diese wurden nur von Bonddrähten gehalten, ganz ohne direkte mechanische Verbindung zum Trägersubstrat. ●

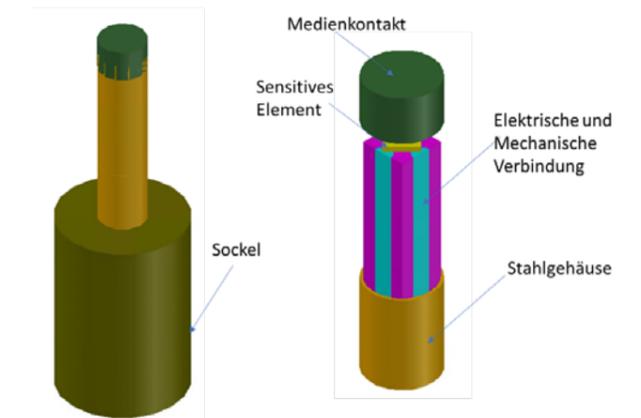
Drucksensor für Ultra-Höchst-Druck-Anwendungen (DS-NEMO)

Zur Herstellung von Drucksensoren werden verschiedene Technologien und Messprinzipien angewendet. Weit verbreitet ist das piezoresistive Messprinzip. Messwiderstände werden als Dickschicht- oder Dünnschichtwiderstände realisiert, implantierte Messwiderstände in Silizium (MEMS) finden ebenfalls eine breite Anwendung. Während für die Dickschicht- oder Dünnschichttechnik vorzugsweise Verformungskörper aus Keramik bzw. aus Stahl mit weitgehend standardisiertem Aufbau verwendet werden, besteht bei siliziumbasierten Drucksensoren ein breites Spektrum an Aufbauten. Traditionell verwenden Drucksensoren eine Biegeplatte zur Vergrößerung der Empfindlichkeit. Durchmesser und Dicke sind abhängig von dem Messbereich. Ausgenutzt wird die Biegespannung. Die Biegespannung wird mittels dehnungsempfindlicher Messwiderstände bestimmt. Da die Biegespannung in der Ebene liegt, ist diese mit den traditionellen Messwiderständen leicht zu bestimmen.

Zum Messen von hohen Drücken ist keine Biegeplatte oder Membran mehr notwendig. Die mechanische Spannung ist für ein gut verwertbares Signal ausreichend. Es liegt aber eine homogene Druckspannung vor. Diese ist senkrecht zur Ebene gerichtet und mittels der zur Verfügung stehenden Messwiderstände schwer auszuwerten.

Das aktuell in Bearbeitung befindliche Projekte DS-NEMO verfolgt einen Lösungsansatz, mit folgenden Bedingungen:

- Einsatz von mittels MEMS-Technologien hergestellter piezoresistiver Si-DMS,
- Medienkontakt über Stahl,
- frontbündige Platte,
- Druckbereich bis ca. 2000 MPa,
- Messgenauigkeit <0,5 % FS,
- maximale Einsatztemperatur 200°C.



Drucksensor mit Sockel zum Einbau (links), Sensorkopf elektrischer und mechanischer Verbindung

Damit werden die Vorteile, die MEMS-basierte piezoresistive Si-Sensorelemente aufweisen, wie hohe Linearität, geringste Hysteresen und große Langzeitstabilitäten für den Anwendungsbereich der hohen Drücke nutzbar. Eine kompakte Bauweise und eine weitere Miniaturisierung hinsichtlich des Bauraumes sind möglich. Große Einsatzpotenziale liegen in den Bereichen Wasserstoffspeicherung, industrielle Herstellungsprozesse (z.B. Autofrettage), Luftfahrt u.a.m. ●

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt Entwicklung innovativer Füge-technologien zum Aufbau hochstabiler Druckmessumformer (EFAH) wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Förderkennzeichen: 49MF200074

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt Drucksensor für Ultra-Höchst-Druck-Anwendungen (DS-NEMO) werden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

Förderkennzeichen: 49MF220036



MEMS: SILIZIUMBASIERTE TEMPERATURSENSORIK

Eine effiziente und robuste Prozessmesstechnik ist notwendig für das Gelingen der industriellen Automatisierung in der Produktion. Prozessparameter wie Temperatur, Druck, pH-Wert oder Füllstände müssen mit hoher Genauigkeit und zum Teil bei extremen Umgebungsbedingungen sicher bestimmt, qualitätsgerecht gesteuert und optimiert werden können. Dafür werden vielfach redundante Systeme benötigt, um sichere Prozesse zu gewährleisten. Hierbei spielen Temperatur- und Drucksensoren für eine präzise Messwert-erfassung eine entscheidende Rolle.

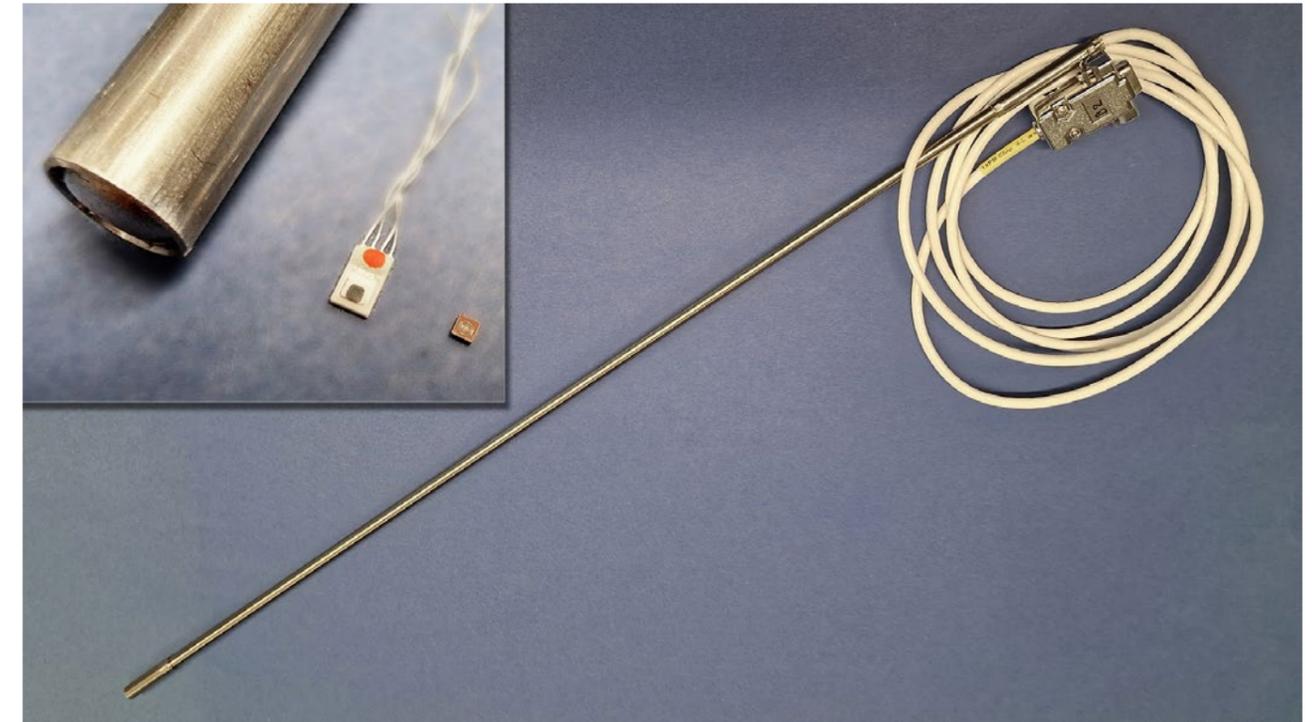
Im Rahmen der Entwicklung von Temperatursensoren ist eine Vielzahl an Anforderungen zu beachten. Darunter zählt die Redundanz (Ausfallsicherheit) eines Sensorsystems oder die Beständigkeit des Systems unter extremen Einsatzbedingungen. Hierbei ist die Sensorentwicklung für den kryogenen Temperaturbe-

reich besonders interessant, um Wasserstoff als Energieträger der Zukunft sicher anzuwenden.

Wasserstoff ist das leichteste Element in Periodensystem der Elemente, bei Normaltemperatur gasförmig und 14-mal leichter als Luft. Die extreme Reaktionsfreudigkeit erfordert eine permanente und genaue Überwachung bei der Herstellung, Transport, Speicherung und Anwendung. Unter hohem Druck oder sehr tiefen Temperaturen, kann Wasserstoff komprimiert oder verflüssigt werden, um das Volumen zu verkleinern und damit Transport und Speichermengen zu verbessern.

Das CiS Forschungsinstitut bearbeitete erfolgreich Forschungsprojekte, die diese Zielstellungen mittels siliziumbasierter Sensorstrukturen lösen und somit eine Technologieplattform für kundenspezifische Entwicklungsprojekte erstellt. ●

Redundante Temperaturmessung bis 300°C (Redundanz)



Prüfling mit angelötetem Sub-D-Steckverbinder sowie Halbleiterdiode und Sensoraufbau

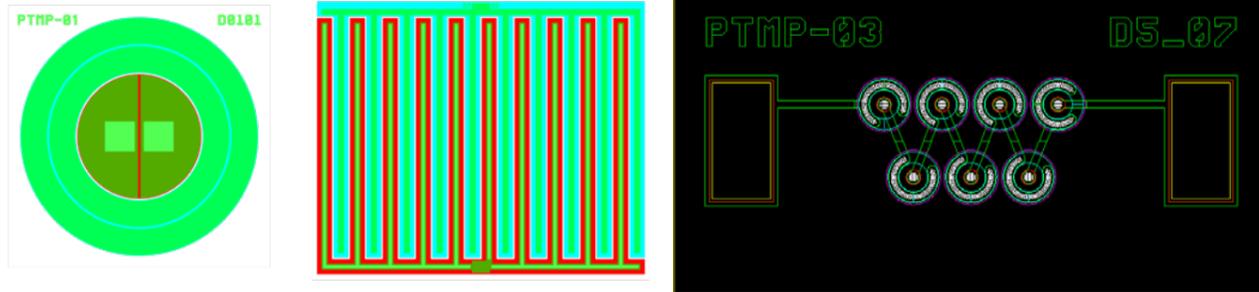
Kunden aus verschiedenen Branchen wie Energiewirtschaft, Industrie oder Mobilität sind daran interessiert, Temperaturfühler, die auf konventionellen Technologien beruhen zu ersetzen. Im Detail werden schon vorhandene Sensoren um funktional gleich operierende Sensoren erweitert, welche jedoch auf einer anderen Technologie beruhen. Solche Systeme werden als diversitär redundant definiert und erhöhen die Betriebssicherheit eines Sensorsystems erheblich. Bei der Verwendung von zwei Sensoren, die sich bezüglich ihrer Kennlinie signifikant unterscheiden, kann durch simultane Datenauslese und Vergleich während des Betriebs festgestellt werden, ob eine Komponente ausgefallen ist.

Bei dem Einsatz von drei Sensoren kann beim Ausfall von einer Komponente durch die Verwendung der zwei noch intakten Teilkomponenten noch der richtige Messwert generiert werden. Durch die Redundanz wird damit die Zuverlässigkeit gegenüber Einzelsensoren erheblich verbessert, was bisher verschlossene

Einsatzfelder im Bereich industrielle Messtechnik oder Automotive eröffnet.

Im Projekt wurde ein redundanter Sensor realisiert, der aus einem dafür speziell hergestellten Temperaturfühler Pt1000 der Güteklasse A eines Industriepartners und einer Halbleiterdiode, gefertigt im CiS Forschungsinstitut, besteht. Diese wurden von einem weiteren Industriepartner zu fertigen Temperaturfühlern konfektioniert und anschließend extern validiert. Zudem wurde eine Elektronik und ein dazugehöriges Computerprogramm zur Datenaufnahme realisiert.

Um ein redundantes System ausschließlich aus Dioden zu betreiben, sollten diese signifikant unterschiedliche Kennlinien haben. Die Kennlinien der unterschiedlichen Designs wurden mit dem am CiS Forschungsinstitut vorhandenen Simulationstools berechnet, wobei auch die Dotierungsprofile variiert wurden.



Verschiedene Layouts zur Generierung von unterschiedlichen Kennlinien; Links: CiS p/n-SOI-Diode; Mitte: großflächige Diode in Form einer Interdigitalstruktur; Rechts: Reihenschaltung von sieben p/n SOI-Dioden

Zur Kalibrierung wurden zunächst die stromabhängigen Temperatur-Spannungs- bzw. Temperatur-Widerstands-Beziehungen aller Prüflinge am Eispunkt bei 0°C ermittelt. Anschließend erfolgte eine individuelle Vergleichskalibrierung aller Prüflinge in Schritten von 20 K in einem mit Wasser und Glykol gefüllten Badthermostaten im Temperaturbereich von -40°C bis +40°C, sowie in einem mit Silikonöl gefüllten Badthermostaten im Temperaturbereich von +60°C bis +120°C. Abgeschlossen wurde diese Messreihe mit einer erneuten Kalibrierung aller Prüflinge am Eispunkt.

Allgemein kann anhand der Abweichungsfunktionen der Platinwiderstände aller Prüflinge bezüglich der Normkennlinie festgestellt werden, dass die Exemplarstreuung sowie die Unsicherheiten gering sind. Ferner wurde zur mathematischen Beschreibung der Kennlinien in beiden Fällen ein Polynom zweiten Grades verwendet, welches ausreichend kleine Residuen

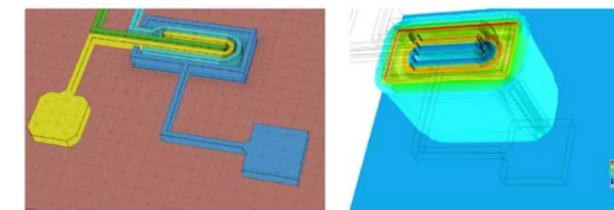
liefert. Bei den Halbleiterdioden fällt hingegen auf, dass Messungen mit einem Messstrom von $I_D = 1 \mu A$ deutlich stärkeren Abweichungen unterliegen, als dies bei höheren Strömen der Fall ist. Dies legt nahe, dass die Dioden bei einem höheren Strom, wie bereits am CiS Forschungsinstitut geschehen, betrieben werden sollten unter Inkaufnahme einer geringfügig höheren Eigenerwärmung. Die verlangt eine maximale Abweichung von $\pm 0,5^\circ C$, welche auch bei sehr niedrigen Strömen eingehalten wird.

Während der Untersuchungen zeichneten sich die Prüflinge durch eine für industrielle Thermometer bemerkenswert geringe Hysterese, ausgezeichnete messtechnische Stabilität und hervorragende Wiederholbarkeit aus. Diese exzellenten Eigenschaften machen sie zu einer vielversprechenden Option für Anwendungen, bei denen Präzision und Redundanz entscheidend sind. ●

Beschreibung des Freezing out-Phänomens mittels quantenmechanischer Simulationstools (Freezing out)

Das freezing out-Phänomen bei Halbleitern muss bei der Entwicklung von hochpräzisen Halbleitersensoren, insbesondere bei tiefen Temperaturen, berücksichtigt werden. Bei tiefen Temperaturen werden die Dotieratome nicht vollständig ionisiert, was zu einer Reduktion der Ladungsträgerkonzentration führt (freezing out).

Innerhalb dieses Projektes wurden quantenmechanische Rechnungen und umfangreiche Messungen an Halbleitern im Temperaturbereich von 4 K bis 300 K durchgeführt. Dies diente dazu, zukünftige Simulationen im MEMS-Bereich und der Halbleiterindustrie in diesem Temperaturbereich auf eine bessere Datenbasis zu stellen und zuverlässiger zu machen.

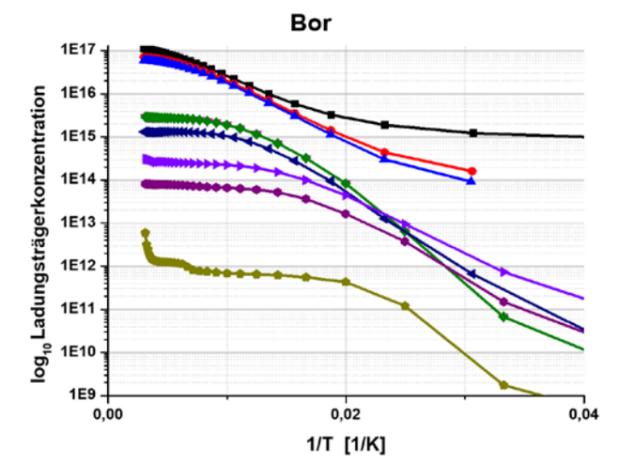


Vernetzung eines Bauteils (jFET) (links) und das damit errechnete Potential (rechts)

Durch Messungen an Hall-Strukturen und an p/n-Übergängen mit unterschiedlichen Bor- und Phosphordotierungen sowie Simulationsrechnungen parallel dazu, konnten im Temperaturbereich bis knapp über dem absoluten Nullpunkt Daten über die Ladungsträgerkonzentration und Ladungsträgerbeweglichkeit bereitgestellt werden, die zukünftige Entwicklungen in diesem Temperaturbereich genauer, schneller und kosteneffizienter machen.

Für verschiedene Bauelemente (Diode, jFET) wurden klassische und quantenmechanische Simulationen durchgeführt und entsprechende Designs erstellt, die anschließend prozessiert wurden.

Die Charakterisierung zeigte eine gute Übereinstimmung von Simulation und Messungen. Damit sind die Simulationstools in der Lage, den Freezing-Out-Effekt bei der Simulation von kundenspezifischen Sensoren besser als bisher zu berücksichtigen.



Gemessene Ladungsträgerdichte in Abhängigkeit von der inversen Temperatur

Mit den generierten Ergebnissen können Halbleitersimulationen im kryogenen Temperaturbereich signifikant verbessert werden. Dies ist wissenschaftlich von Interesse, da es in diesem Bereich bisher kaum belastbare experimentelle Daten gab. Sie sind unabdingbar für die zukünftige großtechnische Anwendung von flüssigem Wasserstoff in der Industrie. ●



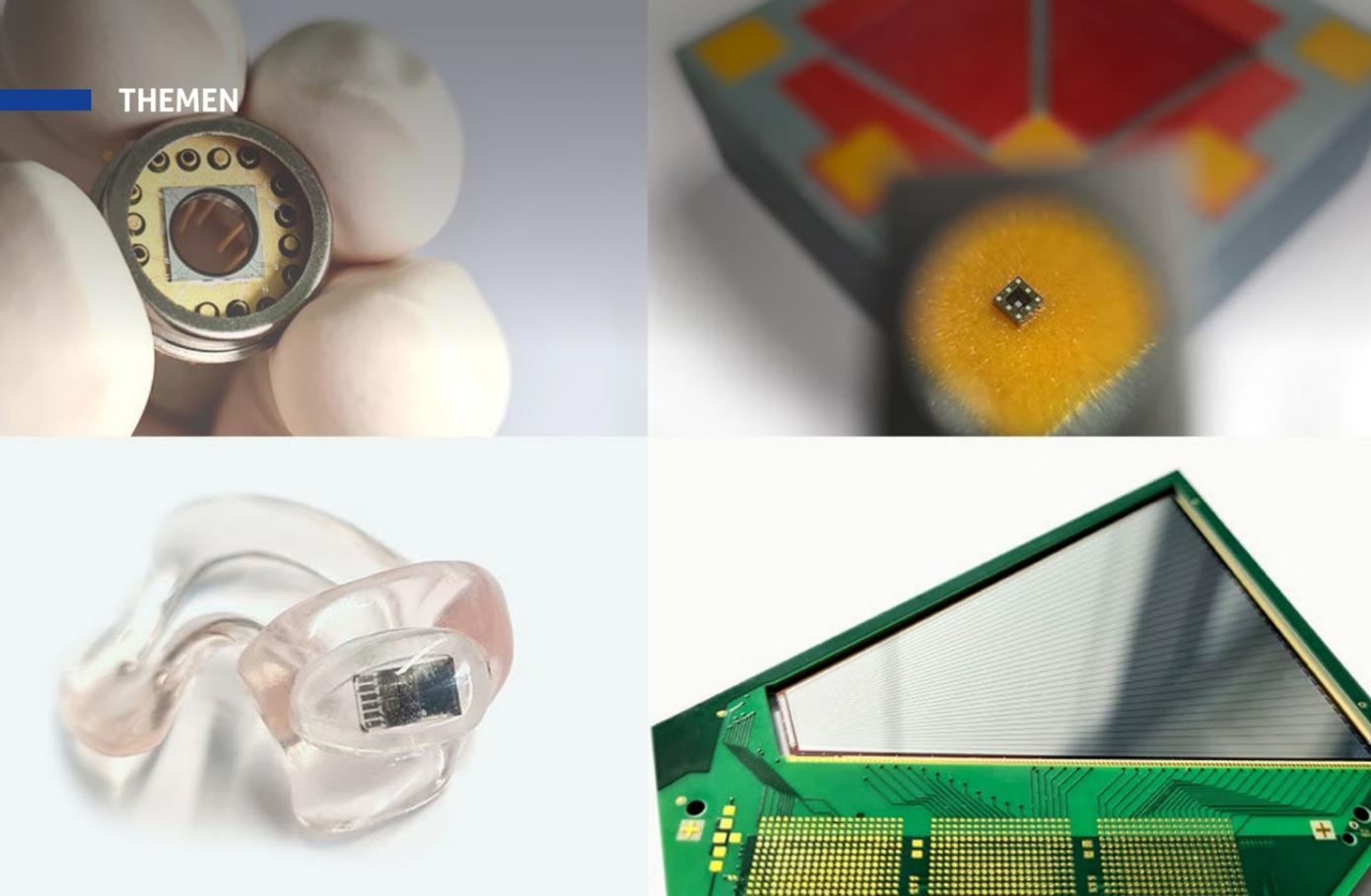
GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt *Redundante Temperaturmessung bis 300°C (Redundanz)* durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.
Förderkennzeichen: 49MF200075



GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt *Beschreibung des Freezing out-Phänomens mittels quantenmechanischer Simulationstools (Freezing out)* durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.
Förderkennzeichen: 49VF190056



MOEMS: SILIZIUM-PHOTODIODEN – MULTITALENTE DER LICHTDETEKTION

Silizium-Photodioden sind seit mehr als 70 Jahren bekannt und zählen somit zu den ersten nutzbaren Halbleiterbauelementen überhaupt. Dennoch stellt diese Technologie und daraus hervorgegangene Spezialisierungen nach wie vor ein hoch innovatives technologisches Themengebiet mit unzähligen Möglichkeiten in der Anwendung dar. Heute sind Photodioden in der Sensorik ebenso wenig verzichtbar wie Transistoren in der Mikroelektronik. Anwendungen sind praktisch in allen technischen Bereichen zu finden – von einfachen lichtgetriebenen Schaltfunktionen (an/aus) bis hin zu hochkomplexen spektral, räumlich oder zeitauflösenden Analysen. Insbesondere bei der Überwachung und Steuerung von Industrieprozessen und Maschinen sind Photodioden ein wichtiges „Sinnesorgan“ der zunehmenden Digitalisierung. Sie dienen unter anderem der Zustandsüberwachung, ermöglichen eine bedarfsgerechte Steuerung der Prozesse sowie Wartungsintervalle und leisten somit einen wichtigen Beitrag zur

verbesserten Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit. Am CiS Forschungsinstitut stellen verschiedene Photodioden-Technologien für den Lichtwellenlängenbereich von 190 bis 1100 nm eine tragende Säule der Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsaktivitäten dar. In Ergänzung zu einfachen, planaren Ausführungen von Einzeldioden und Arrays liefern vielfältige und anspruchsvolle Strukturierungsmöglichkeiten den entscheidenden Vorteil für viele Anwendungen. Mit der im Haus entwickelten MORES-Technologieplattform (Mikro-optischer-Remissions-Sensor) können beispielsweise Lichtquellen und andere Bauelemente direkt in den Photodioden-Chip integriert werden. Diese Technik erlaubt es, besonders kompakte, flache und gleichzeitig geometrisch hoch präzise Baugruppen zu realisieren, die beispielsweise in unserem optischen Nivellierungssensor oder dem medizinischen Im-Ohr-Sensor zum Einsatz kommen. Weiterentwicklungen führten dazu, dass auch die geeigneten Flan-

MOEMS: SILIZIUM-PHOTODIODEN – MULTITALENTE DER LICHTDETEKTION

ken von nasschemisch erzeugten Kavitäten als aktive Gebiete gestaltet werden können. Auf diese Weise lassen sich unter anderem Lichteinfallswinkel detektieren oder ultraschnelle (Taktraten bis einige GHz) oberflächensensitive Detektoren realisieren. In Kombination mit vollständigen Durchbrüchen durch das Siliziumsubstrat – sogenannte through silicon vias (TSV) – können optische Elemente integriert oder Freistrahlen durch den Chip geführt werden. Besonders schädigungsarme Plasmaätzverfahren ermöglichen es dabei, aktive Sensorgebiete ohne Einbußen der charakteristischen Eigenschaften bis auf 10 µm dicht an solche TSV heran zu legen. Mit dieser Technologie lassen sich beispielsweise Partikelstreulichtsensoren

oder Sensoren für die optische Strahlnachführungen realisieren.

