

# Mess- und Sensortechnik

**Sensorik und Messtechnik**  
Trends, Innovationen und  
Wirtschaftsentwicklung

Seite 26

**Wenn der Chip  
zum Spion wird**

Seite 72

**Drahtlose Sensordysteme**  
für die nächste Generation  
der digitalen Produktion

Seite 78



[www.sensor-test.com](http://www.sensor-test.com)



Willkommen zum

# Innovationsdialog!



## **SENSOR+TEST** DIE MESSTECHNIK-MESSE

**Nürnberg**

**11.-13. Juni 2024**

### **Effizient und persönlich:**

Hohe Informationsdichte und umfassendes Beratungsangebot internationaler Experten

### **Wissenschaftlich fundiert:**

Internationale Kongresse und Tagungen bieten Einblick in die Technologie der Zukunft

### **Vom Sensor bis zur Auswertung:**

Mess-, Prüf- und Überwachungslösungen für die Innovationen in allen Industriebranchen

AMA Service GmbH - 31515 Wunstorf, Deutschland  
Tel. +49 5033 96390 - [info@sensor-test.com](mailto:info@sensor-test.com)

# „Die Wachstumsbranche Sensorik- und Messtechnik nimmt weiter zu.“

QUELLE: AMA VERBAND FÜR SENSORIK  
UND MESSTECHNIK E. V.



INSTITUT FÜR  
WISSENSCHAFTLICHE  
VERÖFFENTLICHUNGEN

In Zusammenarbeit mit

**AMA**

Verband für Sensorik + Messtechnik

*Innovatoren verbinden*



**sps**

smart production solutions

Internationale Fachmesse der  
industriellen Automation  
**12. bis 14. November 2024**



Weltleitmesse und Konferenz  
der Elektronik  
**12. bis 15. November 2024**

Strategische  
Partnerschaft

**Sensorik**

Wissenschaftliche  
Institute und  
Forschungseinrichtungen  
bundesweit

Um zum Onlineportal der Mess- und Sensortechnik zu gelangen, scannen Sie bitte den QR-Code auf der Titelseite oder gehen auf

[www.messundsensortechnik-online.de](http://www.messundsensortechnik-online.de)

# IMPRESSUM

JAHRESMAGAZIN  
MESS- UND SENSORTECHNIK  
2023/2024

**Idee, Konzeption und redaktionelle Koordination:**  
INSTITUT FÜR  
WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN (IWV)



INSTITUT FÜR  
WISSENSCHAFTLICHE  
VERÖFFENTLICHUNGEN

**Anzeigenverwaltung und Herstellung:**  
ALPHA-Informationsgesellschaft mbH  
Finkenstraße 10  
68623 Lampertheim  
Tel.: 06206 939-0  
[www.alphapublic.de](http://www.alphapublic.de)

**Abteilungsleiter und Ansprechpartner:**  
Sascha Bückermann / [sascha.bueckermann@alphapublic.de](mailto:sascha.bueckermann@alphapublic.de)  
Tel.: 06206 939-441

**Titelbild:**  
robotic arm catch for electronic assembly line. The robot for smart technology manufacturing process. Von xiaoliangge – [stock.adobe.com, #287866677](https://stock.adobe.com/#287866677)

ISSN 1618-8357

Projekt Nr. 96-686

Schutzgebühr 9,80 Euro

Die Informationen in diesem Buch sind sorgfältig geprüft worden, dennoch kann keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Die einzelnen Bildquellen sind über das Institut für Wissenschaftspublikationen erfragbar. Die Auskunft ist kostenfrei und kann per E-Mail erfragt werden.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, des Vortrags, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechts der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

# MASSGESCHNEIDERTE SENSORIK FÜR KOMPLEXE MESSAUFGABEN

ALTHEN Sensors & Controls hat sich auf die Entwicklung innovativer und bedarfsgerechter Produkte und Messlösungen spezialisiert. In enger Abstimmung mit seinen Kunden entwirft, fertigt und liefert der Mess- und Sensorteknikexperte maßgeschneiderte Produkte und Lösungen für eine Vielzahl unterschiedlicher Industriezweige.

Das Portfolio umfasst die physikalischen Messgrößen Druck, Kraft, Drehmoment, Dehnung, Weg, Drehwinkel, Neigung, Beschleunigung, Vibration, Drehrate, Temperatur, sowie Messverstärker, Datenlogger, Joysticks und Elektronik für die Automatisierungstechnik. Spezialisiert auf die elektrische Erfassung dieser Parameter bietet Althen vielseitige Produkte unterschiedlicher Hersteller sowie Eigenentwicklungen und maßgeschneiderte Lösungen. Faire und herstellerneutrale Kundenberatung, enge Zusammenarbeit von Vertrieb und Entwicklung sowie hauseigene Fertigung inklusive Kalibrierlabor sind die Grundpfeiler für den Erfolg des Unternehmens.

Sensordaten spielen eine zentrale Rolle im **Bereich IoT** (Internet der Dinge). Flexible Produktionstechniken sowie optimierte Datenerfassung und -verarbeitung tragen dazu bei, die betriebliche Effektivität zu erhöhen und gleichzeitig Kosten zu senken. Althen bietet schlüsselfertige Messlösun-

gen, die die Hardware ebenso beinhalten wie die Übertragung, Speicherung und Analyse der vom Messsystem erfassten Informationen.

Für **OEM-Kunden** fertigt Althen exklusive Serienprodukte in kleinen und mittleren Stückzahlen. In enger Zusammenarbeit mit den Kunden entstehen so hochwertige, individuell zugeschnittene Sensor-Lösungen. Serienkomponenten und Messketten, z. B. für Prüfstände und Testanwendungen im Automobil- und Maschinenbau, werden in hoher Qualität termingerecht bereitgestellt.

**Test & Measurement** steht bei Althen für individuelle Messtechnik und effiziente Plug&Play-Lösungen, die alle Kundenanforderungen erfüllen, von speziellen Messsystemen wie z. B. zur Erdbebenerkennung bis hin zu hochgenauen Neigungsmesssystemen. Prototypen werden in der hauseigenen Konstruktions- und Fertigungsabteilung hergestellt und innerhalb kürzester Zeit getestet und zur Serienreife gebracht.

## KONTAKT

**ALTHEN GMBH  
MESS- UND  
SENSORTECHNIK**

[www.althensensors.com/de](http://www.althensensors.com/de)

**ALTHEN**  
SENSORS & CONTROLS

## Ihr Experte für Sensorik & Messtechnik

Wir helfen Ihnen Prozesse zu automatisieren,  
Kosten zu sparen, Probleme zu lösen und neue  
Technologien zu entwickeln.



Jetzt Lösungen entdecken

Jetzt Produkte entdecken

[www.althensensors.com/de](http://www.althensensors.com/de)

# VORWORT



Prof. Dr.-Ing.  
Stefan Zimmermann

## Sensorik und Messtechnik im Wandel: Trends und Forschungsperspektiven

Die moderne Industrielandschaft steht vor stetig wachsenden Herausforderungen, aber auch großen Chancen, die sich durch ständige Technologieinnovationen ergeben. In turbulenten Zeiten, in denen sich globale Märkte wandeln und Ressourcen begrenzt sind, wird die Zukunft der Industrie maßgeblich von ihrer Fähigkeit zur Anpassung und Transformation bestimmt. Eine treibende Kraft hinter dieser Transformation ist die enge Zusammenarbeit von Forschung und Industrie.

Die Entwicklung der Industrie 4.0 steht exemplarisch für diesen Wandel. Der Einsatz innovativer Sensortechnologien und das Konzept des Internet of Things (IoT) haben einen Paradigmenwechsel in der Produktions- und Fertigungslandschaft ausgelöst. In der vernetzten Produktion werden nicht nur Produkte hergestellt, sondern ganze Prozessketten orchestriert und optimiert. Dies geht einher mit einer fortschreitenden Miniaturisierung immer leistungsfähigerer Sensoren, die heute in nahezu allen industriellen Anwendungen eingesetzt werden.

Die Forschung treibt dabei den Innovationsmotor in der Sensorik und Messtechnik an. Sie trägt entscheidend dazu bei, Sensoren effizienter, genauer und vielseitiger zu machen. Auch die Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) spielt eine entscheidende Rolle in der Weiterentwicklung der Sensorik. Die Anbindung von Sensortechnik an zentrale KI-Systeme ermöglicht eine umfassende Datenerfassung und -verarbeitung, die nicht nur die Produktion, sondern auch die Logistik und die Lieferketten optimiert. KI-Algorithmen ermöglichen eine Selbstregulierung von Anlagen und die schnelle Anpassung an sich verändernde Situationen.

Die Nachfrage nach immer kleineren, kostengünstigeren, leistungsfähigeren und intelligenteren Sensoren in Produkten hat die Sensorik und Messtechnik längst zu einer Schlüsseltechnologie gemacht und den Weg für ihre breite Anwendung in der Industrie geebnet. In der Medizin eröffnen intelligente Sensoren inzwischen neue Möglichkeiten für die Diagnostik, Gesundheitsversorgung und Therapie.

Trotz dieser erheblichen Fortschritte stehen der Industrie auch bedeutende Herausforderungen bevor. Die zunehmende Vernetzung birgt Risiken, insbesondere im Bereich der Cybersicherheit. Die Sicherheit von vernetzten Systemen muss mit dem Grad der Vernetzung Schritt halten, um die Gefahr von Cyberangriffen zu minimieren. In diesen aufregenden und dynamischen Zeiten arbeiten Forschung und Industrie eng zusammen. Dabei sind Innovation und ständige Anpassung der Schlüssel zum Erfolg. Forschung und Industrie gehen weiter Hand in Hand, um die Zukunft zu gestalten, die Industrie zu verbessern und sich auf neue Anforderungen vorzubereiten. Wir laden Sie ein auf eine Reise in die Zukunft, informieren Sie sich über die Herausforderungen und Chancen, die vor uns liegen.

### PROF. DR.-ING. STEFAN ZIMMERMANN

Vorsitzender des AMA Wissenschaftsrates  
AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.  
Sophie-Charlotten-Straße 15, 14059 Berlin  
info@ama-sensorik.de

[www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de)

### LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Leiter des Institutes für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik  
Leiter des Fachgebietes Sensorik und Messtechnik  
Appelstraße 9A, 30167 Hannover  
zimmermann@geml.uni-hannover.de

[www.geml.uni-hannover.de/de/smt/](http://www.geml.uni-hannover.de/de/smt/)

# MICRO SENSOR: YOUR RELIABLE PARTNER OF SENSING AND MEASURING

Seit 1971 erforscht, konstruiert und produziert Micro Sensor Druckelemente und Instrumente. Heute können Kunden mit hochwertigen Druckzellen, Drucksensoren, Füllstandsensoren und Durchflussmessern beliefert werden. Die Micro Sensor GmbH mit Sitz in Essen ist ein 100 % Tochterunternehmen der Micro Sensor Co., Ltd in China und betreut westeuropäische Kunden mit lokalen Sales und Service, damit die Kunden ihre Erfolgsziele qualitativ und kostengünstig erreichen können.

Micro Sensor setzt neue Maßstäbe in der Präzisionsmessung mit seinen fortschrittlichen Prozess-Drucktransmittern, die auf der bahnbrechenden piezoresistiven MEMS-Technologie basieren. Mit einer beeindruckenden Messgenauigkeit von bis zu 0.05 % und einem erweiterten Messbereich von 60mbar bis 100bar bieten diese Transmitter unübertroffene Präzision und Flexibilität.

Die Anwendungsbereiche dieser innovativen Transmitter sind vielfältig. Sie finden in der Prozessin-

dustrie, Chemie, Gas & Öl, Lebensmittelverarbeitung, Energieerzeugung und vielen anderen Branchen Anwendungen.

Besonders bemerkenswert ist die Möglichkeit der OEM/ODM-Anpassung, die Micro Sensor anbietet. Diese Option ermöglicht es Unternehmen, die Prozess-Drucktransmitter nach ihren individuellen Anforderungen zu gestalten, um maßgeschneiderte Lösungen zu schaffen.

## KONTAKT

### MICRO SENSOR GMBH

Dipl. - Ing. Kai Lu  
Girardetstraße 6  
45131 Essen  
Tel.: +49 (0)201 9599 1858  
kai.lu@microsensorcorp.de  
www.microsensorcorp.de

## MICROSENSOR

High Stability Pressure Transmitter



# GRUSSWORT



Prof. Dr. rer. nat.  
Christoph Kutter

## Liebe Leserinnen und Leser,

Internet of Things, Industrie 4.0, Big Data - die Digitalisierung ist in fast allen Branchen Trend und Innovationstreiber. In dieser vernetzten Welt ist eine vertrauenswürdige Elektronik eine Grundvoraussetzung. Doch wann ist Elektronik „vertrauenswürdig“?

Zum einen ist es in sensiblen Einsatzbereichen wie der Medizintechnik, der Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrttechnologie entscheidend, dass elektronische Systeme zu hundert Prozent zuverlässig funktionieren, idealerweise als „Zero-Defect-Systeme“.

Der zweite Aspekt von „Sicherheit“, der – leider auch vor dem Hintergrund globaler politischer Spannungen – immer wichtiger wird, ist der Schutz elektronischer Systeme vor Manipulation und ungewolltem Zugriff. Nur wenn die Sicherheit von Daten gewährleistet ist, werden Internet of Things (IoT)-Anwendungen auf breite Nutzerakzeptanz stoßen. Softwarebasierte Lösungen reichen oft nicht aus, um sensible Daten in elektronischen Systemen zu schützen, beispielsweise im Bereich des Bankings, im Umgang mit Patientendaten oder bei kritischen Infrastrukturen.

Es ist wichtig, den gesamten Datenfluss zu betrachten – bis hin zur Hardware, welche die Daten verarbeitet. In der Vergangenheit wurden immer wieder Sicherheitslücken in der Hardware entdeckt, die das Auslesen sensibler Informationen ermöglichten. Gerade Hardware-Trojaner haben es dabei in sich: Sie sind in der Lage, herkömmliche Sicherheitsmechanismen zu umgehen und zudem nur schwer zu detektieren.

Eine 100-prozentige Sicherheit wird es nie geben. Das sollte aber kein Grund sein, sich verrückt zu machen. Denn gemeinsam haben wir ein beachtliches Know-how und einen großen Strauß an technischen Möglichkeiten, um Elektronik „vertrauenswürdig“ zu machen. Jetzt geht es darum, dieses Wissen zu bündeln und dabei die gesamte Wertschöpfungskette von Elektronik zu berücksichtigen.

Gerade wenn es um vertrauenswürdige Elektronik geht, ist auch das Vertrauen unter Kooperationspartnern unentbehrlich. Wo könnte man dieses Vertrauen besser finden als in einem gewachsenen Netzwerk wie dem Cluster Sensorik? Ich möchte Sie daher ermutigen: Sprechen wir offen miteinander über aktuelle Herausforderungen und Bedarfe und arbeiten wir gemeinsam an robusten und zukunftsweisenden Lösungen. Lassen Sie uns „Made in Germany“ zu einem Siegel der Vertrauenswürdigkeit machen.

Herzlichst,

**Ihr Christoph Kutter**

Institutsleiter Fraunhofer EMFT, München

# LASER-MADE SOLUTIONS – PRÄZISIONSBAUTEILE AUS SONDERMATERIALIEN

Je filigraner ein Layout und je empfindlicher ein Werkstoff ist, desto höher sind die Anforderungen an die Herstellung des jeweiligen Produktes. Hier sind langjähriges Know-how und die richtige Technologie gefragt. Die LCP Laser-Cut-Processing GmbH bietet mit der Fertigung individueller und anspruchsvoller Fein- und Mikropräzisionsbauteile für vielfältige Anwendungen der Elektronikbranche die passende Lösung.

In den Bereichen Sensorik & Systeme, Leistungselektronik, Feinmechanik & Gerätebau sowie E-Mobilität & Energie stehen wir unseren Kunden als verlässlicher Fertigungsdienstleister und agiler Entwicklungspartner zur Seite. Von der Beratung über das Prototyping bis hin zur Serienfertigung begleiten wir unsere Kunden entlang der gesamten Prozesskette.

Dabei haben wir uns auf die Laserfeinbearbeitung von Sondermaterialien spezialisiert. Die Bandbreite reicht von Hochleistungskeramik (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, SiN, SiC, 3YSZ) über Glas- und Siliziumwafer bis hin zu organischem Leiterplattenmaterial. Ebenso fertigen wir aus Edel- und Federstahl, Aluminium, Titan oder Kupferlegierungen Kontaktelemente, Lead Frames, Heat Sinks oder Heat Spreader für elektrische Schaltungen. Spezifische Layouts werden mittels Laserscriben, -bohren sowie -strukturi-

rieren (bspw. durch UKP-Bearbeitung) oder Wafer Dicing umgesetzt. Außerdem stellen wir Fertigungshilfsmittel wie Stütz- oder Sputtermasken, Niederhalter, Vakuummatrizen und Metallschablonen aller Art her.

Spezielle Kundenanforderungen können wir in unserem Laseranwendungszentrum dank eigenem Gerätebau und angepasster Automatisierungslösungen präzise und individuell realisieren. Mit unserem starken F&E-Bereich treiben wir zukünftige Entwicklungen selbst voran und bleiben durch Kooperationen mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen stets „up to date“.

Seit mehr als 30 Jahren vertrauen Kunden auf unsere Kompetenz in der Lasermaterialbearbeitung. Gern unterstützen wir auch Sie bei der Realisierung Ihrer anspruchsvollen Projekte.

## KONTAKT

### LCP LASER-CUT- PROCESSING GMBH

Heinrich-Hertz-Straße 16  
07629 Hermsdorf  
Tel.: +49 (0)36601 9327-0  
vertrieb@lcp GmbH.de  
www.lcp GmbH.de

**LCP LASER CUT PROCESSING**

*Laser-made solutions.*

www.lcp GmbH.de

# E-JOYN – EXPERIENCE THE SMART WAY OF ELECTRIFIED DRIVING

Zusätzlich zum Automotive-Portfolio treibt Hirschmann Automotive die Entwicklung innovativer Mobilitätskonzepte voran und entwickelte für diese Art der Fortbewegung eine eigenständige Business Unit: E-JOYN. Diese steht für eine smarte, dynamische sowie fortschrittliche Einstellung zur Mobilität. Die Produkte sind zukunftsweisend und eignen sich für alle E-Fahrzeuge im Bereich der Mikromobilität.



Hirschmann Automotive ist seit über 60 Jahren erfolgreicher Entwicklungs- und Produktionspartner in der Automobilindustrie. Die Produkte finden weltweit ihre Anwendung bei allen namhaften Fahrzeugherstellern und in allen Bereichen des Fahrzeugs. Die Anwendungsgebiete der Produkte sind breit gefächert und reichen von der Steuerungs- und Regelfunktion für Motor, Fahrwerk oder Getriebe bis hin zur Emissionsregelung und gewährleisten Sicherheit, Komfort und Fahrassistenz.

Als Experte für maßgeschneiderte Kundenlösungen bietet das Unternehmen ein umfassendes Produktspektrum an Einzelkomponenten als auch elektromechanische Baugruppen bestehend aus Sensoren, Steckverbindungen und Spezialkabelösungen.

## Mikromobilität

Aber nicht nur der Automobilindustrie stellt sich Hirschmann Automotive als ambitionierter Part-

ner. Das Unternehmen setzt gleichermaßen auf eine zeitgemäße Form der individuellen Mobilität. Technologien und Entwicklungsleistungen aus der Automotive-Sparte werden auf E-Bikes und Pedelecs, Scooter und allgemein LEVs (Light Electric Vehicles) angewandt, damit die Produkte für diesen Markt die Anforderungen an Emissionsfreiheit, Fahrfreude, Design und Technologie bestens bedienen – und einer neu gedachten Mobilität einen starken Auftritt ermöglichen.

Die Entwicklungen für diesen Markt unterscheiden sich von den herkömmlichen Automotive Produkten in ihrer Stromtragfähigkeit und Datenprotokollübermittlung, sowie der Miniaturisierung der Steckverbindungen. „Wir befinden uns hier in einem ‚Light E-Mobility‘ Bereich, somit zwischen High- und Low-Voltage. Unsere Produktpalette deckt die komplette Fahrzeugverkabelung ab, von Speed- oder ABS-Sensoren im Hinterrad bis hin zum Display am Lenker und alles was dazwischen liegt. Hierzu gehören Leitungssätze, Datenleitungen, Sensoren, aber auch Motor- und Akkuschnittstellen. Letztere zeichnen sich durch die Möglichkeit für hohe Steckzyklen, und für Systeme > 42V, einen Berührungsschutz nach IPXXB aus. Damit sind wir in der Lage den Markt für denkbar alle Gefährte vom E-Scooter, E-Skateboards bis Cargo-Vehikel im Sinne innerstädtischer Zustelldienste und ähnlichen Größenordnungen auszustatten“, so Manuel Linseder.

## Umweltbewusstsein und Ressourcenknappheit

Mit intelligenten und innovativen Produkten schafft Hirschmann Automotive nicht zuletzt die Voraussetzung für einen erfolgreichen Fortschritt, der dem gestiegenen Umweltbewusstsein und der evidenten Ressourcenknappheit Rechnung trägt. Denn nur durch den intelligenten und innovativen technologischen Beitrag kann der Klimawandel eingedämmt und können die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden. ■

## KONTAKT

### E-JOYN BY HIRSCHMANN AUTOMOTIVE GMBH

Manuel Linseder  
Global Area Manager E-JOYN  
Oberer Paspelsweg 6-8  
A-6830 Rankweil  
Tel.: +43 (0)5522 307-1332  
manuel.linseder@e-joyn.com  
www.hirschmann-  
automotive.com

# BOT – DIGITALER DRUCKAUFNEHMER MIT NEUEN FEATURES

**FLEXIBILITÄT** wird beim BoT Druckaufnehmer großgeschrieben und ermöglicht nahezu grenzenlose Einsatzmöglichkeiten. Ob DNV Zulassung, erweiterte Auswahl an Prozessanschlüssen oder Einsatz in Wasserstoff-Anwendungen – mit der Weiterentwicklung des BoT lässt der Druckaufnehmer insbesondere für OEM-Ansprüche keine Wünsche offen.

Die Basis des BoT ist ein breites Standardportfolio. Durch die modulare Designplattform können zusätzlich eine beeindruckende Vielfalt an Kundenwünsche erfüllt werden.

Der Druckaufnehmer ist optimal geeignet für die Überwachung und Steuerung von Gasversorgungsanlagen, mobilen hydraulischen Geräten und Industrieanordnungen, Pumpen und Kompressoren, Wasserstoff-Systemen u.v.m.

## Grenzenlose Kombinationsmöglichkeiten

Über 30 Druckbereiche (max. 700 bar), über 10 neue Vakuumbereiche (von -1 bis 0,6 bar bis -1 bis 24 bar) decken die Modelle der P-, C- und W-Reihe ab. Darüber hinaus kann zwischen 12 verschiedenen Prozessanschlüssen gewählt werden, neu in der Auswahl sind beispielsweise 7/16-20 SAE #4 ORB Innengewinde, M12x1,5, G1/4 EN837, G1/2 EN837 und auch G1/2" frontbündig für klebrige Medien.

Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit des BoT beruht auf einer strapazierfähigen, robusten Konstruktion aus 316er und 17-4er Edelstahl. Ein Überdruckschutz bis zum 23-fachen Nennwert sichert die Applikation vor Druckschlägen und Berstdrücken.

## Höchste Sicherheitsansprüche – neue Applikationen

Der BoT-Druckaufnehmer erfüllt von Haus aus die Industriestandards für Genauigkeit, Prozessanschlüsse, Druckbereiche und thermische Leistung in Hochleistungsanwendungen und extremen Umgebungen. Fortschrittliche digitale Elektronik reduziert die Auswirkungen von EMI/EMC gemäß der Norm IEC 61000 und bietet hohe Langzeitstabilität. Industrielle Zulassungen und behördliche Standards (CE, IEC, NEMA, UL, REACH, RoHs) liegen vor. Mit der DNV-Zulassung werden auch Applikationen im Marine Markt ermöglicht. Sprechen Sie uns an.

## KONTAKT

### BARKSDALE GMBH

Dorn-Assenheimer Straße 27  
61203 Reichelsheim  
Tel.: +49 (0)6035-949-0  
info@barksdale.de  
www.barksdale.de



**Barksdale®**  
CONTROL PRODUCTS

**BOT: DIE NÄCHSTE  
GENERATION DIGITALER  
DRUCKAUFNEHMER**

- Neue Features
- Neue Anwendungen
- Neue Märkte

www.barksdale.de

# INHALTSVERZEICHNIS

## SENSOR + TEST 2024

Die Messtechnik-Messe

11. – 13. Juni 2024  
Nürnberg

---

## sps – smart production solutions

12. – 14. November 2024  
Nürnberg

- 2**      **Impressum**
- 4**      **Vorwort**  
**Prof. Dr.-Ing. Stefan Zimmermann**  
Vorsitzender des AMA Wissenschaftsrates – AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e. V.
- 6**      **Grußwort**  
**Prof. Dr. rer. nat. Christoph Kutter**  
Institutsleiter Fraunhofer EMFT, München
- 26**     **Sensorik und Messtechnik:  
Trends, Innovationen und Wirtschaftsentwicklung**  
AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e. V.
- 32**     **Sensorik für Wasserstoff – ein Energieträger der Zukunft**  
CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH
- 40**     **Kombinierte Ultraschall- und Radarmessung  
zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Bauwerken**  
**Oliver Blaschke, Prof. Dr. Klaus Stefan Drese**  
Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg

# 3D-SENSOR FÜR KRAFT- UND DREHMOMENTMESSUNG

Einarm-Roboter werden heute für die unterschiedlichsten Aufgaben eingesetzt. Die auftretenden Kräfte und Drehmomente direkt am Arm präzise zu messen, erschließt viele weitere Möglichkeiten in Produktion und QS. So können z.B. bei Bestückungsprozessen aus den Messwerten Rückschlüsse auf die richtigen Teile, deren Positionierung und die korrekte Bestückung getroffen werden.

burster hat dafür einen sechssachsigen Kraft-/Drehmomentsensor mit Roboterflansch entwickelt, der einfach an der Standardaufnahme des Roboterarms befestigt wird. Der 3D-Sensor 8565 kann bis zu drei Kräfte und Drehmomente  $F_x/F_y/F_z$  und  $M_x/M_y/M_z$  gleichzeitig messen. Dabei werden die einzelnen Werte nicht wie oft üblich extrapoliert, sondern jede Messgröße wird über einen eigenen Dehnmessstreifen erfasst. Die jeweiligen Werte können über handelsübliche Messverstärker mit einer Linearitätsabweichung (20 % – 100 %) von 0,1 % vom Endwert ausgelesen werden. Auch hierfür bietet der Messtechnikanbieter verschiedene Lösungen. Je nach Applikation sind kundenspezifische Achsenkonfigurationen möglich, von ein bis drei Achsen und mit oder ohne Drehmomentmessung. Der Anwender kauft also nur, was er tatsächlich benötigt. Die besondere interne Geometrie des Sensors gewährleistet ein geringes Übersprechen der einzelnen Achsen. Je nach Sensorausführung können so neue Arbeitsfelder für die Roboter erschlossen

oder auch Qualitätssicherungsmaßnahmen inline umgesetzt werden. Beispielsweise lassen sich bei der Bestückung von Werkzeugträgern die relevanten Kräfte und Momente messen und mit Vorgabewerten vergleichen. Das ermöglicht Gut/Schlecht-Aussagen und vermeidet Beschädigungen. Auch bei anderen taktilen Bewegungsabläufen wie Greifen, Fräsen oder Schleifen etc. geben die auftretenden Momente direkt Aufschluss über den Zustand des Werkstückes oder des eingesetzten Werkzeugs. Auch Anpassungen durch diverse Referenzmessungen z.B. der Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug je nach Anpressdruck können das Arbeitsergebnis z.B. beim Polieren verbessern. Da je Kanal ein separater Messverstärker eingesetzt wird, lassen sich die einzelnen Werte weitgehend unabhängig erfassen und bewerten; somit ist kein kostenintensiver Mehrkanalverstärker mit Korrekturrechnung notwendig, um die einzelnen Kanäle zu erfassen, wodurch der Aufbau deutlich vereinfacht wird.



## KONTAKT

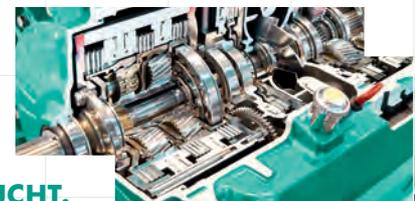
### BURSTER PRÄZISIONS- MESSTECHNIK GMBH & CO KG

76593 Gernsbach  
Tel.: +49 (0)7224-645-0  
info@burster.com  
burster.com




THE MEASUREMENT SOLUTION.






**WEIL FORTSCHRITT VISIONEN BRAUCHT.**

**burster, der Messtechnik- und Sensor-Spezialist** liefert punktgenau die beste Lösung für Ihre Anforderungen. burster bietet Ihnen zukunftsorientierte Produkte, Systemlösungen und umfanglichen Service rund um das Produktspektrum. Mit persönlichem Engagement und kompromissloser Qualitätsfokussierung.

burster präzisionsmesstechnik gmbh & co kg

burster.com

# INHALTSVERZEICHNIS

## electronica

Weltleitmesse und  
Konferenz der Elektronik

12. – 15. November 2024

54

### Automatisierter Sicherheitsnachweis elektronischer Systeme

M.Sc. Levent Ergün, M.Sc. Roman Müller-Hainbach, Prof. Dr.-Ing. Stefan Butzmann

Bergische Universität Wuppertal

58

### Forschung auf dem Gebiet der Speckle-Messtechnik am Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik (MST) der Technischen Universität München (TUM)

Dr.-Ing. Franziska Brändle, Dr.-Ing. Martin Jakobi, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Alexander W. Koch

Technische Universität München

## 17. DRESDNER SENSOR- SYMPOSIUM

25. – 27. November 2024

Dorint Hotel Dresden

64

### Strategische Partnerschaft Sensorik e. V. (SPS)/Cluster Sensorik

Stefanie Fuchs, Matthias Streller

Strategische Partnerschaft Sensorik e. V. , Bayerisches Clustermanagement Sensorik

72

### Wenn der Chip zum Spion wird

Fraunhofer-Institut für elektronische Mikrosysteme und Festkörper-Technologien EMFT

76

### SENSOR+TEST 2024 – mit neuen Highlights

Die Messtechnik-Messe – The Measurement Fair

78

### Drahtlose Sensorsysteme für die nächste Generation der digitalen Produktion

Christian Viehweger, Abdallah Adawy, Frank Wendler, Meriam Ben Ammar,

Bilel Ben Atitallah, Ghada Bouattour, Olfa Kanoun

Technische Universität Chemnitz

# UNIVERSELLE HIGH-SPEED DATENERFASSUNGSLÖSUNGEN

Die Elsys AG ist ein mittelständisches Messtechnik-Unternehmen mit Sitz in der Schweiz. Der Tätigkeitsbereich erstreckt sich über diverse Branchen, vom Energie- über den Automobil- bis hin zum Ballistiksektor. Sie erhalten kundenspezifische Gesamtlösungen, schlüsselfertig und aus einer Hand.

Die Produkte in der Familie der Datenerfassungsgeräte lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien einteilen: Die Datenlogger, welche Signale bis einige kHz meistens über eine längere Zeit aufzeichnen. Typische Anwendungen sind Langzeitüberwachungen von Temperaturen oder Drücken. Die Oszilloskope, welche ab 1 GHz und höher arbeiten, diese meist 4-Kanaligen Geräte werden hauptsächlich in der Elektronikentwicklung eingesetzt und zeichnen entweder periodische Signale auf oder es wird gezielt auf eine Signalform getriggert. Dazwischen liegt die Kategorie der Datenerfassungsgeräten, welche zwischen 1 und 500 MS/s pro Kanal arbeiten, in Mehrkanalvarianten bis zu mehreren 100 Kanälen erhältlich sind und als Langzeitaufzeichnungsgerät eingesetzt werden können sowie auch getriggert einzelne Ereignisse erfassen können. In der zuletzt genannten Kategorie positionieren sich die Produkte der Elsys AG. Je nach Anwendungsumgebung und benötigten Anzahl an Eingangskanälen bieten sich verschiedene Datenerfassungsgeräte an. Die Produktreihe

TraNET® FE ist als 4, 8, 16 oder 32 Kanal Variante erhältlich. Die Geräte werden über eine Ethernet Schnittstelle an einen Mess-PC angeschlossen oder autonom betrieben. Für Daten-Streaming oder andere datenintensive Anwendungen bieten sich die TraNET® EPC Geräte an. Diese können bis 40 Kanäle ausgebaut werden und basieren auf einem leistungsstarken Industrie-PC.

Die PCIe Datenerfassungskarte TPCE bildet die Basis der soeben beschriebenen Datenerfassungslösungen. Diese DAQ-Karten sind in verschiedenen Abtastraten von 2 bis 240 MHz, als 4 oder 8 Kanal mit singleended oder differenziellen Eingängen erhältlich. Der Eingangsbereich lässt sich jeweils pro Kanal von 100 mV bis 100 V einstellen. Optional können ebenfalls IEPE Sensoren direkt an der Messkarte betrieben werden, ohne dass eine zusätzliche Speisung notwendig ist.

In Kombination mit der TranAX® Datenerfassungssoftware erhält der Anwender eine schlüsselfertige aber trotzdem flexible Messlösung.

## KONTAKT

### ELSYS AG

Mellingerstrasse 12  
CH-5443 Niederrohrdorf  
Schweiz  
Tel.: +41 (0)56 496 01 55  
info@elsys-instruments.com  
www.elsys-instruments.com

**TranAX®** Datenerfassungssoftware  
Messen | Steuern | Visualisieren | Auswerten

Anwendungen

- Power Electronics
- Acoustic Emission
- SHPB
- Health Monitoring
- Strain
- Connector Test
- Ultra Sound

**TraNET® FE**  
Data Logger | Transienten Rekorder | Oszilloskop

# INHALTSVERZEICHNIS

**82** **Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik**

**Prof. Dr.-Ing. Stefan Zimmermann**

Leibniz Universität Hannover, Fachgebiet Sensorik + Messtechnik

**94** **Sensitivität und Selektivität vereint:  
Applikationen für GC-MOS-Systeme**

**Oliver Brieger, Christian Bur, Andreas Schütze**

Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik



**PRÄZISE**  
**MESSTECHNIK**  
**FÜR DRUCK & FÜLLSTAND**

>> [www.bdsensors.de](http://www.bdsensors.de)

**BD SENSORS**  
pressure measurement

**DRUCK** auf höchstem NIVEAU.

f in @

# SMARTE GASWARNANLAGEN

## Ein digitaler Messfühler allein bietet keine ausreichende Grundlage für ein intelligentes Messsystem

LogiDataTech ist Hersteller ortsfester Gaswarnsysteme. So war die Vision geboren mit neuen, digitalen Systemstrukturen die physikalischen Begrenzungen bisheriger Systeme, so, wie sie heute in der Industrie verbreitet sind, zu überwinden. Die funktionalen Anforderungen des Zukunftsmarktes sind softwaretechnisch vernetzte Lösungen, mit ausbaufähigen Strukturen. Die Planung, Installation und der Service der Systeme müssen dabei ganzheitlich betrachtet werden.

Hauptentwicklungsziel war es eine maximale Anlagentransparenz zu gestalten. Jede Komponente sollte frei konfigurierbar sein und lokales, sowie globales Monitoring gewährleisten. Um dies zu realisieren ist ein neuartiger Aufbau für die Messfühler umgesetzt worden. Der Messfühler zur Gasdetektion ist dreigeteilt aufgebaut: die Messzelle mit Ihren Kenndaten, das Analyse-Modul zur messtechnischen Auswertung und eine applikationsbezogene Kommunikationsschnittstelle. Der Aufbau der Messfühler legt somit hardware- wie softwareseitig die Basis für eine transparente-, digitale Systemstruktur.

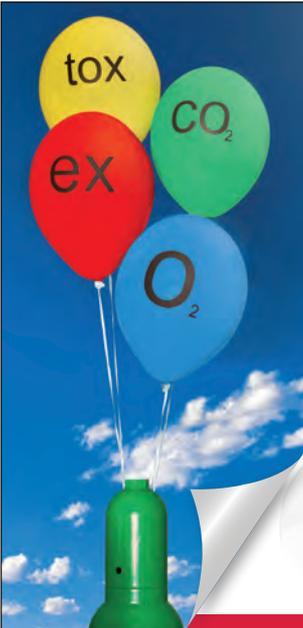
Herz der Warnanlage ist ein Controller mit einer Intelligenz, ähnlich einer SPS. Echtzeitperformance und Datenlogging ermöglichen ressourcensparende IT Strukturen. Der Controller warnt

vor gefährlichen Konzentrationen und steuert Gegenmaßnahmen. Das Gerät kann je nach Bedarf durch Verbindung mit weiteren Controllern frei skaliert und an jede Aufgabenstellung angepasst werden. Herausragend ist hierbei die Fähigkeit analoge, wie digitale Signale über verschiedene Schnittstellen verarbeiten zu können. Somit können nahezu unbegrenzt viele Sensoren für unterschiedliche Gase auch über größere Distanzen angeschlossen werden. Aktoren werden über Relaisausgänge mit Wechselkontakten angesteuert. Status- sowie Messdaten können z.B. über eine TCP/IP-Schnittstelle abgerufen werden, diese Daten stehen somit übergeordnete Leit-, ERP- oder SPS-Systeme zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Ein besonderer Kundenvorteil besteht darin, dass der Controller in bestehende Anlagen integriert werden kann und bei Um- und Ausbau sich an ändernde Bedürfnisse leicht anpassen lässt. Über weitere Schnittstellen können sowohl die Konfiguration eingestellt, als auch Daten vom internen Speicher ausgelesen werden.

Alle Systembestandteile verfügen über eine Geräte-Eigendiagnose diese erhöht somit die Störfestigkeit und erleichtert das Auffinden von Fehlern im System. Zum hohen Komfort der Konfiguration gesellt sich darüber hinaus ein einheitliches und leicht bedienbares Servicekonzept. ■

### KONTAKT

**LogiDataTech GmbH**  
Aschmattstr. 7  
76532 Baden-Baden  
Tel.: +49 (0)7221 97062-0  
info@logidatatech.com  
www.logidatatech.com

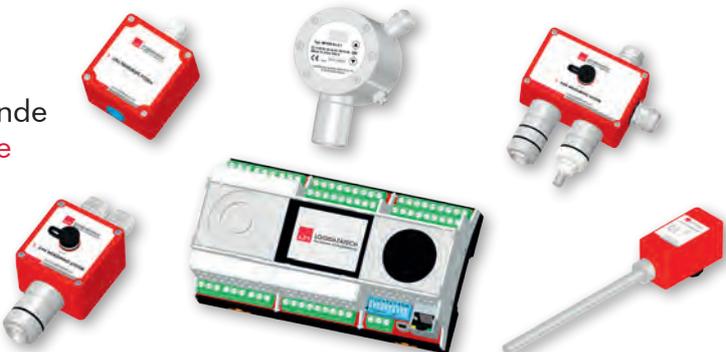


Sie wollen wissen, wie viel von jedem Gas im Ballon ist? **Fragen Sie uns!**

Wir bieten passende **Gas-Messsysteme**



**LOGIDATATECH**  
the power of engineering



**LogiDataTech GmbH**  
Aschmattstrasse 7  
76532 Baden-Baden, Germany

fon +49 7221 97062-0  
fax +49 7221 97062-99

email info@logidatatech.com  
web www.logidatatech.com

# INSERENTENVERZEICHNIS

<a href="http://www.ahlborn.com">www.ahlborn.com</a>	75	AHLBORN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH
<a href="http://www.althensensors.com/de">www.althensensors.com/de</a>	3	ALTHEN GMBH MESS- UND SENSORTECHNIK
<a href="http://www.amitronics.de">www.amitronics.de</a>	71	AMITRONICS ANGEWANDTE MIKROMECHATRONIK GMBH
<a href="http://www.barksdale.de">www.barksdale.de</a>	9	BARKSDALE GMBH
<a href="http://www.bay-sensortec.com">www.bay-sensortec.com</a>	17	BAY SENSORTEC GMBH
<a href="http://www.bdsensors.de">www.bdsensors.de</a>	14	BD SENSORS GMBH
<a href="http://www.beckhoff.com">www.beckhoff.com</a>	48, 49	BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG
<a href="http://www.burster.com">www.burster.com</a>	11	BURSTER PRÄZISIONSMESSTECHNIK GMBH & CO KG
<a href="http://www.cismst.de">www.cismst.de</a>	37	CIS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR MIKROSENSORIK GMBH
<a href="http://www.dimetix.com">www.dimetix.com</a>	24, 25	DIMETIX AG
<a href="http://www.driesen-kern.de/dkp">www.driesen-kern.de/dkp</a>	53	DRIESEN + KERN GMBH

# DAS MASS DER DINGE FÜRS MESSEN – AUCH IN MINI: BAY-SENSOREN

Präzision und Zuverlässigkeit, kombiniert mit hoher Ingenieurskunst und pfiffigen Anwendungsideen – das sind seit über 30 Jahren die Stärken der Sensoren von Peter Bay, zum Messen von Bewegung, Beschleunigung oder Schwingungen. Deshalb sind die fast unsichtbaren, kompakten Multitalente auch international gefragt und auf der ganzen Welt im Einsatz bei Auto-Crash- und Bremstests, in Flugzeugen oder Zügen, an Windrädern, Bohrinseln, Traktoren, Brücken u. v. m.



Die kleine, feine Sensoren-Schmiede Bay SensorTec in Eching bei München legt viel Wert auf ihren guten Ruf. Firmenchef Peter Bay setzt von jeher auf Top-Qualität „Made in Germany“, große Offenheit für kundenspezifische Spezial-Anwendungen und -Entwicklungen, Produktion auch in kleinen Stückzahlen und kurze Lieferzeiten, die durch die eigene Produktion gewährleistet werden können. Das kommt auch Sonderwünschen der Bay

SensorTec-Kunden entgegen. „Wer sich 30 Jahre lang in unzähligen Projekten immer wieder neuen Herausforderungen stellt, technisch am Ball bleibt, und auf viel Erfahrung und ein engagiertes, gut ausgebildetes Team setzen kann, der kann auch für knifflige Fragestellungen individuelle Lösungsstrategien entwickeln.“, schildert Peter Bay seine ungebrochene Neugier auf jedes Projekt. Die Vielfalt der Anwendungsgebiete kommt dem entgegen: In der Luft- und Raumfahrttechnik, bei Windkraftanlagen, im Schiffsbau und in der Agrartechnik geben Bay-Sensoren Auskunft über Dreh- und Schwingungskräfte. Ebenso bei Schienenfahrzeugen und Sicherheits- und Crashtests in der Automobilindustrie. Gefragt sind dabei häufig immer sensiblere und immer kleinere Sensoren. Die neueste Entwicklung aus dem Hause Bay trägt dem Rechnung. Der innovative Mini-Sensor BST IMU-CC mit sechs Freiheitsgraden, bietet Höchstleistung im Miniformat und ist eine der Kleinsten weltweit.

## KONTAKT

**BAYSENSORTEC GMBH**  
Peter Bay  
Erfurter Straße 31  
85386 Eching  
Tel.: +49 (0)89 189 41 49 11  
info@bay-sensortec.com  
www.bay-sensortec.com

## Hochwertige Sensoren – Made in Germany



### Beschleunigung

- uniaxial, Messbereich 2 g bis 200 g
- optional Edelstahlgehäuse
- Speisung 5 – 28 VDC
- hohe Stoßfestigkeit
- TEDS Modul



### Beschleunigung

- triaxial, Messbereich 2 g bis 200 g
- Alu- oder Edelstahlgehäuse
- Speisung 5 – 28 VDC
- hohe Stoßfestigkeit
- TEDS Modul



### Drehrate

- uni- und triaxiale Bauform
- Messbereich 30 °/s bis 10.000 °/s
- Speisung 5 – 28 VDC
- sehr kleine Bauform
- TEDS Modul

**bay**  
SensorTec



# INSERENTENVERZEICHNIS

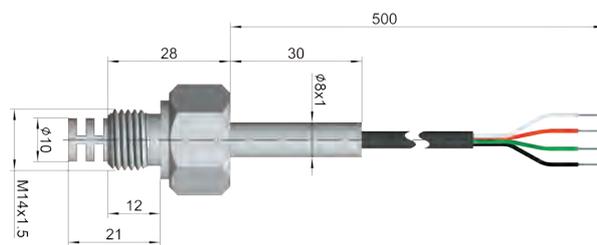
<a href="http://www.hirschmann-automotive.com">www.hirschmann-automotive.com</a>	<b>8</b>	E-JOYN BY HIRSCHMANN AUTOMOTIVE GMBH
<a href="http://www.elsys-instruments.com">www.elsys-instruments.com</a>	<b>13</b>	ELSYS AG
<a href="http://www.galltec-mela.de">www.galltec-mela.de</a>	<b>93</b>	GALLTEC+MELA
<a href="http://www.heitronics.com">www.heitronics.com</a>	<b>23</b>	HEITRONICS INFRAROT MESSTECHNIK GMBH
<a href="http://www.hensoldt.net/karriere">www.hensoldt.net/karriere</a>	<b>22</b>	HENSOLDT
<a href="http://www.ist-ag.com">www.ist-ag.com</a>	<b>19</b>	INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY IST AG
<a href="http://www.keller-druck.com">www.keller-druck.com</a>	<b>52, U4</b>	KELLER DRUCKMESSTECHNIK AG
<a href="http://www.lcpgmbh.de">www.lcpgmbh.de</a>	<b>7</b>	LCP LASER-CUT-PROCESSING GMBH
<a href="http://www.logidatatech.com">www.logidatatech.com</a>	<b>15</b>	LOGIDATATECH GMBH
<a href="http://www.micro-epsilon.de">www.micro-epsilon.de</a>	<b>30, 31</b>	MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG
<a href="http://www.microsensorcorp.de">www.microsensorcorp.de</a>	<b>5</b>	MICRO SENSOR GMBH

# ÜBERWACHUNG DER WASSERSÄTTIGUNG IN INDUSTRIELLEN ÖLEN

Öl ist das Lebenselixier vieler Industrieanlagen und Maschinen. Es dient der Kühlung, Schmierung, Isolierung und Kraftübertragung. Jeder Schmierstoff altert, sei es durch Zersetzung, Additivabbau oder Verunreinigungen. Dadurch verändert sich langfristig die Wasseraufnahmefähigkeit des Öls, und dessen Leistungsfähigkeit lässt nach. Um Maschinenstillstände vorzubeugen ist die kontinuierliche Überwachung der aktuellen Wasseraufnahmefähigkeit des Öls äusserst wichtig.