Trotz dieser Variantenvielfalt besteht nach wie vor Bedarf an neuen Technologien und Erweiterungen, um die hohen Anforderungen einiger Anwendungen zu erreichen, neue Miniaturisierungsgrade zu ermöglichen oder die Signalqualität über den bisher erreichbaren Stand hinaus zu verbessern. Im Rahmen verschiedener Förderprojekte entwickeln und erproben wir dafür geeignete neue Verfahren für die Halbleiterbearbeitung sowie Aufbau- und Verbindungstechniken. Einige dieser im Berichtsjahr 2023 abgeschlossene Vorhaben werden im Folgenden vorgestellt.

Entwicklung semitransparenter optischer Sensoren als Bestandteile von Mikro- und Optoelektronischen Systemen (Tandemdiode)

Eine besonders präzise Wegmessung kann mit optischen Verfahren bewerkstelligt werden, bei der die Wellenlänge des Lichts selbst als grundlegender Streckenmaßstab angesetzt wird. Eine elegante Möglichkeit der Wegmessung ist z.B. über die ortsabhängige Intensität einer stehenden Welle (Stehende-Wellen-Interferometer). Die anwendungsbezogenen Möglichkeiten solcher kompakten Systeme sind derzeit noch Gegenstand laufender Forschung, für die wir eng mit der TU Ilmenau (Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Team Prof. Manske) zusammenarbeiten. Dabei wird ein Laserstrahl auf einen am beweglichen Objekt angebrachten Spiegel gelenkt und das reflektierte Licht interferiert mit dem einfallenden Laserlicht. Durch Interferenz der kohärenten Teilstrahlen entstehen Interferenzminima und -maxima, deren räumliche Lage unmittelbar vom Abstand des Messobjekts zum Detektor abhängig sind. Zur Detektion des räumlichen Intensitätsverlaufs wird ein transparenter Detektor mit minimaler Reflektion benötigt. Weiterhin sollte die Dicke des Detektors (bzw. der absorbierenden Schicht) für optimale Performance ein ungeradzahliges Vielfaches vom Viertel der Laserwellenlänge betragen. Für den Anwendungsfall eines Helium-Neon-Lasers sollte die absorbierende Siliziumschicht daher, unter Beach-

tung der Brechzahl von Silizium, ein ungeradzahliges Vielfaches von 42 nm sein. Die zu entwickelnde Technologie soll für die industrielle Anwendung des Prozesses ausgelegt werden.

Weiteres Entwicklungsziel war es, zwei transparente Detektoren übereinander zu fertigen. Mit einem solchen Detektor lässt sich, neben dem Abstand, sehr einfach die Bewegungsrichtung bestimmen. Der Abstand der vertikal angeordneten Detektoren muss dabei im Bereich weniger zehn Nanometer genau eingestellt werden können. Dies lässt sich, bei Verwendung zweier separater Detektoren mit herkömmlichen Aufbau- und Verbindungstechniken nicht erreichen. Im Projekt sollte daher eine Lösung auf Waferlevel gefunden werden. Im Rahmen der Entwicklungen wurden zwei Detektor-konzepte konzipiert, optisch simuliert, gefertigt und charakterisiert.

Konzept I: Detektor auf Basis eines silicon on insulator (SOI) Substrats.

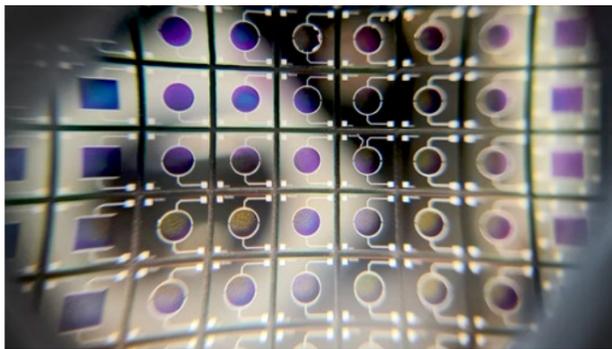
Bei diesem Detektortyp wurde die Dicke der absorbierenden Siliziumschicht mittels thermischer Oxidation eingestellt. Um die Transparenz zu gewährleisten, wurde die Silizium-Trägerschicht des SOI-Materials

an der optisch aktiven Stelle entfernt. Ergebnis ist eine optisch aktive Membranstruktur mit nur wenigen 100 nm Dicke und mit minimaler Reflektion für die Laserwellenlänge. Aufgrund der Schichtspannungen kommt es dabei zu Verformungen der Membran. Um optimale optische Eigenschaften zu erhalten, mussten diese Verformungen möglichst gering gehalten werden. Messungen zeigen, dass der gewählte Schichtstapel nach oben gewölbte Membranen hervorbringt. Der Höhenanstieg erfolgt dabei sehr steil, gefolgt von einem ebenen Plateau. Diese Membranstruktur zeigte im Stehende-Wellen-Interferometer eine gute Performance. Außerdem konnten bei diesem Detektortyp alle elektrischen Zielparameter (Diodenverhalten und Grenzfrequenz) erreicht werden.

Konzept II: Tandemdetektor auf Glassubstrat.

Bei diesem Detektortyp werden schon im CMOS-Prozess zwei voneinander elektrisch getrennte lichtab-

sorbierende Schichten auf ein Glassubstrat aufgebracht. Auch dieser Schichtstapel wird so ausgelegt, dass Transmission maximal und Reflektion minimal werden. Die lichtabsorbierende Schicht wird von einer wenige Nanometer dicken polykristallinen Siliziumschicht gebildet. Hier wurden im Rahmen des Projektes geeignete Prozessparameter für die Abscheidung der Schicht gefunden sowie die technologische Folge der Fertigungsschritte entwickelt. Die prinzipielle Funktionsweise dieser Detektoren konnte nachgewiesen werden, für die Erreichung der gewünschten elektrischen Performance ist jedoch weitere Forschung und Entwicklung nötig. Vorteil dieses Detektorkonzeptes ist die mechanische Stabilität des Aufbaus und die doppelte Diode in sehr gut definiertem Abstand. Die Prozessparameter und die Eigenschaften der polykristallinen Siliziumschicht müssen für eine gute Detektorperformance aber noch weiter verbessert werden.



SOI-Detektors auf Waferlevel



Tandemdetektor auf Glassubstrat. Es sind auch Testfelder zur Bewertung der Einzeldioden zu erkennen.

Galvanisch getrennter Inkrementalsensor (GalGIS)

Der Markt für galvanisch getrennte Mehrkanal-Fotodioden wird durch Bereiche mit hohen Sicherheitsanforderungen getrieben. In der Medizintechnik dienen diese dem Schutz des Menschen, der Sicherung störungsfreier Messergebnisse und ist auch Bestandteil verschiedener Normen für Medizinprodukte. Im Luft- und Bahnverkehrswesen dient die Trennung dem Erreichen von Redundanz, also elektrisch unabhängigen Informationen zur Absicherung von Teil-Systemausfällen. Höchste Anforderungen an Qualität und Sicherheit der Produkte sind hier grundlegend.

Bei Systemen und Sensoren, die auf die gleichzeitige Bewertung mehrerer Kanäle angewiesen sind, beispielsweise optische Drehratengeber, führt diese Forderung nach einer galvanischen Trennung bislang zu deutlich erhöhtem Aufwand. Bisher kann diese Bedingung nur erfüllt werden, wenn jeder Messkanal baulich getrennt und separat in solche Systeme integriert wird. Dies schränkt den erreichbaren Miniaturisierungsgrad erheblich ein und erhöht Montage- bzw. Justage-Kosten.

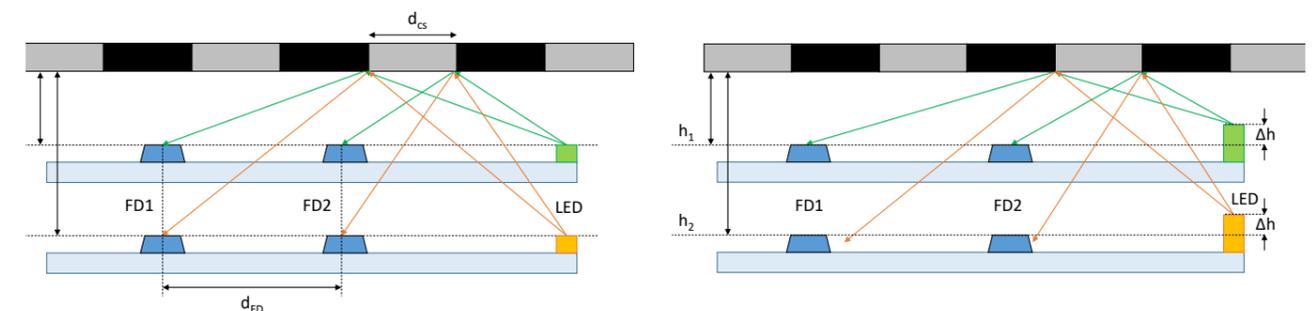
Ziel war es, eine Technologie für monolithische Photodioden-Arrays zu entwickeln, deren einzelne Segmente bereits im Chip die galvanische Trennung realisieren. Im späteren System müssen somit nicht mehr viele Einzelbauelemente, sondern nur noch eine einzige Baugruppe integriert werden.

Zusätzlich soll zudem mit der Sub-Mikrometer-Präzision der Halbleitertechnologien auch eine sehr viel genauere, relative Position bzw. Abstände der Segmente erreicht werden, als es mit einer händischen Justage von einzelnen Baugruppen möglich ist.

Als Demonstrator dient ein optischer Drehratengeber (Inkrementalsensor), wie er im Schienenverkehr zur Überwachung und Regelung der Fahrgeschwindigkeit zum Einsatz kommt.

Eine elektrische Isolation von einzelnen Bereichen innerhalb eines Siliziumchips ist nicht ohne weiteres möglich, da das Grundmaterial Silizium ein Halbleiter ist und somit eine elektrische Verbindung zwischen den Strukturen auf einem Wafer besteht. Zudem kommt es bei diesen hohen Spannungen auch zu elektrischen Überschlüssen über Luftstrecken, sobald ein Abstand von 1 mm unterschritten wird. Diese Grenzen der Miniaturisierbarkeit wurden mit der entwickelten Technologie überwunden.

Dazu wird ein spezieller Siliziumwafer eingesetzt, dessen aktive Schicht (nur wenige Mikrometer dick) durch eine integrierte dielektrische Schicht (Siliziumdioxid) vom Grundmaterial getrennt ist (sogenannte Silicon-On-Insulator Wafer, kurz: SOI). Die aktive Schicht wird im Zuge der Wafer-Prozessierung lokal bis hinunter auf diese integrierte Isolationsschicht geätzt, sodass



Skizze des optischen Strahlengangs des Inkrementalsensors; links: optimierter Aufbau ohne Abstandsabhängigkeit; rechts: nicht optimierter Aufbau, bei dem die Phasenlage vom Abstand zwischen Sensor und Codescheibe abhängt.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt Entwicklung semitransparenter optischer Sensoren als Bestandteile von Mikro- und Optoelektronischen Systemen (Tandemdiode) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Förderkennzeichen: 49VF200011

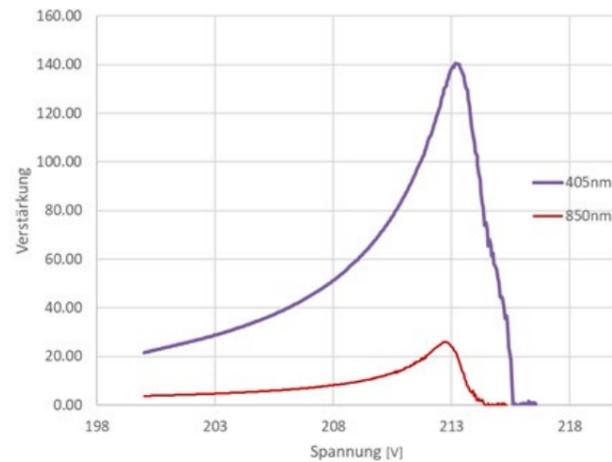


Abbildung 1: Spannungsabhängige Verstärkungsfaktoren des Ausgangssignals für blaues und nahinfrarotes Licht.

Ausgehend von einer optimierten Dotierungsverteilung, bei welcher der Exzess-Rauschfaktor des Sensors verringert wird und die Durchbruchspannung den gewünschten Wert erreicht, wurde eine Bauelement-Struktur entworfen, die einen flachen pn-Übergang aufweist und einen frühzeitigen elektrischen Durchbruch verhindert.

Für den blauen und violetten Spektralbereich, bei dem Licht nur wenige Mikrometer oder sogar nur einige 100 nm tief in das Silizium eindringt, wurden besonders flache Dotierungsprozesse entwickelt.

Durch die somit erreichte Justierung der Tiefe der Photogenerationszone, speziell für kurzwelliges Licht, wird die Verstärkung der APD für blaues und violettes Licht optimiert. Langwelliges Licht wird hingegen weniger verstärkt, da dieses im Mittel tiefer eindringt und so die Ladungen erst hinter den Verstärkungszonen generiert. Diese so bereits modifizierte Quanteneffizienz konnte zusätzlich durch eine Anpassung der Antireflexionsbeschichtung erhöht werden.

Weiterhin wird eine niedrige Betriebsspannung durch eine Kombination von Maskenentwurf, Dotierungsprozess und zusätzliche Grabenstrukturen realisiert. Dabei wird die statistische Abweichung durch Multiplikation der Stoßionisationsprozesse reduziert. Somit werden die Oberflächenisolation und das gewünschte

elektrische Feldprofil gleichzeitig erreicht.

Auf diese Weise haben wir eine BVAPD hergestellt, in der die Verstärkung für Blau-Violett deutlich gegenüber dem Stand der Technik erhöht und der Rauschfaktor reduziert werden.

In Abbildung 1 wird dieser Effekt anhand der Ergebnisse erster Demonstratoren verdeutlicht. Im blauen Spektralbereich konnte eine Verstärkung der Ausgangssignale um über Faktor 100 erreicht werden, im roten Spektralbereich beträgt die Verstärkung der Ausgangssignale dagegen weniger als 30.

Auch die spektrale Verstärkung in Abbildung 2 zeigt, dass diese Technologie die gewünschte hohe Empfindlichkeit für Wellenlängen ab 400 nm und darunter verstärkt. Als Betriebsspannung kann eine Spannung von 210 V gewählt werden, die sowohl eine hohe Verstärkung als auch ein geringes Rauschen aufweist. Diese relativ niedrige Betriebsspannung kann sowohl die Integration der Frontend-Elektronik als auch die praktische Anwendung erleichtern. Die hohe Verstärkung im blauviolettten Bereich kann die geringe intrinsische Quanteneffizienz des Siliziums in diesem Bereich kompensieren.

Die BVAPD kann sehr gut in der Fluoreszenzdiagnostik, Nuklearmedizin, elektromagnetischen Kalorimetrie

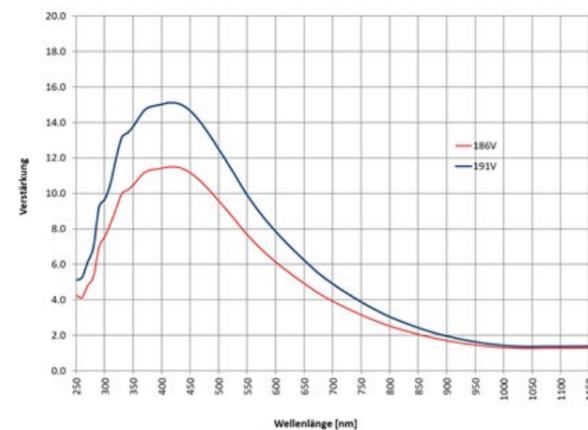
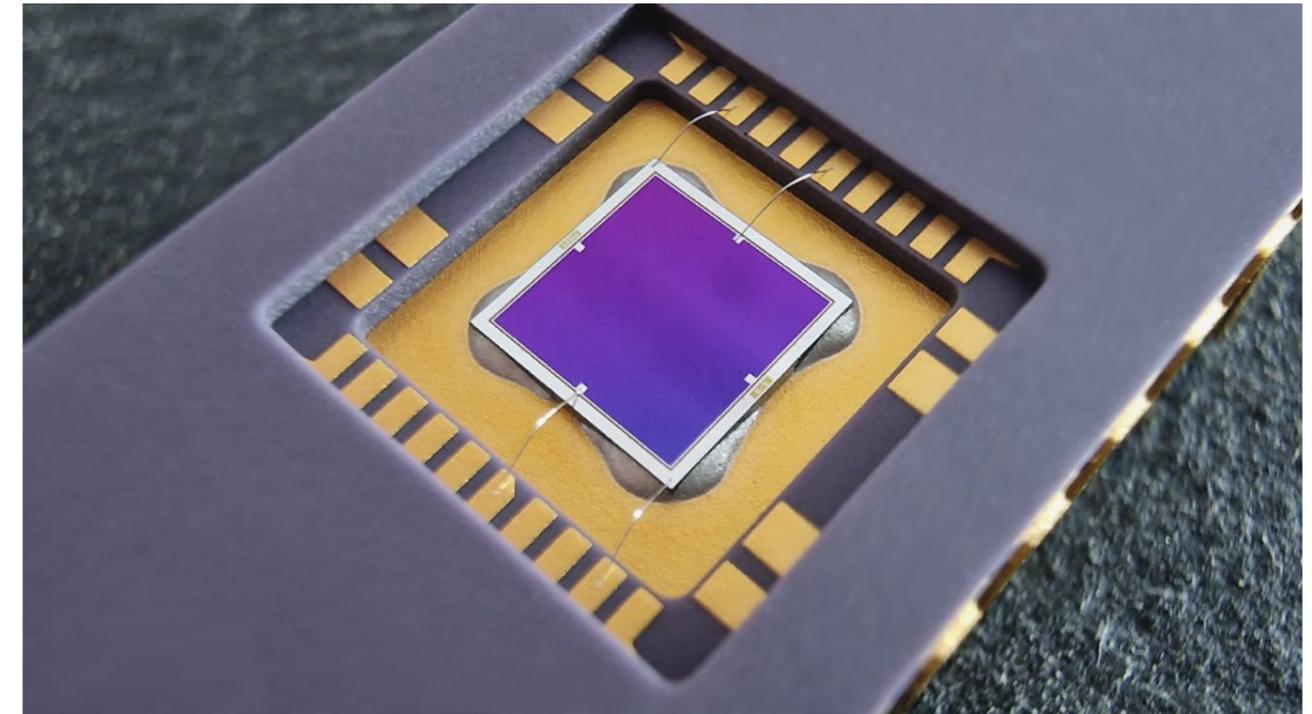


Abbildung 2: Verlauf der spektralen Verstärkung bei Betriebsspannung 186 V bzw. 191 V. Zu erkennen ist die deutliche Steigerung der Empfindlichkeit im Bereich um 400 nm und kürzen Wellenlängen.

und zur Leistungsregulierung und Überwachung von blauen Lasern in Hygienebereich eingesetzt werden. Derzeit sind die BVAPDs im Chipformat 5 mm x 5 mm mit einer gesamten aktiven Fläche von 4,4 mm x 4,4 mm sowohl als Einzelsensor als auch als 2x4- und 3x3-Sensorarrays verfügbar.

Die im Rahmen eines geförderten Projektes geschaffenen Technologien und Demonstratoren stehen nun für die Entwicklung und Fertigung applikations- und kundenspezifischer Detektoren und Sensorsysteme zur Verfügung. Die entwickelte Technologie kann auf andere Formate und Wellenlängenbereiche übertragen und ausgeweitet werden. ●



Demonstrator einer BVAPD im Chipformat 5 mm x 5 mm

Gefördert durch:



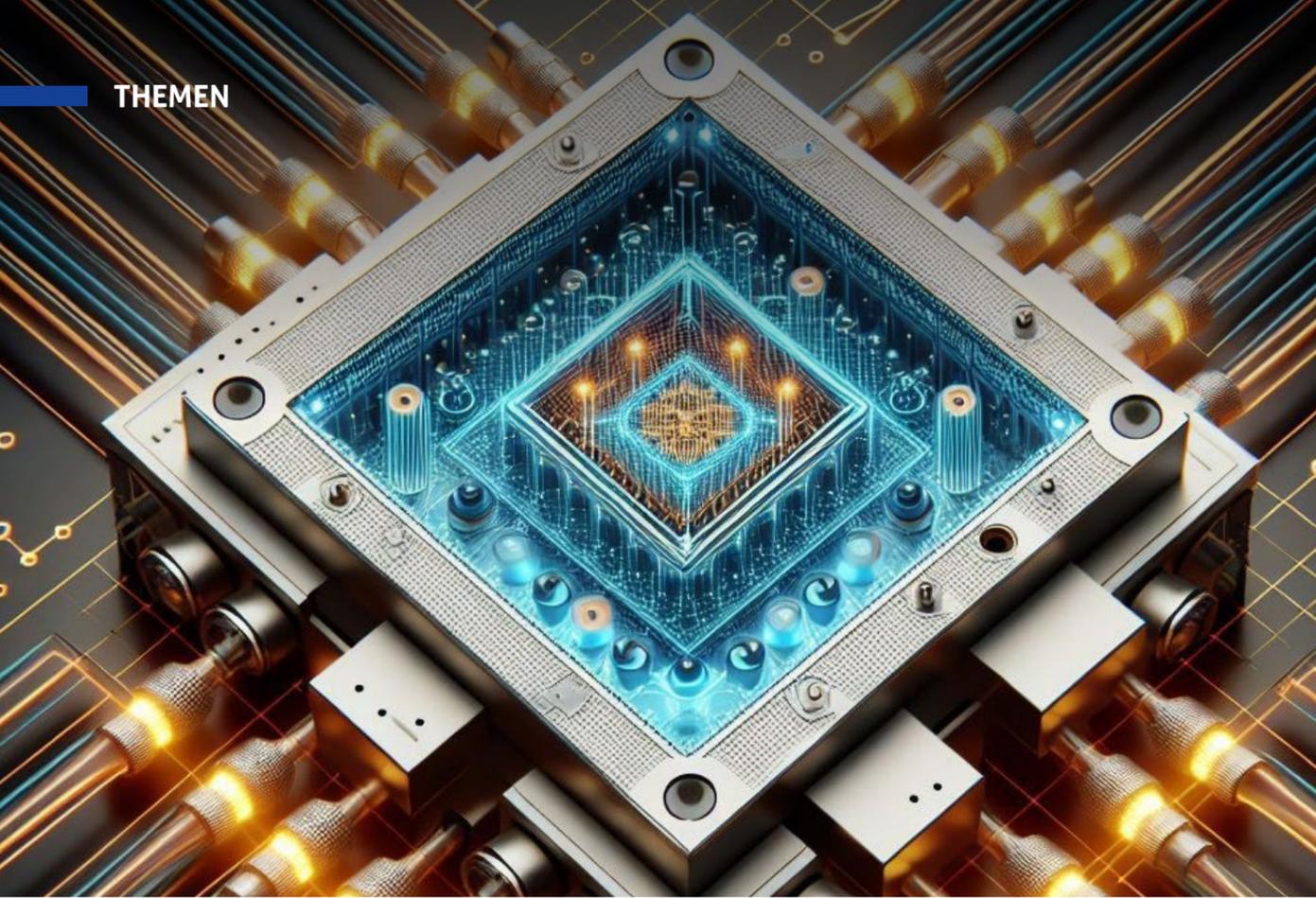
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt *Hochempfindliche rauscharme Blauviolett-APD (BVAPD)* durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Förderkennzeichen: 49MF20098



QUANTENTECHNOLOGIEN

Vielfältige Anwendungen werden durch den Einsatz von Quantentechnologien möglich, allerdings sind noch viele Forschungsaufgaben zu lösen bis zu ihrem kommerziellen Einsatz.

Das CiS Forschungsinstitut ist Partner verschiedener Konsortien und öffentlich geförderter Forschungsprojekte.

Wettbewerbsfähiger Deutscher Quantenrechner (CoGeQ)

Quantencomputer erlauben einen enormen Zuwachs an Rechenleistung bei extremer Geschwindigkeit. Erste Prototypen zeigten, dass das von Richard Feynman 1972 vorgeschlagene Konzept ein sehr großes Potenzial besitzt und die enormen technischen Probleme beherrschbar sind. Neben anderen Technologieplattformen haben gatterbasierte Quantenprozessoren auf Basis optischer Defektzentren in synthetischem Diamant wesentliche Alleinstellungsmerkmale und es konnten in letzter Zeit gute Entwicklungsfortschritte

erzielt werden. Ausgewählte Themen möchten wir Ihnen hier vorstellen. Dabei werden vom CiS Forschungsinstitut zwei wesentliche technologische Konzepte verfolgt: die Quantensysteme auf Basis von Diamant NV-Zentren und die supraleitenden Systeme auf der Basis von Josephson-Kontakten. Der Schwerpunkt für den Jahresbericht 2023 liegt auf der Diamant-Technologie. ●

Die Drehimpulse (Spins) der beteiligten Elektronen und Atomkerne bilden die sogenannten Qubits, also die kleinsten manipulierbaren Speichereinheiten, die der Quantentheorie gehorchen. Sie können z.B. die bekannten Speicherwerte 0 und 1 gleichzeitig annehmen und miteinander interagieren. Besonders ist zudem, dass sich mit jedem zusätzlichen Qubit die Speicherdichte verdoppelt. Bei Rechnungen können ganze Zahlenräume mit dem Quantencomputer gleichzeitig verarbeitet und abgesucht werden, um

beispielsweise zukünftig Medikamente zu entwickeln oder den Handel von Aktien in der Finanzwirtschaft zu optimieren.

Die strukturelle Basis für Quantenprozessoren dieser Art bildet das negativ geladene NV-Farbzentrum in Diamant. Es kann als eine Art künstliches Atom in einem sehr stabilen Diamantgitter betrachtet werden. Dieses Zentrum besitzt Spin-Zustände, die optisch adressiert und mittels Mikrowellen manipuliert werden können. Erste kommerzielle Quantencomputer sind bereits am Markt erhältlich (u.a. SaxonQ GmbH), sind kompakt und mobil, und können sogar bei Raumtemperatur betrieben werden. Die Herausforderungen für diese Systeme liegen derzeit noch in der Skalierung der verwendeten Technologiebausteine, wie beispielsweise der deterministischen Erzeugung einzelner NV-Zentren oder der Initialisierung und Auslese von mehr als 15 Qubits.



In den öffentlich geförderten Verbundprojekt CoGeQ (BMBF) werden diese Herausforderungen für zwei

technische Varianten der Auslese der Spinzustände erforscht. Als assoziierter Partner unterstützt das CiS Forschungsinstitut auch die damit zusammenhängende Weiterentwicklung im EU Projekt MAESTRO (QuantERA). In CoGeQ wird die optische Auslese mittels ODMR-Messungen (Optisch detektierte magnetische Resonanz) und der Nachweis der dipolaren Spin-Spin-Kopplung betrachtet, während es in MAESTRO neben der Kopplung um die photoelektrische Auslese mittels PDMR-Messung (photoelektrischen Detektion von magnetischen NV-Resonanzen) geht, die das Potential der Skalierung für die Nutzung von mehr als 100 Qubits für diese Aufbauten birgt. Das CiS Forschungsinstitut entwickelt für beide Verbünde die notwendigen Montagekonzepte und Aufbaustrategien, um den Quantenprozessorchip zuverlässig in einer stabilisierten Umgebung und verlustarmen elektrischen Verbindungen zu lagern. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Systemeffizienz und Skalierung geleistet. Konkrete Arbeitsziele sind unter anderem die Realisierung einer skalierbaren, zuverlässigen, raum- und tieftemperaturtauglichen Integrationsplattform für NV-basierte Quanten-Prozessor-Lösungen als kompaktes, hochintegriertes und robustes Modul, das leicht vervielfacht und in verschiedene übergeordnete Systeme integriert werden kann. ●



GEFÖRDERT

Das Verbundvorhaben CoGeQ wird durch die Universitäten Kassel und Ulm sowie dem CiS Forschungsinstitut und dem Unternehmen SaxonQ aus Leipzig ausgeführt, um einen wettbewerbsfähigen deutschen Quantenrechner herzustellen.

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/dem Autor.

Verbundprojekt: Wettbewerbsfähiger Deutscher Quantenrechner (CoGeQ) – Teilvorhaben: Aufbau der Demonstratoren, Förderkennzeichen: 13N16098

Quantenprozessoren für verschlüsselte Kommunikation mit Satelliten (QuVeKS)

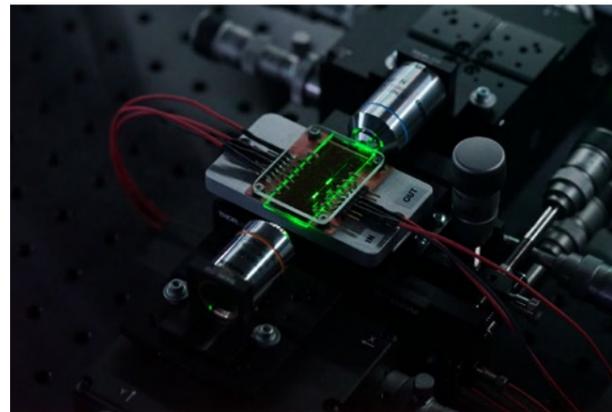
Quantentechnologien basieren auf den Prinzipien der Quantenphysik und versprechen deutliche Fortschritte in den Bereichen Kommunikation, Rechenleistung und Sensortechnologie. Durch die Nutzung quantenmechanischer Phänomene, wie Superposition und Verschränkung, eröffnen sich innovative Perspektiven für leistungsfähigere Technologien, die herkömmliche Limitationen überwinden können.

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts „QuVeKS“ wird an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und dem CiS Forschungsinstitut ein kompakter und universell einsetzbarer Quantenprozessor entwickelt. Dieser soll Lichtquelle, Prozessor und Detektor platzsparend und robust auf einem Chip vereinen und lässt sich über elektrische Leitungen, ähnlich einem FPGA (Field Programmable Gate Array), programmieren. Auf diese Weise lassen sich vielfältige Anwendungsszenarien adressieren, wobei der Fokus zunächst auf der Absicherung der Kommunikation von Satelliten liegt.

Die Grundlage hierfür bietet die Quantenkryptographie, bei welcher die Sicherheit auf den fundamentalen Gesetzen der Quantenphysik beruht. Für die Übertragung des Schlüssels, welcher der Kodierung dient, ist die Erzeugung von Einzelphotonen essentiell.

Die Quantenlichtquelle stellt somit einen zentralen Baustein der Systemarchitektur dar. Dabei sollte dieser Punkt bereits frühzeitig Beachtung finden, da sich dadurch der Einsatz ineffizienter Konversionsmethoden vermeiden lässt. Darüber hinaus sollte die Lichtquelle möglichst reine Photonen erzeugen, robust und konfigurierbar sein sowie eine geringe Komplexität aufweisen, um den Betrieb des Systems zu vereinfachen.

In QuVeKS kommt eine Quantenlichtquelle auf der Basis eines Farbzenters (optisch-aktiver Defekt im Kristallgitter) im 2D-Material hexagonales Bornitrid (hBN) zum Einsatz. Derartige Quellen lassen sich bereits bei Raumtemperatur betreiben und zeichnen sich durch eine hohe Effizienz und Wiederholrate aus. Gekoppelt



Beispiel eines Wellenleiter-Chips mit Interferometerstrukturen, die über elektrische Heizerstrukturen geschaltet werden können. Das endgültige Design befindet sich noch im Entwicklungsprozess und wird dem des abgebildeten Chips ähneln.

an einen Resonator lässt sich ein besonders schmalbandiges und durchstimmbares Spektrum erzielen, wodurch eine einfache Ankopplung an die übrige Quantenarchitektur gegeben ist.

Zudem lässt sich der hBN-Kristall mittels Van-der-Waals-Kräfte direkt mit einem lasergeschriebenen Wellenleiter kombinieren. In diesem können konfigurierbare optische Schaltungen realisiert werden, weshalb er als programmierbarer Quantenprozessor dient.

Die Grundlage dafür bilden durchstimmbare Mach-Zehnder-Interferometer, welche die Phase der Quanten in Abhängigkeit von der Temperatur beeinflussen können. Elektrische Heizerstrukturen, die an den Wellenleiter angekoppelt sind, ermöglichen damit den Aufbau programmierbarer Logikschaltkreise.

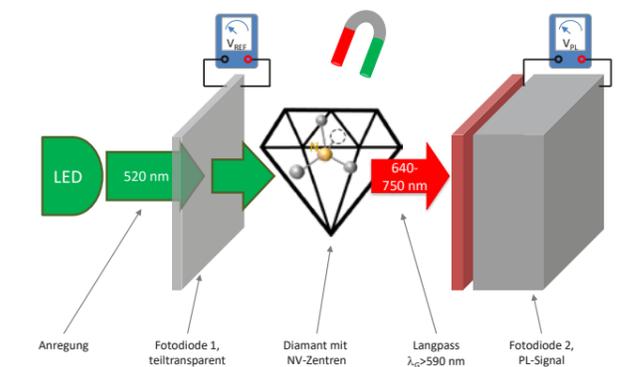
Als Detektoren dienen Single-Photon-Avalanche-Photodioden (SPAD), die direkt auf den Wellenleiterausgängen fixiert werden. Hierfür werden SPADs benötigt, die eine hohe Zeitauflösung ermöglichen sowie eine hohe Quanteneffizienz im gewählten Wellenlängenbereich, bei möglichst geringer Dunkelzählrate, aufweisen. Die zeilenförmig angeordneten SPADs werden über eine direkt angebundene dedizierte Elektronik-

platine betrieben. Diese übernimmt die Bereitstellung der Versorgungsspannungen (Sperrvorspannung, Quenchingspannung) als auch die Auslesung der SPADs und die Auswertung der Sensorsignale. Darüber hinaus ist eine hochpräzise Positionierung der SPADs auf den einzelnen Ausgängen der Wellenleiterstruktur erforderlich, da der Modenfelddurchmesser des aus den Wellenleitern austretenden Lichts als auch der Durchmesser der SPADs nur wenige Mikrometer betragen.

Kompakte Sensoreinheit zur Messung von Magnetfeldern mittels Diamantfluoreszenz (KoSenDi)

Im dem Forschungsvorhaben KoSenDi beschäftigen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des CiS Forschungsinstitutes mit der Miniaturisierung eines Magnetfeldsensors auf der Basis von Stickstoff-Fehlstellen (NV-Zentren) im Diamant. Ziel ist es, einen Sensorstapel aus einem teiltransparenten Silizium-Detektor, einem Langpassfilter und einem Silizium-Volumendetektor aufzubauen. Für die Anwendung in der Magnetometrie ist nur die Fluoreszenzintensität des negativ geladene NV-Zentrums NV-relevant. Hierzu wurden Spektraluntersuchungen an verschiedenen Diamantproben durchgeführt, die die Anforderungen an die Filter- bzw. Absorptionseigenschaften der Fotodioden genauer spezifizieren. Der Sensorstapel soll neben der Fluoreszenz der NV-Zentren in Diamant (Volumendetektor) auch die Intensität der Anregungswellenlänge detektieren. Die dafür nötigen transparenten Fotodioden wurden gefertigt und charakterisiert. Die Sensoreinheit ist von einem Helmholtzspulenpaar umgeben, welches das magnetische Feld im Sensor kons-

Aus diesem Grund wurde in Vorversuchen zunächst eine faserbasierte Kopplung zwischen den Wellenleiterausgängen und den einzelnen Detektorkanälen realisiert. Aktuell werden die Komponenten des Detektorsystems sowie die notwendigen Aufbau- und Verbindungsprozesse in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme (IMMS) sowie der X-FAB Global Services GmbH entwickelt. Dies ermöglicht uns, in naher Zukunft den vollständig integrierten Quantenchip aufbauen und anschließend testen zu können. ●



NV-Zentren in Diamant sind sensitiv gegenüber äußeren Magnetfeldern. Sie können optisch angeregt und anhand ihrer Photolumineszenz-Antwort ausgelesen werden. Im Messkopf werden die Photolumineszenz-Anregung, Messung des Referenzsignals durch eine teiltransparente Fotodiode, das Filtern des Photolumineszenz-Lichts und die Photolumineszenz-Signalmessung vereint.

tant hält. Je nach Stärke des äußeren (zu messenden) Magnetfeldes wird der Spulenstrom nachgeregelt und lässt Rückschlüsse auf die Stärke des zu messenden Feldes zu (Kompensationsmethode). ●

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt *Kompakte Sensoreinheit zur Messung von Magnetfeldern mittels Diamantfluoreszenz (KoSenDi)* durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.
Förderkennzeichen: 49MF220192

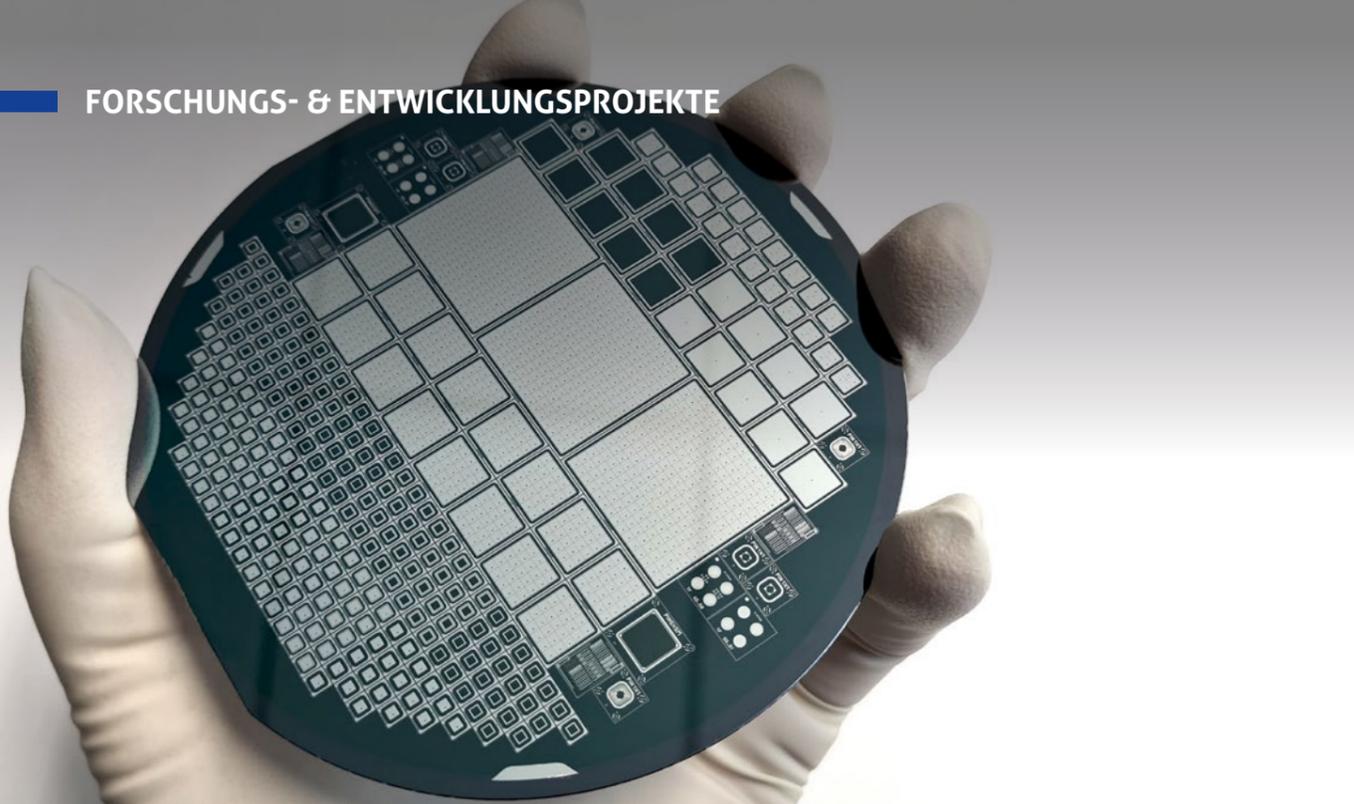


Abbildung 1: Am CiS Forschungsinstitut hergestellter Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) auf Wafer

10 JAHRE $A_{Si}-Si_i$ -DEFEKT-FORSCHUNG

Das Jahr 2023 markierte das 10-jährige Jubiläum der Erforschung des $A_{Si}-Si_i$ -Defekts am CiS Forschungsinstitut. In diesem Artikel soll daher die Entdeckung und anschließende Forschung dazu überblicksartig beschrieben werden. Die entscheidenden Versuche und Messergebnisse werden zusammen gefasst. Für den Leser, der an den wissenschaftlichen Details interessiert ist, wird die Originalliteratur zitiert. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche weitere Anwendungsfelder dieser Defektkategorie gegeben, beispielsweise im Rahmen der aktuellen Forschungen zu Quantentechnologien am CiS Forschungsinstitut.

Im Jahr 2013 beschäftigte sich Christian Möller im Rahmen seiner Promotion am CiS Forschungsinstitut intensiv mit der Kinetik von Akzeptor-Eisen-Paar-Defekten in Silizium. [1] Diese Defekte sind insbesondere für die Funktionsweise von Siliziumsolarzellen schädlich, da sie in bestimmten Konfigurationen deren Effizienz senken.

Dabei wurden die Akzeptoren Bor, Aluminium, Gallium und auch Indium untersucht. Bei diesen Analysen war es notwendig, den Einfluss anderer Defekte im Silizium,

wie zum Beispiel den Bor-Sauerstoff (BO)-Komplex, die ebenfalls die Effizienz der Solarzellen beeinflussen sowie metastabiles Verhalten zeigen, auszuschließen. Daher wurden die untersuchten Proben speziellen Behandlungen unterzogen, um diese anderen Defekte in einen stabilen Zustand zu versetzen. Zu dieser Zeit wurde angenommen, dass der BO-Komplex nur für den Akzeptor Bor auftritt. Die landläufige Meinung hierzu war, dass nur das Bor auf Grund seiner geringen Größe die Möglichkeit schafft, dass sich noch ein anderes Atom oder sogar Molekül in seiner direkten Nachbarschaft ansiedelt.

Die anderen Akzeptoren Aluminium, Gallium und Indium wurden als zu groß für solch einen Prozess erachtet. In der Tat wurde die Lichtinduzierte Degradation (LID) nicht in Gallium-dotierten Solarzellen beobachtet.

Die Untersuchungen von Christian Möller ergaben jedoch, dass auch im Fall des Akzeptoratoms Indium LID in Silizium zu beobachten ist. Die Messungen hierzu sind in Abbildung 2 gezeigt.

Auf der Suche nach einem Erklärungsansatz für diese

experimentellen Resultate wurde nach Gemeinsamkeiten der Akzeptoren Bor und Indium in der Literatur gesucht. Dabei wurden Untersuchungen auf Basis von ab-initio Dichte-Funktional (DFT)-Berechnungen festgestellt, dass Bor und Indium nach dem Einfang eines interstitiellen Siliziumatoms nicht ihren Gitterplatz verlassen. Gallium tut dies hingegen.

Diese Erkenntnisse begründeten bei den Forschenden des CiS Forschungsinstitutes die Idee, dass ein Paar aus einem Akzeptoratom und einem interstitiellen Siliziumatom für die LID verantwortlich sein könnte. Dieser Gedanke wurde zusammen mit den Untersuchungsergebnissen im Paper „Light-induced degradation in indium-doped silicon“ [2] publiziert. Damit war die Idee des $A_{Si}-Si_i$ -Defekts am CiS Forschungsinstitut geboren und wurde veröffentlicht.

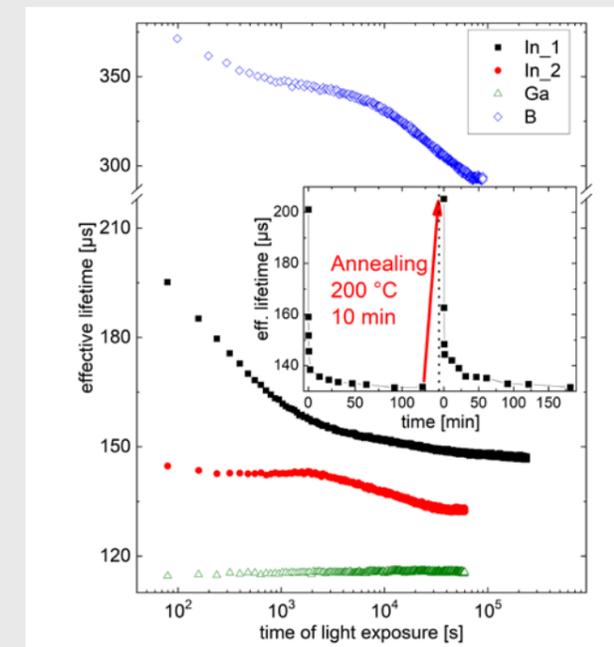


Abbildung 2: Ladungsträgerlebensdauerdegradation unter Beleuchtung für Silizium, das mit den Akzeptoren Bor, Gallium und Indium dotiert ist. Deutlich ist die Degradation für Si:B und Si:In zu erkennen.[2]

In einem so stark untersuchten Material wie Silizium ist es nicht verwunderlich, dass eine solche neue Idee viele Implikationen nach sich zieht. Unter anderem bedeutet es zwangsläufig, dass, wenn die Idee des $A_{Si}-Si_i$ -Defekts richtig ist, bisherige Erklärungen falsch sein müssen. Diese anderen Erklärungen wurden sehr oft

und lange wiederholt, wodurch sich in der Endkonsequenz sehr viele Folgefehler ergeben. Die sorgfältige Analyse einiger der grundlegenden Implikationen ergab im weiteren Verlauf, dass die in der Literatur veröffentlichten experimentellen Ergebnisse der Idee des $A_{Si}-Si_i$ -Defekts nicht im Wege stehen. Teilweise unterstützen sie diesen neuen Ansatz sogar. Die Ergebnisse dieser sorgfältigen Analyse bestehender Experimente wurden unter anderen in zwei Publikationen veröffentlicht. [3], [4]

Als Beispiele aller Voraussicht nach fehlerhafter anderer Erklärungen sind zu nennen: der Watkins-Austauschmechanismus für Bor, die rekombinationsunterstützte schnelle Diffusion von interstitiellem Bor und die Annahme, dass das umfangreiche Wissen zu den Prozessen, die während einer Czochralski-Kristallzucht im Silizium ablaufen, zwingend nur den Sauerstoff als Komponente des LID-Defektes zulassen und Siliziuminterstitielle vollständig ausschließen. Es ist also festzuhalten, dass bestehende ältere Experimente nicht in der Lage sind, die Idee des $A_{Si}-Si_i$ -Defekts auszuschließen.

Daher war und ist es lohnenswert, neue Experimente unter dem Gesichtspunkt eines $A_{Si}-Si_i$ -Defekts zu planen und mit Hilfe dieser Ergebnisse die Idee weiterzuentwickeln. Dies wurde in den Folgejahren nach der Formulierung der $A_{Si}-Si_i$ -Defektidee am CiS Forschungsinstitut in Kooperation mit der TU Ilmenau gezielt fortgeführt.

Ein erstes Experiment vor diesem Horizont war die Untersuchung und Identifikation einer Photolumineszenz-Linie (P-Linie) in Indium-implantierten Silizium, das von der Firma Infineon Technologies zur Verfügung gestellt wurde. Auf Grund von drei Beobachtungen konnte diese P-Linie als eine Konfiguration des $In_{Si}-Si_i$ -Defektes identifiziert werden.[5] Eine davon ist, dass die P-Linie auftritt, wenn eine Region mit einer Anreicherung von Siliziuminterstitiellen auf einem implantierten Indiumkonzentrationsmaximum liegt.

Eine zweite Beobachtung ist, dass die Abwesenheit einer Nitridschicht die P-Linie nach einem Tempersschritt wiedererscheinen lässt. Die dritte und wichtigste

Beobachtung ist, dass die P-Linie dem aus Ladungsträgerlebensdauermessungen bekannten LID-Zyklus folgt. Die Messergebnisse hierzu sind in Abbildung 3 dargestellt. Im Rahmen dieser Experimente konnte dann ein erstes $ASi-Sii$ -Defektmodell erstellt werden.

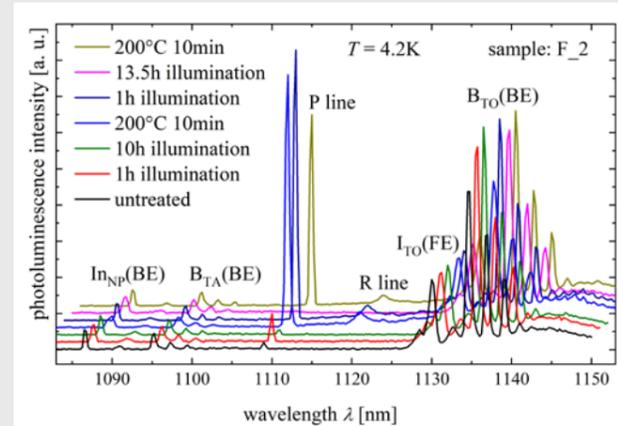


Abbildung 3: Tieftemperaturphotolumineszenz (TTPL)-Spektren der P-Linie für verschieden Stadien des LID-Zyklus. [5]

Die frühen Experimente, die zur $A_{Si}-Si_i$ -Defektidee geführt haben, konnten zu einem späteren Zeitpunkt an einem eigens für diese Versuche vom Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) gezogenen Indium-dotierten Czochralski-Kristall wiederholt und vertieft werden. [6] Dabei konnten alle Aktivierungsenergien des LID-Zyklus für $Si:In$ bestimmt werden.

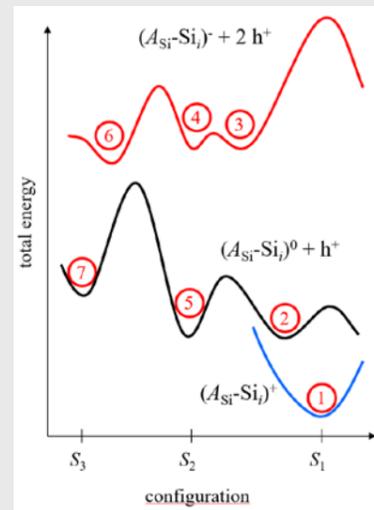


Abbildung 4: $A_{Si}-Si_i$ -Defektmodell in Form eines Konfigurationskoordinaten-Energie-Diagramms.[6]

Zudem wurde in dieser Veröffentlichung eine zweite, verbesserte Version des $A_{Si}-Si_i$ -Defektmodells entwickelt. Dieses

Modell ist in Abbildung 4 gezeigt. Es umfasst drei mögliche Defektkonfigurationen in den Ladungszuständen positiv, neutral und negativ. Insgesamt werden sieben Zustände und 16 Übergänge modelliert. Die Prozesse des LID-Zyklus werden in diesem Modell als Konfigu-

rationsänderungen betrachtet, bei denen eine thermische Aktivierungsenergie überwunden werden muss.