IST's neuer Feuchte-in-Öl-Sensor ist ein kompaktes, digitales Feuchte- und Temperaturmodul (RH/T), das den relativen Sättigungsgrad von Wasser in %rF in Ölen und Kraftstoffen misst. Eingesetzt wird er in feuchtigkeitsempfindlichen Systemen in Schiffsmotoren und -Getrieben, in Nutzfahrzeugen, Transformatoren von Zügen sowie in der Energietechnik in Windkraftanlagen. Auch in Generatoren sowie in der Industrie, wie z. B. hochvolumigen Ölreservoirs, in grossen Bohr- und Papiermaschinen oder in kleineren Systemen wie mobilen Ölfiltrationsanlagen wird dieses Sensormodul eingesetzt.

Mit seinem robusten, kompakten Schraubgehäuse aus Edelstahl ist der neue Feuchte-in-Öl-Sensor ideal für den Einsatz im industriellen Umfeld. Über die digitale Schnittstelle (I2C) lässt sich das Sensormodul einfach in verschiedene Mess- und Überwachungssysteme integrieren. Der Sensor wird kalibriert und temperaturkompensiert gelie-



fert. Für unkomplizierte Tests steht für die vereinfachte Auswertung auch eine Testplatine mit analogen (0-10 V) Ausgängen zur Verfügung. Der Feuchte-in-Öl-Sensor gewährleistet eine kontinuierliche Überwachung der Temperatur und des Wasser-Sättigungsgrads des Öls im Betriebsbereich 0 bis 100 % rF bei minus 40 °C bis 120 °C. Seine Reproduzierbarkeit ist  $\pm 0,2\%$  rF;  $\pm 0,1$  °C bei einer Genauigkeit von  $\pm 3\%$  rF;  $\pm 0,2$  °C. Die IST AG bietet Herstellern von Messgeräten auch anwendungsspezifische Montage- und Kalibrierlösungen. ■

## KONTAKT

### INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY IST AG

Steggrütstrasse 14  
CH-9642 Ebnat-Kappel  
Tel.: +41 (0)71 992 0100  
info@ist-ag.com  
www.ist-ag.com

**IST** Innovative  
Sensor Technology  
physical. chemical. biological.

## MOISTURE IN OIL

Ready-to-use, fully calibrated RH/T module in screw-in assembly:  
Ideal for continuous monitoring of water content in industrial oils.  
[www.ist-ag.com/humidity](http://www.ist-ag.com/humidity)



# INSERENTENVERZEICHNIS

<a href="http://www.novotechnik.de">www.novotechnik.de</a>	<b>29</b>	NOVOTECHNIK MESSWERTAUFNEMER OHG
<a href="http://www.polytec.com/qttec">www.polytec.com/qttec</a>	<b>47</b>	POLYTEC GMBH
<a href="http://www.processsensing.com">www.processsensing.com</a>	<b>21</b>	PROCESS SENSING TECHNOLOGIES PST GMBH
<a href="http://www.sab-kabel.de">www.sab-kabel.de</a>	<b>50, 51</b>	SAB BRÖCKSKES GMBH & CO. KG
<a href="http://www.stw-mm.com">www.stw-mm.com</a>	<b>63</b>	SENSOR-TECHNIK WIEDEMANN GMBH
<a href="http://www.yageo-nexensos.com">www.yageo-nexensos.com</a>	<b>38, 39</b>	YAGEO NEXENSOS GMBH
<a href="http://www.umweltsensortechnik.de">www.umweltsensortechnik.de</a>	<b>56, 57</b>	UST UMWELTSENSORTECHNIK GMBH

# ZUVERLÄSSIGE LUFTFEUCHTIGKEITSMESSUNG VOR UND NACH DER STERILISATION

Reinräume, Inkubatoren und andere Geräte werden meist mit Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) sterilisiert. Für die Wirksamkeit ist die Luftfeuchtigkeit bei dem Verfahren von entscheidender Bedeutung. Allerdings haben herkömmliche Feuchtesensoren Probleme bei hoher H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Konzentration genau zu messen und fallen oft aus. Nicht so die Fühler-Generation „Rotronic HC2A-SX-HH“ von PST.



Das Problem beim Sterilisieren mit Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ist, dass dabei die Luftfeuchtigkeit überwacht werden muss, die meisten Feuchtesensoren jedoch Probleme mit der hohen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Konzentration haben. Zum einen behindert H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> das Messen von Wasserdampf, indem es die Poren auf der Oberfläche des Sensors besetzt und zum anderen kann es empfindliche Materialien, wie das in Feuchtesensoren verwendete Polymer, angreifen.

Eine Lösung bietet Process Sensing Technologies (PST) mit der Fühler-Generation „Rotronic HC2A-SX-HH“.

Rotronic, ein Unternehmen der PST-Gruppe, hat speziell dafür den Sensor HYGROMER@HH-1-SK mit zusätzlichem Schutzgitter entwickelt. Die Füh-

ler sind dadurch resistenter gegen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> und haben eine viel längere Lebensdauer als Standardsensoren für diese Anwendungen.

Die Fühlergeneration Rotronic HygroClip2 Advanced (HC2A) misst relative Feuchte von 0...100 %rF, Temperatur von 0...60 °C sowie den Taupunkt und zwar mit einer Genauigkeit von ±0.8 %rF sowie ±0.1 K bei 10...30 °C. Die GAMP-konformen Sensoren sind im Betrieb austauschbar.

Der HygroClip2 ist in diversen Bauformen lieferbar: Vom einfachen Aufsteckfühler für Handmessgeräte und Datenlogger bis zum hochentwickelten Kabelfühler für Hochtemperatur- und andere Spezialanwendungen.

Somit findet jeder Anwender bei PST exakt den Fühler, den er für seine Anwendung benötigt. Allen gemeinsam ist die hohe Präzision, die durch eine individuelle Justierung mithilfe des AirChips noch gesteigert werden kann.

## KONTAKT

### PROCESS SENSING TECHNOLOGIES PST GMBH

Max-Planck-Straße 14  
61381 Friedrichsdorf  
Tel.: +49 (0)7243 6019002  
Christoph.arnswald@processensing.com  
www.processensing.com

[www.ProcessSensing.com](http://www.ProcessSensing.com)



**Michell** | Dew Point Instruments

**Aii** | Oxygen Sensors

**Rotronic** | Humidity Instruments

**Rotronic** | Monitoring System

**LDetek** | Trace Impurity Analyzers

**Dynamant** | Gas Safety Sensors

**Ntron** | Oxygen Analyzers

**SST** | Oxygen Sensors



# HENSOLDT – INNOVATIONEN FÜR EINE SICHERERE WELT

HENSOLDT ist ein führendes Unternehmen der europäischen Verteidigungsindustrie mit globaler Reichweite. Das Unternehmen mit Sitz in Taufkirchen bei München entwickelt Sensor-Komplettlösungen für Verteidigungs- und Sicherheitsanwendungen.

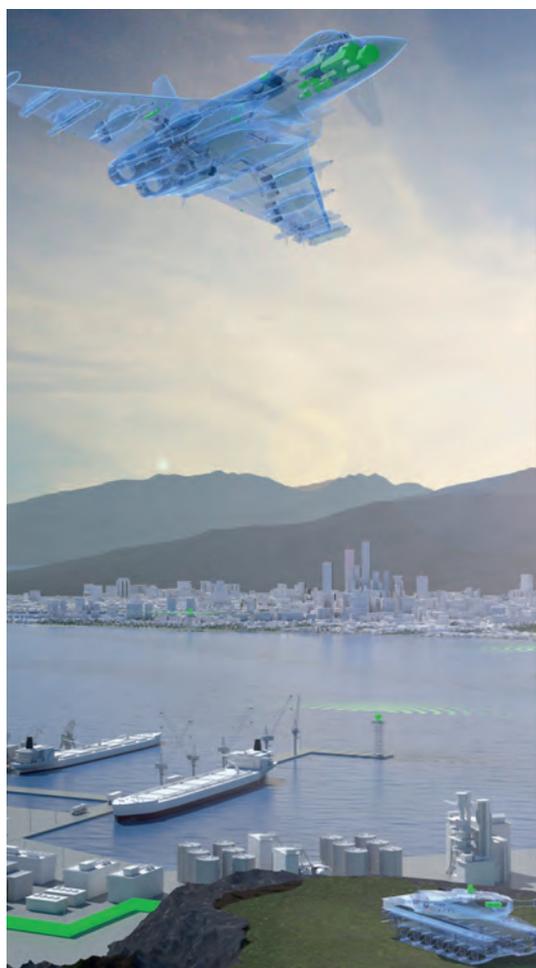
## KONTAKT

### HENSOLDT

Lea Schmutz, Recruiting  
 Tel.: +49 (0)731 392-0  
[jobs@hensoldt.net](mailto:jobs@hensoldt.net)  
 Wörthstraße 85  
 89077 Ulm  
[www.hensoldt.net/karriere](http://www.hensoldt.net/karriere)

Als Technologieführer treibt HENSOLDT die Entwicklung der Verteidigungselektronik und Optronik voran und baut sein Portfolio auf der Grundlage innovativer Ansätze für Datenmanagement, Robotik und Cybersicherheit kontinuierlich aus. Mit mehr als 6.500 Mitarbeitern erzielte HENSOLDT 2022 einen Umsatz von 1,7 Milliarden Euro. HENSOLDT ist an der Frankfurter Wertpapierbörse notiert. Zu den Haupttätigkeitsbereichen des Unternehmens gehören Sensoren zur Nachrichtengewinn-

nung und Aufklärung, Lösungen zur Kontrolle des elektromagnetischen Spektrums und Systeme der Missionsavionik. Das Unternehmen vereint verschiedene missionskritische Sensortechnologien zu Komplettlösungen, die durch Sensor- und Datenfusion eine wesentliche Verbesserung der Erkennungsfähigkeiten gewährleisten. Damit trägt HENSOLDT zur Abwehr von Gefahren für Streitkräfte und Gesellschaft bei. ■



## Gemeinsam machen wir den Unterschied für eine sicherere Zukunft

Unter dem Motto „Detect and Protect“ entwickelt HENSOLDT intelligente und integrierte Technologien für den besten Schutz in der Luft, zur See, an Land sowie im Weltraum und im Cyberspace. Werden Sie Teil dieser spannenden Entwicklung und gestalten Sie unsere Zukunft mit!

**Software-Entwicklungsingenieur\*in** (w/m/d)  
**System-Ingenieur\*in** (w/m/d)  
**Safety-Ingenieur\*in** (w/m/d)

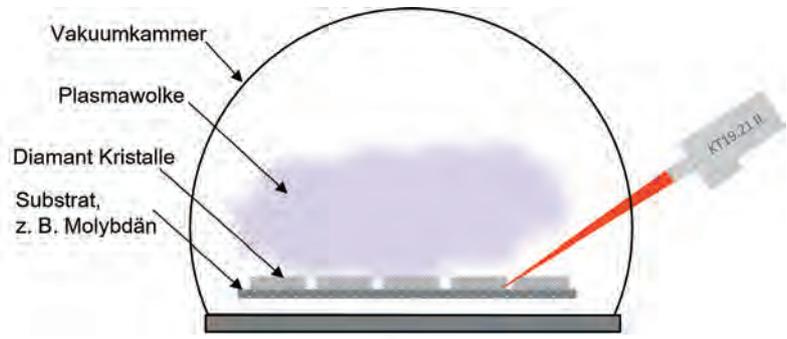
[hensoldt.net/karriere](http://hensoldt.net/karriere)



**HENSOLDT**  
 Detect and Protect

# HEITRONICS KT19.21 II TEMPERATURÜBERWACHUNG BEI DER HERSTELLUNG SYNTHETISCHER DIAMANTEN

Diamanten werden durch plasmachemische Gasphasenabscheidung (CVD) im Vakuum aus einem kleinen Kristallkeim synthetisch gezüchtet: Im Mikrowellenofen wird ein Gasgemisch aus Methan und Wasserstoff in die Vakuumkammer zum Diamantsubstrat gepumpt. Mikrowellen erzeugen eine heiße Plasmawolke, in der das Methan Wasserstoffatome verliert. Das verbleibende Kohlenstoffatom lagert sich auf dem Substrat kristallin an. Nebenprodukte, die entstehen, werden vom Wasserstoff weggeätzt. Schicht für Schicht wächst eine mikrometerdicke Schicht aus hochreinem Diamant.



Application Sketch

## Überwachung der Substrattemperatur mit HEITRONICS Strahlungsthermometern

Strahlungsthermometer KT19.21 II gewährleisten die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses. Die Schwierigkeit besteht darin, dass das Plasma Infrarotstrahlung in sehr spezifischen Spektralbereichen emittiert. Entscheidend sind schmalbandige IR-Filter im Strahlungsthermometer, um Störungen durch diese Emissionen zu vermeiden. Das KT19.21 II misst durch die Plasmawolke hindurch.

## Vorteile des HEITRONICS Strahlungsthermometers

- Kleine Messfelder
- Erfassung kleinster Temperaturunterschiede
- Berührungslose, langzeitstabile und driftfreie Temperaturmessung
- Erfassung der Substrattemperatur durch die Plasmawolke

## KONTAKT

### HEITRONICS INFRAROT MESSTECHNIK GMBH

Kreuzberger Ring 40  
65205 Wiesbaden  
Tel.: +49 (0)611 97393-0  
info@heitronics.com  
www.heitronics.com

Ihr Partner für die driftfreie,  
langzeitstabile und exakte berührungslose  
Temperaturmessung von -100 °C bis 3000 °C



**HEITRONICS**  
Infrarot Messtechnik

# PRÄZISE DISTANZMESSUNG AUS DER SCHWEIZ

Schon seit 2002 entwickelt und produziert die Dimetix AG in der Schweiz Laserdistanzsensoren, die ermöglichen, was sich sonst gegenseitig ausschließt: Sie messen auf große Distanzen bis 500 Meter mit einer Abweichung von maximal einem Millimeter (Bild 1 und 2). Seit mehr als 20 Jahren sind sie am Markt etabliert und aus zahlreichen Anwendungsbereichen nicht mehr wegzudenken. Dank eines gut ausgebauten Vertriebsnetzes, welches kontinuierlich erweitert wird, stehen den Anwendern weltweit kompetente Ansprechpartner zur Verfügung, beispielsweise für Support oder schnelle Ersatzteillieferung. Da jeder einzelne Sensor am Standort Herisau produziert, geprüft und mit einer Seriennummer versehen wird, lassen sich bei Kundenanfragen alle Messdaten aus dem Teststand abrufen – bis zurück zum ersten produzierten Gerät.



Abb. 1: Laserdistanzsensoren für schnelle und genaue Messergebnisse bis 500 m (Urheber: Dimetix)



Abb. 2: Laserdistanzsensoren für schnelle und genaue Messergebnisse bis 500 m (Urheber: Dimetix)

## Global im Einsatz

Typische Anwendungen gibt es mittlerweile viele. Sie reichen von sensiblen Logistik-Prozessen oder Krananwendungen über die Überwachung von Felsen oder Staumauern bis hin zum Gleisbau mit seinen besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit. Auch im Bergbau oder in der Metallverarbeitung sind die Laserdistanzsensoren im Einsatz. Vielfach werden die Schweizer Sensor-Experten dann angefragt, wenn sich sonst keine passende Lösung finden lässt, denn auf große Distanzen erreicht kein anderes Gerät weltweit diese Messgenauigkeit. Solche Anfragen sind die Triebfeder, die Sensoren stetig weiterzuentwickeln und auf alle möglichen Anwenderbedürfnisse anzupassen. Dank eines kompetenten Entwicklungs- und Support-Teams können so selbst sehr herausfordernde Anwendungen realisiert werden. In einem Stahlwerk beispielsweise geht es heiß her. Für die Dimetix Laserdistanzsensoren ist das jedoch kein Problem. Sie können auch bei Oberflächentemperaturen bis 1.300 °C messen. Dies machte sich zum Beispiel eine Gießerei zunutze, um den Füllstand von geschmolzenem Stahl und Eisen zu kontrollieren und damit einen Überlauf zu verhindern.

## Kombiniertes Messverfahren

Laserdistanzsensoren messen klassischerweise entweder die Lichtlaufzeit oder die Phasenverschiebung. Die Laufzeitmessung ist schnell, durch die anspruchsvolle Zeitmessung aber oft nicht ausreichend genau. Die Messung der Phasenverschiebung ist entfernungsabhängig und deutlich genauer, aber durch die aufwendigere Auswertung nicht so schnell wie die reine Laufzeitmessung. Die Schweizer Sensorikspezialisten kombinieren des-

halb bei ihren Laserdistanzsensoren die Vorteile beider Messmethoden, indem sie sowohl Laufzeit als auch Phasenversatz auswerten (**Bild 3**). Um eine hohe Messgeschwindigkeit zu erreichen, arbeitet das Verfahren mit einer Hochfrequenzmodulation der Laseramplitude und wertet die Phasenlage und den Abstand dieser aufmodulierten Hochfrequenzsignale (Bursts) aus. Dadurch kann man sehr schnell die entfernungsabhängige Laufzeit der einzelnen Pulspakete messen, aber auch die Phasenverschiebung der einzelnen Wellen innerhalb der modulierten Pakete. Abhängig vom Geräte-Typ eignen sich die Dimetix-Sensoren deshalb für Distanzen von 0,05 bis 500 m und messen dabei mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm bei einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,3$  mm. Die Messgeschwindigkeit reicht bis 250 Hz bei einer Ausgaberate von 1 kHz. Dadurch eignet sich die Technik für Anwendungen mit höchsten Anforderungen und auch für zahlreiche Applikationen in der Stahlindustrie (**Bild 4 und 5**).

## Kollisionsschutz bei der Stahlproduktion

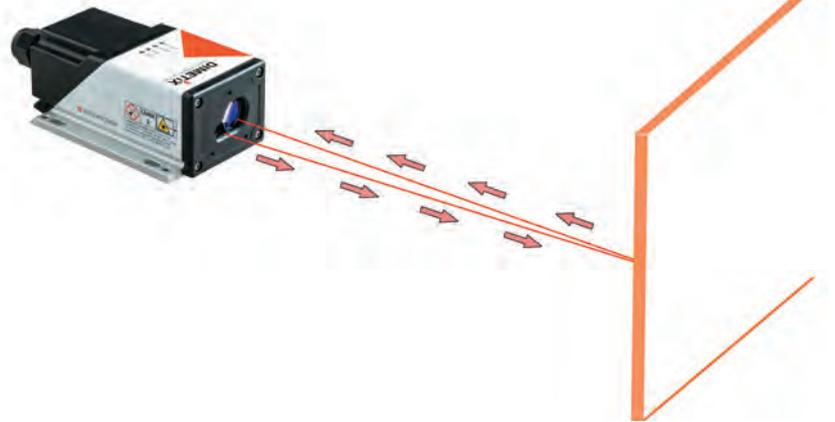
In einer Stahlproduktionsanlage kam es immer wieder zu Produktionsausfällen, weil die großen Transportwagen für die 60 m langen, glühenden Stahlbrammen oft über ihre Pendelpositionen fuhren oder mit den Sperrstopps am Ende einer Transferlinie kollidierten. Verantwortlich dafür war eine Fehlfunktion der im Boden der Fahrstrecke montierten Mikroschalter. Heute ersetzt ein speziell für diese Anwendung konzipiertes berührungsloses Laser-Messsystem die fehleranfälligen mechanischen Mikroschalter und sorgt durch die präzise Distanzmessung für einen reibungslosen Transportbetrieb. Das System besteht aus zwei, in einem Schutzgehäuse eingebauten Laserdistanzsensoren, welche die Position des

## KONTAKT

### DIMETIX AG

Degersheimerstr. 14  
CH-9100 Herisau  
Tel.: +41 (0)71 353 00 00  
info@dimetix.com  
www.dimetix.com

Transferwagens erfassen. Für eine zuverlässige und schnelle Messung wurde auf diesem die reflektierende Zieltafel von Dimetix montiert. Hinzu kam eine kleine Steuerung samt Anzeige. Im Schutzgehäuse der Sensoren hält eine Druckluftkühlung die Temperatur konstant. Um den Laser des Laserdistanzensors nicht durch Staubsammlungen und Verunreinigungen auf dem Sichtfenster des Schutzgehäuses zu beeinträchtigen, wird zusätzlich ein kontinuierlicher Luftstrom über das Sichtfenster aus Borosilikat-Glas geleitet.



**Abb. 3:** Um eine hohe Messgeschwindigkeit zu erreichen, arbeitet das Verfahren mit einer Hochfrequenzmodulation der Laseramplitude und wertet die Phasenlage und den Abstand dieser aufmodulierten Hochfrequenzsignale (Bursts) aus. (Urheber: Dimetix)

**Individuelle Lösung zur Längenteilung**

Ein weiteres Beispiel findet sich beim Ablängen von Metallrohren. Vorrichtungen zur Längenteilung sind in der metallverarbeitenden Industrie zwar gängige Werkzeuge und der Markt bietet zahlreiche Standardlösungen. Für viele metallverarbeitende Betriebe sind diese aber nicht geeignet, weil eine individuelle, auf ein bestimmtes Produkt angepasste Lösung erforderlich ist. Die

Laserdistanzsensoren können hier helfen, Konstruktionsaufwand und Kosten für eine entsprechende Sonderlösung gering zu halten. Eine individuelle Vorrichtung zur Längenteilung besteht aus einem Laserdistanzsensor, der die Entfernung zur hinteren Aufspannung misst, welche dann auf einer kleinen Digitalanzeige dargestellt wird. Ein PC ist nur für die Konfiguration der Messeinrichtung notwendig. ■

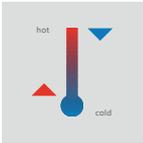


**Abb. 4 und 5:** Trotz der rauen Umgebung in Stahlwerken müssen die Laserdistanzsensoren präzise und zuverlässig arbeiten. (Urheber: shutterstock.com)





**Distanzmessung mit Millimetergenauigkeit für alle Ihre herausfordernden Anwendungen**











500 m

# SENSORIK UND MESSTECHNIK: TRENDS, INNOVATIONEN UND WIRTSCHAFTS- ENTWICKLUNG

AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.