Mit Hilfe eines Differentialgleichungssystems kann die Dynamik des LID-Zyklus unter Annahme von Übergangsraten berechnet werden. [7] Eine wichtige Einsicht bei der Analyse des LID-Zyklus ist, dass alle Prozesse des LID-Zyklus gleichzeitig ablaufen. Je nach Umgebungsbedingungen werden manche Prozesse begünstigt oder reduziert. Die scheinbare Messung eines einzelnen Prozesses wird bei Auswertung unter Berücksichtigung einer einzelnen Reaktion immer mit einem Fehler behaftet sein. [8]

Da Siliziuminterstitielle eine wesentliche Rolle bei der $A_{Si}-Si_i$ -Defektgeneration spielen, wurde versucht, durch Bestrahlung von Silizium mit Elektronen sowie gezieltes Konglomerieren von Sauerstoff in sauerstoffangereicherten float zone (FZ), Silizium LID zu generieren. [9] Das Hauptproblem bei der Bestrahlung mit Elektronen ist, dass die Ladungsträgerlebensdauer sehr stark reduziert wird und dadurch eine Untersuchung der LID mittels Lebensdauermessungen deutlich erschwert wird. Dennoch konnte eine LID in bestrahltem FZ-Silizium nachgewiesen werden, wenn auch ohne Stabilität bei aufeinander folgenden LID Zyklen.

Im weiteren Verlauf der Forschung wurden Low Gain Avalanche Detektoren (LGAD) hergestellt und deren Verhalten nach Bestrahlung analysiert. Detektoren dieser Bauart besitzen eine intrinsische Bor-dotierte Verstärkungszone, die eine Vervielfachung des Detektorsignals um den Faktor 5-20 bewirkt. Das Problem ist, dass diese Verstärkung während einer Bestrahlung verschwindet, was als Acceptor Removal Phenomenon (ARP) bezeichnet wird. Dieses Phänomen lässt sich nun mittels des $A_{Si}-Si_i$ -Defektmodells erklären. [10], [11] Nach dem Einfang eines durch die Bestrahlung generierten Siliziuminterstitiellen durch das Boratom auf seinem Gitterplatz entsteht der $B_{Si}-Si_i$ -Defekt, der in seiner Grundzustandskonfiguration ein Donator ist, wodurch die Verstärkungseigenschaft der LGADs verschwindet.

Auch in dem Fall der ARP wurde früher ein BO-Komplex ($B_O O_i$) als Ursache vermutet. Bei der Generation dieses $B_O O_i$ -Defektes wird allerdings eine schnelle

Bordiffusion benötigt, damit Bor ein interstitielles Sauerstoffatom erreichen kann. Solch eine schnelle Diffusion des Bor bei Raumtemperatur und unter Protonenbestrahlung konnte mit Hilfe von SIMS-Messungen am CiS Forschungsinstitut nicht nachgewiesen werden.[10] Einige Ergebnisse dieser Experimente sind in Abbildung 5 gezeigt. Es kann keine Verbreiterung des Borprofils durch Diffusion auf Grund der Bestrahlung beobachtet werden.

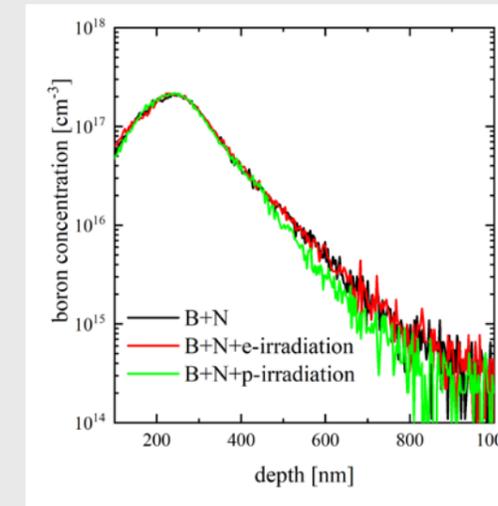


Abbildung 5: SIMS-Tiefenprofile von Bor-implantierten und bestrahlten Siliziumproben [10]

Ein weiteres hochinteressantes Feld für die Anwendung von $A_{Si}-Si_i$ -Defekten ist die Quantentechnologie. Hier wird aktuell sehr intensiv nach Defekten in Silizium gesucht, die als Qubit verwendet werden können. Qubits werden beschrieben durch einen zweidimensionalen quantenmechanischen Zustandsraum. Ein Beispiel mit dem man ein solches Qubit

realisieren könnte, ist der Spin eines Elektrons, das einen Zustand eines Defektes besetzt. Dessen beide möglichen Zustände könnten mit den Binärzahlen 0 und 1 identifiziert werden. Die Aufspaltung von Photolumineszenzlinien in einem Magnetfeld ist ein erster Hinweis für die Eignung eines solchen Defekts als Qubit: Spannenderweise zeigt zum Beispiel eine Linie des $Tl_{Si}-Si_i$ -Defekts eine solche.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass in den letzten 10 Jahren sehr interessante neue Entdeckungen und Erklärungen (z.B. der LID und des ARP) auf Basis der $A_{Si}-Si_i$ -Defektidee gemacht und gefunden worden sind. Dies deutet darauf hin, dass auch in den nächsten 10 Jahren viele neue Ideen, Experimente und Entdeckungen auf Grundlage der $A_{Si}-Si_i$ -Defektidee zu erwarten sind, vor allem in der Quantentechnologie. ●

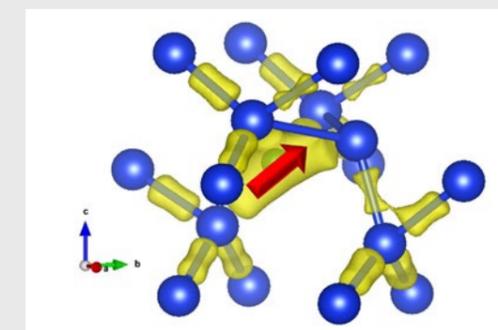


Abbildung 6 Visualisierung des $B_{Si}-Si_i$ -Defektes im Qubit-Modus (©Aaron Flötotto 2024)

Referenzen

[1] C. Möller, T. Bartel, F. Gibaja, and K. Lauer, 'Iron-boron pairing kinetics in illuminated p-type and in boron/phosphorus co-doped n-type silicon', J. Appl. Phys., vol. 116, no. 2, p. 024503, Jul. 2014, doi: 10.1063/1.4889817.

[2] C. Möller and K. Lauer, 'Light-induced degradation in indium-doped silicon', Phys. Status Solidi RRL - Rapid Res. Lett., vol. 7, no. 7, pp. 461-464, Jul. 2013, doi: 10.1002/pssr.201307165.

[3] K. Lauer, C. Möller, D. Schulze, C. Ahrens, and J. Vanhellemont, 'Discussion of $ASi-Sii$ -defect model in frame of experimental results on P line in indium doped silicon', Solid State Phenom., vol. 242, p. 90, Sep. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.242.90.

[4] K. Lauer, K. Peh, D. Schulze, T. Ortlepp, E. Runge, and S. Krischok, 'The $ASi-Sii$ Defect Model of Light-Induced Degradation (LID) in Silicon: A Discussion and Review', Phys. Status Solidi A, vol. 219, no. 19, p. 2200099, 2022, doi: 10.1002/pssa.202200099.

[5] K. Lauer, C. Möller, D. Schulze, and C. Ahrens, 'Identification of photoluminescence P line in indium doped silicon as $InSi-Sii$ defect', AIP Adv., vol. 5, no. 1, p. 017101, Jan. 2015, doi: 10.1063/1.4905066.

[6] K. Lauer, C. Möller, C. Tessmann, D. Schulze, and N. V. Abrosimov, 'Activation energies of the $InSi-Sii$ defect transitions obtained by carrier lifetime measurements', Phys. Status Solidi C, vol. 14, no. 5, p. 1600033, 2017.

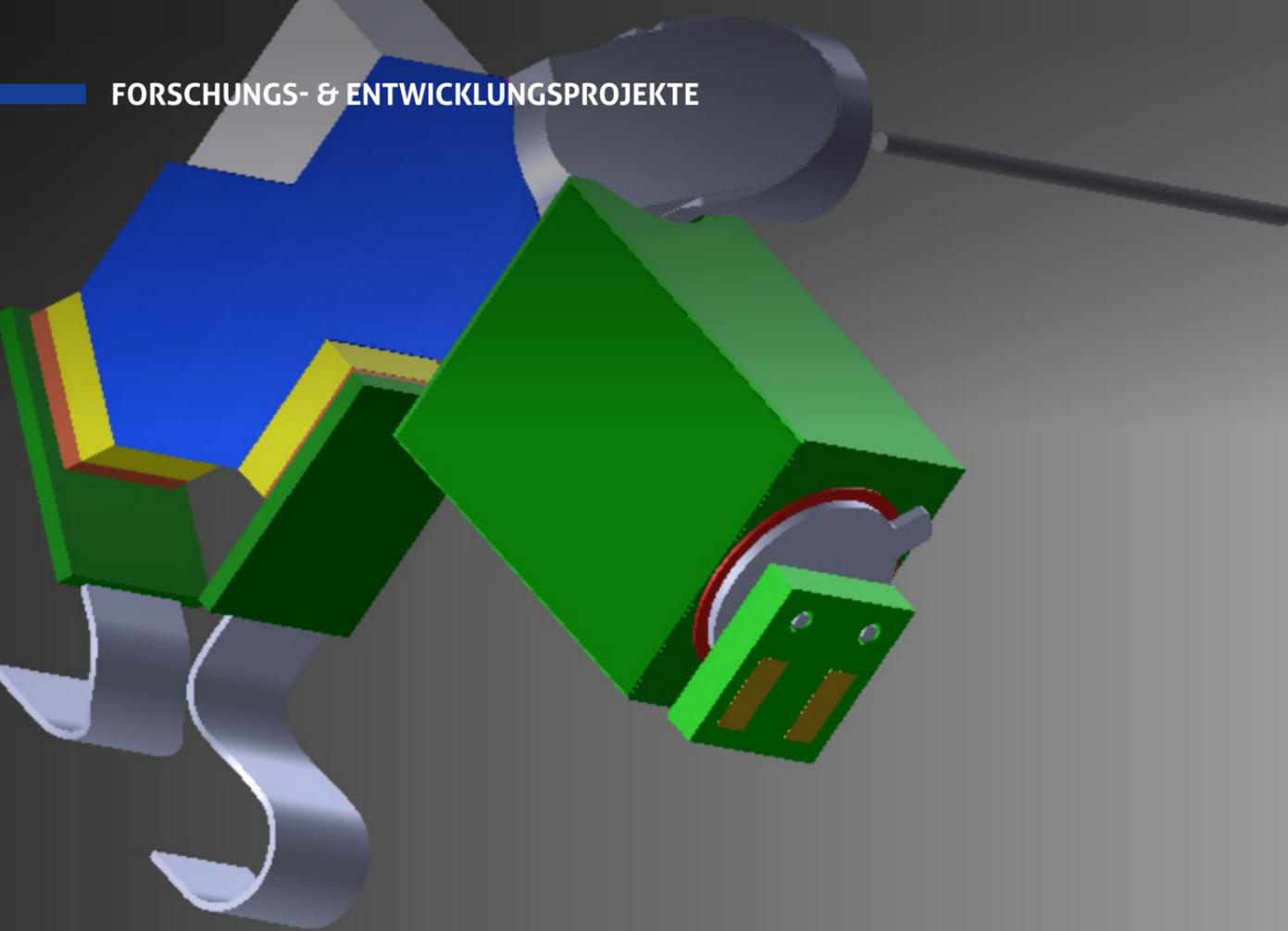
[7] K. Lauer et al., 'Modeling the light-induced degradation (LID) in silicon due to $ASi-Sii$ -defects', Tagungsband 5 Niedersächsisches Symp. Mater. 23 Bis 24 Februar 2023, Jun. 2023, doi: 10.21268/20230628-0.

[8] K. Lauer, C. Möller, D. Debbih, M. Auge, and D. Schulze, 'Determination of activation energy of the iron acceptor pair association and dissociation reaction', Solid State Phenom., vol. 242, p. 230, Sep. 2015.

[9] K. Lauer et al., 'Light-Induced Degradation in Annealed and Electron Irradiated Silicon', Phys. Status Solidi A, vol. 216, no. 0, p. 1900284, 2019, doi: 10.1002/pssa.201900284.

[10] K. Lauer, K. Peh, S. Krischok, S. Reiß, E. Hiller, and T. Ortlepp, 'Development of Low-Gain Avalanche Detectors in the Frame of the Acceptor Removal Phenomenon', Phys. Status Solidi A, vol. 219, no. 17, Art. no. n/a, Jun. 2022, doi: 10.1002/pssa.202200177.

[11] K. Lauer et al., 'Effect of inelastic ion collisions on low-gain avalanche detectors explained by an $A_{Si}-Si_i$ -defect mode'. arXiv, Nov. 13, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2311.07280.



Aufbau des miniaturisierten Fluorimeters

MINIATURISIERTES FLUORIMETER (MINIFLU)

Das Projekt MiniFLU beschäftigte sich mit der Entwicklung und Einführung eines miniaturisierten Fluoreszenzphotometers mit zwei Messkanälen zur kontinuierlichen Blutzuckermessung.

Nach der erfolgreichen Entwicklung und Herstellung von Funktionsmustern war ein weiteres Ziel, die empirische Bestimmung bestimmter Toleranzspezifikationen, die beim Übergang von der Prototypenherstellung zur Serienfertigung ermittelt werden können. Förderlich war dabei die Kooperation mit einem Industriepartner. Optik- und Elektronikkomponenten des neuartigen Fluorimeters sind in Summe nicht größer als ein Stück Würfelzucker. Auf übliche optische Komponenten, wie teure Photomultiplier als Detektoren, wurde verzichtet. Stattdessen kamen zwei dichroitische Strahlteiler, speziell beschichtete Fotodioden und klebbare Filter zum Einsatz. Nach der Entwicklung und Untersuchung der

Einzelkomponenten entstand ein Prototyp, welcher an einem faserbasierten fluorometrischen Farbstoffsystem zur kontinuierlichen Blutzuckermessung getestet wurde.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden patentrechtlich gesichert und werden gemeinsam mit einem Industriepartner verwertet. Eine vertragliche Vereinbarung diesbezüglich wurde abgeschlossen.

Ebenso wurden Maßnahmen zur Skalierung der Prototypenkomponenten getroffen, so dass eine Überführung in eine Serienproduktion möglich ist.

Im Ergebnis der durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen können die folgenden Aussagen gemacht werden: Die Performance der Fluoreszenzphotometer ergibt sich einmal aus dem sogenannten internen Übersprechen, aus dem Verhältnis zwischen diesem internen Über-

sprechen und der Sensitivität sowie aus dem Verhältnis der Fluoreszenzsignale von Messkanal eins und zwei (relative Fluoreszenz).

Als Eingangsp Parameter wurden untersucht:

- (1) das Streulicht, welches von der sogenannten Beleuchtungseinheit ausgeht.
- (2) ein Optimierungsparameter, der bei der optisch aktiven Justage der Beleuchtungseinheit generiert wird und
- (3) der geometrische Versatz zwischen der Optik des Moduls und der „Ankoppelöffnung“ für den Multimode-Lichtwellenleiter.

Zwischen (2) und der relativen Fluoreszenz konnte keine Korrelation nachgewiesen werden. Hier wurde über 206 Module bei einem Mittelwert von 6,68 für die relative Fluoreszenz eine Standardabweichung von 0,24 erreicht. Bezüglich (3) konnte bis zu einer Toleranz von $\pm 100 \mu\text{m}$ keine Korrelationen zur Performance der Module festgestellt werden (141 Module). Dies kommt einer preiswerten Fertigung entgegen.

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass andere Faktoren, wie internes Übersprechen und Empfindlichkeit, einen größeren Einfluss auf die Leistung des Fluoreszenzphotometers haben.

Miniaturisierte Fluoreszenzphotometer mit zwei Messkanälen bieten verschiedene Vorteile und finden in verschiedenen Anwendungsbereichen Verwendung:

1. Kompakte Größe: Durch ihre Miniaturisierung sind diese Photometer klein und leicht, was ihre Integration in tragbare und handgehaltene Geräte ermöglicht. Dies eröffnet vielfältige Anwendungen in Bereichen wie der medizinischen Diagnostik, Überwachung von Umweltparametern und Lebensmittelindustrie.

2. Hohe Empfindlichkeit: Die Verwendung von zwei Messkanälen erhöht die Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messungen. Dies ermöglicht präzise Analyseergebnisse und eine zuverlässige Bestimmung von Substanzkonzentrationen.

3. Flexibilität: Mit zwei Messkanälen können verschiedene Fluoreszenzmarker gleichzeitig gemessen werden, was die Vielseitigkeit und Flexibilität des Systems erhöht. Dies eröffnet die Möglichkeit für multiplexe Analyseanwendungen, bei denen mehrere analytische Parameter gleichzeitig untersucht werden können.

4. Kontinuierliche Überwachung: Durch die kontinuierliche Messung in Echtzeit können miniaturisierte Fluoreszenzphotometer mit zwei Messkanälen verwendet werden, um schnelle Änderungen in den Messsignalen zu erfassen. Dies ermöglicht eine Echtzeitüberwachung von Prozessen und eine sofortige Reaktion auf Veränderungen.

5. Anwendungsgebiete: Die Anwendungsgebiete reichen von der medizinischen Diagnostik, beispielsweise zur kontinuierlichen Überwachung von Blutzucker oder anderen Biomarkern im Körper, bis hin zur Umweltüberwachung, Lebensmittelqualitätskontrolle und pharmazeutischen Analytik. Die Kombination von Miniaturisierung, hoher Empfindlichkeit, Mehrkanal-Messung und kontinuierlicher Überwachung macht miniaturisierte Fluoreszenzphotometer mit zwei Messkanälen zu leistungsstarken Instrumenten in verschiedenen analytischen Anwendungen, die einen schnellen und präzisen Nachweis von Substanzen erfordern. ●



Wissenschaftlicher Beitrag in der Zeitschrift *tm - Technisches Messen*, vol. 90, no. 4, 2023, pp. 237-247



GEFÖRDERT

Die beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden im Forschungsprojekt Miniaturisiertes Fluorimeter (MiniFLU) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Förderkennzeichen: MF140098



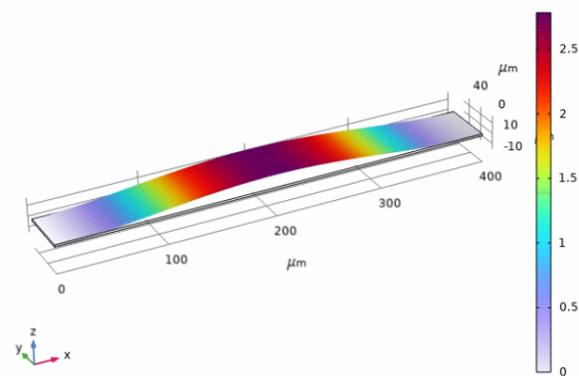
RESONANTE SILIZIUM-DIFFERENZ-DRUCKSENSOREN (RESI-DDS)

Piezoresistive MEMS zeichnen sich durch hohe Präzision, Stabilität sowie Zuverlässigkeit aus und gewährleisten einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen der zu messenden Größe und dem Ausgangssignal. Ein physikalisch bedingter Nachteil piezoresistiver Silizium-basierter Sensoren ist deren Anfälligkeit gegenüber elektronischer Drift. Besonders Wasserstoff führt durch seine Neigung zur Diffusion durch die meisten Materialien, u.a. auch Silizium, durch Absättigung freier atomarer Bindungen zu veränderlichen Ladungszuständen und damit zu einer Drift des Ausgangssignals. Dieses Verhalten beschränkt eine Anwendung in der Wasserstoffwirtschaft.

Resonante Sensoren können hier Vorteile ihres Messprinzips ausspielen, da sich die Resonanzfrequenz einer schwingenden Struktur durch Einwirkung einer physikalischen Größe ändert. Wird deren Frequenz als Messgröße benutzt, sind diese Sensoren unempfindlich gegenüber einer Drift der Signalamplitude. Eine Hauptanforderung ist, diese Resonator-Strukturen (nahezu freischwingende Siliziumstrukturen) herzustellen,

welche nach einer beidseitigen Einbettung hinsichtlich der Signalauswertung einen Differenzdrucksensor abbilden.

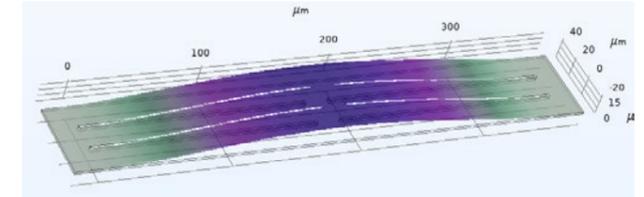
Zur Strukturierung und Verkapselung dienen ausschließlich Verfahren der Bulk- und Oberflächenmikromechanik sowie Waferlevel-Packaging-Technologien, um eine reproduzierbare und kosteneffiziente Herstellung zu erreichen.



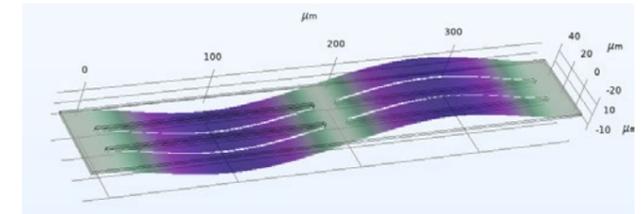
Schwingung der 1. Eigenmode

Zu den neu zu entwickelnden Technologiebausteinen gehört die Freistellung der Schwingbalken aus Silizium. In einem ersten Schritt wurde als Verfahren das HF-Dampfätzen favorisiert, ein Prozess der für die Herstellung mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) geeignet ist. Dabei wird gasförmiger Fluorwasserstoff (HF) verwendet, um freistehende Strukturen zu erzeugen. Das HF-Dampfätzen bietet überdies vielfältige Vorteile, die eine intensive Auseinandersetzung mit diesem technologischen Verfahren rechtfertigen. Anfängliche Untersuchungen zeigten positive Ergebnisse. Mit Unterstützung des Landes Thüringen und Kofinanzierung der Europäischen Union (OPENSENS), wurde in eine Versuchsanlage investiert, die wesentliche Arbeitsschutzmaßnahmen umsetzt und die Prozessoptimierung erleichtert.

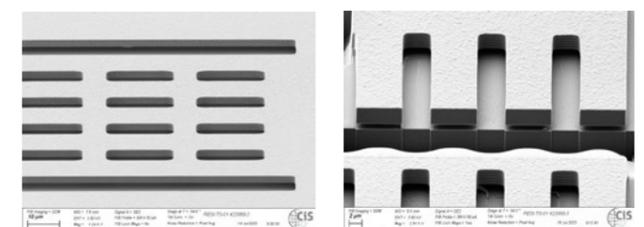
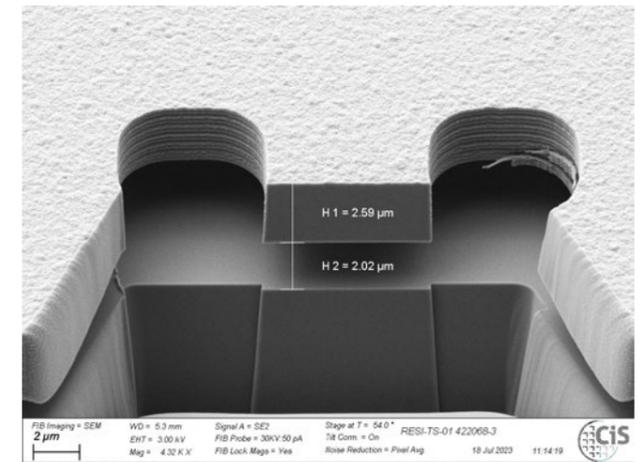
Am Beispiel der Resonatorstrukturen auf 4"-Wafers konnte gezeigt werden, dass mit verschiedenen Ätzmedien (50%ige Flußsäure unterschiedlich verdünnt mit Wasser und Isopropanol) sehr homogene Ätzergebnisse erzielt werden. Damit zeichnen sich bereits jetzt weitere Anwendungsfelder ab. In der nächsten Entwicklungsstufe wird der Prozess beispielsweise in die Fertigung von hochempfindlichen Feder-Masse-Systemen oder Mikrosiegeln integriert. Zukünftig wird das Verfahren der HF-Dampfätzung auch für 6"-Wafer zur Verfügung stehen. ●



Eigenmode (113 kHz)



Eigenmode (310 kHz)



Freigestellte Resonatorstrukturen mittels HF-Dampfätzen

Gefördert durch:

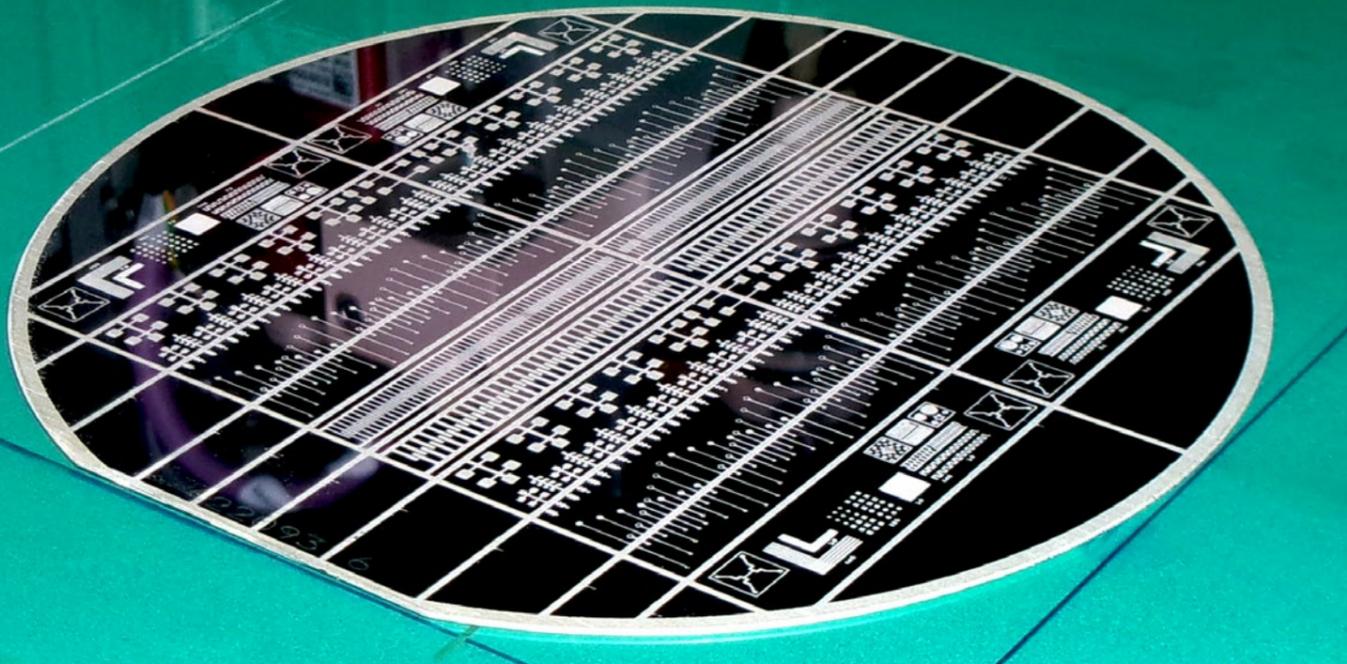
 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt *Resonante Silizium-Differenzdrucksensoren (ReSi-DDS)* werden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK).
Förderkennzeichen: 49MF210095



Weitere Informationen zum dem Projekt OPENSENS, Förderkennzeichen 2022 WIN 0044 befinden sich im Kapitel Technische Infrastruktur sowie auf unserer Internetseite.



Gedruckte Teststruktur inklusive Randkontaktierung als Startschicht für eine galvanische Verstärkung der Metallisierung

INKJET-PRINTING GALVANISCH VERSTÄRKTER INFRAROT-EMITTER (IJP-IR)

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Tintenstrahl Druckverfahren zur Erweiterung der Prozessfähigkeit in der Herstellung von optisch relevanten Schichtsystemen auf thermisch entkoppelten Silizium-Membranen (bzw. $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ -Membranen).

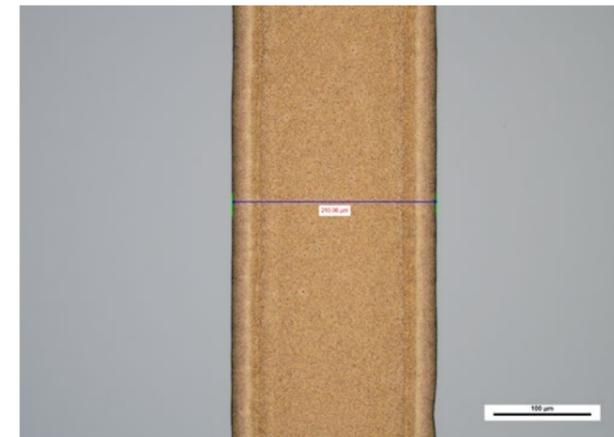
Eingesetzt werden solche Chips in Strahler-Empfänger-einheiten für die Gassensorik. Die derzeitige verwendete Prozesse zur Herstellung der Sensoren benötigen komplexe Fotolithografieschritte zur Strukturierung der durch eine chemischen (CVD) und physikalischen (PVD) Gasphasenabscheidung abgeschiedenen Schichten. Dies ist zum Teil zeit- und kostenaufwendig.

Die Implementierung eines Ink-Jet-Printings ermöglicht ein Prototyping ohne Fotolithografie durch direktes Schreiben der Strukturen. Des Weiteren ist die Materialauswahl deutlich flexibler, und ist unabhängig von der CMOS-Kompatibilität, da eine vollständige

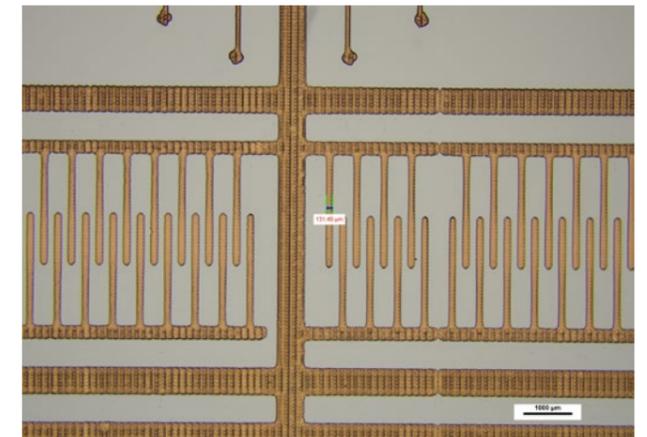
Trennung der Technologieabfolge vorgenommen werden kann.

Im Vordergrund der Prozessentwicklung stehen die Evaluierung der Druckparameter und der Sintertechnologie mit dem Ziel eine reproduzierbare Schichtzeugung mit einerseits guter Schichthaftung zum Untergrund und andererseits reproduzierbar-einstellbare Schichteigenschaften zu garantieren. Um Letzteres zu erreichen, ist ein einheitliches Druckbild von essentieller Bedeutung.

In der folgenden Abbildung ist das Ergebnis eines Inkjetdrucks mit Silbertinte dargestellt. Die perfekte Strukturausbildung ohne Einzeltropfenerkennung ist das Ergebnis einer optimierten Einstellung der Druckparameter ebenso wie einer Anpassung der Oberflächenenergien durch Vorbehandlung der Substratoberfläche und Einstellung der Oberflächenspannung der Tinte.



Druckbild eines typischen Testlayouts mit Silbertinte



Ein weiteres Ziel ist die galvanische Verstärkung solcher, gedruckter Strukturen. Nachdem die hinreichende Haftung über ein geeignetes Sinterprofil eingestellt werden konnte, wurden erste erfolgreiche Versuche mit anschließender Galvanik durchgeführt. Dies dient der Anpassung der Schichteigenschaften hinsichtlich der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie Optimierung der Schichtspannung.

Da die gedruckten Silberschichten nicht die notwendige Emissivität aufweisen für einen effizienten IR-Emitter, wird aktuell an einem Zweischichtsystem gearbeitet, das die optischen Eigenschaften des IR-Strahlers optimiert. Verschiedene Oxide wie Zinkoxid und Zinnoxid kommen hier zum Einsatz.

Genauso gut können diese Schichten als Absorberschicht genutzt werden. Sie verbessern die Empfindlichkeit etwaiger Gassensoren und können für verschiedene Wellenlängenbereiche zugeschnitten werden.

Parallel zu dem beschriebenen Entwicklungsvorhaben wird aktiv nach druckfähigen Materialien recherchiert, die als Absorberschicht in Frage kommen und insbesondere im längerwelligen Bereich (dem Footprint-Bereich einzelner Moleküle oder Molekülgruppen) eine niedrige Transmission und Reflektivität aufweisen.

Ein zusätzliches Anwendungsfeld einer optimierten Drucktechnologie auf Waferebene erschließt sich durch die strukturierbare Abscheidung von katalytisch wirkenden Materialien, die eine nachgelagerte Abscheidung, beispielsweise von Diamant und anderen kohlenstoffbasierten Funktionsschichten zulassen. Die Abscheidung erfolgt dann nur in diesen Bereichen mit den entsprechenden im Inkjetverfahren aufgetragenen Nanopartikeln.

Bereits jetzt ist eine breite Anwendungsmöglichkeit des optimierten Druckverfahrens erkennbar, das eine vielschichtige Einsatzmöglichkeit insbesondere in der dedizierten Gassensorik zulässt. ●

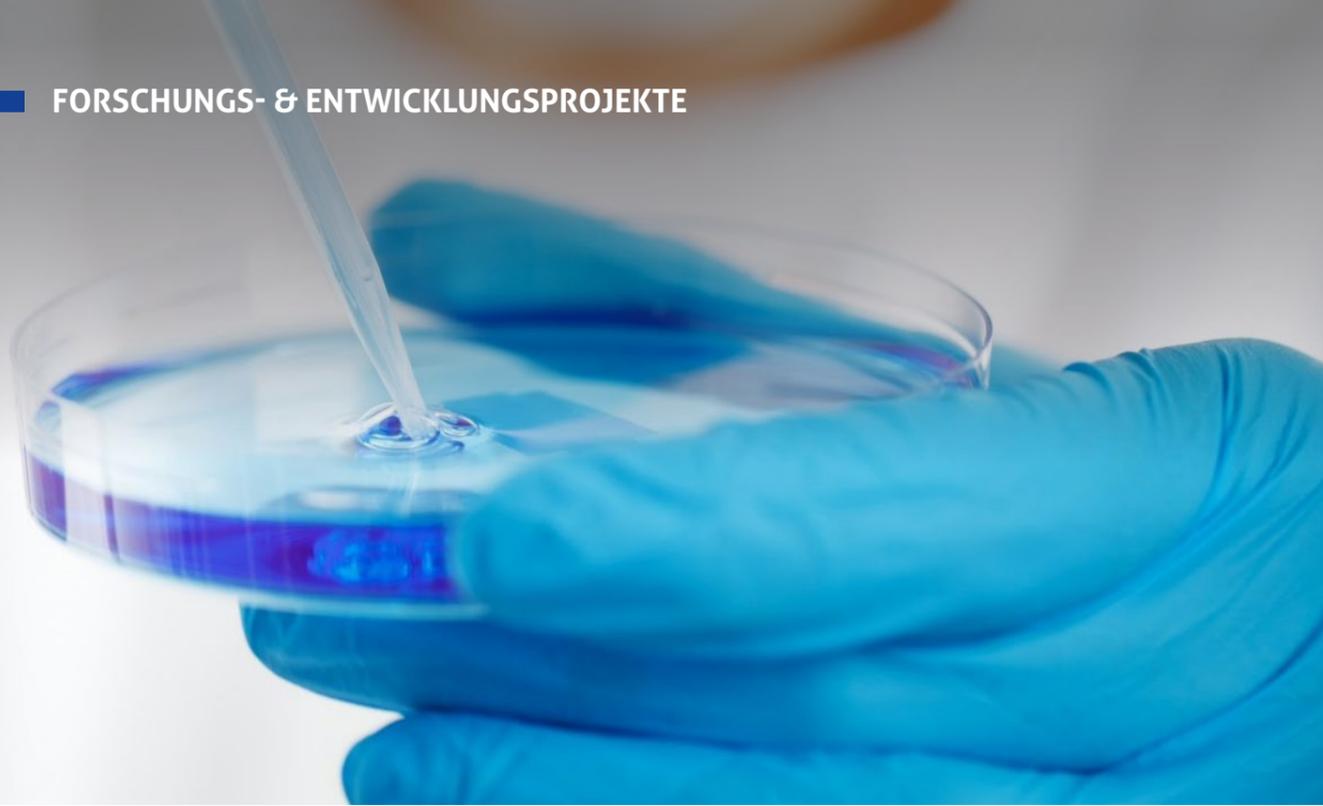
Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

GEFÖRDERT

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt *Inkjet-Printing galvanisch verstärkter Infrarot-Emitter (IJP-IR)* werden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK).
Förderkennzeichen: 49MF222025



KOMPONENTEN UND MODULE FÜR DIE VERBESSERTE OPTISCHE DIAGNOSTIK (KODIAK)

Verschiedene Biomarker im Blut, die charakteristisch für eine Entzündungsreaktion (z.B. in Folge einer Sepsis oder Infektionskrankheit) im Körper sind, können für eine schnelle Erkennung eines Zytokin-Freisetzungssyndroms herangezogen werden. Im Projekt „KODIAK“ wurde ein Demonstrator für eine Lab-on-Chip-basierte Point-of-Care-Diagnostik entwickelt, ein angepasstes immobilisiertes Immunoassay entworfen und für den Nachweis verschiedener Entzündungsmarker (Interleukin 6 und 1b sowie Interferon- γ) erprobt.

Das auf Chemolumineszenz-Farbstoffen basierte Nachweisverfahren ermöglicht ein optisches Auslesen der Proben innerhalb einer Mikrofluidik-Kartusche. Die Entwicklungen dieser perspektivisch als Einweg-Komponente einzusetzenden Kartusche und der im inneren ablaufenden biochemischen Prozesse erfolgte durch die Partner microfluidic ChipShop und Fraunhofer-Zentrum MEOS. Um die sehr lichtschwachen Effekte erfassen zu können, entwickelten die Partner X-FAB und IMMS

spezielle Detektoren (SPAD = Single Photon Avalanche Diodes) in Form von Arrays aus 192 Zeilen mit je 20 Pixeln, die dafür erforderlichen integrierten und externen Schaltungen sowie die Firm- und Software zu deren Betrieb. Den Partnern CiS Forschungsinstitut und LUCAS Industrie oblag schließlich die Systemintegration, insbesondere das Zusammenbringen der SPAD-Detektoren und der Mikrofluidik-Kartusche in einem funktionstüchtigen Demonstrator.

Die Funktionsfähigkeit des Demonstratorsystems wurde im Rahmen des Projekts erfolgreich demonstriert. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die klinisch relevanten Nachweisgrenzen, von $< 50 \text{ pg/mL}$, mit Hilfe des für die Mikrofluidik optimierten, immobilisierten Immunoassays erreicht werden können. Als zukünftige Schritte sind die räumlich aufgelöste Messung aller Zytokine gleichzeitig, unter Einsatz der Mikrofluidik-Kartusche, sowie die Validierung mit klinischen Proben geplant. ●



Links: In dem Demonstrator integrierte Halterungsvorrichtung, welche das PCB mit den beiden SPAD-ICs und die Mikrofluidik-Kartusche zusammenbringt. Foto: IMMS. Rechts: Demonstrator mit eingesetzter Halterungsvorrichtung. Foto: LUCAS.

Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI-Richtlinie)

Antragsteller-Name: CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Beschreibung des Vorhabens:
Komponenten und Module für die verbesserte optische Diagnostik - KODIAK
Teilvorhaben: Hybride Mikromontage von mikrooptischen Sensorsystemen zur Bildgebung auf Basis von Einzelphotonen

Das vom Freistaat Thüringen geförderte Vorhaben wurde durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und von REACT-EU kofinanziert.

EFRE bewegt Thüringen

Freistaat Thüringen | EFRE | REACT-EU

GEFÖRDERT

Das Verbundprojekt des Thüringer Konsortiums X-FAB, MEOS, IMMS und CiS Forschungsinstitut gehört zum Spezialisierungsfeld Gesundes Leben und Gesundheitswirtschaft der RIS3 Strategie Thüringens. Es leistet einen Beitrag zur Vorbereitung einer grünen, digitalen und stabilen Erholung der Wirtschaft, inklusive Forschung und Entwicklung, die zu diesem Ziel oder zu einer Stärkung des Gesundheitssystems beiträgt. Das Vorhaben wird zudem durch EFRE-Mittel als Teil der Reaktion der Union auf die COVID-19-Pandemie (REACT-EU) unterstützt.

Projekt: Komponenten und Module für die verbesserte optische Diagnostik (KODIAK)

CiS Forschungsinstitut Teilprojekt: Hybride Mikromontage von Mikrooptischen Sensorsystemen zur Bildgebung auf der Basis von Einzelphotonen

Vorhabens-Nr.: 2021 FGI 0045



INNOVATIVE HOCHTEMPERATUR-TECHNOLOGIE (EFFIZIENTPRO)

Leitfaden für die aktuellen Herausforderungen der Technologieweiterentwicklung ist zum einen der Klimaschutzplan 2050 und zum anderen der „European Chips Act“. Die weitgehende Treibhausgasneutralität auch im Industriesektor ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Die Europäische Union will die Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz bezüglich Halbleitertechnologien und -anwendungen erhöhen, um die technologisch wichtige Unabhängigkeit sowie den digitalen und ökologischen Wandel voranzutreiben.

Für das CiS Forschungsinstitut besteht ein erster mittelfristiger Ansatz in der Steigerung der Ressourceneffizienz durch Verwendung energieeffizienter Technik und der Optimierung von Verfahren und Prozessen in der Wertschöpfungskette von MEMS- und MOEMS-Bauteilen.

Die neue Hochtemperaturanlage bildet verschiedene Basistechnologien ab, die am CiS Forschungsinstitut in nahezu jedem Technologieablauf der Wafer-

prozessierung integriert ist. Schichtabscheidungen, beispielsweise auf Basis umweltfreundlicherer Materialien können ebenso untersucht werden wie die Weiterentwicklungen klassischer Beschichtungsverfahren zur Verbesserung der Performance und Ausbeute von Sensoren.

Durch die umfangreichen Schnittstellen zur computergestützten Prozessparametererfassung und -optimierung wird ein höherer Qualitätsstandard in der sensorischen Entwicklung erreicht. Mittels Fernüberwachung und -steuerung kann der Beschichtungsprozess und dessen Regelung jederzeit transparent abgebildet werden.

Zu den technischen Neuerungen gehört auch eine vollautomatische Bestückung, die von der Bestückung der einzelnen Prozess-Carrier bis zum Absetzen auf das entsprechende Paddle reicht. Die Möglichkeit der Vorbestückung gestattet eine enge Bearbeitungsfolge, wodurch wiederholte, energieaufwendige Abkühl- und Aufheizphasen entfallen. Das System verfügt

des Weiteren über ein redundantes Temperaturmanagement. Spezielle, hochtemperaturstabile Thermoelemente erfassen die Temperaturprofile sowohl im Innen- als auch im Außenbereich für die verschiedenen Prozesskammerbereiche. Eine optimierte Gasverteilung unterstützt die homogene Schichtbildung auf den Wafern. Die Bauteilperformance wird von der neuen Hochtemperatur-Anlage profitieren.

Die Investition in eine Hochtemperaturanlage mit einer ressourcenschonenden Prozessführung stärkt

langfristig die Wirtschaftsfähigkeit des CiS Forschungsinstituts und unterstützt damit Partner aus Industrie und Forschung.

Das Projekt gehört zum Spezialisierungsfeld Nachhaltige Energie und Ressourcenverwendung der RIS3 Thüringen. Es leistet einen Beitrag zur Vorbereitung einer grünen, digitalen und stabilen Erholung der Wirtschaft, inclusive Forschung und Entwicklung, die zu diesem Ziel oder zu einer Stärkung des Gesundheitssystems beiträgt. ●



GEFÖRDERT

Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Freistaat Thüringen unter der Nummer 2022 WFN 0014 gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



OPTIMIERTE ENTWICKLUNGSUMGEBUNG FÜR EIN MIKROSENSORIK-PROTOTYPING (OPENSENS)

Halbleitertechnologien und Mikrochips tragen dazu bei, den Herausforderungen unserer Zeit zu begegnen, den Lebensstandard zu verbessern und gleichzeitig Energie und Materialien effizienter einzusetzen. Zudem zielt die Europäische Union auf ein starkes Halbleiter-Ökosystem in Europa ab, um strategische Abhängigkeiten zu reduzieren und damit langfristig eine sichere Versorgung aufzubauen.

Voraussetzung hierfür ist eine technologische Infrastruktur auch in Forschung und Entwicklung, die eine vielfältige und variable Nutzung zulässt, um innovative Ideen für einen Transfer in die Wirtschaft zu untersuchen und deren Skalierung vorzubereiten.

Mit der Investition in einen vollautomatischen Waferprober etablierte das CiS Forschungsinstitut einen weiteren wichtigen Baustein der Prozesskontrolle im Bereich der Prototypenfertigung. Die vollautomatisierte Parametererfassung von Einzelsensorelementen auf Waferebene, Sensitivitätsanalyse und in-

line-Parameteraktualisierung gestattet eine schnelle umfassende Charakterisierung und Bewertung der Prozessierungsergebnisse. Diese Ergebnisse führen zu angepassten Prozessparametern und zu sogenannten „first time right“-Entwicklungen. Darüber hinaus wird der Übergang von der reaktiven Qualitätskontrolle zur zustandsbasierten oder gar vorausschauenden Qualitätskontrolle und -sicherung möglich. Letztere greift bereits nach essentiellen Prozessschritten und ist eine zwingende Voraussetzung insbesondere im Bereich der Prototypenfertigung.

Parameter und Prozessvariablen werden digitalisiert, in Datenbanken zusammengeführt und mit dem Endergebnis abgeglichen. Dazu wurde eine leistungsfähige Hardware implementiert.

Umfänglich können nunmehr Prozessparameter erfasst und ausgewertet werden mit dem Fokus auf eine „vorausschauende“ Qualitätssicherung, die sich aus dem multiphysikalischen Simulationsansatz gekoppelt mit den erzielten Chipparametern ergibt.



Ein weiterer technologischer Schwerpunkt unseres Hauses liegt in der Entwicklung hochempfindlicher Feder-Masse-Systeme auf Siliziumbasis. Standardisierte Verfahren werden weiterentwickelt und neue technologische Ansätze wie Dampfphasenätzen erprobt. Entsprechende Prüfverfahren, beispielsweise Schichtdickenmesssysteme, helfen technologische Entwicklungsaspekte detailliert auszuwerten. Das Vorhaben „Entwicklung von Stapeltechnologien für Resonante Silizium-Differenzdrucksensoren“ (ReSi-DDS) unter-



sucht die Möglichkeiten des HF-Dampfätzens zur Herstellung von Resonator-Strukturen und wird im Kapitel Forschungsprojekte vorgestellt.

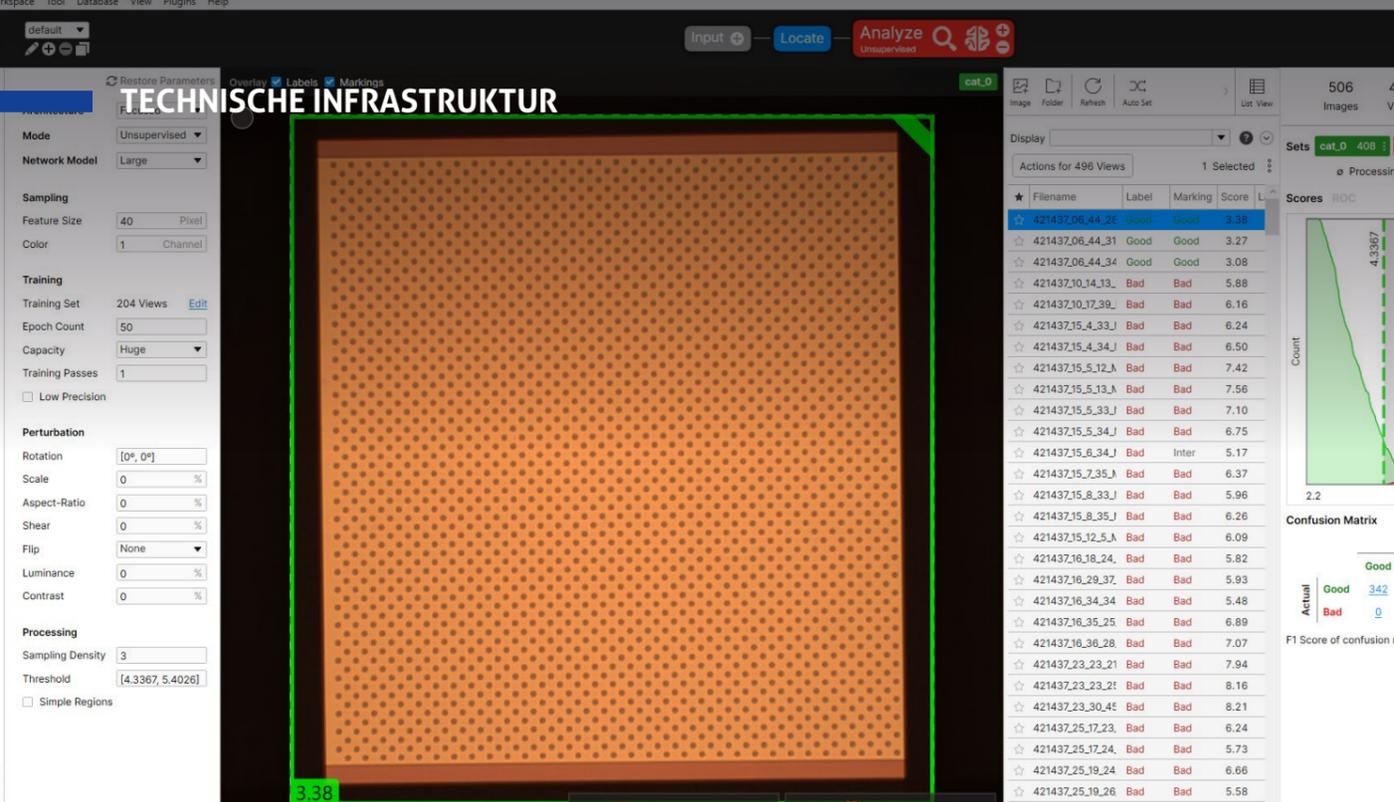
Diese Investitionen tragen dazu bei, im Sinne des europäischen „Green Deals“ eine ressourcenschonende und energieeffiziente Wirtschaft weiter auszubauen.