Die Sensorik- und Messtechnikbranche hat sich in den letzten Jahren als dynamische und zukunftsweisende Branche durchgesetzt. Trotz einiger wirtschaftlicher Herausforderungen wächst die Branche kontinuierlich und befördert durch innovative Entwicklungen den technischen Fortschritt in nahezu allen technischen Anwendungsbereichen. In diesem Artikel werfen wir einen Blick auf die aktuellen Trends, Innovationen und die wirtschaftliche Entwicklung der Sensorik und Messtechnik.

Das dynamische Wachstum in der Sensorik und Messtechnik ergibt sich aus einem stetig steigenden Bedarf bei der Verwendung von Sensoren in verschiedensten Anwenderindustrien. Sensoren werden immer häufiger eingesetzt, um Maschinen, Förderbänder, Fahrzeuge und ganze Produktionsprozesse präzise zu überwachen. Sensorensysteme ermöglichen eine noch feinere Reaktion auf Unregelmäßigkeiten in Produktionsabläufen, sie unterstützen eine Optimierung von Abläufen, vermeiden Stillstände durch vorausschauende Instandhaltung und unterstützen dadurch die Qualitätssicherung.

Ein Schlüssel dafür sind intelligente Sensoren, die mit digitalen Schnittstellen und integrierter Intelligenz ausgestattet werden. Sie können Aufgaben autonom ausführen und vor Ort eingesetzt werden. Die Gesamtkomplexität von Systemen kann dadurch reduziert und die Effizienz gesteigert werden. Der Markt für diese sogenannten smarten Sensoren verzeichnet nach Angaben von Roland Berger ein beeindruckendes zweistelliges Wachstum. Gleichzeitig reduzieren sich analoge Schnittstellen allmählich. Diese Entwicklung unterstreicht die fortschreitende Notwendigkeit von hochmodernen Sensorlösungen.

### Quanten Sensorik als Innovationstreiber

Ein besonders spannender Trend ist die Quanten Sensorik. Diese Technologie nutzt Quanteneffekte, um verschiedene Messgrößen präzise zu erfassen. Quantensensoren sind winzig und reagieren empfindlicher auf Veränderungen in Messgrößen wie etwa Magnetfeldern. Dies ermöglicht neue Anwendungen in Bereichen, in denen herkömmliche Methoden an ihre Grenzen stoßen.

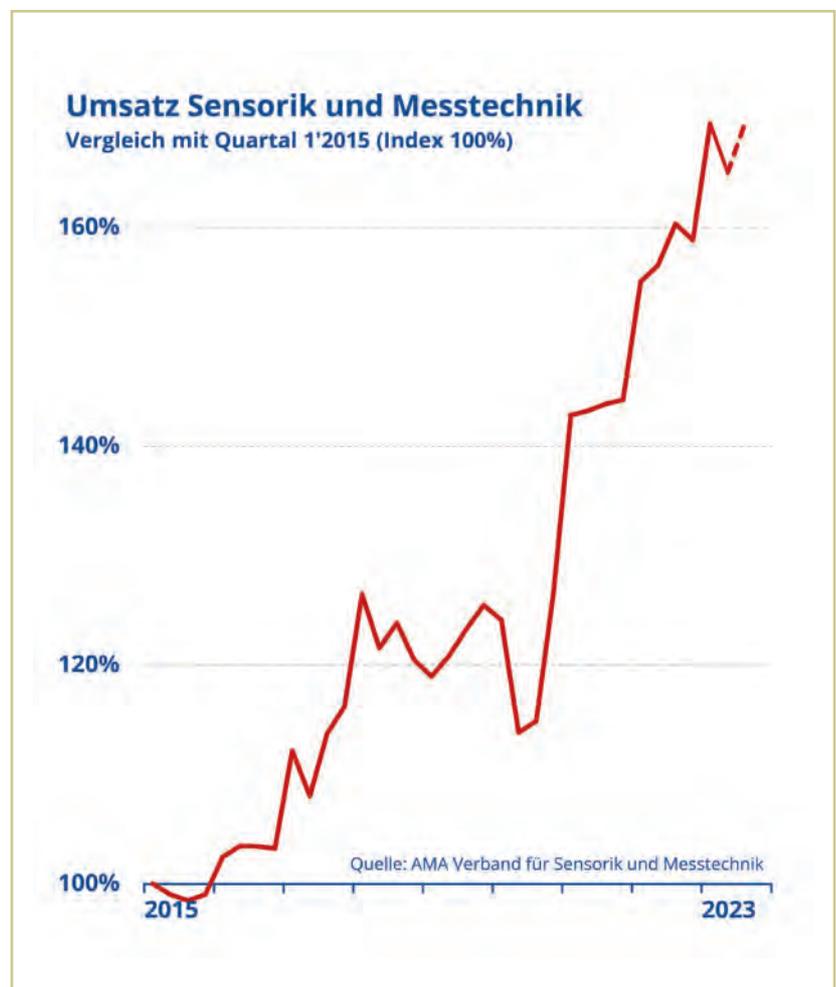
Ein Beispiel dafür ist das Gewinnerteam des renommierten AMA Innovationspreises 2023, das die Jury mit seinem Magnetfeld-Quantensensor für den industriellen Einsatz auf ganzer Linie überzeugte. Das Start-up Quantum Technologies GmbH, aus Leipzig entwickelte den QT-RH105, ein fasergekoppelter Magnetfeldsensor, der rein optisch die Magnetfeldstärke präzise misst. Der Quantensensor nutzt die Magnetfeldabhängigkeit der Spinzustände von Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant und deren Fluoreszenz. Der Sensorkopf ist nicht dicker als ein menschliches Haar, chemisch inert, nicht-magnetisch, nicht-leitend und damit galvanisch getrennt. Im Vergleich zu gängigen Halbleitersensoren eröffnet dies vollkommen neue Anwendungsbereiche in der Magnetfeld Sensorik. Durch seine extreme Detekti-

onsempfindlichkeit und den weiten Erfassungsbereich eignet sich der Magnetfeld-Quantensensor für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen. Auf weitere Entwicklungen aus der Quanten Sensorik dürfen wir gespannt sein.

### Wirtschaftliche Entwicklung und Ausblick

Die Branche erwirtschaftete nach eigenen Angaben im zweiten Quartal ein Umsatzminus von drei Prozent, verglichen mit dem Vorquartal. Damit blieb die Branche hinter den Erwartungen von plus minus null zurück. Vergleicht man die Umsatzentwicklung des zweiten Quartals 2023 jedoch mit der des zweiten Quartals des Vorjahres, stieg der Umsatz der Sensorbranche um plus fünf Prozent. Bei den Auftragseingängen verzeichneten die AMA Mitglieder im zweiten Quartal 2023 einen Rückgang von fünf Prozent, verglichen mit dem Vorquartal.

Es zeigen sich Unterschiede in der Umsatzentwicklung zwischen großen und kleineren Unternehmen, wobei größere Unternehmen einen





stärkeren Umsatzrückgang verzeichneten als kleinere AMA Mitglieder. Die Absatzmärkte in den Bereichen Sensorik und Messtechnik sowie Elektrotechnik entwickelten sich vergleichsweise

gut. Die Absatzmärkte im Energiesektor und in der Bahntechnik gestalteten sich im zweiten Quartal als schwieriger.

## KONTAKT

### AMA VERBAND FÜR SENSORIK UND MESSTECHNIK E.V.

Sophie-Charlotten-Straße 15, 14059 Berlin

info@ama-sensorik.de

[www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de)

Die Branche erklärt den rückläufigen Umsatz im zweiten Quartal als Nachwirkung der Lieferengpässe während der Corona-Pandemie. Mit zunehmender Verfügbarkeit von Lieferungen füllten die Anwenderindustrien die Lagerbestände und versuchen diese nun wieder auf ein normales Niveau zu bringen. Deshalb bleibt die Stimmung unter den AMA Mitgliedern insgesamt positiv, sie rechnen im dritten Quartal bereits wieder mit einem Umsatzplus von drei Prozent. ■

# ROBUSTE WINKELSENSOREN IM MOBILEN EINSATZ

Mobile Arbeitsmaschinen, wie sie in Bau-, Agrar- und Forstwirtschaft eingesetzt werden, sowie Flurförderzeuge stellen aufgrund ihrer Einsatzumgebung sehr hohe Anforderungen an die Sensorik. Außer zuverlässiger Funktion bei rauen Betriebsbedingungen sind häufig noch weitere Eigenschaften gefragt, z. B. kompakte Abmessungen, wenn der Einbauraum knapp bemessen ist, Eignung für sicherheitsrelevante Anwendungen und last but not least spielt auch der Kostenfaktor eine wesentliche Rolle. Speziell für solche Anforderungen hat Novotechnik gleich drei Baureihen magnetischer Winkelsensoren entwickelt, die alle auf dem gleichen elektronischen Design basieren. Sie sind besonders robust und überzeugen durch ein günstiges Preis-Leistungs-Verhältnis.

Die magnetischen Winkelsensoren der Baureihe RFC-4800 haben sich bereits in vielen mobilen Anwendungen bewährt. Sie sind kompakt, durch den getrennten Positionsgeber einfach zu montieren und erfassen den Drehwinkel über volle 360 Grad mit einer Auflösung von bis zu 14 Bit. Speziell für den Einsatz in Nutzfahrzeugen gibt es sie auch mit CANopen oder CAN SAE J1939-Schnittstelle. Hinzu kommen je nach Schnittstelle weitere attraktive Sensorfunktionen wie z. B. parametrierbare Drehrichtung, Positions-Offset und ein (flüchtiger) Umdrehungszähler. Die Positions- und Geschwindigkeitssignale werden ein- oder zweikanalig ausgegeben. Außerdem sind die Sensoren sehr widerstandsfähig: Sie verkräfteten Schwingungen und Vibrationen bis 20 g (gemäß IEC 600658-2-6) sowie Stöße bis 50 g (gemäß IEC 68068-2-27) und erfüllen vor allem sämtliche in mobilen Anwendungen geforderten EMV-Spezifikationen. Die hohen Anforderungen aus der ECE-R10-Regelung zur elektromagnetischen Verträglichkeit werden weit übertroffen. Sie können bei Umgebungstemperaturen zwischen -40° C und +105° C eingesetzt werden und erfüllen die Anforderungen der Schutzart IP67 bzw. IP6K9K.

Die magnetischen Winkelsensoren der Baureihe RSA-3200 und RFE-3200 gibt es sowohl in Wellenausführung (RSA) als auch in der berührungslosen Variante mit separatem Positionsgeber (RFE). Sie sind speziell für Hochtemperatur-Anwendungen bis +125° C entwickelt und bieten mit dem MicroQuadlock-Stecker eine branchenübliche Kontaktierung. ■

## KONTAKT

### NOVOTECHNIK MESSWERTAUFNEMER OHG

Horbstraße 12  
73760 Ostfildern  
Tel.: +49 (0) 711 4489-0  
info@novotechnik.de  
www.novotechnik.de

## Robuste Winkel- sensoren

Stark in rauer Umgebung  
kompakt – berührungslos – sicher

- Verschleißfreie, berührungslose Messung
- Temperaturbeständig bis +125° C
- Funktionale Sicherheit (EN ISO13849)
- KBA E1 Typgenehmigung
- Analog, CANopen, CAN SAE J1939

Neue Lösungen –  
spektakuläre Anwendungen



support@novotechnik.de  
Tel. +49 711 4489-250  
www.novotechnik.de

**novotechnik**  
Siedle Gruppe

# VON INTELLIGENTER 3D-AUSWERTUNG BIS HIN ZU HOCHPRÄZISEN PUNKTEWOLKEN

Die neue Generation der Laserscanner scanCONTROL von Micro-Epsilon überzeugt – sowohl bei der 2D-Profilmessung als auch bei der Erfassung und Auswertung von 3D-Punktwolken. Bezüglich Genauigkeit und Messrate zählen die Laserscanner zu den leistungsstärksten Profilsensoren weltweit.

**Abb. 1:** Die neue Generation der Laserscanner scanCONTROL von Micro-Epsilon überzeugt – sowohl bei der 2D-Profilmessung als auch bei der Erfassung und Auswertung von 3D-Punktwolken.



Die scanCONTROL Laserscanner erzielen eine ausgezeichnete Signalstabilität und dadurch präzise Messergebnisse. Die hohe Profillrate mit bis zu 10 kHz prädestiniert diese Sensoren für dynamische Messaufgaben, die hohe Profilauflösung mit bis zu 2048 Punkten/Profil für die Erfassung kleinster Details. Je nach Anwendung stehen verschiedene Messbereiche zur Verfügung. Abhängig vom Messobjekt werden Scanner mit rotem Laserlicht oder mit der patentierten Blue-Laser-Technologie eingesetzt.

## Smarte Laserscanner für 2D-Profilmessungen

Für Profilmessungen eignen sich die Laserscanner der Reihe scanCONTROL SMART. Diese verarbeiten 2D-Messaufgaben im integrierten Controller. Typische Messaufgaben sind die Erfassung und Bewertung von Profil, Breite, Höhe, Tiefe, Kante, Raupe, Spalt, Winkel, Rundheit u.v.m. Aufgrund der herausragenden Technologie sind Laserscanner von Micro-Epsilon Messtechnik in zahlreichen Branchen zu finden. Dank integriertem Controller und der kompakten Bauform können die Scanner auch in kleine Bauräume integriert werden. Die Konfiguration erfolgt über die scanCONTROL Configuration Tools Software. Diese bietet über 40 Messprogramme mit insgesamt mehr als 90 Auswertungen. Die Programme werden auf den Scanner übertragen, der im Standalone-Betrieb die Messung, Bewertung und Ausgabe übernimmt.

## Leistungsstarke 3D-Messungen

Neben der 2D-Profilerfassung eignen sich die scanCONTROL Laserscanner auch für 3D-Messaufgaben. Die Sensoren generieren hochpräzise 3D-Daten, die dank dem GenICam/GigE-Vision Standard zur individuellen Weiterverarbeitung genutzt werden können. Zur Anbindung steht ein umfangreiches SDK zur Verfügung, das beispielsweise Funktionsblöcke für die Sensorsteuerung und Messwertübertragung beinhaltet. Mit der Software 3DInspect bietet Micro-Epsilon ein leistungsstarkes Softwaretool zur Parametrierung, Datenaufnahme und Bearbeitung. Die Software ermöglicht die intuitive Erkennung und Kombination von Programmen, die auf die Punktwolken angewendet werden können. Die 3D-Punktwolken können beliebig weiterverarbeitet und ermittelte Messwerte an die Steuerung ausgegeben werden. Die Software 3DInspect ermöglicht dabei die Erfassung und Auswertung echter 3D-Daten, das sogenannte Valid3D, und somit nicht nur 2.5D wie meist üblich. Das bedeutet, dass jeder x-y-Koordinate mehrere z-Koordinaten zur Verfügung stehen und damit zum Beispiel Punktwolken ohne Datenverlust in allen Achsen rotiert werden können. Zudem stammen Sensoren und Software direkt vom Hersteller, wodurch nur noch ein Ansprechpartner für die Lösung komplexer Messaufgaben notwendig wird. ■

**Abb. 2:** Auch bei der Ausrichtung der Rundzellen im Montageprozess von Batterien sind Laserscanner erforderlich. Hierbei spielen die korrekte Ausrichtung sowie die Höhe der einzelnen Zellen zueinander eine wichtige Rolle.

## KONTAKT

### MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG

Königbacher Straße 15  
94496 Ortenburg  
Tel.: +49 (0)8542 168-0  
Fax: +49 (0)8542 168-90  
www.micro-epsilon.de



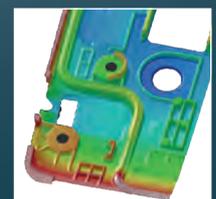
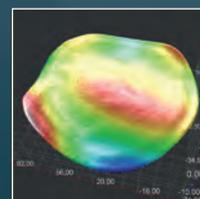
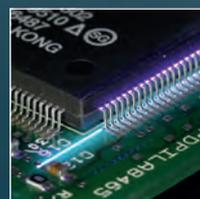
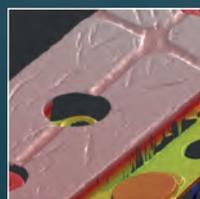
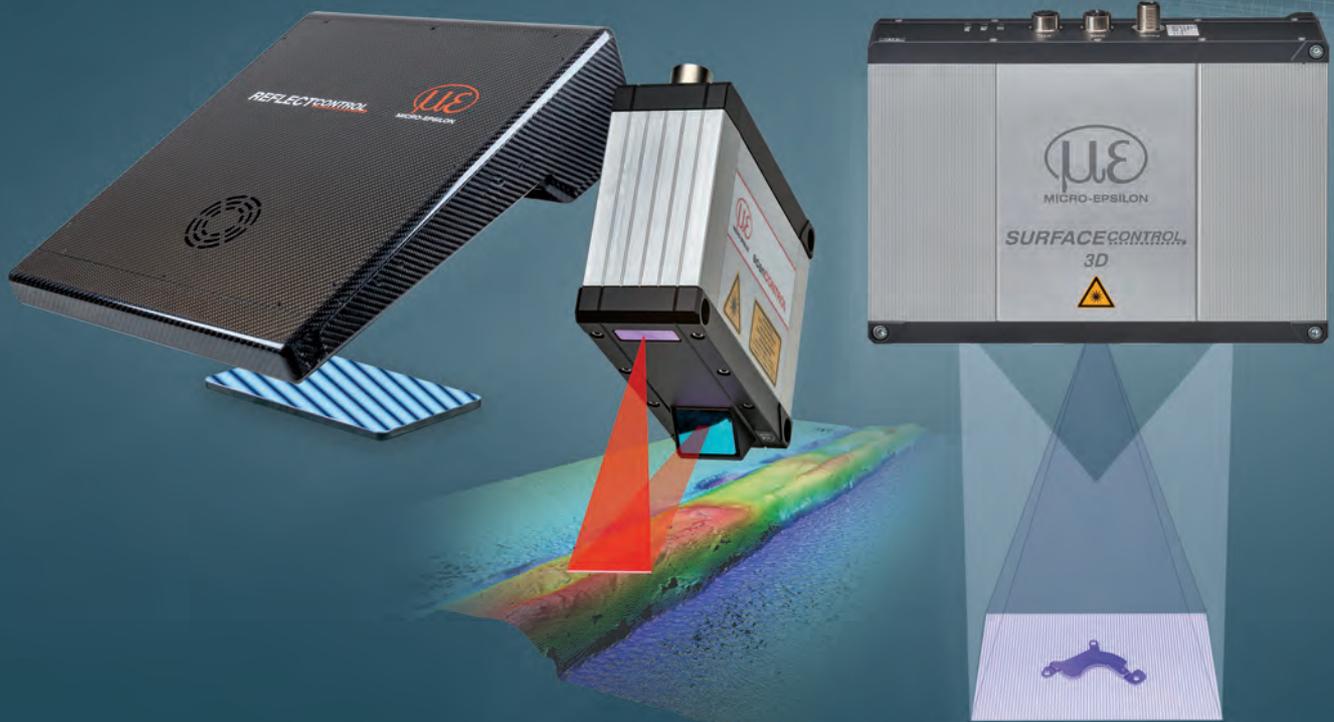
**Abb. 2**

# Mehr Präzision.



## Präzise 3D-Sensoren für Geometrie & Oberflächeninspektion

- Präzise Geometrie-, Form- und Oberflächenprüfung
- Hohe Genauigkeit zur Erkennung feinsten Details
- Ideal zur Inline-Überwachung in Fertigungsprozessen
- Leistungsstarke Software zur Lösung von 3D-Messaufgaben und Inspektionsaufgaben



# SENSORIK FÜR WASSERSTOFF – EIN ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT

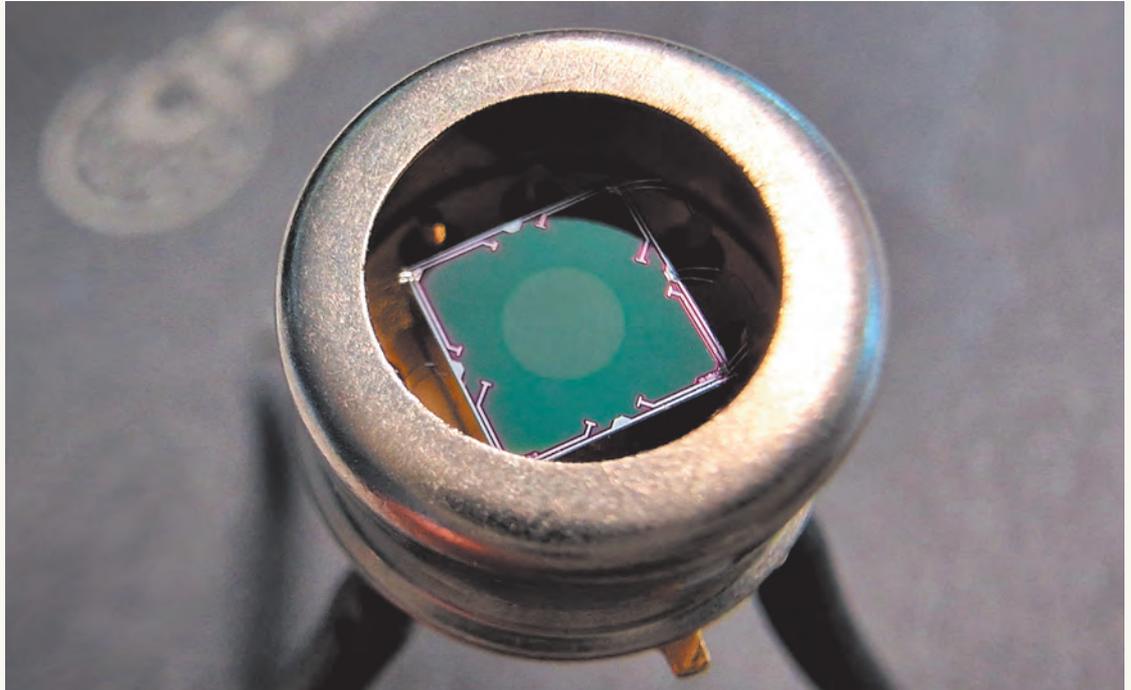


Abb. 1:  
H2MEMS: Sensorchip für  
Wasserstoff-Messung

Wasserstoff ist ein zukunftssträchtiger Energieträger für die Energiewende. Er dient der Speicherung von Energie aus regenerativen Quellen. Seinen Einsatz findet er in energieintensiven Prozessen unter anderem in der Glasindustrie, chemischen Industrie sowie in Raffinerien, zur Ammoniak- und Wärmeenergieerzeugung. Im Jahr 2019 wurden weltweit jährlich ca. 117 Millionen Tonnen Wasserstoff aus Erdgas erzeugt, als Nebenprodukt chemischer Prozesse sowie in steigendem Maße mittels regenerativer Energien.<sup>1</sup> Nach Darstellung des DLR wurden in Deutschland max. 60 TWh Wasserstoff (2020) produziert und verbraucht, wobei der Anteil regenerativ erzeugten Wasserstoffs ca. 5 % beträgt.<sup>2</sup> In der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung bildet die Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien eine tragende Säule für eine CO<sub>2</sub>-freie Energiegewinnung und zur Erreichung der Klimaschutzziele. Sie enthält 38 Maßnahmen für eine klimafreundliche Versorgung mit Wasserstoff, u.a. dem Ausbau der Elektrolysekapazitäten auf bis zu fünf Gigawatt bis 2030 in Deutschland. In Europa soll sich bis 2030 ein europäischer Wasserstoffmarkt etablieren mit einer Elektrolysekapazität von 40 GW (aktuell 6 GW).<sup>2</sup>

Für die verschiedenen Herstellungsverfahren und Produktionsprozesse, Transport und Speicherung von Wasserstoff sind eine Vielzahl an Sensoren notwendig, um konstante und kontrollierbare Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Hier setzt das CiS Forschungsinstitut mit seinen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben an. In unterschiedlichen Forschungsprojekten werden Sensoren zur Konzentrationsmessung von Wasserstoff in Speichersystemen, Leckagebestimmung oder zur Feuchtemessung in Elektrolyseuren mit Partnerunternehmen entwickelt und für den Industrieeinsatz erprobt.