Das Projekt gehört zum Spezialisierungsfeld „Industrielle Produktion und Systeme“ der RIS3 Thüringen und betrifft die Leitziele „LIPS 1.1: Thüringen ist 2020 Kompetenzregion für intelligente vernetzte Produktion mit adäquat angepasster Mensch-Maschine-Interaktion“, „LIPS 1.2: Thüringen ist 2020 eine führende Region Europas für die Entwicklung und Anwendung von flexiblen und effizienten Prozessen, Systemen sowie Technologien für individualisierbare Produkte“ und „LIPS 1.3: Thüringen ist 2020 eine global etablierte Region auf dem Gebiet der Sensorik und Messtechnik für die industrielle Produktion“.



GEFÖRDERT

Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Freistaat Thüringen unter der Nummer 2022 WIN 0044 und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



Gedruckte Teststruktur inklusive Randkontaktierung als Startschicht für eine galvanische Verstärkung der Metallisierung

DIENSTLEISTUNG ZUR KI-UNTERSTÜTZTEN QUALITÄTSKONTROLLE (PINSPEK)

Für kleine und mittelständische Unternehmen besteht ein großer Wettbewerbsdruck, neue IT-Konzepte wie maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz (KI) anzuwenden. Praktische und monetäre Hürden sowie Fachkräftemangel wirken zusätzlich beschränkend.

Mit diesem Vorhaben wurde die Basis für eine praktikable KI-unterstützte Dienstleistung gelegt, welche eine automatische Bildverarbeitung mit weiteren fertigungsrelevanten Qualitätsdaten zusammenführt. Eine industrielle Bildverarbeitungssoftware wurde anhand zwei verschiedener Sensorfertigungen entwickelt und dabei an verschiedene elektrische Kenngrößen für die Qualitätssicherung in einer Fertigung gekoppelt. Erfahrungswerte fließen in fest definierte Fehlerkataloge ein und tragen dazu bei, frühzeitig Abweichungen zu erkennen, um den Fertigungsprozess zu optimieren und Ressourcen zu schonen.

Der Fokus lag in einem ersten Schritt bei der flexiblen Anpassbarkeit der zu entwickelnden Verfahren auf geänderte Objekte und Umgebungseinflüsse. Bereits jetzt sind die enormen Vorteile der KI-unterstützten Qualitätskontrolle erkennbar, insbesondere bei wechselnden Produkttypen und kleineren bis mittleren Stückzahlen individueller Baugruppen.

Unternehmen profitieren direkt von diesem Methodenwissen, welche die entwickelten Prozeduren adaptieren bzw. übernehmen und auf ihre eigenen Entwicklungs- sowie Fertigungsabläufe anwenden können. Das CiS Forschungsinstitut steht dazu als Entwicklungspartner und beratend zur Verfügung.

Das Projekt gehört zum Spezialisierungsfeld „Industrielle Produktion und Systeme“ der RIS3 Thüringen und betrifft die Leitziele „LIPS 1.1: Thüringen ist

DIENSTLEISTUNG ZUR KI-UNTERSTÜTZTEN QUALITÄTSKONTROLLE (PINSPEK)

2020 Kompetenzregion für intelligente vernetzte Produktion mit adäquat angepasster Mensch-Maschine-Interaktion“, „LIPS 1.2: Thüringen ist 2020 eine führende Region Europas für die Entwicklung und Anwendung von flexiblen und effizienten Pro-

zessen, Systemen sowie Technologien für individualisierbare Produkte“ und „LIPS 1.3: Thüringen ist 2020 eine global etablierte Region auf dem Gebiet der Sensorik und Messtechnik für die industrielle Produktion“.



GEFÖRDERT

Das diesen Ergebnissen zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Freistaat Thüringen unter der Nummer 2022 WFN 0035 gefördert und durch Mittel der Europäischen Union im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.

MESSEN 2023

Redundante Temperaturmessung und hochpräzise, piezoresistive Drehratensensoren auf der Hannover Messe 2023

MESSE

Auf der Weltleitmesse der Industrie in Hannover, vom 17. bis 21. April 2023, stellte das CiS Forschungsinstitut auf dem Gemeinschaftstand der LEG Thüringen, Halle 3, Stand 26, sein Portfolio vor. Erstmals präsentierten wir Ergebnisse des Forschungsprojektes „Redundanz“. Hiermit ist es möglich, kundenspezifisch redundante Temperatursensoren auf der Basis von Silizium-Temperaturdioden und Platin-Widerstandselementen zu entwickeln und zu fertigen.

Eine weitere Neuheit war ein hochpräziser, piezoresistiver Drehratensensor aus dem Projekt „Gyros“ für die autonome Offline Navigation, um die exakte Position von bewegten Objekten im dreidimensionalen Raum zu ermitteln.

Für die Nutzung von Grünem Wasserstoff sind spezifische Sensoren für die Messung des Wasserstoffanteil im Erdgasnetz notwendig. Hierfür entwickelt das CiS Forschungsinstitut gemeinsam mit zwei weiteren Partnern Palladium-beschichtete MEMS-Strukturen, die Si-MEMS-Drucksensoren sehr ähnlich sind.

Der Bereich MOEMS setzte den Schwerpunkt auf die Entwicklung und Fertigung von IR-Strahlern und Thermopilesensoren, deren aktive Zone innerhalb einer sehr dünnen Membran aufgespannt wird. Hier ermöglicht eine vielseitige Technologieplattform individuelle Entwicklungen von Gassensoren und Temperaturmessgeräten für Industriepartner.

Bei seinem Rundgang auf der Hannover Messe informierte sich Thüringens Wirtschaftsminister Wolfgang Tiefensee über die aktuellen und zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Thüringer Aussteller. Im gemeinsamen Gespräch mit Thomas Brock, Geschäftsführer des CiS Forschungsinstituts, und Dr. Martin Schädel, Geschäftsfeldleiter MOEMS, diskutierten Minister Tiefensee und Sabine Wosche, Geschäftsleitung der LEG Thüringen, über Ressourceneffizienz und Energieeinsparung.

Zudem waren wir auch auf dem Messestand des Forschungs- und Technologieverbund Thüringen (FTVT e.V.), in Halle 2, Stand C 57 vertreten. Hier präsentierten wir einen hochstabilen, medienbeständigen barometrischen Drucksensoren, welcher in MEMS-Technologie gefertigt wurde. ●



Aktuelle Forschungsergebnisse auf der Sensor + Test in Nürnberg

MESSE

Die internationale Fachmesse SENSOR+TEST in Nürnberg ist für uns eine der wichtigsten Messen, um aktuelle Entwicklungsergebnisse zu präsentieren sowie Kontakte zu Kunden und Partnern zu pflegen und neu aufzubauen. Mit eigenem Messestand in Halle 1, Stand 501, sowie drei wissenschaftlichen Beiträgen auf der begleitenden Konferenz SMSI 2023 - Sensor and Measurement Science International waren wir vom 9. bis 11. Mai 2023 stark vertreten. Außerdem nutzen wir das neue Recruiting-Angebot der Job-Lounge, um während zweier Slots an einem kleinen Stand interessierte Bewerbende Informationen zu Job- und Praktika-Möglichkeiten im wissenschaftlichen Umfeld zur Verfügung zu stellen und diese auch gezielt kennenzulernen.

Messe-Highlight waren erste Chip-Aufbauten aus dem Projekt „GalGIS - Galvanisch getrennter Inkremental

sensor“. Außerdem wurden weitere Ergebnisse aus den Projekten Gyros (Hochpräziser piezoresistiver Drehratensensor für die autonome Offline Navigation) und BVAPD (Hochempfindliche rauscharme Blauviolett-Avalanche-Photodioden) gezeigt.

Auf der begleitenden Konferenz SMSI 2023 - Sensor and Measurement Science International betreute Dr. Thomas Frank, Fachbereichsleiter MEMS, zwei Posterbeiträge zu den Themen „Setting up a pressure sensor with flush membrane and without oil filling“ sowie „A MEMS micromachined low cost microheater platform for applications in thermal sensors“. Ein weiteres Poster über „Optimization of Micro-Hotplates for better Performance as infrared Emitters“ wurde von Dr. Andreas Winzer, Fachbereichsleiter MOEMS, vorgestellt. ●



Neue Generation von IR-Emittern und Si-Dehnmessstreifen mit hohem K-Faktor auf der COMAPAMED in Düsseldorf

MESSE

Vom 13. bis 16. November 2023 öffnete mit der COMAPAMED die weltweit führende Leitmesse für den medizintechnischen Zulieferbereich in Düsseldorf ihre Tore. Auf dem Gemeinschaftsstand der IVAM, in Halle 8A, Messestand H23-4, stellten wir unser Portfolio an siliziumbasierten Mikrosensoren der internationalen Fachwelt vor.

Im Rahmen des COMPAMED HIGH-TECH Forum by IVAM präsentierte Dr. Martin Schädel, Geschäftsfeldleiter MOEMS, am 13. November 2023 ausgewählte Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zur Thematik „Siliziumbasierte Mikrosensoren für medizinische und biowissenschaftliche Anwendungen“.

Am Messestand lag unser Augenmerk auf MEMS-Komponenten. Im Bereich der Atemanalyse und Lungenfunktion spielt die Untersuchung verschiedener Gase

wie CO₂, CO oder Alkohol eine zentrale Rolle. Eine neue Generation von MEMS-Emittern, die aus Arrays von aktiven Flächen bestehen, wurde im Projekt FIRE - Flinker Infrarot-Emitter-Array entwickelt. Vorteile sind hier eine hohe Miniaturisierung, Langzeitstabilität, breitere Emissionsspektren sowie höhere Dynamik bis zu 100 Hz.

Si-Dehnmessstreifen des CiS Forschungsinstituts weisen im Vergleich zu metallischen Dehnmessstreifen deutlich höhere K-Faktoren auf, was in der Signalauswertung und Sensorplatzierung erhebliche Vorzüge bietet. Mit spezifisch entwickelten Aufbau- und Verbindungstechnologien können die Sensorelemente auf verschiedenen Materialien wie Metall und Keramik flexibel montiert und verbunden werden. Kundenspezifische Lösungen vom Prototyp bis zur Serienfertigung sind damit umsetzbar. ●



KONGRESSE 2023



Sensorentwicklung für nachhaltige und sichere Prozessführung in der Industrie

KONGRESS MIT AUSSTELLUNG

Unter dem Motto „Sensorik-Zukunftstrends und Sensorimpulse für industrielle Anwender“ ludt das Institut für Sensor- und Aktortechnik der Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg zum bereits 3. Technologietag angewandte Sensorik (TAS). Am 9. März 2023 wurden in Fachvorträgen, Postern und Exponaten, Schwerpunkte rund um das Themenfeld „industrielle Transformation zu mehr Nachhaltigkeit, Prozesssicherheit und Qualitätsüberwachung“ gesetzt.

Wir beteiligten uns mit einem Fachvortrag und einem Platz in der begleitenden Ausstellung. In der dritten

Session der Kurzvorträge aus Industrie und angewandter Forschung berichtete Dr. Martin Schädel, Geschäftsfeldleiter MOEMS, über „Optische Sensoren zur Überwachung und Steuerung von Industrieprozessen“.

Exponate und Demonstratoren aktueller Forschungsergebnisse präsentierte Dr. Klaus Ettrich, Geschäftsfeldleiter MEMS, in der Ausstellung. So zum Beispiel eine gemeinsame Entwicklung mit der UST Umweltsensortechnik GmbH. Das diversitär redundante H₂-Semicon®-Gassensorsystem misst H₂-Konzentrationen bis 100%. ●

Monitoring sicherheitsrelevanter Flanschdichtungen

KONGRESS

Gemeinsam mit der CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, der 5microns GmbH und der Siegert TFT Thinfilm Technology GmbH erhielt die Micro-Hybrid Electronic GmbH die renommierte Auszeichnung für die Entwicklung einer Technologieplattform für hochzuverlässige NDIR Gassensorik. Der AMA Innovationspreis wird jährlich durch den AMA Verband für Sensorik und Messtechnik für innovative Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus der Sensorik und Messtechnik ausgelobt und während der Eröffnungsveranstaltung zur Sensor+Test verliehen.

Das prämierte Gas-Sensorsystem mit neuartigem, spektral breitbandigem Infrarot (IR)-Emitter kombiniert bahnbrechende Technologien von MEMS-Chips bis zum Gas-Sensorsystem mit besonderer Langzeit-

stabilität und ermöglicht damit neue Anwendungen für die Gasanalyse auch in extremen Umgebungsbedingungen.

„In enger Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern ist es uns gelungen, langzeitstabile und hochdynamische Infrarotbauelemente auf Basis unserer MEMS-Technologien zu entwickeln und inzwischen auch in Serie zu fertigen. Diese stellen die Kernkomponenten moderner Gassensoren dar, für die in den nächsten Jahren – getrieben durch Gebäudeautomation, Medizintechnik und industrielle Prozessüberwachung – ein enormes Marktwachstum zu erwarten ist.“, erläutert Prof. Thomas Ortlepp, Geschäftsführer des CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik die Bedeutung dieser Technologie. ●



Neuartige Wärmestromsensoren auf der microTEC Südwest Clusterkonferenz

KONGRESS

Die microTEC Südwest Clusterkonferenz fand vom 15. bis 16. Mai 2023 in Freiburg statt. In der Session A2 „Mikrosensorik“ berichtete Dr. Ingo Tobehn-Steinhäuser, Entwicklungsingenieur im Fachbereich Simulation & Design, über die Entwicklung eines neuartigen Wärmestromsensors auf der Basis von Siliziumtechnologien berichten. Basis hierfür bildet die funktionale Einheit über in Reihe geschaltete Temperaturdioden.

Diese können die physikalische Größe Temperatur als präzisen Absolutwert sowie auch hochdynamisch als vektorielle Größe erfassen. Die Integration innovativer hochauflösender Temperatursensoren mit einem mehrdimensionalen Kennlinienfeld bietet die Möglichkeit zur Selbstdiagnose, einer grundlegenden Anforderung der Industrie. Der Sensor weist einen größeren Signalhub auf und kann preisgünstig hergestellt werden. ●

Einfluss dünner Polysiliziumschichten auf die Performance von Thermopiles

KONGRESS

Paris war Gastgeber der ICTFFM 2023: 17. International Conference on Thin Films and Functional Materials am 10. und 11. Juli 2023. In der Session „Engineering And Physical Sciences Research“ informierten Dr. Li Long, Entwicklungsingenieur im Fachbereich Simulation & Design, und Prof. Thomas Ortlepp, Geschäftsführung, über Forschungsergebnisse der Untersuchung dünner polykristalliner Siliziumschichten.

Im Vortrag wurden die Abhängigkeit der Leistung von Bauelementen auf der Basis polykristallinen Siliziums von den Transporteigenschaften der Ladungsträger in polykristallinen Siliziumschichten erörtert sowie ein theoretisches Modell vorgestellt, welches mit Messer-

gebnissen vieler Experimente gute Übereinstimmung zeigte.

Der zweite Vortrag „Optimization of Thermopile Sensor Performance of Polycrystalline Silicon Film“ erläuterte ein theoretisches Modell zur Optimierung der Leistung eines Thermosensors mit polykristalliner Siliziumschicht. Dieses wurde für die Erkennung von Infrarotstrahlung auf thermoelektrischer Basis entwickelt und zeigt, dass die Leistung eines polykristallinen Siliziumschicht-Thermosensors entsprechend dem thermoelektrischen Qualitätsfaktor, dem Sensorschichtstrukturfaktor und dem geometrischen Formfaktor des Sensorlayouts optimiert werden kann. Messergebnisse bestätigen das Modell. ●



CiS Forschungsinstitut auf dem 10. MikroSystemTechnik Kongress

KONGRESS

Vom 23. bis 25. Oktober 2023 fand der 10. MikroSystemTechnik Kongress in Dresden statt. Mit dem Fokus auf nachhaltige Mikroelektronik wurden die Themen Elektronik, Mikrosystemtechnik und Werkstoffe diskutieren und welchen Beitrag sie zum Erreichen der Klimaziele leisten können.

In verschiedenen Vortrags- und Poster-Sessions konnten wir ausgewählte Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsleistungen aus den Bereichen MEMS und MOEMS vorstellen. Bereits am 24. Oktober 2023,

referierte Dr. Thomas Frank, Fachbereichsleiter MEMS, über das Thema „Membranlose Drucksensoren für den Einsatzbereich über 1000 MPa“.

In der Poster-Session „Mikrosysteme in der Anwendung“ wurde das Thema „Kompakter Nanoindenter mit integrierten Weg- und Kraftsensoren“ präsentiert. Unter der Rubrik Nachhaltigkeit, Energie und Klima stand eine weitere Poster-Session, hier wurde das Thema „Verwendung von Siliziumdehnungssensoren für makroskopische Prüfkörper“ erläutert. ●



GREAT H2 Abschlusskonferenz und grüner Wasserstoff in der Industrie

KONFERENZ

Im Rahmen der GREAT H2 Abschlusskonferenz am 22. November 2023 präsentiert das CiS Forschungsinstitut Sensorentwicklungen zur industriellen Anwendung von grünem Wasserstoff. Im Comcenter Brühl erläuterte Dr. Klaus Ettrich, Geschäftsfeldleiter MEMS, in seinem Pitch sensorische Lösungen für eine

sichere Nutzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Herstellung, über die Speicherung bis hin zur Verteilung von „Grünem Wasserstoff“ in verschiedenen Branchen. In der Fachausstellung zeigten wir Demonstratoren aus entsprechenden Forschungsprojekten. ●

Optische CO₂-Messung mit einem IR-Sensor auf dem Innovationstag Mittelstand in Berlin

POLITIK

Wandel durch Innovation - unter diesem Motto startete am 15. Juni 2023 der Innovationstag Mittelstand des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in Berlin. Auf dem Freigelände des BMWK-Projekträgers AiF Projekt GmbH in Berlin-Pankow stellen sich alljährlich zahlreiche Förderinitiativen und -programme des BMWK den neugierigen Fragen der interessierten Besucher. Der Fokus lag auf dem Themenfeldern Nachhaltigkeit und Klimaschutz, Digitales sowie Gesundheit. Dr. Martin Schädel, Geschäftsfeldleiter MOEMS und Jessica Thorhauer aus dem Projekt-Controlling stellten einen optischen Gassensor vor, der die Konzentration von Kohlendioxid in der Atemluft misst.

Der Gassensor arbeitet nach dem NDIR-Prinzip, in welchem ein entwickelter IR-Strahler (Infrarot-Strahler) als Lichtquelle dient. Dargestellt wurden die live-Sensor-Rohsignale sowie die ausgewertete CO₂-Konzentration der freiwilligen Probanden am Stand des CiS Forschungsinstitutes D11. Der Demonstrator ist auch das Ergebnis eines mit BMWK-Fördermitteln unterstützten Projektes Texturierter Schwarzkörper-MEMS-IR-Strahler (TeSIS) mit dem Förderkennzeichen 49MF190034. In diesem Projekt wurde eine neuartige, deutlich vereinfachte Prozesskette für die Herstellung dieser IR-Strahler mit Schwarzkörpereigenschaften entwickelt. Damit ist es möglich, die Herstellungskosten fast zu halbieren. Für diese vielversprechende Idee wurde unter PCT/EP2018/083263 erfolgreich ein internationales Patent gesichert.



Mit dem Innovationstag demonstrieren der innovative Mittelstand sowie wirtschaftsnahe Forschungseinrichtungen die Wirksamkeit der Förderung durch den Bund. Als Mitglied der Konrad-Zuse-Gemeinschaft, die Interessenvertretung gemeinnütziger, privatwirtschaftlich organisierter Forschungseinrichtungen, transferiert das CiS Forschungsinstitut Erkenntnisse der Wissenschaft in anwendbare Technologien. ●



CIS WORKSHOPS

Auch in 2023 boten drei Workshops spannende Einblicke zu siliziumbasierter Sensorik und damit verbundenen, aktuellen Forschungsergebnissen und neusten Trends innerhalb der Schwerpunktthemen Analytik,

Design & Simulation sowie Aufbau- und Verbindungstechnik. Die Workshops fanden als Hybridveranstaltung im großen Konferenzraum am CiS Forschungsinstitut in Erfurt statt. Veranstalter war der CiS e.V. ●

SAVE THE DATE
CiS Workshops 2023

- 06.06.2023**
Moderne Analytik für innovative und nachhaltige Sensorik und Materialwissenschaft
- 12.09.2023**
Aktuelle Entwicklungen in der Hybrid- und Waferlevel-Montage
- 26.09.2023**
Modellierung in der Mikrosystemtechnik

Workshop zu moderner Analytik eröffnet CiS-Workshop-Reigen 2023

Der erste dieser drei Workshops stand unter dem Motto „Moderne Analytik für innovative und nachhaltige Sensorik & Materialwissenschaft“ und beleuchtete am 6. Juni 2023 aktuelle Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung in der modernen Analytik für die Halbleiterindustrie. Die Entwicklung anspruchsvoller neuer Sensoren und Materialien verlangt stets ein genaues Verständnis der Material- beziehungsweise Bauteiloberflächen. Wie ist die physikalische und chemische Beschaffenheit des Bauteils, wie verändert es sich durch Nutzung, wie steht es um die Umweltverträglichkeit oder die Qualität und Kontrolle zugrunde liegender Herstellungsprozesse? Auf diese Fragen liefert eine Oberflächenanalytik die Antworten.

Im hybrid gestalteten Workshop wurden verschiedene Untersuchungsmethoden der Oberflächenanalytik

sowie weiterer Spezialverfahren vorgestellt und an Hand aktueller Beispiele aus Forschung und Entwicklung deren Anwendungen und Potential aufgezeigt. Eingeleitet wurde der Workshop durch Prof. Christoph Gerhardt von der HAWK Göttingen mit seinem Vortrag „Kalibrationsfreie Untersuchung mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS) zur Quantifizierung von Spurenelementen in Gläsern“.

Einen Schwerpunkt des Workshops bildete die Analyse von Materialien mittels Sekundärmaspektroskopie (SIMS), welche im CiS Forschungsinstitut verfügbar ist. Nach einer kurzen Einleitung, erläuterte Dr. Stefanie Reiß, verantwortlich für die SIMS im CiS Forschungsinstitut, Untersuchungsergebnisse für quantentechnologischen Anwendungen. Hier standen vor allem die Untersuchung von Defekten im Diamantkristallgitter

und deren Auswirkungen im Mittelpunkt. Die SIMS ist beispielsweise eine der leistungsfähigsten Analysemethoden zur genauen Bestimmung sehr geringer Stickstoffkonzentrationen in Diamanten.

In seinem Vortrag „10 Jahre ASi-Sii-Defekt“ erörterte Dr. Kevin Lauer aus dem CiS Forschungsinstitut die analytischen Durchbrüche, die wesentlich zum Verständnis dieser Defektkategorie in Siliziumbauelementen beigetragen haben.

Das Unternehmen nano analytik GmbH stellte erste Ergebnisse der Kooperation mit dem CiS Forschungsinstitut vor, die im Rahmen der beiden vom BMBF geförderten Kooperationsprojekte „DiaQuantFab“ und „DiaTip“ erarbeitet wurden.

Führungen durch das Analytik-Kompetenzzentrum im CiS Forschungsinstitut begleiteten den Workshop und trugen zu regem Gedanken- und Erfahrungsaustausch bei. ●



Teilnehmende am CiS Analytik Workshop

AVT Workshop zu aktuellen Entwicklungen in der Hybrid- und Waferlevel-Montage

Am 12. September 2023 starteten wir mit dem CiS AVT Workshop, der „Aktuelle Entwicklungen in der Hybrid- und Waferlevel-Montage“ in den Fokus rückte. Im Rahmen des Workshops berichteten führende Vertreter aus Industrie und Forschung in der Mikrosystem- und Halbleitertechnologie über Erfahrungen und neue Entwicklungen aus dem Bereich Aufbau- und Verbindungstechnik. Schwerpunkt bildeten Mikrosysteme auf Basis von Siliziumsensoren, wobei sich der Bogen von innovativen Technologien der Hybridtechnik bis hin zur heterogenen Integration komplexer Systeme auf Waferlevel spannte. Potential und Grenzen kritischer Fertigungsschritte oder gesamter Prozessketten

mit Blick auf Effizienz, Miniaturisierung, Zuverlässigkeit sowie Leistungsfähigkeit der Sensorsysteme wurden beleuchtet und diskutiert.

Thomas Brock, Geschäftsführung, begrüßte alle Teilnehmenden des hybrid durchgeführten Workshops und gab einen kurzen Überblick über die Wertschöpfungskette unseres Instituts mit dem Schwerpunkt Aufbau- und Verbindungstechnik – dem Leitgedanken des Workshops.

Als Keynote Speaker erläuterten Mario von Podewils und Dr. Tino Jäger von der X-FAB Semiconductor Found-

dries GmbH in ihrem Tandemvortrag „Pure play foundry technologies for advanced heterogeneous system integration“ das Modell einer Foundry, um kundenspezifische Produktideen gewinnbringend umzusetzen. Andre Grün, CiS Forschungsinstitut, führte in seinem Vortrag „Glasfritte-Bonden auf Bauteil und Waferlevel-Technologie und Charakterisierung“ ausgehend vom Material über Glasfritte-Bonden auf Modul- und Wafer-Level bis hin zur Evaluierung einzelner mechanischer und elektrischer Parameter, beispielsweise Nullpunktstabilität und Langzeitverhalten. In ihrem Beitrag „Fügetechnologie mit Reaktivschichtsystemen vom Chip zum Wafer“ berichtete Dr. Indira Käßlinger, ebenfalls CiS Forschungsinstitut, über Ergebnisse aus

dem aktuellen Forschungsprojektes „Optimierte reaktive Bondtechnologie auf der Basis neuartiger Zirkonium-Systeme für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik“. In diesem IGF Projekt lag der Schwerpunkt der Arbeiten am CiS Forschungsinstitut in der Überführung der Fügetechnologie auf Chipllevel in eine Waferbondtechnologie. Den Abschlussvortrag übernahm Prof. Roy Knechtel, Professor für „Autonome Intelligente Sensoren“ an der Hochschule Schmalkalden und Stiftungsprofessur der Carl-Zeiss-Stiftung. Seine Zusammenfassung gab einen Überblick über komplette AVT Lösungen auf Waferebene mittels monolithischer MEMS-CMOS Integration, Wafer Bonden und Durchkontaktierungen. ●



Teilnehmende am CiS AVT Workshop

CiS Workshop mit Schwerpunkt Simulation & Design zur Modellierung in der Mikrosystemtechnik

Der CiS Workshop mit dem Schwerpunkt Simulation & Design fokussierte am 26. September 2023 auf „Modellierung in der Mikrosystemtechnik“. In der Mikrosystemtechnik sind zuverlässige Simulationswerkzeuge eine Voraussetzung für die Unterstützung des Entwurfs von Bauelementen und Systemen durch umfassende Modellierung auf allen Ebenen. Damit können bereits in einem frühen Entwicklungsstadium Funktions- und Designkonzepte bestätigt und ausgewählt werden.

Prof. Peter Schneider, Fraunhofer IIS/EAS und Technische Universität Dresden, führte mit seiner Keynote „Herausforderungen und Perspektiven für die Entwicklung adaptiver mikroelektronischer Systeme“ in die Thematik ein.

Im weiteren Programm ging Dr. Georg Gläser, IMMS, in seinem Vortrag „Artificial Intelligent EDA“ auf neue Werkzeuge zur Entwurfsunterstützung ein. Im Rahmen einer Session zur Simulation von MOEMS stellt Dr. Bernhard Michel, Hembach Photonik GmbH, ein Verfahren vor, mit dem Falschlicht, dass in ein optisches System gelangt, identifiziert und quantifiziert werden kann. Das CiS Forschungsinstitut beteiligte sich mit drei Beiträgen, die einerseits halbleiterphysikalische Simulationswerkzeuge zur Modellierung piezoresistiver Widerstandsbrücken und zum Vergleich verschiedener Simulationsanwendungen zur Modellierung optischer Sensoren vorstellten und andererseits die Ermittlung von Materialparametern bei polykristallinem Silizium am Beispiel piezoresistiver Koeffizienten erläuterten. ●



Teilnehmende am CiS Design Workshop

MITARBEITENDE

Ein Sommerfest zum 30. Jubiläum



Anlässlich des 30-jährigen Bestehens des CiS Forschungsinstituts für Mikrosensorik trafen sich am 9. Juni 2023 alle Mitarbeitenden auf dem Petersberg in Erfurt. Bei sommerlichen Temperaturen wurden zur Einstimmung verschiedene Touren auf dem Erfurter Wahrzeichen und in sein Inneres, den Horchgängen, angeboten. Anschließend eröffnete die Geschäftsführung bei einem Sektempfang das CiS-Mitarbeiter-Sommerfest 2023.

Die Geschäftsführer Prof. Thomas Ortlepp und Thomas Brock bedankten sich bei allen anwesenden Kolleginnen und Kollegen für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, die die Leistungsfähigkeit des Instituts weiter auf einem hohen Niveau hält. „Durch sehr gutes Teamwork und gemeinsame Anstrengungen sind wir in der

Lage, unsere technische Infrastruktur erfolgreich zu erneuern und mit hochqualifiziertem Personal fachgerecht zu bedienen. Damit können wir den wachsenden Anforderungen in Forschung und Industrie immer wieder gerecht werden.“ Neben einem Geburtstagskind, wurden auch langjährige Mitarbeitende für Ihre 25- und 30-jährige Betriebszugehörigkeit geehrt.

Als Location bot die Osterrasse auf dem Petersberg nicht nur einen fantastischen Rundumblick über Erfurt, sondern hatte auch kulinarisch mit einem leckeren Grill-Buffer und ausgewählter Getränkekarte einiges zu bieten. Für die musikalische Begleitung sorgte ein DJ. Die Percussion-Gruppe Rabazz aus Erfurt begeisterte mit einer unkonventionellen Show und lud alle Gäste zum rhythmischen Mitmachen ein. ●

Frohe Ostertage – Kreativer Wettbewerb für die Kinder unserer Mitarbeitenden

Zur Osterzeit lud auch im Jahr 2023 die Geschäftsführung des CiS Forschungsinstituts erneut zu einer kreativen Mitmach-Aktion. Die Kinder aller Mitarbeitenden waren aufgerufen, selbstgemalte Bilder des Osterhasen oder österliches Selbstgebasteltes einzureichen. Für jedes teilnehmende Kind gab es eine süße Überraschung als Belohnung. Die zahlreichen kreativen Einreichungen der jungen Künstler und Künstlerinnen können in unserer Online-Galerie bestaunt werden. Wir wünschen viel Freude und Vergnügen beim Durchblättern. ●



Kilometer sammeln für den Klimaschutz und Erfurter Triathlon

Radeln für ein gutes Klima – unter diesem Motto beteiligte sich die Stadt Erfurt auch in diesem Jahr wieder an der Aktion „Stadtradeln“. Mit dabei das 15-köpfige Team des CiS Forschungsinstitutes. An 21 Aktionstagen erradelte unser Team 2.750 km und belegte damit Platz 65 von 186 teilnehmenden Teams. Mit ihren gefahre-

nen Radkilometer wurden 446 kg CO2 vermieden und Aktionen zur Förderung des innerstädtischen Radverkehrs unterstützt. Zudem spendete das Umwelt- und Naturschutzamt für jede 1.000 gefahrene Fahrrad-Kilometer, die während des Aktionszeitraumes geradelt werden, einen Baum. ●



VERBÄNDE

Vom Mikrochip zum Gassensorsystem

In der aktuellen Auflage der digitalen Veranstaltungsreihe „Spotlights der Mikro- und Nanotechnologie“ am 7. Februar 2023 referierte Dr. Martin Schädel, Geschäftsleiter MOEMS, gemeinsam mit Steffen Biermann, Director of Development & Industrial Engineering bei Micro-Hybrid Electronic, über die Entwicklung „Vom Mikrochip zum Gassensorsystem“. Im ersten Teil ging Dr. Martin Schädel näher auf „MEMS Technologien für Infrarotkomponenten“ ein, Steffen Biermann erläuterte im Anschluss „NDIR Gassensoren für anspruchsvolle Anforderungen“.

Die besonderen Herausforderungen der MEMS-Komponenten ergeben sich aus der fragilen und gleichzeitig hohen Temperaturänderungen ausgesetzten



Mikrostrukturen. So wird beispielsweise die aktive Zone eines MEMS-IR-Strahlers innerhalb nur ca. 1 µm dünnen Folien realisiert, in der im Betrieb laterale Temperaturgradienten von über 800°C pro Millimeter vorliegen können. ●

Smart Mobility auf dem IVAM Hightech Summit



„Microtechnologies für eine smarte Welt“ unter diesem Slogan stand der IVAM Hightech Summit in Bochum am 3. und 4. Mai 2023. Auf der englischsprachigen Konferenz im Bergbau Museum Bochum treffen und vernetzen sich Unternehmen der Mikro- und Nanotechnologie, um ihre neuesten Produkte und Entwicklungen vorzustellen und zu diskutieren.

Prof. Thomas Ortlepp, Geschäftsführung, moderierte die Session „Smart Mobility“ und eröffnete mit seinem Vortrag „nMEMS Development for Smart Mobility –

Driver Condition Monitoring for Safety“ die Diskussion. Hohe Effizienz, kleine Größen und relativ niedrige Fertigungskosten fördern den Einsatz von MEMS-Sensoren in der Fahrzeugtechnik zu Unterstützung aktiver und passiver Sicherheit. Der zunehmende Bedarf von Elektroautos weltweit verstärkt diesen Trend, beispielsweise zur Überwachung von Batterien oder wasserstoffbetriebener Flotten. Besonders piezoresistive Sensoren, die Drücke und Kräfte messen, übernehmen eine Vielzahl von Messungen in den Fahrzeugen. ●

Sensorik im Wandel

Als Vorstandsmitglied im Sensorcluster detect (SensorikNet e.V.) und Geschäftsführer des CiS Forschungsinstitut hielt Prof. Thomas Ortlepp im Rahmen der Fachtagung „Sensorik im Wandel“ in der Session „Smart Home – Sensorik“ ein Vortrag. Dabei stellte er das Portfolio des CiS Forschungsinstituts vor und erläuterte aktuelle Technologien aus den Bereichen MEMS, MOEMS und Quanten-Sensorik.

Die Veranstaltung im COMCENTER Brühl war die erste gemeinsame Initiative des IVAM Fachverbands für Mikrotechnik und des Thüringer Sensorik Clusters „detect“. Das Programm der Tagung enthielt eine spannende Vielfalt an Themen rund um innovative und hochtechnologische

Entwicklungen im Bereich der Sensorik. Besonders Augenmerk wurde dabei auf die Bereiche Medizintechnik, Umweltsensorik und Gebäudetechnik gelegt, die in Zeiten gesellschaftlicher Herausforderungen wie dem Klimawandel und demografischer Entwicklungen von großer Bedeutung sind. ●



CiS Forschungsinstitut war Gastgeber des zweiten After-Work-BBQ des FIZ e.V.



In ungezwungener Atmosphäre fand in den frühen Abendstunden des 24. Mai 2023 das zweite After-Work-BBQ des Forschungs- und Industriezentrum Erfurt (FIZ) e.V. am Forschungs- und Industriestandort Erfurt-Südost statt. Gastgeber war dieses Mal das CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik und bot bei kühlen Getränken und leckerem Barbecue mit Thüringen Rostbratwürsten und Grillgemüse viel Raum zum Netzwerken und persönlichem Austausch. Im Rahmen einer

Hausmesse konnten Gäste in Kleingruppen einen interessanten Einblick in die aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des CiS Forschungsinstitutes gewinnen, anhand von Demonstratoren Sensor-Applikationen ausprobieren und mit den Mitarbeitenden im Anschluss weiterdiskutieren. Ein weiteres Highlight bildete eine Führung durch unser Analytik Zentrum mit Sekundärionen-Massenspektrometer (SIMS) und Rasterelektronenmikroskop (REM) sowie Drucklabor. ●



NACHWUCHSFÖRDERUNG AM CIS FORSCHUNGSINSTITUT

Berufsausbildung

Das CiS Forschungsinstitut engagiert sich als anerkannte Ausbildungseinrichtung. Die klassische Facharbeiterausbildung mit IHK-Abschluss beinhaltet die Berufsbilder Mikrotechnologe/Mikrotechnologin, Industriekaufmann/-frau sowie Kaufmann/-frau für Büromanagement. Mehrere Ausbildungsverantwortliche unterstützen und begleiten die Azubis in den jeweiligen Fachbereichen und sind Mitglied einer Prüfungskommission. Die Ausbildungen mit IHK-Abschluss dauern drei Jahre. Die angebotenen Berufsbilder sind für Schülerinnen und Schüler der mittleren Reife, Abiturientinnen und Abiturienten aber auch für Abbrecher technischer Studienrichtungen gleichermaßen interessant und herausfordernd.

Die Arbeiten als Industriekaufmann in den verschiedenen Bereichen der kaufmännischen Abteilung sind spannend und abwechslungsreich und erfordern ein hohes Interesse an Zahlen und Tabellen. Dabei spielen Teamfähigkeit und Zuverlässigkeit eine große Rolle.

Seit dem neuen Ausbildungsjahr 2023/2024 werden die Auszubildenden von der Berufsschule in Sömmerda betreut und besuchen die Ergänzungslehrgänge des ebz in Erfurt. Das betrifft auch unseren neuen Auszubildenden zum Industriekaufmann in der kaufmännischen Abteilung.

2023 begannen zwei Azubis ihre Ausbildung zum Mikrotechnologen bei uns und erhalten für die Lehre ein iPad. Viele Online-Angebote wie die Visualisierung von Herstellungsverfahren und -abläufen erweitern die theoretische Grundausbildung und ermöglichen damit auch ein vielschichtiges Kennenlernen des Berufsbildes. Diese virtuellen Ausbildungsinhalte werden allseits gut angenommen. Das Arbeiten in Reinräumen und verschiedenen Laboren erfordert Gewissenhaftigkeit und naturwissenschaftliches Verständnis.

Gemeinsam mit der IHK und dem Ostthüringer Ausbildungsverbund entwickeln unsere Ausbildungsverantwortlichen Lehrinhalte ständig weiter. ●

Hochschulen & Universitäten

Forschung und Industrie benötigen Nachwuchs, um die Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft zu meistern. Basis hierfür sind motiviertes und gut ausgebildetes wissenschaftliches und technisches Fachpersonal. Veranstaltungen wie die Ilmenauer Wissenschaftsnacht, der Erfurter Technologie Dialog oder der Coburger Technologietag „Angewandte Sensorik“ an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg bieten einen Einblick in spannende Forschungsaufgaben und Arbeitsmöglichkeiten.

Die Thüringer Hochschulen bieten ausgezeichnete Bedingungen für ein Studium der Ingenieurwissenschaften. Auf der Landeswissenschaftskonferenz 2023 wurden Herausforderungen und Ideen für die weitere Entwicklung der Thüringer Hochschulen diskutiert. In diesem Gremium vertritt unser Geschäftsführer Prof. Thomas Ortlepp die Interessen der wirtschaftsnahen Forschungseinrichtungen Thüringens, die im Thüringer Forschungs- und Technologieverbund (FTVT e.V.) organisiert sind. Sie orientieren sich am Bedarf der Thüringer Unternehmen in den spezifischen Branchen.

Als An-Institut der Technischen Universität Ilmenau ist das CiS Forschungsinstitut ein wichtiger Partner bei der praxisnahen Ausbildung Studierender auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik. Im Masterstudiengang Technische Physik, konzentrieren wir uns auf das Studienmodul Optische Halbleiter-Bauelemente.



Wir bieten eine Vielfalt an Themen für Bachelor- und Masterarbeiten an, die durch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unseres Forschungsinstitutes betreut werden. Auch Promotionsstudierende können bei uns Themen bearbeiten.

Alljährlich unterstützt das CiS Forschungsinstitut den Ilmenauer Physiksommer an der Technischen Universität Ilmenau. 54 Jugendliche der gymnasialen Oberstufen aus Bayern, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Thüringen nahmen an der einwöchigen Veranstaltung im September teil. 2023 stand die Veranstaltung unter dem Motto „Irgendwas mit Quanten“. Mario Bähr, wissenschaftlicher Mitarbeiter am CiS Forschungsinstitut eröffnete mit dem Thema "Echt jetzt - Quantensensoren und Quantencomputer mit Brillis?". Anschaulich und unterhaltsam nahm er alle Anwesenden mit auf eine Reise von den Anfängen der Forschung bis zu möglichen Anwendungsfeldern und warum Diamanten ein vielversprechendes Material für die Quantenphysik und Quantenkommunikation darstellt.

Studierende der Fakultät für Maschinenbau und der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Ilmenau hatten am 8. November 2023 die Gelegenheit mit unserem Geschäftsfeldleiter MOEMS, Dr. Martin Schädel, ins Gespräch zu kommen. Im Rahmen dieser Orientierungsangebote der Universitäten können sich Studierende frühzeitig über Praktika und

Werksstudentenangebote informieren sowie Unternehmen in der Region kennenlernen.

Für ausgewählte duale Studiengänge an der Hochschule Schmalkalden sowie der Duale Hochschule Gera-Eisenach sind wir Praxispartner. An der HS Schmalkalden kann der Bachelorabschluss für Mikrotechnologien erworben werden. An der Dualen Hochschule arbeiten wir in den Bachelorstudiengängen Elektrotechnik und verschiedenen Kaufmännischen Studiengängen zusammen. ●

Verleihung Silicon Science Award

Sehr stolz ist das CiS Forschungsinstitut auf eine Verleihung des Silicon Science Awards in der Kategorie Bachelorarbeiten. Hier wurde Lukas Leon Barthelmann, Technische Universität Ilmenau, geehrt für seine Untersuchungen zum Thema „Messtechnische Untersuchung redundanter Temperatormesssysteme im Temperaturbereich von -40 C bis +140 C“.

Seine Arbeit beinhaltete die Validierung eines diversitären Redundanzsystems spezieller Platinwiderstände und Temperaturdioden, wobei umfangreiche experimentelle Untersuchungen notwendig waren. Lukas Barthelmann fertigte seine Bachelorarbeit am CiS Forschungsinstitut an und wurde von Dr. Ingo Tobehn-Steinhäuser betreut. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte im Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der TU Ilmenau unter Leitung von Prof. Thomas Fröhlich. Schon während der Bachelorarbeit veröffentlichte er zwei Konferenzbeiträge und bereitete eine Veröffentlichung vor.

2023 erhielt Lukas Barthelmann zudem für seine Bachelorarbeit auch den Förderpreis Maschinenbau, welcher alljährlich durch den „Verein zur Förderung der Fakultät für Maschinenbau und der Feinwerktechnik der Technischen Universität Ilmenau e.V. vergeben wird.

Die feierliche Preisübergabe fand im Rahmen der Eröffnungsveranstaltung des internationalen 60th Ilmenau Scientific Colloquium „Engineering for a Changing World“ im Audimax der Technischen Universität Ilmenau statt.

Diese Auszeichnung wird durch den CiS e.V. alle zwei Jahre bundesweit ausgelobt und für hervorragende Bachelor- und Masterarbeiten sowie Dissertationen vergeben. In diesem Jahr wurden fünf der eingereichten Arbeiten geehrt, die gekennzeichnet waren durch hohe Qualität, Praxisrelevanz sowie eine wirtschaftliche Umsetzung in Industrie- und Forschungsvorhaben. Diesmal wurden jeweils zwei Bachelorarbeiten und Dissertationen ausgezeichnet sowie eine Masterarbeit. ●



Nachwuchsgewinnung

Um junge Menschen für ein ingenieurtechnisches oder wissenschaftliches Studium zu interessieren, bieten wir Schülerpraktika, Ferienjobs und Schnuppertage an. Oft gelingt es uns, Interesse zu wecken, sich mit technischen Berufsbildern auseinander zu setzen. Die Jugendlichen erhalten einen Einblick in die Fachbereiche Aufbau- und Verbindungstechnik, Messtechnik und Waferfertigung und dürfen auch kleine Aufgaben selbstständig umsetzen. Sicherheitstechnische Bestimmungen erfordern dabei eine intensive Betreuung.

Unsere Mitarbeitenden engagieren sich bei den Studien- und Berufsorientierungswochen in Thüringer Schulen. Beispielsweise im Perthes-Gymnasium in Friedrichroda konnten sich die Jugendlichen ab der Klassenstufe 9 über Angebote unseres Hauses informieren. Beim physikalischen Ratespiel gab dabei kleine Preise zu gewinnen.

An verschiedenen Schulen werden Seminarfacharbeiten betreut, unter anderem am Staatlichen Gymnasium „MELISSANTES“ Arnstadt mit dem Thema „Atomvorstellung von der Antike bis zur heutigen Zeit, aktuelle Theorien und deren Auswirkung auf Medizin und Technik“. ●



Lange Nacht der Wissenschaften

Ein Highlight bildete die Lange Nacht der Wissenschaften am 23.06.2023, die nach langer Pause erstmals im Frühsommer stattfand. Zwischen 18 und 23 Uhr konnten Groß und Klein, Jung und Alt, an Führungen teilnehmen, Stände besichtigen, selbst experimentieren und ihren Wissensdurst im Gespräch mit unseren Mitarbeitenden stillen.

Im Vorfeld der Veranstaltung hatte das CiS Forschungsinstitut Schüler und Schülerinnen des Arnstädter Gymnasiums eingeladen, unsere Forschungseinrichtung und andere Unternehmen am Standort Erfurt-Südost zu besuchen. Die Jugendlichen waren begeistert und erstaunt, welche interessanten Arbeitsplätze und Berufschancen in Thüringen vorhanden und vielfach gar nicht bekannt sind. Es ist auch dem starken Engagement der Lehrer und Lehrerinnen zu

verdanken, Jugendliche zu motivieren, einen Freitagabend für einen gemeinsamen Veranstaltungsbesuch zu nutzen.

Unsere zwei Schülerpraktikantinnen (Klassenstufe 9-12) hatten an diesem Abend alle Hände voll zu tun. In ihrer Praktikumswoche hatten sie gemeinsam zwei Experimente vorbereitet. Vor allen der Versuch, selbst ein Hufeisen biegen und dabei die eigenen Kräfte zu messen, war ein Publikumsmagnet.

Bei den Jüngsten fand der Basteltisch großen Begeisterung. Hier wurden geometrische Körper wie Würfel und Tetraeder aus unterschiedlichen Materialien mit viel Geduld nachgebaut. Zeit für die Großen, alle Stände zu besichtigen und sich mit unseren Mitarbeitenden auszutauschen. ●



Ein weiteres Highlight war der Laborbesuch im Bereich Analytik. Der Blick durch das Rasterelektronenmikroskop rief große Faszination hervor. Extrem vergrößert wurden winzigste Blütenpollen und Insekten aber auch elektronische Bauteile gezeigt und wie dick ein menschliches Haar im Vergleich zu den feinen Strukturen in der Mikroelektronik sind.

Mitaussteller an diesem Abend war unter anderem das junge Thüringer Start-up Healyan. Philip Caspari und sein Team entwickelte eine preiswerte LED-Brille mit integrierter Lichttherapie, die vor allen den Stressabbau unterstützen soll. Im Rahmen des Thüringer Wettbewerbs „getstartet2gether“ hatte das CiS Forschungsinstitut bei der Umsetzung der kompakten Schaltung mitgewirkt. ●



Technologie-Wettbewerb getstarted2gether

Bei der sechsten Auflage des Thüringer Technologie-Wettbewerbs getstarted2gether am 30.03.2023 überzeugte der junge Gründer Philip Caspari erneut die Jury von seinem Konzept und wird gemeinsam mit dem CiS Forschungsinstitut die Entwicklung seiner preiswerten stroboskopischen Therapie-Brille fortsetzen. Stand im ersten Schritt die kompakte Umsetzung der Schaltung und deren Integration in ein Brillengestell im Vordergrund, wird in diesem zweiten Schritt die Integration farbiger LEDs und deren dazugehörige Elektronik in den Fokus der Entwicklungsarbeiten rücken. Zusätzlich wird ein weiterer Partner ins Boot geholt mit dem Ziel, diese Brille mittel 3D-Druck kostengünstig fertigen zu können. Eine klinische Studie für dieses Licht-Therapie-Gerät ist ebenfalls in Vorbereitung. Diese kabellose Brille ist alltagstauglich und kann auch Stroboskoplicht mit Musik, nach Genre und Anwendung spezifisch verschmelzen für ein neues Kunsterlebnis.

Der Start Up- und Gründerwettbewerb „getstarted2gether“ bietet jungen technologie-orientierten Unternehmen die Möglichkeit, sich mit innovativen Geschäftsideen auf ein Betreuungsprojekt mit den Thüringer wirtschaftsnahen Forschungsinstituten zu bewerben.



Dabei können die an den Forschungseinrichtungen vorhandenen technischen und unternehmerischen Kompetenzen sechs Monate genutzt werden, um die gefasste Geschäftsidee weiterzuentwickeln.