### Sensoren für Druck und Konzentration

*Neuartiger Wasserstoffsensoren mit höchster Sensitivität und Selektivität auf Basis von mikroelektromechanischen Sensorstrukturen (Projekt: H2MEMS)*

Zusammen mit Industriepartnern wurde ein MEMS-basierter Wasserstoffkonzentrationsensor aufgebaut. Das CiS Forschungsinstitut und ein Partner entwickelten spezielle MEMS-Sensorchips, welche auf einem Messkonzept des Partners basieren und die Konzentration von Wasserstoff durch den Einsatz von Palladium-Schichten detektieren. Die Vorteile liegen im breiten Konzentrationsbereich und einer hohen Selektivität. MEMS-Sensoren werden mittels Methoden der Mikrosystemtechnik (Si-Technologie, Mikroelektronik) gefertigt und haben ein hohes Potenzial für weitere Miniaturisierungen, kostengünstige Herstellung und Senkung des Energieverbrauchs (**Abb. 1**).

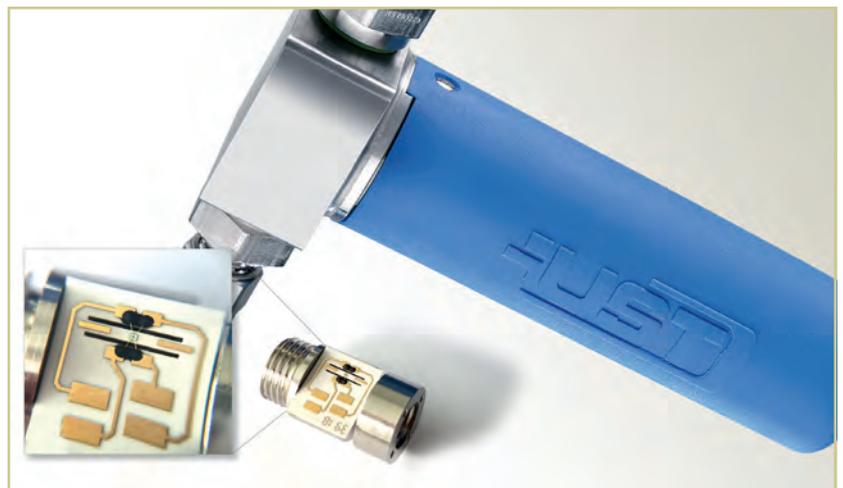
Palladium besitzt die höchste Absorptionsfähigkeit aller Elemente für Wasserstoff. Bei Raumtemperatur kann es das 900-fache des eigenen Volumens binden, welches für ein sensorisches Grundelement genutzt wurde. Wird eine Palladiumschicht mit einem passiven Material verbunden, entstehen durch die Volumenvergrößerungen erhebliche mechanische Spannungen, deren Größe ein Maß für den Wasserstoffanteil im Palladium darstellt.

*Untersuchung langzeitstabiler Fügeverbindungen zum Aufbau von Drucksensoren zur Prozessüberwachung in Elektrolyseuren und Systemspeichern (Projekt HyProS-D)*

Ebenfalls in Rahmen des Innovationsnetzwerkes HYPOS wurde für einen neuartigen Wasserstoffsensoren der Fa. UST Umweltsensortechnik GmbH ein wasserstoffstabiler Drucksensor im CiS Forschungsinstitut entwickelt. Hier lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung langzeitstabiler Fü-

geverbindungen. Der Sensor ist wasserstoffbeständig, Teil eines Multisensors und erfasst neben dem Druck auch die Temperatur, die Wasserstoffkonzentration sowie Restgase.

Das neue Gassensorsystem der UST Umweltsensortechnik GmbH kombiniert einen keramischen Metalloxid-Halbleiter-Gassensor und einen keramischen Wärmeleitfähigkeitsdetektor. Das System misst  $H_2$ -Konzentrationen bis 100 %, das integrierte Drucksensorelement des CiS Forschungsinstituts ermöglicht die Druckkompensation für



$H_2$ -Messungen von 300/400 mbar bis 100 bar Umgebungsdruck. Das Sensorsystem ist insbesondere für sicherheitsrelevante Anwendungen, wie beispielsweise die Wasserstoff-Erzeugung (Elektrolyseure) und für Speichersysteme (Leckage-Detektion u. ä.) geeignet.

Die besondere Herausforderung für das CiS Forschungsinstitut lag darin, einen langzeitstabilen Drucksensor zu entwickeln, da zahlreiche Metalle unter Wasserstoffeinfluss zur Versprödung neigen. Wasserstoffatome, die in ein Metallgitter eindiffundieren, verändern die Festigkeit des Metalls und führen im schlimmsten Fall zu Rissen und damit zur Zerstörung des Sensors (**Abb. 2**).

Im Zusammenhang mit der Einspeisung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff bis zu 20 % in das Erdgasnetz sind langzeitstabile Sensoren zur Überprüfung des Wasserstoffanteils notwendig.

Das Sensorsystem entstand im Rahmen des BMBF-geförderten Konsortiums HYPOS, der Förderinitiative „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovationen“. Das Netzwerk untersucht und entwickelt

**Abb. 2:** Si-DMS auf einem Montage-träger aus Keramik, gefügt mit Glasfritte, drahtgebondet und mit Lötanschlüssen sowie Integration von Montage-träger und PCB in ein Bauteil.

Lösungen für den Nutzung von Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Herstellung, über die Speicherung und Verteilung bis zur Anwendung von „Grünem Wasserstoff“ in den Bereichen der chemischen Industrie, Mobilität und Energieversorgung.

### Speicherung und Transport

*Innovative Lösungen zur Temperaturmessung  
(Projekt: Cryo-Resistance)*

Wasserstoff wird bei Temperaturen unterhalb von  $-253^{\circ}\text{C}$  in flüssiger Form gelagert und transportierbar. Um diese Temperaturen messtechnisch zu erfassen, sind mehrere Optionen vorhanden, einerseits Sensoren auf Basis von Halbleitertechnologien und andererseits die in der Industrie gegenwärtig gebräuchlichen Platin-Widerstandsthermometer. Durch geeignete Modifikationen zur Erweiterung des Temperaturbereiches können sie für diese Überwachung qualifiziert werden. Herkömmliche Platinwiderstandsthermometer korrodieren wenig und gelten als zuverlässig. Temperaturschwankungen führen jedoch zu mechanischen Spannungen im Sensor und bei permanenten Dauermessungen zu ungenauen Messwerten. Die bisher gebräuchlichen Widerstandsthermometer zeigen diese Hysterese bei sehr niedrigen Temperaturen, was durch eine geeignete Wahl der Materialkombinationen und der Sensorgeometrie behoben werden kann. Das neue Projekt Cryo-Resistance wird gemeinsam mit weiteren Industriepartnern diese Thematik untersuchen.

### Elektrolyseverfahren

Für die Herstellung von grünem Wasserstoff werden Wasserelektrolyseanlagen eingesetzt. Sie erzeugen aus Wasser direkt gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff. Bisher existieren drei Verfahren in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Großtechnisch wird die alkalische Wasserelektrolyse (AEL) eingesetzt. Die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (SOEL; engl.: Solid Oxide Electrolysis) rückt immer mehr in den Mittelpunkt. Im Entwicklungsstadium befindet sich die trockene Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse).

*Elektrolyse-Systemkomponenten für hochdynamischen/intermittierenden Betrieb (Projekt ElyKon)*

Die Partner im Verbundprojekt ElyKon untersuchten den Einsatz von Feuchtesensoren als Bestandteil der Steuerung des Elektrolyseurs bei der PEM-

Elektrolyse zur Vermeidung von Betriebszuständen, die einen starken Verschleiß, Korrosion oder die Zerstörung des Elektrolyseurs selbst oder seiner Peripherie (z. B. Gaskompressor) verursachen. Ziel dieses Projektes war es, den Einsatz von PEM-Elektrolyseuren wirtschaftlicher zu gestalten, indem auf der Basis von ortsaufgelösten sensorischen Daten eine Kontrollstrategie entwickelt wurde, die eine kontinuierliche Zustandsüberwachung des Elektrolyseprozesses erlaubt. Sie erlaubt, ungünstige Betriebszustände zu identifizieren, ihnen entgegenzuwirken und dadurch die Betriebsparameter zu optimieren. Die sensorischen Daten sind in die Steuerung des Elektrolyseurs integriert, mit der Aufgabe, ungünstige Betriebszustände zu meiden, die Lebensdauer des Elektrolyseurs und die Energieeffizienz zu steigern sowie die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen. Alle Punkte tragen auch dazu bei, die Kosten für die Produktion des Wasserstoffs zu senken. Ungünstige Betriebszustände stellen z. B. solche Zustände dar, die einen übermäßig starken Verschleiß, Korrosion oder die Zerstörung des Elektrolyseurs selbst oder seiner Peripherie (z. B. Gaskompressor) verursachen.

Zur Überwachung und Steuerung wurden Sensoren an verschiedenen Positionen des Elektrolyseurs integriert. Durch die Arbeiten der Projektpartner wurden die sensorischen Voraussetzungen geschaffen, z. B. die Stromdichte- und Temperaturverteilung innerhalb des Stacks, die Leitfähigkeit des Wassers sowie die Feuchtigkeit der Gasströme in der Peripherie zu überwachen. Die zugehörige Elektronik zur Erfassung und Einbindung der Daten in die Steuerung der Elektrolyseanlage wurde ebenfalls durch einen Industriepartner entwickelt (**Abb. 3**).

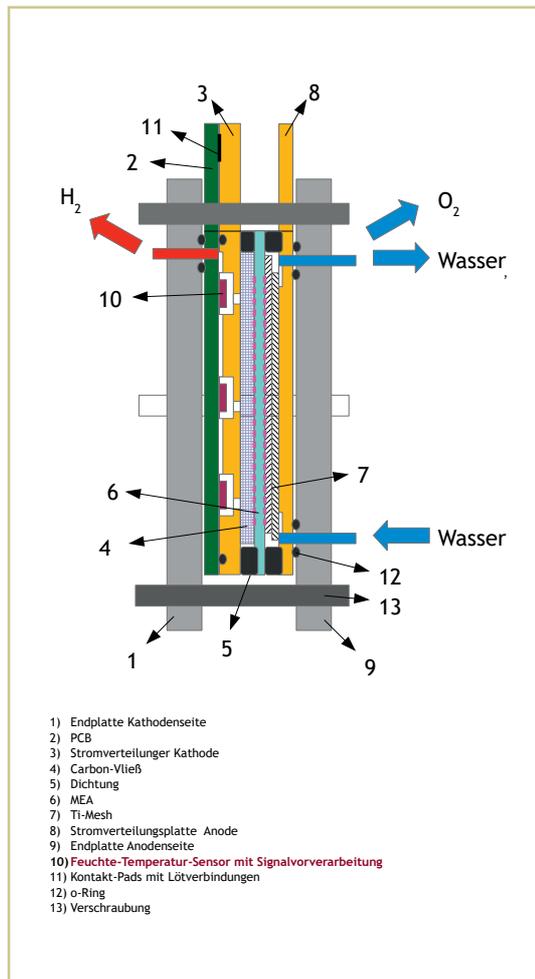
Das CiS Forschungsinstitut entwickelte hierbei Feuchte- und Temperatur-Sensoren als Bestandteil der Steuerung des Elektrolyseurs zur Vermeidung derartiger Zustände. Bekannt war, dass die Feuchtigkeit des Membran Electrode Assembly (MEA) für den Elektrolyseprozess zwar einerseits zwingend erforderlich ist, andererseits aber im Zusammenhang mit dem Anpressdruck und einer erhöhten Temperatur die Alterung der MEA fördert. Daher wurde die Anwesenheit von flüssigem Wasser in Form von Wassertropfen innerhalb des Stacks detektiert und mit Betriebsparametern des Elektrolyseurs korreliert. Aufgabe des CiS Forschungsinstitutes war es, an der Kathodenseite insbesondere größere Wassertropfen zu detektieren, welche gegebenenfalls den Abtransport des Wasserstoffs behindern könnten. Diese wurden

kapazitiv erfasst. Durch Anpassung der Streufeld-dimensionen wurden die detektierbaren Tropfen-größen justiert. Dazu wurden Sensorelemente eingesetzt, die aus einem in Silizium eingebetteten Streufeldkondensator mit integrierter Temperatur-messdiode bestehen (**Abb. 4**).

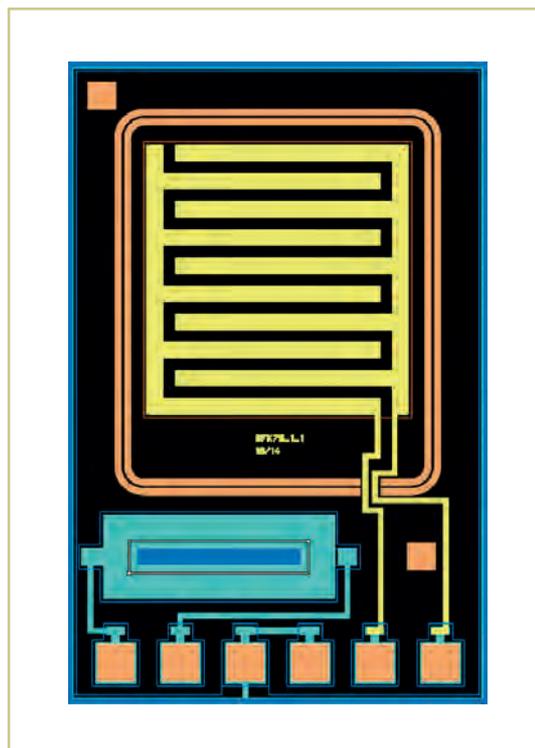
Durch spezielle Oberflächenbehandlung wurde eine Grenzfläche geschaffen, an der größere Kondensattropfen leicht ablaufen, und die eine zeitliche Messwerterfassung erlaubt. Die Temperatur wird anhand der Diodenflussspannung bestimmt. Die Signale werden kabelgebunden zum Anzeigergerät übertragen. Aus kommerziell verfügbaren Bauteilen wurde ein Teststand errichtet und die Datenerfassung im laufenden Elektrolyse-Betrieb erprobt. Dieser PEM-Elektrolyseur war hinsichtlich der Gestaltung der Flussfelder an die kommerziell genutzten Stacks des assoziierten Partners angelehnt, d.h. die Verteilung des Wassers und der Gase über die aktive Fläche wurden nicht durch feste Strukturen in den Stromverteilern, sondern durch lose eingelegte gasdurchlässige Lagen (GDL) aus Titan-Mesh bzw. Kohlevließ erzeugt. Der Teststand stellt eine Einzelzelle dar, die eine aktive Fläche von 50 cm<sup>2</sup> aufweist. Sie ist dafür vorgesehen, dass sie mit trockener Kathode betrieben wird, damit das Auftreten von Wasser auf dieser Seite untersucht werden kann. Das deionisierte Wasser für die Elektrolyse wird ausschließlich auf der Anodenseite zugeführt. Drei Sensor-chips können auf der Kathodenseite im Bereich der aktiven Fläche übereinander angeordnet werden. Sie dienen zur Beobachtung der Temperatur und der Entstehung von Wassertropfen innerhalb des Stacks. Um die Integration der Sensoren zu ermöglichen, wurde der kathodische Stromverteiler angepasst. Mit Hilfe der von einem Verbundpartner entwickelten Messbox wurden die Daten der jeweiligen Messpunkte mit einem einzelnen Gerät erfasst.

Die Sensoren wurden auf einer eigenen Platine so angeordnet, dass die Daten orts aufgelöst im Bereich der aktiven Fläche aufgezeichnet werden. Die Platine wurde in den Stack des Elektrolyse-Teststands eingefügt.

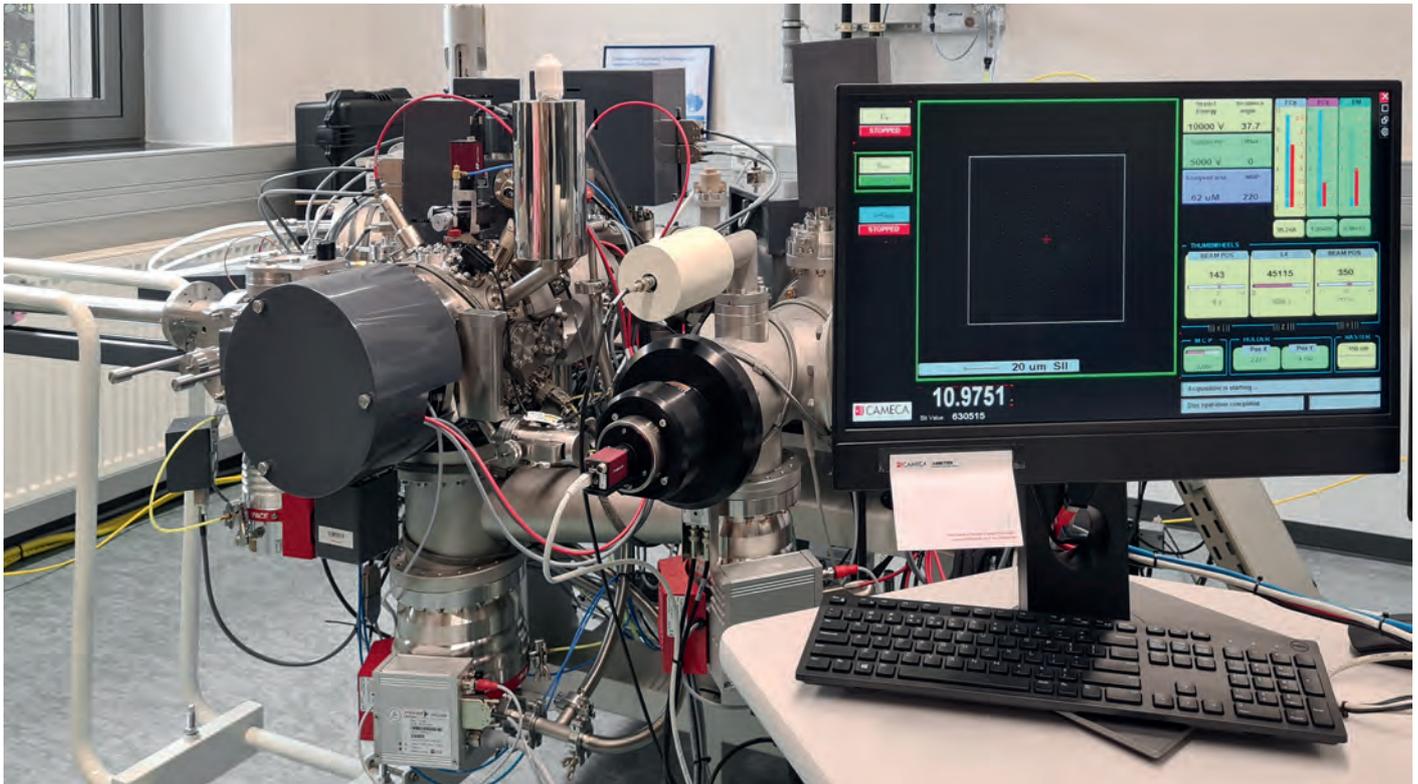
Mit dem verwendeten Sensorintegrationskonzept sind auch andere Parameterverteilungen an verschiedenen Punkten innerhalb der aktiven Fläche möglich, wobei sich die Messpunkte sowohl nahe der Anoden- als auch Kathodenseite befinden können. Bei Verwendung elektrisch leitfähiger Sensorplatinen oder PCBs mit Vias ist auch die Beobachtung im Bereich zwischen den Stromfängern



**Abb. 3:** Elektrolyseur – Teststand mit Sensorplatine Feuchte-Temperatur-sensor (#10)



**Abb. 4:** Prinzip-Aufbau Temperatur-Feuchte-Sensor für Elektrolyseur



**Abb. 5:**  
Sekundärionenmassenspektrometrie (SIMS)

möglich. Mit den Feuchtesensoren innerhalb eines Stacks eröffnet sich die Möglichkeit, die PEM-Membranen im Hinblick auf Transporteigenschaften zu charakterisieren und detaillierter zu bewerten. Performance und Degradationsverhalten der Elektrolyseanlage können mit den Messergebnissen der Sensoren während des Elektrolysebetriebs korreliert werden, sodass das Verständnis der Prozesse vervollkommenet und Simulationen weiterentwickelt werden können. Damit wird eine zielgerichtete Optimierung des Gesamtsystems möglich.

Das Know-how kann ebenso in der Brennstoffzellentechnik angewendet werden. Interessant ist es auch für Bereiche der Prozessindustrie, bei denen Zero-Gap-Zellen zum Einsatz kommen, beispielsweise in Elektrolyseprozesse zur CO<sub>2</sub>-Reduktion oder elektrochemischen Oxidationsprozessen.

### Begleitende Messtechnik und Analyse

Die messtechnische Untersuchung sowohl der Halbleiterprozesse als auch der Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der entwickelten und gefertigten Sensorchips bzw. -aufbauten sind erfolgskritisch für die Entwicklung und Fertigung kundenspezifischer Sensoren insbesondere im Bereich der Wasserstoffanwendungen (**Abb. 5**). Am CiS Forschungsinstitut wurden hier Kompetenzen aufgebaut, die Aspekte der elektrischen

und optischen Charakterisierung von Sensoren mit der Bearbeitung von halbleiterphysikalischen Fragestellungen sowie der Untersuchung neuer innovativer Materialien verbinden. Der Trend zur stetigen Miniaturisierung bedingt einen immer größeren Einfluss von Oberflächeneffekten. Deshalb ist es notwendig, speziell für die Untersuchung der Oberflächen bzw. oberflächennahen Bereiche, Analyseverfahren einzusetzen bzw. zu entwickeln, die diesen Einfluss identifizierbar machen. Weiterhin sind die Oberflächen in besonderer Weise der Wechselwirkung mit der den Sensor umgebenden Umwelt ausgesetzt.

Um ein entwickeltes Material, Bauelement oder den dahinterliegenden Herstellungsprozess verstehen, kontrollieren und optimieren zu können, ist der Einsatz von Nano- bzw. Oberflächenanalytik zur Qualitätskontrolle, Fehlersuche oder zu Fragen der Umweltverträglichkeit notwendig.

Im CiS Analytik Kompetenzzentrum (CAK) stehen verschiedene Analyseverfahren zur Verfügung, beispielsweise Rasterelektronenmikroskopie (REM), Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX), Sekundärionenmassenspektrometrie (SIMS), Raman-Spektroskopie, Focused Ion Beam (FIB), Rasterelektronenmikroskopie (AFM), die einzeln oder in der Kombination ihrer Ergebnisse eine Beantwortung der o.g. Fragestellungen ermöglichen. ■

## Danksagung

Die Projekte H2MEMS, HyProS-D und ElyKon wurden im Rahmen des Innovationsnetzwerkes HYPOS durchgeführt. HYPOS war eines von zehn Innovationsprojekten der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung ins Leben gerufenen Förderinitiative „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“. Die diesen Projekten zugrunde liegende Vorhaben wurden unter den Förderkennzeichen 03ZZ0757B (H2MEMS), 03ZZ0724D (HyProS-D) und 03ZZ0742B (ElyKon) gefördert. Das Forschungsprojekt „Cryo-Resistance“ wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen: 49MV220180 gefördert.

## LITERATUR

- [1] Statista, Produktion und Verwendungen von Wasserstoff weltweit im Jahr 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195241/umfrage/produktion-und-verwendung-von-wasserstoff-weltweit/>, abgerufen am 03.08.2023
- [2] Mirko Kruse, Jan Wedemeier, Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung, Wirtschaftsdienst, 101. Jahrgang, 2021 · Heft 1 · S. 26–32, <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2021/heft/1/beitrag/potenzial-gruener-wasserstoff-langerweg-der-entwicklung-kurze-zeit-bis-zur-umsetzung.html>, abgerufen am 02.08.2023

## KONTAKT

### CiS FORSCHUNGSINSTITUT FÜR MIKROSENSORIK GMBH

Konrad-Zuse-Straße 14, 99099 Erfurt  
Tel.: +49 (0)361 663-1160, [info@cismst.de](mailto:info@cismst.de)  
[www.cismst.de](http://www.cismst.de)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Mikrosensoren für die Welt von morgen  
**Sensorik für Wasserstoff**  
Ein Energieträger der Zukunft



[www.cismst.de](http://www.cismst.de)

Vom Design zum Prototyping.  
Zuverlässig. Langzeitstabil. Präzise.

# PLATIN-TEMPERATURSENSOREN UND LÖSUNGEN FÜR ELEKTROMOBILITÄT. INNOVATIONSKRAFT UND BESCHLEUNIGUNG FÜR MARKTERFOLGE

Präzise Temperatursensorik ist ein Garant für Effizienz und Sicherheit in der Automobilindustrie. YAGEO Nexensos liefert jährlich Millionen von Platinsensoren für Verbrennungsmotoren, und trägt dazu bei, die immer strengeren Emissions-Grenzwerte und Verbrauchswerte einzuhalten. Dabei kommt es nicht selten zu Betriebstemperaturen von etwa 1000 °C. Gerade dieses Know-How zum sicheren Betrieb an der physikalischen Belastungsgrenze hilft nun auch bei der Mobilitätswende und positioniert YAGEO Nexensos als Entwicklungspartner für die Elektromobilität.



Abb. 1:

Die Transformation vom Verbrenner hin zur Elektromobilität schreitet rasant voran, wodurch sich auch die Anforderungen an Temperatursensoren stetig verändern. Die Anwendungstemperatur für batterieelektrische Antriebe, sowie deren Ladestruktur gehen bis etwa 250 °C und zuverlässige Temperaturüberwachung spielt eine entscheidende Rolle, um E-Fahrzeuge sicher und effizient zu betreiben. YAGEO Nexensos hat einen speziellen polymergekapselten Platin-Sensor entwickelt, der den höchsten Ansprüchen leistungsstarker E-Motoren genügt. Der Sensorkopf mit dem Produktnamen EC3032 ist dabei hochflexibel und verbindet Eigenschaften in einzigartiger Weise. Zum einen muss der Sensor robust gegen hohe Spannungen, Vibrationen und Feuchtigkeit sein, um den sicheren Betrieb des Motors langfristig zu gewährleisten. Zum anderen ist die Konstruktion des Sensorkopfs kompakt und filigran. Damit kann er an schwer zugänglichen Positionen zwischen Rotor und Stator verbaut werden und erreicht kurze Ansprechzeiten, um maximale Motorleistungen zu ermöglichen. Durch eine spezielle Konstruktion von Schmelz- und Schrumpfschläuchen gewährleistet der EC3032 die Spritzschutznorm IP67 und IP68, sowie eine Durchschlagfestigkeit von bis zu 6kV AC und das bei einer Ansprechzeit von nur 8 Sekunden (T0.9).

## KONTAKT

### YAGEO NEXENSOS GMBH

Dominik Schneider  
Reinhard-Heraeus-Ring 23  
63801 Kleinostheim  
dominik.schneider@yageo.com  
www.yageo-nexensos.com

Sensoren wie der EC3032 können bis zu 260°C betrieben werden und lassen sich nach Belieben an die jeweilige Verbau-Situation anpassen. Dadurch hat sich YAGEO Nexensos als Entwicklungspartner positioniert und leistet mit innovativen und praxisnahen Sensorlösungen einen wichtigen Beitrag zur Mobilitätswende (siehe Abb. 1).

Neben dem E-Motor ist die Leistungselektronik der Schrittmacher eines jeden Elektrofahrzeugs: Leistung, Tempo und Effizienz werden von der Auslegung und den Möglichkeiten der Spannungswandler- und Wechselrichtereinheiten bestimmt. Höhere Schaltfrequenzen, höhere Leistungen und der daraus resultierende Betrieb bei höheren Temperaturen tragen zu längeren Reichweiten und dynamischen Fahrweisen bei. Höhere Betriebstemperaturen erfordern aber auch neue Materialien und neue Verbindungstechniken: Die Sintertechnologie ist auf dem Weg, sich als Standardverbindungstechnik für SiC Module der nächsten Generation durchzusetzen.

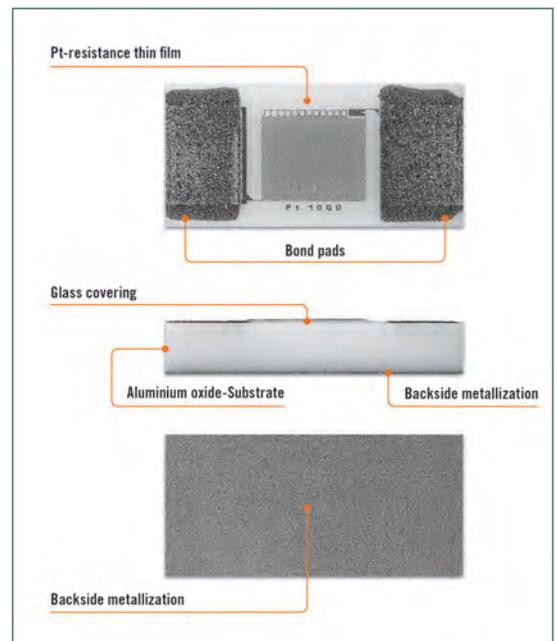


Abb. 2:

Sicherheit ist bei hohen Spannungen und erhöhten Temperaturen ein zentraler Aspekt: In der SiC Leistungselektronik gewährleistet eine zuverlässige und präzise Temperaturüberwachung den sicheren Betrieb. YAGEO Nexensos hat speziell für diese Anwendungen einen Pt1000-Tempersensor in SMD-Bauform entwickelt, der die Optimierung des Gesamtsystems in mehrfacher Hinsicht unterstützt. Der sinterfähige Pt1000 im SMD-Format kombiniert dabei die Zuverlässigkeit eines Pt1000 und Anwendungstemperaturen von 200 °C mit neuen Vorteilen, um die Herausforderungen bei der Temperaturmessung und beim Bauteilschutz in modernen Leistungsmodulen sicherzustellen: Die Pt-Sensorschicht befindet sich auf der Oberseite des Bauteils und ist von der Rückseitenmetallisierung elektrisch isoliert (siehe **Abb. 2**).

Dieses Layout ermöglicht die potenzialfreie Positionierung des Sensors an einer beliebigen Position auf dem Substrat. Damit kann der Sensor näher an der Wärmequelle platziert werden, was eine genauere Temperaturmessung und schneller Ansprechzeiten ermöglicht. Gleichzeitig ermöglicht die elektrische Isolierung das Aufsintern auf der gleichen Potentialfläche mit den SiC Chips. Eine elektrische Isolierung mittels Ätzgraben wie im Falle von NTC-Thermistoren ist nicht mehr notwendig (siehe **Abb. 3**). Das vereinfacht das Substratlayout sowie den Herstellungsprozess und erlaubt kompaktere Designs. In der Anwendung erhöht der reduzierte Abstand zwischen der Wärmequelle und dem Sensorelement aufgrund des wegfallenden Trennelements die Genauigkeit und

führt zu einer kürzeren Ansprechzeit, die je nach Design um bis zu 30 % schneller sein kann.

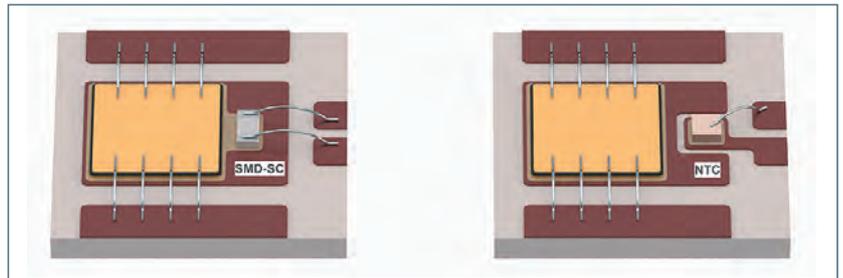


Abb. 3:

Weiterführende Informationen zu den Vorteilen des sinterbaren SMDs, den Modellierungsergebnisse zur Dynamik der Temperaturbestimmung und Messungen finden Sie auf unserer Website sowie in unserem aktuellen Whitepaper.

Pt Sensoren im SMD-Format sind nicht nur für die SiC Technologie von großem Interesse. Sie sind kompakt, können automatisiert verarbeitet werden und als Standard-SMD auf Platinen aufgelötet werden. Die Anwendungstemperaturen reichen je nach Design von -50 °C bis zu +170 °C was sie zu idealen Sensoren für die Temperaturüberwachung in Schnellladesystemen und Powerladesystemen macht. Unsere PT1000 SMDs verfügen über die AEC-Q200 Zertifizierung und sind für Automotive Anwendungen geeignet. ■

**YAGEO**  
NEXENSOS



**WIR MACHEN AUS INPUT MEHR OUTPUT.  
GEMEINSAM.**

EXPERTS FOR MAXIMUM SENSING.



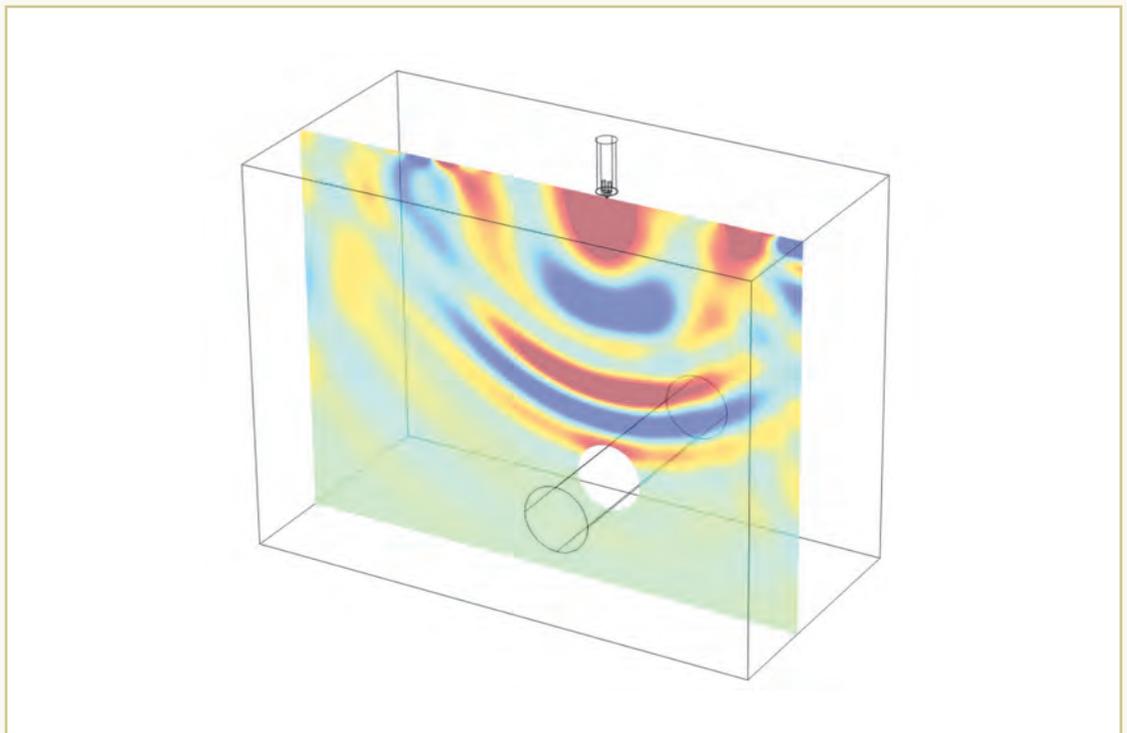
### PT SENSOR SOLUTIONS

Temperatursensoren ermöglichen ein Höchstmaß an Präzision und Datenqualität. Dadurch leisten sie einen grundlegenden Beitrag, um Elektrofahrzeuge sowohl leistungsstark als auch sicher zu betreiben. Dies macht Temperatursensorik zu einer Schlüsseltechnologie in der Elektromobilität.

[YAGEO-NEXENSOS.DE](http://YAGEO-NEXENSOS.DE)

# KOMBINIERTE ULTRASCHALL- UND RADARMESSUNG ZUR ZERSTÖRUNGSFREIEN CHARAKTERISIERUNG VON BAUWERKEN

Oliver Blaschke, Prof. Dr. Klaus Stefan Drese



**Abb. 1:**  
FEM-Simulation eines Transversalwellenwandlers auf einem Betonkörper mit kreisförmigem Durchbruch als Fehlstelle. Visualisiert ist die Transversalkomponente des Verschiebungsfelds

Um Klimaneutralität im Gebäudesektor zu erreichen, muss in den nächsten Jahren eine Vielzahl von Bestandsgebäuden bedarfsgerecht saniert werden. Zur Sicherstellung einer material- und kosteneffizienten Sanierung dieser Gebäude ist die Kenntnis der spezifischen Schäden an eingebauten Verstärkungen und statisch relevanten Fehlstellen im Mauerwerk von großer Bedeutung. Das Institut für Sensor- und Aktortechnik (ISAT) der Hochschule Coburg arbeitet an der Entwicklung innovativer Sensorlösungen, insbesondere im Bereich Ultraschall. In einem Forschungsprojekt konnte das ISAT ein Messverfahren entwickeln, das durch Sensordatenfusion aus einem eigens entwickelten Ultraschall-Phased-Array mit Trockenpunktkontakt-Schallköpfen und einem kommerziellen Radarmodul zur Bewehrungsdetektion eine effiziente Bauwerksanalyse durch orts- und tiefenaufgelöste Erkennung typischer Schädigungsformen in Bauwerken ermöglicht.

## Notwendigkeit einer Bauwerks-Analyse durch zerstörungsfreie Messmethoden

Die Umsetzung der Energieeffizienzstrategie der Bundesregierung erfordert erhebliche Sanierungsmaßnahmen im Altbaubestand. Von den rund 19 Millionen Wohngebäuden mit insgesamt rund 40 Millionen Wohnungen ist in den nächsten 20 Jahren fast die Hälfte sanierungsbedürftig. Das bedeutet, dass jährlich rund eine Million Wohnungen saniert werden müssen. Zur Abschätzung des Sanierungsbedarfs und des Sanierungsaufwandes liegen jedoch häufig keine ausreichenden Informationen über die im Mauerwerk verbauten Strukturen (z.B. Bewehrung) und deren Zustand vor. Auch weitere, vor allem in der Tiefe des Mauerwerks liegende Fehlstellen wie Löcher, herausgelöste Dämmung, Kabelschächte, Einschlüsse wie Kiesnester etc. sind oft nicht bekannt. Zur Beurteilung des Ist-Zustandes von Bauwerken werden in der Regel Bohrkern entnommen, die aufwändig im Labor analysiert werden müssen. Bei diesem Verfahren muss das Mauerwerk teilweise zerstört werden, zudem sind die Ergebnisse der Bohrkernanalysen stark von der Lage und der Anzahl der Bohrkernentnahmen abhängig. Nicht-invasive Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Bauwerken wie Radar, Wirbelstrom oder Ultraschall haben gegenüber der Entnahme von Bohrkernen den klaren Vorteil, dass sie ohne Eingriff in das Mauerwerk große Flächen scannen können und eine schnelle Charakterisierung des Bauwerks vor Ort ermöglichen. Jede dieser ZfP-Methoden hat jedoch ihre physikalischen Grenzen, die einen direkten Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben.

Ziel eines Verbundforschungsvorhabens des ISAT mit Kooperationspartnern aus der Wirtschaft war die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens, das durch Kombination aus Ultraschall- und Radardaten eine präzise und positionsgenaue Bauwerksanalyse ermöglicht. Hierzu wurde ein neuartiges Phased-Array-Ultraschallmodul entwickelt und die gewonnenen Messdaten mit den Messinformationen aus einem kommerziellen GPR (ground penetrating radar) – Modul kombiniert. Durch Kombination der Vorteile von Ultraschall und Radar sollte ein erheblicher Zugewinn an Information und Messgenauigkeit bei der Bauwerksprüfung ermöglicht werden.

Das im Forschungsvorhaben des ISAT entwickelte Ultraschall-Array ermöglicht durch Verwendung von federnd gelagerten Trockenpunktkontakt-Schallköpfen erstmals den Einsatz von Wandlern

mit höherer Auslenkung (Einkopplung mit höherer Schalleistung = größere Eindringtiefe und damit mehr Tiefeninformation). Erprobt wurden sowohl Radar- als auch Ultraschallmessungen an Betonkörpern mit künstlich eingebrachten Fehlstellen.

## Ultraschall und Radar zur Bauwerksanalyse: Vorteile der Fusion beider Messprinzipien

Sowohl beim Einsatz von Radar- als auch von Ultraschallmessmethoden als ZfP-Messverfahren im Bauwesen nutzt man zur Detektion von Strukturen oder Fehlstellen die an diesen reflektierten Wellen und wertet die Intensität und Laufzeit des Reflexionssignals aus. Ultraschall- und Radarsensoren haben dabei jeweils spezifische Vor- und Nachteile bei der praktischen Anwendung in der Bauwerksbewertung. Radargeräte weisen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber metallischen Einschlüssen auf. Diese können aber auch das weitere Eindringen der Radarwellen in die Bausubstanz behindern. Die Folge ist eine verminderte Tiefeninformation. Die Ultraschallmesstechnik wird nicht durch metallische Objekte abgeschirmt und kann daher auch starke Bewehrungslagen durchdringen und dahinterliegende Strukturen detektieren. Der Einsatz mehrerer Messfrequenzen ermöglicht durch die wechselnde Wellenlänge der Signale eine Fokussierung auf unterschiedlich große Fehlstellen. Ultraschallwellen reagieren sehr empfindlich auf Phasensprünge (fest – gasförmig), weshalb sie bestens geeignet sind, um Hohlräume oder Risse zu detektieren. Die Signalintensität nimmt durch Reflexion an solchen Strukturen aber stark ab, wodurch die Eindringtiefe sinkt. Radarwellen können hier wiederum weiter propagieren.

Durch die Kombination beider Messprinzipien und die fusionierte Aufbereitung der Daten entsteht ein Mehrwert, der über die beiden Messverfahren im Einzelnen hinausgeht. Der praktische Nutzen konnte bereits in einem Forschungsprojekt mit Partnern aus Industrie und Handwerk nachgewiesen werden.

## Entwicklung eines neuartigen Ultraschall-Phased-Array-Moduls mit Trockenpunktkontakt-Schallköpfen zum Einsatz an Mauerwerken

### Auslegung des Ultraschallmoduls mit Trockenpunktkontakt-Wandlern

Von anderen Forschungsgruppen ist bekannt, dass Trockenpunktkontakt-Schallwandler bei einer niedrigeren Frequenz betrieben werden kön-

nen und eine potentiell höhere Krafteinwirkung auf das Substrat ermöglichen als Gel-gekoppelte Schallwandler [1,2]. Aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Frequenzen im Ultraschallbereich von 30 kHz – 150 kHz, welche auf diese Weise verwendet werden können, werden höhere Eindringtiefen in das Messobjekt ermöglicht [3]. Ohne Verwendung eines Arrays an Schallwandlern ist aufgrund der Heterogenität von Beton eine Detektion von Fehlstellen innerhalb der Struktur kaum möglich [1]. Herkömmliche Ultraschallarrays nutzen die Full-Matrix-Capture (FMC) Methode, bei welcher jeder Schallwandler sowohl als Sender als auch Empfänger angesteuert wird. Der resultierende „vollständige“ Datensatz bietet zwar das Maximum an Information, allerdings werden Limitationen hinsichtlich der Schallwandler notwendig, damit diese sowohl im Sende- wie auch Empfangsmodus funktionieren. Ein alternativer Ansatz, welcher dedizierte Sende- und Empfängerwandler erlaubt, bildet die Sparse Array Methode, die einen reduzierten aber repräsentativen Datensatz aufnimmt und durch Nachbearbeitungsmethoden nahezu die gleiche Aussagekraft wie die FMC Methode aufweist. [4, 5]

Für die Messungen an Mauerwerk (Betonproben) wurde ein Ultraschall-Phased-Array entwickelt, das Schallwandler mit Trockenpunktkontakt verwendet und im Mauerwerk Transversalwellen erzeugt. Der Trockenpunktkontakt wurde mit Keramikspitzen realisiert, da diese besonders abriebfest sind und eine ähnliche Schallgeschwindigkeit und akustische Impedanz wie typische Piezokeramiken aufweisen. Durch das Sparse Array Design müssen weniger Kompromisse bei der Auslegung der Schallwandler eingegangen werden. So können z. B. auch Piezokeramiken mit höherer Auslenkung aber geringerer Empfangsleistung für die Sender des Ultraschallmessgerätes verwendet werden.

**Abb. 2:** Schematische Anordnung und Foto des Ultraschall Phased Array. Positionen mit „S“ markieren Senderpositionen. Sechsecke ohne Bezeichnung markieren Empfängerpositionen.