Für den jungen Gründer ist es eine bemerkenswerte Erfolgsstory. Hatte es doch noch am Vorabend der Wissenschaftsnacht in der Kategorie Gründen den begehrten „ThEx AWARDS – Der Thüringer Gründungspreis“ 2023 gewonnen. Zudem gewann das Start-up den Clusterpreis Informationstechnologie des IQ-Innovationspreises Mitteldeutschlands 2023. ●



VEREINE & VERBÄNDE

Das CiS Forschungsinstitut arbeitet in nachstehenden Verbänden, Vereinen bzw. Fachgremien, teilweise auch durch Mitwirkung in den jeweiligen Vorständen:

- Advanced UV for Life e.V. (Vorstand)
- AIT Arbeitskreis der Informationsvermittler Thüringen e.V.
- AMA Fachverband für Sensorik e.V. (Wissenschaftsrat, verschiedene Arbeitskreise)
- Arbeitskreis Mikrosysteme für Biotechnologie und Lifescience e.V.
- Deutsche Industrieforschungsgemeinschaft Konrad Zuse e.V.
- DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- detect – Das Sensoriknetzwerk im Herzen Deutschlands (Vorstandsmitglied)
- DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
- FIZ - Forschungs- und Industriezentrum Erfurt e.V.
- FTVT - Forschungs- und Technologieverbund Thüringen e.V.
- Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (Arbeitskreis Korrosionsschutz in der Elektronik und Mikrosystemtechnik)
- GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V.
- IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH
- idw - Informationsdienst Wissenschaft e.V.
- IHK Prüfungskommission für den Mikrotechnologen (Mitglied)
- Industrie- und Handelskammer Erfurt (Mitglied der Vollversammlung)
- iMAPS - International Microelectronics and Packaging Society
- IPHT - Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V.
- IVAM e.V. Fachverband für Mikrotechnik (AK Innovation, AK Marketing)
- Medways e.V.
- OptoNet e.V.
- Ostthüringer Ausbildungsverbund
- Thüringer Landeswissenschaftskonferenz (Mitglied)
- TITK e. V.
- VDE/VDI Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik (FB Mikrosystemtechnik und Nanotechnologien, FB Aufbau-, Verbindungs- und Leiterplattentechnik)
- VDI/VDE-GMA (FA 2.53 Gasfeuchtemessung)
- VDI/ VDE (Arbeitskreis Mikrotechnik Thüringen)
- Verband innovativer Unternehmen e.V. (VIU)



Deutsche Industrieforschungsgemeinschaft Konrad-Zuse e.V.

Als dritte Säule der deutschen Forschungslandschaft vertritt die Zuse Gemeinschaft mehr als die Hälfte aller in Deutschland ansässigen Institute einer mittelständisch geprägten Forschung. Das CiS Forschungsinstitut engagiert sich seit der Gründung im März 2015 in dieser Gemeinschaft. Ziel ist es, verlässliche forschungspolitische Rahmenbedingungen zu gewährleisten, um den Mittelstand mit praxisnahen und kreativen Ideen zu unterstützen. Prof. Ortlepp, Geschäftsführer am CiS Forschungsinstitut, ist Mitglied im Innovationsrat der Industrieforschungsgemeinschaft.



Forschungs- und Technologieverbund Thüringen e.V. (FTVT)

Dieser Verbund bildet die Landesvertretung für die Zuse Gemeinschaft und ist der Zusammenschluss der gemeinnützigen, wirtschaftsnahen Forschungseinrichtungen (Winafos) im Freistaat Thüringen. Gemeinsam mit inzwischen neun weiteren Winafos im Verbund werden die wichtigsten Technologiefelder der Thüringer Wirtschaft abgedeckt.



IVAM Fachverband für Mikrotechnik

Der internationale Mikrotechnik-Fachverband für die Hightech-Branche und Experte für Technologiemarketing unterstützt seine Mitglieder, mit innovativen Technologien und Produkten an den Markt zu gehen. Regelmäßige Online-Veranstaltungen wie das virtuelle Technologiegespräch Mid-Week Coffee Break oder Spotlights der Mikro- und Nanotechnologie geben einen Überblick über die neuesten technologischen Anwendungen, Innovationen und überfachlich relevanten Themen der Hightech-Branche. Unterschiedlichste IVAM-Fachgruppen erleichtern das Netzwerken und sorgen für kontinuierlichen Informationsaustausch.



AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.

Der AMA Verband versteht sich als führendes Netzwerk für die Schlüsselbranche Sensorik und Messtechnik. Er bietet mit seinem detaillierten Branchenführer einen Überblick über Sensoren, Mess- und Prüftechniken. Auf der jährlich stattfindenden Fachmesse SENSOR+TEST und dem parallel stattfindenden Kongress Sensor and Measurement Science International (SMSI) sowie auf Gemeinschaftsständen wichtiger Leitmesse im In- und Ausland unterstützt der Verband den Innovationsdialog. Der Verband vergibt jährlich einen renommierten Innovationspreis und bietet Technologie-Seminare sowie Thementage mit Schwerpunkten aus Sensorik und Messtechnik.



NETZWERKE, KONSORTIEN, WACHSTUMSKERNE

ZIM Innovationsnetzwerke

QPHOT

Quantum Photonics

Das europäische Netzwerk Quantum Photonics bringt Experten und Führungskräfte aus ganz Europa und entlang der Wertschöpfungskette der Quantenphotonik-Technologien zusammen. Das Projektteam stellt sich hierbei der Aufgabe, bereits demonstrierte Prinzipien und Funktionsmuster aus der Grundlagenforschung heraus in reale Anwendungen und Produkte zu überführen. Typischerweise durch Industriepartner getrieben, entstehen dadurch kundenspezifische, vermarktete Sensorlösungen.



SmartBlue

Blaulicht und blaue LEDs mit opto-sensorischem Monitor- und Feedbacksystem für neue effiziente Anwendungen

Blaue LED haben das Potenzial gesundheitsschädliche UV-Strahler für Anwendungen zur Desinfektion und Keimbekämpfung zu ersetzen. Vorhandene Systeme werden systematisch untersucht und mit entsprechender Sensorik und Monitoringsystemen ausgestattet. Ziel ist es, effiziente und sicher zu dosierende Bestrahlungen in Anhängigkeit der Anwendungen zu gewährleisten.



iQuSense

Innovative Quantum Sensing

Das internationale Netzwerk beschäftigt sich mit der Entwicklung von Quantensensoren sowie von kompakten und robusten Schlüsselkomponenten, unter anderem integrierte Lasermodule. Industriepartner begleiten diese Forschungen und legen den Schwerpunkt auf Integration, Energieeffizienz und Transferierbarkeit in die Wirtschaft. Die schnelle Umsetzung kann in vielen Bereichen neue Märkte für die Unternehmen bedeuten, beispielsweise in der Kommunikationstechnik, im medizinischen Bereich oder in der Navigation.



DigiPhysio

Digitale Methoden und sensorische Innovation in der Humanphysiologie

Im September 2023 startete das Netzwerk von Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus Deutschland und Bulgarien. Erklärtes Ziel der Projektpartner ist es, Sensorik, Bildverarbeitung und künstliche Intelligenz zu verknüpfen, um in der Humanmedizin therapeutische Lösungen zu verbessern bzw. neue Therapieansätze auf Basis automatisch generierter diagnostischer Aussagen zu erkennen. Im ersten Schritt wird das Netzwerk bildverarbeitende Verfahren in Kombination von metabolischer und mechanischer Bestimmung im Sportbereich, kontaktlose Diagnostik der Bewegungsmechanik, VR-gestützte Verfahren in der Rehabilitation und Physiotherapie sowie assistierte Techniken im OP-Saal und in der Pflege in den Mittelpunkt der Aktivitäten stellen.

Eco4Light

Intelligente Optiken und Systeme für effizientes Lichtmanagement

Das Konsortium aus 14 KMUs, vier F&E Einrichtungen und acht assoziierten Partnern startete im vierten Quartal 2023 und wird sich der Thematik des effizienten Lichtmanagements widmen. Fast 20 % des weltweiten Energieverbrauches werden beispielsweise für die Beleuchtung in Gebäuden, im Smart Home-Bereich, Automobil und Medizintechnik benötigt. Zudem hatte die Europäische Union ein neues Energielabel 2021 eingeführt, dass neue technologische Entwicklungen entlang der Wertschöpfungskette für eine hohe Energieeffizienz und damit CO2-Einsparung in der Herstellung und Anwendung herausfordert. Hochrechnungen zeigen, dass weltweit ca. 16 Millionen Tonnen Treibhausgas eingespart werden können, durch ein intelligentes und effizientes Lichtmanagement. Neben der Entwicklung der Komponenten steht auch eine präzise Lichtlenkung, vorwiegend durch Kunststoffoptiken mit speziellen Oberflächen im Fokus des nationalen Netzwerkes.

Eco4Light

Intelligente Optiken und Systeme für effizientes Lichtmanagement

ZEREPRO

Netzwerk personalisierte Neurochirurgie



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Konsortien und Wachstumskerne



GEFÖRDERT VOM



PUBLIKATIONEN & KONFERENZEN 2023

Artikel in referierten Journalen

„Compact All-Optical Quantum Sensor Device Based on Nitrogen Vacancy Centers in Diamond“, Mario Bähr, Martin Jahn, Christoph Heinze, Kristin Neckermann, Jan Meijer, Thomas Ortlepp, *Physica status solidi (a)*, Volume 220, Issue 4, 02/2023

„Modeling the light-induced degradation (LID) in silicon due to ASi-Sii-de-fects“, Kevin Lauer, Aaron Flötotto, Dominik Bratek, Ralf Müller, Katharina Peh, Dirk Schulze, Wichard J.D. Beenken, Stefan Krischok, 5. Symposium Materialtechnik, Technische Universität, Clausthal, Deutschland, 23.-24.02.2023, Tagungsband 5. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik

„Korrelation zwischen Eingangsparametern und der Performance für ein Miniatur-Fluoreszenzphotometer innerhalb einer Kleinserie“, Ralf Müller, Michael Hintz, Kristin Neckermann, Roland Krivanek, Achim Müller, *tm - Technisches Messen*, Vol. 90, Nr. 4, Seite 237-247, 28.04.2023

„Optimization of Thermopile Sensor Performance of Polycrystalline Silicon Film“, Li Long, Thomas Ortlepp, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Vol. 17, Nr. 7, Seite 80-89, 10.07.2023

„Thermoelectric Properties of Doped Polycrystalline Silicon Film“, Li Long, Thomas Ortlepp, *World Academy of*

Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, Vol. 17, Nr. 9, Seite 116-122, 10.07.2023

„Effect of inelastic ion collisions on Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) explained by the A_{Si-Sii}-defect model“, Kevin Lauer, Stephanie Reiß, Aaron Flötotto, Katharina Peh, Dominik Bratek, Robin Müller, Dirk Schulze, Wichard Beenken, Erich Runge, Erik Hiller, Thomas Ortlepp, Stefan Krischok, arXiv preprint arXiv:2311.07280, 13.11.2023

Konferenzbeiträge

„Sicherheit in der Sensorik in der Society 5.0“, Thomas Ortlepp, Asa no Kai - Networking-Frühstück Japan, Erfurt, Deutschland, 25.01.2023

„MEMS Technologien für Infrarotkomponenten“, Martin Schädel, *Spotlights der Mikro- und Nanotechnologie*, online, 07.02.2023

„Modeling the light-induced degradation (LID) in silicon due to ASi-Sii-de-fects“, Kevin Lauer, Aaron Flötotto, Dominik Bratek, Ralf Müller, Katharina Peh, Dirk Schulze, Wichard J.D. Beenken, Stefan Krischok, 5. Symposium Materialtechnik, Technische Universität, Clausthal, Deutschland, 23.-24.02.2023

„Design and Simulation of scalable AQFP circuits“, Anna Reinhardt, Thomas Ortlepp, Dominik Karolewski, Bernhard Schwartz, *QSolid - 2nd Collaborative Meeting*, Karlsruhe, Deutschland, 28.02.-02.03.2023

„HPHT-diamond materials for industry-type quantum sensor device applications“, Mario Bähr, Hasselt Diamond Workshop 2023 - SBDD XXVII, Hasselt, Belgien, 15.-17.03.2023

„Innovative Sensorik für das Flanschdichtungsmonitoring“, Klaus Ettrich, Thomas Frank, 37. Fachtagung Rohrleitungstechnik, Dortmund, Deutschland, 21.-22.03.2023

„Real-time non-invasive monitoring of human blood pressure based on a multi-spectral micro-optical sensor“, Hans-Georg Ortlepp, Martin Jahr, Martin Schädel, Olaf Brodersen, Thomas Ortlepp, *Industrie-Innovationsdialog (IID)*, Erfurt, Deutschland, 22.03.2023

„Calibration of low temperature photoluminescence of boron doped silicon with increased temperature precision“, Katharina Peh, Aaron Flötotto, Kevin Lauer, Dirk Schulze, Dominik Bratek, Stefan Krischok, *DPG Frühjahrstagung - Deutsche Physikalische Gesellschaft*, Dresden, Deutschland, 26.-31.03.2023

„Investigation of the influence of light-induced degradation on boron-doped silicon“, Robin Lars Benedikt Müller, Katharina Peh, Kevin Lauer, Dirk Schulze, Stefan Krischok, Dominik Bratek, Aaron Flötotto, *DPG Frühjahrstagung - Deutsche Physikalische Gesellschaft*, Dresden, Deutschland, 26.-31.03.2023

„Investigation of the P-line by low temperature photoluminescence to determine an illumination cycle“, Dominik Bratek, Katharina Peh, Kevin Lauer, Dirk Schulze, Stefan Krischok, Aaron Flötotto, Robin Lars Benedikt Müller, *DPG Frühjahrstagung - Deutsche Physikalische Gesellschaft*, Dresden, Deutschland, 26.-31.03.2023

„Energy landscape of B-Si defects calculated by DFT for modelling light-induced degradation in silicon“, Aaron Flötotto, Wichard J.D. Beenken, Kevin Lauer, Erich Runge, *DPG Frühjahrstagung - Deutsche Physikalische Gesellschaft*, Dresden, Deutschland, 26.-31.03.2023

„Dependence of the activation energy of light-induced degradation (LID) in silicon on the illumination intensity“, Kevin Lauer, Katharina Peh, Dirk Schulze, Stefan Krischok, *DPG Frühjahrstagung - Deutsche Physikalische Gesellschaft*, Dresden, Deutschland, 26.-31.03.2023

„NDUV spectroscopy for ammonia determination“, Christian Möller, Stefan Görlandt, Indira Käßlinger, Thomas Ortlepp, *ICULTA 2023*, Berlin, Deutschland, 23.-26.04.2023

„An innovative Si package for high-performance UVC LEDs“, Indira Käßlinger, *ICULTA 2023*, Berlin, Deutschland, 23.-26.04.2023

„Robuste Sensorik“, Thomas Ortlepp, 5. OptecNet Jahrestagung - Technologietrends - Networking, Fürstfeldbruck, Deutschland, 25.-26.04.2023

„MEMS Development for Smart Mobility – Driver Condition Monitoring for Safety“, Thomas Ortlepp, *IVAM High-tech Summit*, Bochum, Deutschland, 03.-04.05.2023

„Setting up a pressure sensor with flush membrane and without oil filling“, Thomas Frank, Stefan Hermann, André Grün, Danny Hanig, Manuel Kermann, *SMSI 2023 - Sensor and Measurement Science International*, Nürnberg, Deutschland, 08.-11.05.2023

„A MEMS micromachined low cost microheater platform for applications in thermal sensors“, Abdelazize Laades, Christoph Heinze, Li Long, Dominik Karolewski, Julia Baldauf, Thomas Klein, Thomas Ortlepp, *SMSI 2023 - Sensor and Measurement Science International*, Nürnberg, Deutschland, 08.-11.05.2023

„Optimization of Micro-Hotplates for better Performance as infrared Emitters“, Andreas T. Winzer, Julia Baldauf, Toni Schildhauer, Nicole Thronicke, *SMSI 2023 - Sensor and Measurement Science International*, Nürnberg, Deutschland, 08.-11.05.2023

„Neuartiger Wärmestromsensor auf der Basis von Siliziumtechnologie“, I. Tobehn-Steinhäuser, G. Krapf, S. Marin, Xuemei Xu, J. Beereel, T. Ortlepp, T. Fröhlich, *Clusterkonferenz microTEC Südwest*, Freiburg, Deutschland, 15.-16.05.2023

„Sekundärionenmassenspektrometrie und ihre Anwendung für die Quantentechnologie“, Stephanie Reiß, CiS Workshop Analytik & Messtechnik: Moderne Analytik für innovative und nachhaltige Sensorik & Materialwissenschaft, Erfurt, 06.06.2023

„10 years of A_{Si}-Si_i-defect development: Breakthrough measurements“, Kevin Lauer, CiS Workshop Analytik & Messtechnik: Moderne Analytik für innovative und nachhaltige Sensorik & Materialwissenschaft, Erfurt, 06.06.2023

„Optimization of Micro-Hotplates for better Performance in Infrared Emitters“, Andreas T. Winzer, Julia Baldauf, Toni Schildhauer, Nicole Thronicke, Innovationstag Mittelstand 2023, Berlin, Deutschland, 15.06.2023

„Thermoelectric Properties of Doped Polycrystalline Silicon Film“, Li Long, Thomas Ortlepp, Thin Films and Functional Materials, Paris, Frankreich, 10.-11.07.2023

„Optimization of Thermopile Sensor Performance of Polycrystalline Silicon Film“, Li Long, Thomas Ortlepp, Thin Films and Functional Materials, Paris, Frankreich, 10.-11.07.2023

„Demonstration of a High-Speed Interface Circuit for Josephson-CMOS memories“, Hongxiang Shen, Thomas Ortlepp, EUCAS - 16th European Conference on Applied Superconductivity, Bologna, Italien, 03.-07.09.2023

„Advanced FLUXONICS process with sub- μm Nb/AlO_x/Nb junctions for digital circuits“, Jürgen Kunert, Matthias Schmelz, Katja Peiselt, Gregor Ölsner, Soundarya Gopala Reddy, Thomas Ortlepp, Ronny Stolz, EUCAS - 16th European Conference on Applied Superconductivity, Bologna, Italien, 03.-07.09.2023

„Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron as interface circuit“, Thomas Ortlepp, EUCAS - 16th European Conference on Applied Superconductivity, Bologna, Italien, 03.-07.09.2023

„Defect-engineering for better silicon devices based on understanding of the ASi-Sii-defect“, Kevin Lauer, Christian Möller, Stephanie Reiß, Aaron Flötotto, Katharina

Peh, Dominik Bratek, Robin Müller, Dirk Schulze, Stefan Krischok, Wichard Beenken, Erich Runge, Erik Hiller, Thomas Ortlepp, 60th Ilmenau Scientific Colloquium | Engineering for a Changing World, Ilmenau, Deutschland, 04.-08.09.2023

„Transparent photodiodes for standing wave interferometer“, Christian Möller, Ingo Ortlepp, Thomas Klein, Thomas Ortlepp, Eberhard Manske, 60th Ilmenau Scientific Colloquium | Engineering for a Changing World, Ilmenau, Deutschland, 04.-08.09.2023

„Investigation of a LID defect energy barrier confirming the relationship between the „P-line“ in the indium doped silicon PL spectra to the A_{Si}-Si_i-defect model“, Katharina Peh, Dominik Bratek, Kevin Lauer, Robin Lars Benedikt Müller, Dirk Schulze, Aaron Flötotto, Stefan Krischok, 6th International Conference on Materials Science & Nanotechnology, Rom, Italien, 06.-07.09.2023

„Making use of low-cost HPHT-diamond materials for industry-type quantum sensor device applications“, M. Bähr, C. Wild, W. Knolle, J. Fuhrmann, T. Lühmann, S. Reiss, J. Meijer, T. Ortlepp, 33rd International Conference on Diamond and Carbon Materials, Palma, Spanien, 10.-14.09.2023

„DFT study of B-Si-defects for modelling light-induced degradation (LID) in silicon“, Aaron Flötotto, Wichard Beenken, Kevin Lauer, Erich Runge, 32nd International Conference on Defects in Semiconductors (32nd ICDS), Rehoboth Beach, USA, 10.-15.09.2023

„Effect of inelastic ion collisions on Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) explained by the A_{Si}-Si_i-defect model“, Kevin Lauer, Stephanie Reiß, Aaron Flötotto, Katharina Peh, Dominik Bratek, Robin Müller, Dirk Schulze, Wichard Beenken, Erich Runge, Erik Hiller, Thomas Ortlepp, Stefan Krischok, 24th International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-24), Charleston, USA, 10.-15.09.2023

„Innovative Silicon-Ceramic (SiCer) Technology for High-Strength Pressure Sensor Applications Using Different Manufacturing Methods“, Cathleen Kleinholz, Michael Fischer, Nam Gutzeit, Andrea Cyriax, Michael Hintz, Thomas Ortlepp, Jens Müller, 24th European Microelectronics and

Packaging Conference & Exhibition (EMPC), Hinxton, UK, 11.-14.09.2023

„Fügetechnologie mit Reaktivschichtsystemen - vom Chip zum Wafer“, Indira Käßplinger, CiS Workshop Aufbau- & Verbindungstechnik: Aktuelle Entwicklungen in der Hybrid- und Waferlevel-Montage, Erfurt, 12.09.2023

„Fortschritte in der Modellierung piezoresistiver Widerstandsbrücken“, Bernhard Schwartz, CiS Workshop Simulation & Design: Modellierung in der Mikrosystemtechnik, Erfurt, 26.09.2023

„Vergleich und Kombination verschiedener Simulationsanwendungen zur Modellierung optischer Sensoren“, Martin Jahn, CiS Workshop Simulation & Design: Modellierung in der Mikrosystemtechnik, Erfurt,

26.09.2023

„Ermittlung von Materialparametern bei polykristallinem Silizium am Beispiel der piezoresistiven Koeffizienten“, Dominik Karolewski, CiS Workshop Simulation & Design: Modellierung in der Mikrosystemtechnik, Erfurt, 26.09.2023

„Membranlose Drucksensoren für den Einsatzbereich über 1000 Mpa“, Thomas Frank, Stefan Hermann, André Grün, Danny Hanig, Manuel Kermann, Michael Hintz, Andrea Cyriax, 10. MikroSystemTechnik Kongress 2023, Dresden, 23.-25.10.2023

„KODIAK: Components and modules for improved optical diagnostics“, Michael Scholles, Nicole Isserstedt-John, Dirk Kuhlmeier, Martin Jahn, Martin Reuter, Benjamin Saft, Eric Schäfer, Mirjam Skadell, Alexander Zimmer, Ana Leonor H. Lopes, 10. MikroSystemTechnik Kongress 2023, Dresden, 23.-25.10.2023

„Kompakter Nanoindenter mit integrierten Weg- und Kraftsensor“, Thomas Frank, Stefan Hermann, André Grün, Danny Hanig, Manuel Kermann, Heike Wünscher, Georg Font, Luca Zenone, 10. MikroSystemTechnik Kongress 2023, Dresden, 23.-25.10.2023

„Verwendung von Siliziumdehnungssensoren für makroskopische Prüfkörper“, Thomas Frank, Stefan Hermann,

André Grün, Danny Hanig, Manuel Kermann, Heike Wünscher, Georg Font, Luca Zenone, 10. MikroSystemTechnik Kongress 2023, Dresden, 23.-25.10.2023

„Thermo-electrical improvement of a MEMS-IR-Emitter membrane“, Andreas T. Winzer, Toni Schildhauer, COMSOL Conference 2023, München, Deutschland, 25.-27.10.2023

„Establishing an experimentally verified model for a MEMS hotplate“, Andreas T. Winzer, Toni Schildhauer, COMSOL Conference 2023, München, Deutschland, 25.-27.10.2023

„Silicon-Based Microsensors for Medical & Health Care Applications“, Martin Schädel, COMPAMED High-Tech Forum 2023, Düsseldorf, Deutschland, 13.11.2022

„MEMS Sensoren für grünen Wasserstoff“, Klaus Ettrich, Abschlusskonferenz GREAT H₂, Erfurt, Deutschland, 22.11.2023

„Dünnschichtmesstechnik Seminar und Workshop“, Christian Möller, Dünnschichtmesstechnik Seminar und Workshop, Berlin, Deutschland, 29.-30.11.2023

Qualifizierungsarbeiten

„Ellipsometrie und Lebensdauermessungen an dünnen Oxiden, die auf Silizium aufwachsen“, Friederike Schulze, Bachelorarbeit, TU Ilmenau 2023

„Inbetriebnahme und Optimierung eines Messplatzes zur Untersuchung thermo-elektrischer Eigenschaften von siliziumbasierten Mikrostrukturen“, Guhan Dhamodiraswamy, Bachelorarbeit, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

„Synthese eines selbstvalidierenden Tieftemperatursensors auf Siliziumbasis für den kryogenen Temperaturbereich“, Lukas Leon Barthelmann; Masterarbeit, TU Ilmenau

„Homogeneity and ODMR analysis of electron-irradiated HPHT diamond plates“, Muhammad Bilal Javed, Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena

„Entwicklung eines dewetting Prozesses und die Optimierung von gedruckten Katalysatorpartikeln mittels Temperprozess“, Shimoni Mistry, Masterarbeit, Universität Kassel

KONTAKT & GREMIEN

CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Konrad-Zuse-Straße 14
99099 Erfurt
Germany

Telefon: +49 361 663 14 10

E-Mail: info@cismst.de

Internet: www.cismst.de

Geschäftsführer:

Prof. Dr. Thomas Ortlepp,
Thomas Brock

Aufsichtsrat der CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Dr. Knuth Baumgärtel, Hermsdorf
Christiane Bednarek, Jena
Geert Brokmann, Ilmenau
Dr. Hans-Joachim Freitag, Erfurt
Prof. Dr. Gerhard Linß, Suhl, Aufsichtsratsvorsitzender
Michael Philipps, Maulburg
Benjamin Redlingshöfer, Ranis

Gesellschafter der CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH:

CiS e.V.

Vorstand:

Dr. Knuth Baumgärtel, Hermsdorf
Christiane Bednarek, Jena
Geert Brokmann, Ilmenau
Dr. Hans-Joachim Freitag, Erfurt, Vorstandsvorsitzender
Prof. Dr. Jens Müller, Ilmenau
Michael Philipps, Maulburg
Benjamin Redlingshöfer, Ranis