### Aufbau der Schallköpfe zur Anregung von Transversalwellen

Im Inneren von ausgedehnten Festkörpern treten zwei Arten von Schallwellen auf. Longitudinale und transversale Schallwellen unterscheiden sich in deren Schwingungsrichtung und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Da Transversalwellen stets eine geringere Schallgeschwindigkeit aufweisen als longitudinale Wellen, ergibt sich bei gleicher Messfrequenz eine kürzere Wellenlänge. Da kürzere Wellenlängen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Störstellen im Messobjektes aufweisen, sind diese zu bevorzugen. Die Messfrequenz ist grundsätzlich durch das Material des Messobjektes und dessen Dämpfung vorgegeben, so dass hier der Einsatz langsamerer Transversalwellen sinnvoll ist.

Das Konzept des Transversalwellenwandlers besteht aus nebeneinander positionierten piezoelektrischen Elementen. Durch eine gegenphasige Ansteuerung der Piezowandler (einer zieht nach oben, einer schiebt nach unten) wird die Spitze, an denen die Wandler geklebt werden, zu einer Seite ausgelenkt. Durch Anlegen einer Sinusschwingung überträgt die Spitze eine Transversalschwingung auf das Messobjekt.

Anhand der Erkenntnisse aus finite Elemente Simulationen wurden Stackpiezos für die Sendewandler verwendet. Multilayer-Stackwandler haben aufgrund ihres Aufbaus eine deutlich höhere Auslenkung bei selber Betriebsspannung als konventionelle Piezokeramiken. Für die Detektion von Schallwellen sind diese allerdings ungeeignet, weshalb für die Empfängerwandler herkömmliche PZT-Keramiken verwendet wurden.

### Aufbau Ultraschall-Phased-Array

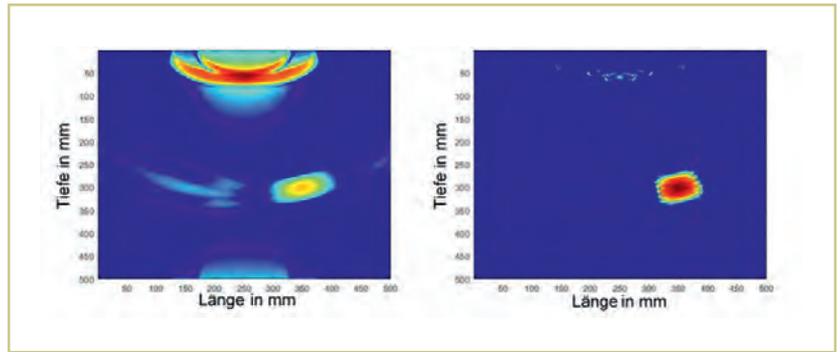
Das Ultraschallmesssystem wurde als Phased-Array umgesetzt. Bei einem Phased-Array-System wird eine Vielzahl von Sensoren an einer einzelnen Messposition gebündelt. Die geometrische Konfiguration des Ultraschallarrays wurde durch Simulationen ermittelt (vgl. **Abbildung 1**).

Anhand der FEM Simulationen hat sich ein Optimum ergeben, welches auf dem Einsatz von 6 Sendern sowie 31 Empfängern, welche ringförmig hexagonal angeordnet sind, beruht. Die schematische Anordnung ist in **Abbildung 2** dargestellt. Die Einhausung jedes einzelnen der 37 Schallköpfe wurde aufgrund verbesserter Adaptivität im 3D Druck-Verfahren (FDM) hergestellt. Die Außen-

hülle der Schallwandler besteht aus einem modifizierten PLA (Polylactid), welches ein begrenztes leitfähiges Verhalten aufweist. Hierdurch soll die Schirmung der Schallwandler gegenüber äußeren Einflüssen (z.B. benachbarte Wandler oder Elektronikkomponenten) verbessert werden. Die Außenhülle diene gleichzeitig auch als Aufnahme für die dämpfende Backing-Schicht. Das Backing trägt maßgeblich dazu bei, die Dämpfung rücklaufender Wellen zu erhöhen und so das Nachschwingverhalten der Piezos zu verringern. Die von jedem Sendewandler ins Substrat eingebrachten Transversalwellen breiten sich im Messobjekt aus und werden beim Vorhandensein einer Fehlstelle an dieser reflektiert. Das reflektierte Signal wird von den 31 Sensoren wiederrum gemessen und kann anschließend ausgewertet werden. Dieses Messprinzip wird über die Anzahl der 6 vorhandenen Sender iteriert. Durch die bekannte Anordnung der einzelnen Sender und Empfänger zueinander können die einzelnen Messsignale so miteinander verrechnet werden, dass am Ende eine Bestimmung der Position der Fehlstelle möglich ist, von der die ausgesendete Schallwelle reflektiert wurde.

**Entwicklung von Algorithmen zur Auswertung der Ultraschalldaten zur Fehlstellendetektion**

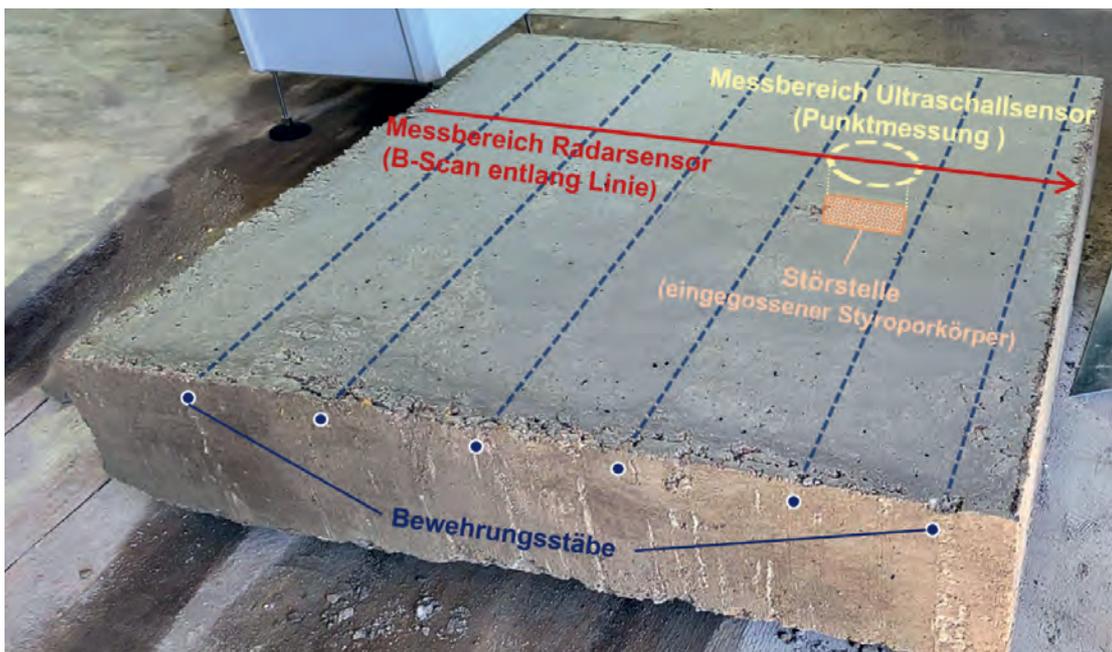
Für die Positionserfassung der Fehlstelle werden sogenannte Rekonstruktionsalgorithmen verwendet. Anwendung fand hierbei die „Total Focusing Method“ (TFM) [6,7,8,9]. Hierbei wird die zu überwachende Querschnittsfläche (B-Scan) in kleine



**Abb. 3:** Vergleich von Rekonstruktionsalgorithmen anhand einer simulierten Fehlstelle. Links: Klassischer TFM Algorithmus. Rechts: TFM Algorithmus mit SCF (Sign Coherence Factor) Erweiterung.

Zellen zerlegt. Anhand der bekannten Position der einzelnen Sensoren sowie deren Abständen zueinander kann über den jeweiligen Ortsvektor einer jeden Zelle die aufgenommenen Signale miteinander verrechnet werden. Schlussendlich wird ein finaler Wert für die jeweilige Zelle ermittelt. Je höher der berechnete Wert ist, desto stärker wurde die ausgesendete Schallwelle im Bereich der Zelle reflektiert. Die Reflexion der Schallwelle an einer Fehlstelle führt somit zu einer lokalen Erhöhung der Zellenwerte und kann durch eine visuelle Darstellung aller berechneten Zellen sichtbar gemacht werden. Die Intensität  $I(r)$  einer Zelle mit zugehörigem Ortsvektor  $r$  bestimmt sich aus der Summe aller Hilbert-transformierten Einzelsignale  $s_{i,j}$  in Verbindung mit der zugehörigen Laufzeit bezogen auf den Zellenvektor  $r$  und der Transversalgeschwindigkeit im Medium  $c$ :

$$I(r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{i,j} \left( \frac{|r - r_T^i| + |r - r_R^j|}{c} \right)$$



**Abb. 4:** Probekörper aus Beton mit schematisch eingezeichneter Lage der Bewehrung und eingegossener Störstelle aus Polystyrol sowie den Messbereichen des Radar- und Ultraschallsensors.

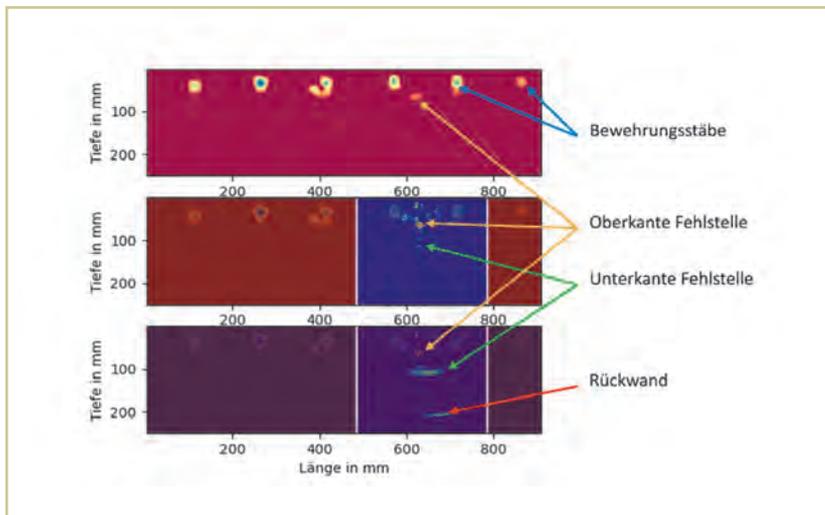
Die Genauigkeit des Standard TFM Algorithmus kann durch unterschiedlichste Erweiterungen erhöht werden. Besonders wirkungsvoll sind dabei Varianten, welche die Phase der Signale berücksichtigen [10, 11]. Eine dieser Erweiterungen ist der „sign coherence factor“ (SCF). In **Abbildung 3** ist der Unterschied des SCF erweiterten TFM Algorithmus zum klassischen TFM anhand einer simulierten Fehlstelle dargestellt.

**Erprobung des Ultraschallarrays zur Fehlstellenerkennung in Betonprüfkörpern**

Das Ultraschallarray wurde in Kombination mit einem kommerziellen Radargerät an realitätsnahen Probekörpern aus Beton getestet. In **Abbildung 4** ist exemplarisch einer der Testkörper abgebildet. In den bis zu 300 mm starken Betonstrukturen wurden mehrere Bewehrungsstäbe eingebettet. Zudem wurden Hohlstellen durch eingebrachte Polystyrolelemente simuliert.

Eine beispielhafte, kombinierte Anwendung von Ultraschall- und Radarmesstechnik ist in **Abbildung 5** dargestellt. In der oberen Grafik ist lediglich die Radarmessung über die Breite des Probekörpers dargestellt. Die Bewehrungsstäbe werden sehr deutlich detektiert und auch die Oberkante der Hohlstelle ist wahrnehmbar. Was fehlt ist die Rückkante der Betonstruktur. Es ist anzunehmen, dass die Bewehrungslage die Radarwellen vor weiterem Eindringen abschirmt. In der mittleren Abbildung ist neben der Radarmessung auch eine Ultraschall-Array Messung bei 75 kHz eingetragen. Diese wurde genau oberhalb der Hohlstelle durchgeführt. Den höchsten Ausschlag liefert hierbei die Oberkante des Polystyrolelements und auch die Rückkante dessen ist angedeutet.

**Abb. 5:** Kombinierte Radar- und Ultraschallmessung an präpariertem Betonkörper. Oben: Radarmessung. Mitte: Radarmessung + Ultraschallmessung bei 75 kHz (Nahbereichsmessung). Unten: Radarmessung + Ultraschallmessung bei 75 kHz und 25 kHz (Tiefenmessung).



Den Aufschluss über die Reflexionsstellen in tieferen Bereichen liefert die in der untersten Grafik zusätzlich überlagerte Ultraschallmessung mit 25 kHz. Diese zeigt vor allem die Rückkante des Polystyrol-Fremdkörpers sowie die Rückkante der Betonstruktur an. Anhand dieses Beispiels wird erkennbar, dass gerade die Kombination der Techniken Radar und multifrequenter Ultraschall einen erheblichen Mehrwert bei der Interpretation von Zuständen in Bauwerken liefert.

**Zusammenfassung und Ausblick**

In dem Forschungsvorhaben wurde ein Ultraschall-Phased Array entwickelt welches aufgrund seiner Art und Konfiguration der Schallwandler sehr gute Ergebnisse hinsichtlich des Detektionsvermögens von Fehlstellen in Betonkörpern sowie bei der Eindringtiefe erzielen kann.

Eine kombinierte Betrachtung mehrerer Messfrequenzen erlaubt zusätzlich eine Fokussierung auf verschieden große Phänomene innerhalb der Bauwerksstrukturen. Gerade die Datenfusion mit etablierter Radartechnik ermöglicht neue Möglichkeiten zur Messdatenaufnahme und -interpretation, was in Testmessungen an Betonprüfkörpern in praxisnaher Größe und Beschaffenheit gezeigt werden konnte.

Ein denkbarer Einsatzzweck in der Baupraxis könnte die Lokalisierung von Bewehrungselementen mit Radarwellen unterstützt mit gezielten Ultraschall-Multifrequenzmessungen darstellen. Während die Radarsignale eine hohe Empfindlichkeit gegenüber metallischen Einschlüssen aufweisen, könnten die Ultraschallsignale Delaminationsprozesse an den Bewehrungen analysieren. Die Entwicklung entsprechender Algorithmen für die Ultraschalldatenverarbeitung ist Stand aktueller Forschung.

Die Entwicklungsarbeiten von ISAT wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand (ZIM) gefördert (Förderkennzeichen 16KN068448, Projekt AnGeBau). Dank gilt auch unseren Kooperationspartnern Büro für Strukturmechanik GmbH, Otto Hauch GmbH & Co. KG, Triona – Information und Technologie GmbH und Elektroanlagenbau Harting.

## LITERATUR

- [1] L. Khazanovich and K. Hoegh, "Quantitative ultrasonic evaluation of concrete structures using one-sided access," 42ND ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2015, doi: 10.1063/1.4940453.
- [2] D. Corbett, "Advances in ultrasonic testing - Research into the application of dry point contact transducers," in 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), Munich, Germany, 2016, pp. 253–259.
- [3] E. G. Nesvijski, "Dry Point Contact Transducers: Design for New Applications," *Journal of Nondestructive*, no. 9, pp. 1–10, 2003.
- [4] H. Hu, J. Du, C. Ye, and X. Li, "Ultrasonic Phased Array Sparse-TFM Imaging Based on Sparse Array Optimization and New Edge-Directed Interpolation," *Sensors*, early access. doi: 10.3390/s18061830.
- [5] L. Moreau, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, "Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, no. 9, pp. 1932–1944, 2009, doi: 10.1109/TUFFC.2009.1269.
- [6] C. Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation," *NDT & E International*, vol. 38, no. 8, pp. 701–711, 2005, doi: 10.1016/j.ndteint.2005.04.002.
- [7] C. Holmes, B. Drinkwater, and P. Wilcox, "The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method," *insight*, vol. 46, no. 11, pp. 677–680, 2004, doi: 10.1784/insi.46.11.677.52285.
- [8] A. Muller, B. Robertson-Welsh, P. Gaydecki, M. Gresil, and C. Soutis, "Structural Health Monitoring Using Lamb Wave Reflections and Total Focusing Method for Image Reconstruction," *Appl Compos Mater*, vol. 24, no. 2, pp. 553–573, 2017, doi: 10.1007/s10443-016-9549-5.
- [9] H. Zhang, Y. Liu, G. Fan, H. Zhang, W. Zhu, and Q. Zhu, "Sparse-TFM Imaging of Lamb Waves for the Near-Distance Defects in Plate-Like Structures," *Metals*, vol. 9, no. 5, p. 503, 2019, doi: 10.3390/met9050503.
- [10] J. Camacho, C. Fritsch, J. Fernandez-Cruza, and M. Parrilla, "Phase Coherence Imaging: Principles, applications and current developments," in 178th Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, California, 2020, p. 55012, doi: 10.1121/2.0001201.
- [11] J. Camacho, M. Parrilla, and C. Fritsch, "Phase coherence imaging," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, no. 5, pp. 958–974, 2009, doi: 10.1109/TUFFC.2009.1128.

## KONTAKT

**HOCHSCHULE FÜR  
ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN COBURG**

Am Hofbräuhaus 1b, 96450 Coburg

Tel.: +49 (0)9561 317-437

[www.isat-coburg.de](http://www.isat-coburg.de)

[www.sensor-test.com](http://www.sensor-test.com)



Willkommen zum

# Innovationsdialog!



## **SENSOR+TEST** DIE MESSTECHNIK-MESSE

**Nürnberg**

**11.-13. Juni 2024**

### **Effizient und persönlich:**

Hohe Informationsdichte und umfassendes Beratungsangebot internationaler Experten

### **Wissenschaftlich fundiert:**

Internationale Kongresse und Tagungen bieten Einblick in die Technologie der Zukunft

### **Vom Sensor bis zur Auswertung:**

Mess-, Prüf- und Überwachungslösungen für die Innovationen in allen Industriebranchen

AMA Service GmbH – 31515 Wunstorf, Deutschland  
Tel. +49 5033 96390 – [info@sensor-test.com](mailto:info@sensor-test.com)

# ÜBERLEGENE MESSDATENQUALITÄT FÜR NVH, SCHWINGUNGS- UND DYNAMIKUNTERSUCHUNGEN

## Laservibrometer mit QTec® Mehrkanalinterferometrie

Die Simulation der Bauteildynamik erlaubt Vorhersagen der späteren Produktqualität hinsichtlich Akustik, Komfort und Dauerfestigkeit. Dazu werden die Modelle anhand von Prototypentests mit der Realität abgeglichen. Scanning Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV) haben sich seit Jahrzehnten für diese Tests etabliert. Die patentierte Mehrkanalinterferometrie QTec® hebt die Schwingungsmessung auf ein neues Niveau für noch schnellere, detailliertere Aussagen besonders von technischen bzw. maschinenbearbeiteten Oberflächen. Bisher waren Messungen auf solchen Prüflingen mit erhöhtem Rauschen oder dem Bedarf an Probenaufbereitung verbunden. Beim Streben nach dem besten Signal-Rausch-Verhältnis ist Polytec mit QTec® der entscheidende Faktor. Damit werden Messungen unter gleichen Voraussetzungen bis zu zehn Mal schneller und die nutzbare Auflösung steigt um bis zu 20 dB. Dieser Zugewinn an Datenqualität und Testeffizienz ist gerade dort, wo optische Schwingungsmessung ohnehin bereits seine Vorteile als berührungsloses, nicht-invasives Testverfahren ausspielen kann, entscheidend. Laserlicht als Informationsträger bringt keine zusätzliche Masse auf das Messobjekt, sodass gerade leichte Membranen oder Bleche nicht-invasiv gemessen werden. Die Laservibrometrie ermöglicht lineares Messen von DC bis in den MHz Bereich hinein

In Forschungs- und Entwicklungsabteilungen sind Scanning Vibrometer zur Messung von Betriebsschwingformen, auch triaxial, weit verbreitet. Ein fein positionierter Laser ermöglicht eine räumliche Auflösung der Messpunkte, wie sie zum Modellabgleich auch bei hohen Frequenzen im akustischen und Ultraschall-Bereich notwendig sind. Aus den Messdaten wird eine animierte (3D-)Schwingform gerechnet, die verglichen mit einfachen Drahtmodellen aus Beschleunigungsaufnehmermessungen einen intuitiven Vergleich mit der Simulation ermöglicht. Der numerische Abgleich und das FE-Model Updating auf Ba-

sis der präzisen Messdaten führen dann zum eigentlichen Ziel: einem dynamischen Modell zur Vorhersage der Produkteigenschaften.



## Schwingungsmessung ohne Rauschen

### Kein Problem mit Polytec

## VibroFlex QTec® Laservibrometer

Unsere neue patentierte Technologie QTec® ermöglicht eine signifikante Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Für aussagekräftige Daten auf allen technischen Oberflächen.

QTec® – Reinventing vibrometry

Mehr unter: [polytec.com/qttec](http://polytec.com/qttec)



## KONTAKT

### POLYTEC GMBH

Polytec-Platz 1–7, 76337 Waldbronn

Tel.: +49 (0) 7243 604-0

[info@polytec.de](mailto:info@polytec.de)

[www.polytec.com/qttec](http://www.polytec.com/qttec)

# DYNAMISCHES WIEGEN DIREKT IN DIE STEUERUNGSTECHNIK INTEGRIERT

Mit der neuen TwinCAT 3 Weighing Library (TF3685) lässt sich insbesondere in Kombination mit den EtherCAT-Klemmen der ELM35xx und EL3356 eine schnelle und präzise Waage für die Gewichtsmessung direkt in die PC-basierte Maschinensteuerung integrieren. Dabei sorgt eine hochleistungsfähige Signalfilterung für beschleunigte Prozessabläufe.



**Abb. 1:** Mit der TwinCAT Weighing Library lassen sich durch eine hochdynamische Gewichtsmessung Maschinenabläufe beschleunigen.

Der Fokus der TwinCAT Weighing Library liegt hauptsächlich auf dem Prozess des dynamischen Wiegens. Dieser ist hinsichtlich der Signalfilterung besonders anspruchsvoll, da die Wiegezeit maßgeblich die Gesamtprozesszeit der jeweiligen Maschine beeinflusst. Eine schnelle Signalfilterung bei gleichbleibender Präzision bedeutet folglich ein schnelleres Gewichtsergebnis, was sich in optimierten Maschinenabläufen widerspiegelt.

ebenfalls über die neuen SPS-Bausteine abgedeckt. Neben einer manuellen Triggerung der Gewichtsmessung ist eine automatische Messung möglich, bei der das Produktionsgut erkannt und die Messung direkt durchgeführt wird. Als wesentlicher Vorteil können hierdurch bislang notwendige externe Trigger, wie z. B. Lichtschranken und Initiatoren, entfallen. ■

## KONTAKT

### BECKHOFF AUTOMATION GMBH & CO. KG

Hülshorstweg 20  
33415 Verl,  
Tel.: +49 (0)5246 963-0  
info@beckhoff.com  
www.beckhoff.com

Da eine Wägezelle und eine Messwerterfassung über die entsprechenden EtherCAT-Klemmen noch keine Waage abbilden, setzt genau dort die SPS-Bibliothek TF3685 an. Mit ihr können auch mehrere Wägezellen zu einer Gesamtwage zusammengeschaltet werden. Außerdem wird die Skalierung der Messwerte übernommen. Funktionen wie z. B. Nullsetzen und Trieren werden

# Systemintegrierte Highend-Messtechnik



Integriert Messtechnik und Datenanalyse ins Automatisierungssystem: PC-based Control

- Hard- und Software für die durchgängige Messkette: von der Datenerfassung bis zur Analyse in der Cloud
- EtherCAT-Klemmen der ELM3xxx-Serie: hochpräzise, schnelle und robuste Messtechnikklemmen in IP20 und IP67
- Highspeed-Feldbus EtherCAT zur zeitsynchronen Datenübertragung an die Steuerung
- durchgängige, lückenlose Datenanalyse mit TwinCAT Analytics
- einfache Integration von MATLAB®/Simulink® in die TwinCAT-Programmierungsumgebung
- Schnittstellen zur komfortablen Datenerfassung und -analyse in LabVIEW™
- TwinCAT 3 Scope View zur grafischen Darstellung aller Messsignale



Erfahren Sie  
mehr über  
unsere Highend-  
Messtechnik!

New Automation Technology **BECKHOFF**

# SAB UNTERSTÜTZT DIE MOBILITÄTSWENDE MIT INNOVATIVEN HV-MESSLÖSUNGEN

Zuverlässige Hochvolt-Messtechnik ist eine elementare Voraussetzung für die Etablierung der Elektromobilität im Alltag. Mit langjährigem Know-how leistet SAB Bröckskes einen wichtigen Beitrag zu Effizienz und Sicherheit der erforderlichen Systeme.

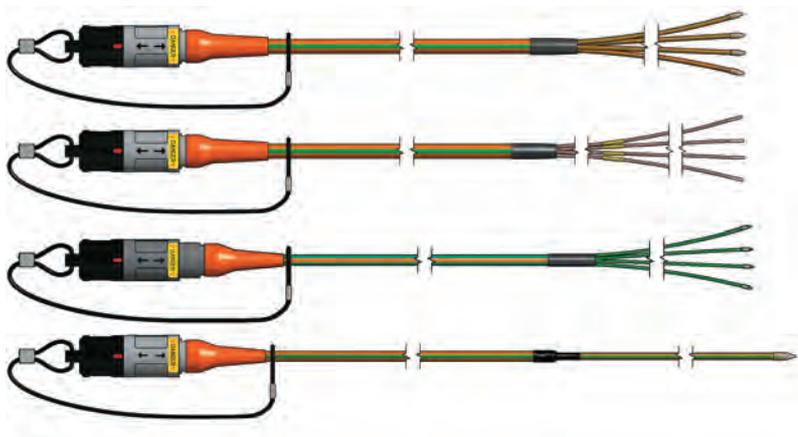


Abb. 1: HV Thermoelemente und PT100 Quelle: SAB Bröckskes

Um die ehrgeizigen Ziele der Mobilitätswende zu erreichen, wird in den nächsten Jahren der Anteil an Elektrofahrzeugen am gesamten Fahrzeugaufkommen in Deutschland massiv zunehmen müssen. Prognosen sehen einen sprunghaften Anstieg von aktuell knapp vier Prozent des Pkw-Bestands auf fast 25 Prozent im Jahr 2030 voraus. Massiv gefordert, um diese und zukünftige Ziele zu erreichen, sind nicht nur Automobilhersteller, deren Zulieferer, vor allen Dingen im Bereich der Stromspeichertechnologie, sowie die verantwortlichen Stellen in Hinblick auf die erforderliche Infrastruktur. Auch auf dem Gebiet der Messtechnik, die alle genannten Bereiche begleitet und unterstützt, sind zuverlässige Hilfsmittel auf Basis vorhandener Technologien und die innovative Entwicklung neuer Technologien unverzichtbar.

SAB Bröckskes gehört seit mehr als 75 Jahren zu den weltweit führenden Kabelherstellern und hat sich durch die Entwicklung und Optimierung von Hochvolt-Leitungen auch im Bereich der Elektromobilität international einen Namen gemacht. Darüber hinaus nutzt SAB das langjährig entwickelte Know-how auch auf dem Gebiet der Hochvolt-Messtechnik und bietet eine Vielzahl innovativer Messlösungen, sowohl als Standard-Hilfsmittel für verbreitete Einsatzzwecke als auch in Gestalt

von individuell konzipierten Lösungen für spezifische technische Anforderungen.

„Die Entwicklungszyklen in der Elektromobilität werden immer kürzer“, weiß Sabine Bröckskes-Wetten, Geschäftsführerin der SAB Bröckskes GmbH & Co. KG aus Viersen. „Das ist nur dann möglich, wenn bei der Entwicklung neuer Produkte und Technologien mit zuverlässigen Messwerten gearbeitet werden kann. Gerade im anspruchsvollen Hochvolt-Bereich stehen wir mit unseren Messlösungen für diese erforderliche Präzision, Zuverlässigkeit und Anwenderfreundlichkeit.“

Bei der Entwicklung neuer und der Realisierung individueller Messlösungen im Hochvolt-Bereich für die Elektromobilität setzt SAB Bröckskes auf ebenso kompetente und erfahrene Partner. Gemeinsam mit der CSM GmbH aus Filderstadt hat SAB so auch ein HV-Messsystem entwickelt, das speziell auf die Anforderungen im mobilen und stationären Einsatz für Aufgaben in der E-Mobilität zugeschnitten ist. Als seit vier Jahrzehnten etablierter Hersteller liefert CSM in der Partnerschaft mit SAB bewährte HV-Messmodule für die Temperaturmessung sowie für analoge Messsignale in HV-Umgebung. Dabei setzen die langjährigen Partner neben Zuverlässigkeit auf geprüfte Sicherheit auf Basis der Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte, DIN EN 61010. Mit Hilfe eines mehrstufigen Sicherheitskonzepts können so sichere Messketten aus speziellen Sensorleitungen und HV-Messmodulen zwischen Sensor und Datenerfassung realisieren werden.

Das Portfolio von SAB Bröckskes im Bereich der HV-Messung umfasst ein breites Produktangebot in den Bereichen HV-Temperaturmesstechnik, HV-Analogmesstechnik, HV-Spannungsmessung sowie hochflexible Hochvolt-Leitungen, HV Prüfadapter, HV-Verkabelung sowie Adaptierungen für HV Prüfstands-Anwendungen.

## KONTAKT

### SAB BRÖCKSKES GMBH & CO. KG

Sacir Adrovic  
Grefrather Str. 204–212b  
41749 Viersen  
Tel.: +49 (0)2162 898-146  
s.adrovic@sab-cable.com  
www.sab-kabel.de



Neben diesem umfassenden Angebot positioniert sich SAB Bröckskes vor allen Dingen mit weit überdurchschnittlichem Service. Dazu zählt auch, dass Produkte aus dem laufenden Angebot auch in kleinen Stückzahlen ab drei bis fünf Stück geliefert werden können. Hierbei profitieren Kunden zudem von im Branchenvergleich positiv auffallenden Lieferzeiten, von in der Regel nur 2 Wochen für maßgeschneiderte Hochvolt Sensoren.

„Gemeinsam mit unserem Partner CSM möchten wir Entwickler und Hersteller in der Elektromobilität dabei unterstützen, den Fortschritt voranzutreiben und auf Basis der E-Mobilität nicht nur wirtschaftlich erfolgreich zu arbeiten, sondern globale Ziele im Umweltschutz zu erreichen“, betont Sabine Bröckskes-Wetten. ■

### Über SAB Bröckskes

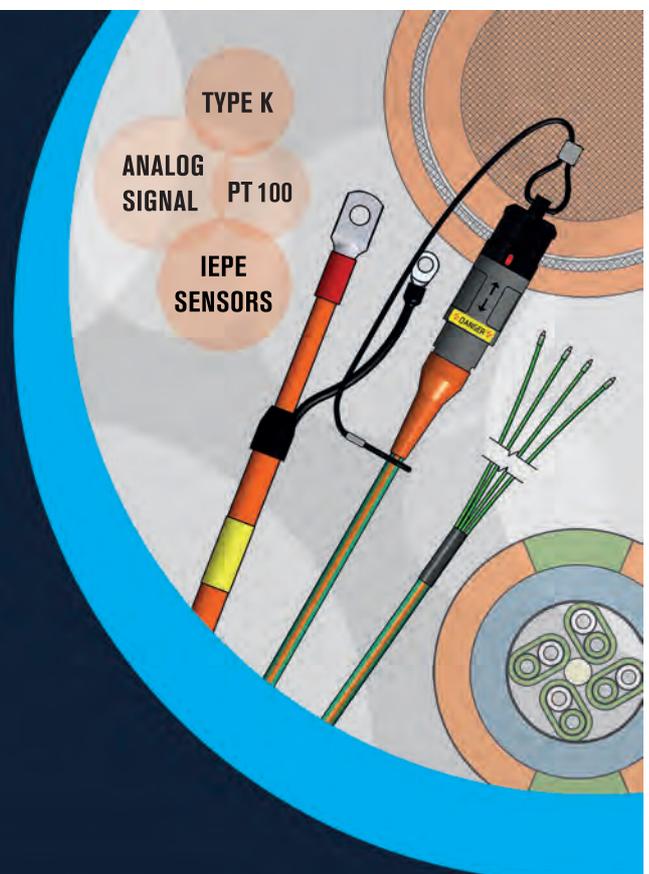
Das 1947 von Peter Bröckskes in Viersen als Einmannbetrieb für den elektrischen Anlagenbau gegründete Unternehmen zählt heute mit mehr als 550 Beschäftigten und einem in über 100 Ländern erwirtschafteten Umsatz von über 134 Mio. Euro zu den weltweit führenden Spezialkabelherstellern. Das Portfolio der SAB Bröckskes GmbH & Co. KG umfasst neben Kabeln und Leitungen in unterschiedlichsten Materialausführungen auch die Kabelkonfektionierung sowie messtechnische Lösungen. Mit seinen komplett am Stammsitz Viersen entwickelten und gefertigten Produkten beliefert das Unternehmen zahlreiche Branchen von der Industrieautomation und Kommunikationstechnologie über Hersteller von Bau- und Agrarmaschinen, die Bahn- und E-Mobility bis zur Medizintechnik. Das Familienunternehmen SAB Bröckskes wird in dritter Generation von Sabine Bröckskes-Wetten geführt und ist mit seinen internationalen Vertretungen und Tochterunternehmen global gut aufgestellt.

Abb. 2: Hochvolt Messsystem für die Elektromobilität  
Quelle: SAB Bröckskes

# HOCHVOLT MESSTECHNIK

## Sichere Temperaturmessung an HV-Komponenten

- ✓ HV Sensoren Typ K + Pt100/1000
- ✓ HV Spannungsmessung
- ✓ HV Sensorkabel Beschleunigung & DMS
- ✓ Hochflexible HV Leitungen
- ✓ HV Prüfadapter



+49/2162/898-0

[www.sab-kabel.de](http://www.sab-kabel.de)

# CUSTOM SOLUTIONS

Das KELLER-Standardsortiment deckt grundsätzlich die meisten Anwendungsfelder für Drucksensoren ab. Oftmals lohnt es sich aber, das Produkt spezifisch für den Einsatz und die Integration in übergeordnete Gesamtsysteme zu optimieren. Durch die hausinterne Fertigung diverser Einzelteile und eine enge Zusammenarbeit mit unseren Lieferanten können viele Anpassungen entsprechend einfach umgesetzt werden.



## Gemeinsames Know-How für passende Sensorlösungen

Unsere Kunden sind Spezialisten auf Ihrem Gebiet und kennen die Anforderungen und die Umgebungsbedingungen am besten. KELLER kennt die Möglichkeiten piezoresistiver Sensortechnik und hat seit 1974 unzählige anspruchsvolle Projekte realisiert. Der gegenseitige Erfahrungsaustausch war dabei immer die Basis des Erfolgs.

## Messbereiche & Performance

Zu Beginn werden grundlegende Sensorspezifikationen festgelegt wie Gesamtmessbereich, Genauigkeit, Kalibrierung auf bestimmte Messpunkte und Druckeinheiten oder die Skalierung des Ausgangssignals.

## Ideale Anpassung an die Umgebung

Die Berücksichtigung der Einsatzbedingungen ist ebenfalls ein zentraler Teil der Anforderungen und erhöht nicht nur die Lebensdauer des Sensors, sondern ist oftmals auch eine Voraussetzung für korrekte Messergebnisse. Ist im druckhaltenden System mit großem Überdruck oder dynamischer Belastung zu rechnen, sollte die Konstruktion des Sensors dafür optimiert werden. Gewisse Anwendungen oder benachbarte Anlagenteile bergen die Gefahr von Signalverfälschungen und Ausfällen durch Vibration oder Schock. Die Temperatur hat ebenfalls starken Einfluss auf alle Materialien und ihre Beständigkeit. Neben Extremwerten können auch schnelle Temperaturwechsel Komplikationen verursachen. Nicht weniger wichtig ist die chemische Beständigkeit. Aggressive Messmedien greifen Gehäuse- und Dichtungsmaterialien an, wenn diese nicht sorgfältig ausgewählt wurden. Die Berücksichtigung aller relevanten Faktoren ist essentiell.

## Mechanische Konstruktion

Der Aufbau eines Sensors muss alle vorhergehenden Überlegungen berücksichtigen und ist ent-

scheidend für die Performance. Von der Auswahl des Sensorchips über das Koppelmedium bis hin zu den verwendeten Werkstoffen und Fertigungstechniken. Zusätzlich kommen hier Kundenwünsche bezüglich Bauform, Druckanschluss usw. sowie Anforderungen aus der Anwendung und Vorgaben aus Normen und Gesetzen zum Tragen.

## Elektronik & Konfiguration

Die Grundfunktion der Elektronik ist es, das Messsignal aufzubereiten, eventuell zu speichern und über die entsprechende Schnittstelle auszugeben. In diesem Zusammenhang ist auch die Integration applikationsspezifischer Berechnungen in die Firmware oder die Konfiguration von Geräten und Software nach Kundenwunsch möglich. Andere Anforderungen sind wiederum von der Umgebung abhängig, wie zum Beispiel erweiterter Blitzschutz, EMV oder Explosionsschutz. Eigensichere Produkte können auch spezifisch auf Parameter des Gesamtsystems beim Kunden abgestimmt werden.

## Elektrische Schnittstellen & Anschluss

Digitale Schnittstellen können an Kommunikationsprotokolle angepasst oder kundenspezifisch konfiguriert werden. Gerade in der Sensorik haben analoge Schnittstellen weiterhin einen hohen Stellenwert. In beiden Bereichen hat KELLER Erfahrung in der Entwicklung applikationsspezifischer Lösungen, darunter solche mit Lichtwellen- und Frequenzausgängen. Für den elektrischen Anschluss lassen sich die benötigten Anschlussstecker in die Konstruktion integrieren und Kabelabgänge nach Wunsch konfektionieren.

## Beschriftung

Neben Kundenlogos können auch funktionale Beschriftungen – wie zusätzliche Teilebezeichnungen, Seriennummern, Data Matrix Codes oder Hilfsmarkierungen – als Laserbeschriftung oder auf Etiketten angebracht werden.



**KELLER**

## KONTAKT

### KELLER DRUCKMESS-TECHNIK AG

St. Gallerstr. 119  
CH-8404 Winterthur  
info@keller-druck.com  
www.keller-druck.com

# HUMI-PRESSURE-PROBE VON DRIESEN + KERN DIE NEUE ALL-IN-ONE SONDE

Driesen + Kern bietet ab sofort die Kombisonden-Serie HumiPressureProbe an. Diese neue Modellreihe kombinierter Druck-, Feuchte- und Temperatursonden zeichnet sich durch hohe Flexibilität und Vielseitigkeit aus. Alle Messgrößen stehen gleichzeitig analog und digital über Modbus zur Verfügung.



Der kombinierte Druck-, Feuchte- und Temperatursensor im Sondenkopf kann anwenderseitig getauscht oder über die busfähige RS485-Schnittstelle kalibriert und justiert werden. Dadurch ergeben sich extrem kurze Wartungseinsätze und minimale Ausfallzeiten.

Über die RS485-Schnittstelle können die Primärmesswerte Druck, Feuchte und Temperatur abgerufen werden, aber genauso auch abgeleitete Größen wie Taupunkt oder Mischungsverhältnis. Dabei werden stets exakte Messwerte ausgegeben, die bereits bezüglich des Gasdrucks korrigiert sind.

Gleichzeitig stehen vier Analogausgänge mit 0...10V-Signalen zusätzlich zur digitalen Messdatenübertragung zur Verfügung, die beliebig mit primären oder berechneten Messwerten belegt werden können und frei skalierbar sind, z.B. auf 0...2,5V oder 1...5V.

Auch die RS485-Schnittstelle ist anwenderseitig konfigurierbar, z.B. die Anzahl der Stopbits oder umschaltbar von Modbus auf ASCII-Protokoll. So lässt sich die Sonde langfristig nutzen und immer wieder an neue Einsatzbedingungen und Gegebenheiten anpassen.

Eine Auswahl verschiedener Bauformen ermöglicht den Einsatz einer HumiPressureProbe auch in sehr anspruchsvollen Umgebungen. Von der Miniatursonde mit nur 4mm Durchmesser für schwer zugängliche Bereiche bis hin zur druckfesten Einschraubsonde für bis zu 30bar Überdruck sind viele Anwendungen realisierbar.

Die HumiPressureProbe wird stets mit Kalibrierzertifikat geliefert. Die EA-Variante beinhaltet eine Werkskalibrierung nach ISO-9001, die DA-Variante eine ISO-17025 DAkkS-Kalibrierung. ■



Nach Abziehen der Filterkappe lässt sich der Sensor leicht tauschen.

## KONTAKT

### DRIESEN + KERN GMBH

Am Hasselt 25  
24576 Bad Bramstedt  
Tel.: +49 (0)4192 817087  
info@driesen-kern.de  
www.driesen-kern.de/dkp

# AUTOMATISIERTER SICHERHEITSNACHWEIS ELEKTRONISCHER SYSTEME

M.Sc. Levent Ergün, M.Sc. Roman Müller-Hainbach, Prof. Dr.-Ing. Stefan Butzmann

In nahezu allen Branchen ist ein Anstieg des Elektronikanteils zu beobachten. Diese Beobachtung trifft u. a. auch auf die Automobilbranche zu, in der vermehrt auf elektronische Systeme und Sensoren gesetzt wird, um die Sicherheit für die Fahrzeuginsassen zu erhöhen. Ähnlich verhält es sich auch in anderen Branchen wie der Medizintechnik und der Flugzeugtechnik. Insbesondere für die Systeme, die im Falle eines Systemversagens das menschliche Leben gefährden können, ist daher eine Nachweisführung hinsichtlich der Funktionalen Sicherheit zu erbringen. Das Ausfallverhalten elektronischer Komponenten hat einen erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit elektronischer und mechatronischer Systeme. Während die Monte-Carlo-Simulation ein etabliertes Werkzeug ist, um die Auswirkungen von Komponententoleranzen vorherzusagen, wird der Ausfall von Bauelementen heute meist nicht automatisiert berücksichtigt. Am Lehrstuhl für Sensorik und messtechnische Systeme wird an softwareunterstützten Methoden gearbeitet, mit deren Hilfe die Auswirkungen der Ausfälle einzelner Module und Komponenten auf das Gesamtsystem effizient und automatisiert prognostiziert werden können. Die eingesetzten und industrieprobten Verfahren wurden bereits mehrfach erfolgreich bei der Identifikation kritischer Fehlerpfade und für Sicherheitsnachweise eingesetzt.

## Herausforderungen in der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse

In fast allen modernen, sicherheitskritischen Systemen ist durch geeignete Analysen wie z.B. FMEDAs sicherzustellen, dass es bei Ausfall einzelner Bauelemente oder Komponenten nicht zu kritischen Zuständen kommt. Vielmehr sollen solche Szenarien durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Diagnose oder redundante Ausführung wesentlicher Komponenten, vermieden werden. Naturgemäß nimmt die Komplexität solcher Analysen mit zunehmender Anzahl der verwendeten Komponenten und Bauelemente zu. Dieses Verhalten wird in der Literatur häufig auch als „kombinatorische Explosion“ bezeichnet.

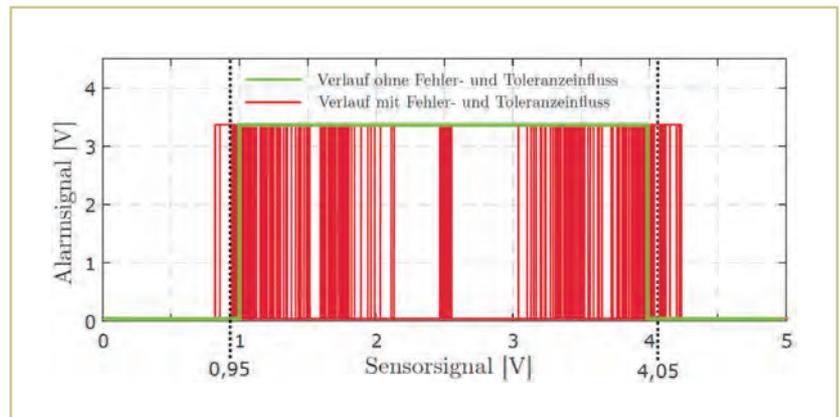
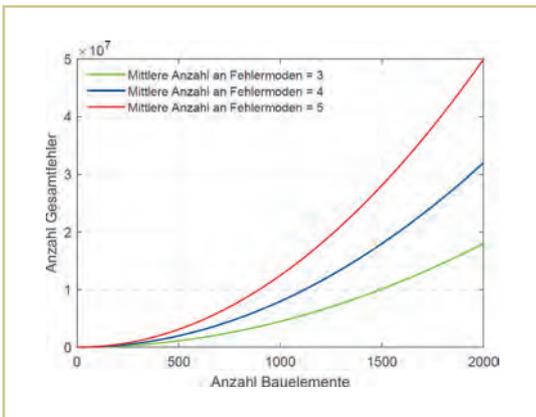
Im Mittel besteht ein modernes Automobilsteuergerät aus etwa 300-1000 Bauelementen. Spezielle Steuergeräte können in manchen Fällen sogar bis zu 3000 Bauelemente beinhalten. So können bspw. bei einem Kfz-Batterie-Management-Steuergerät mit ca. 2000 Bauelementen theoretisch

mehr als 32 Millionen (!) verschiedene Fehler-szenarien (unter Berücksichtigung von Einzel- und Doppelfehlern) auftreten, wenn im Mittel für jedes Bauelement vier Fehlermoden betrachtet werden (**Abb. 1** Blaue Kurve). Die Doppelfehleranalyse ist für die Ermittlung der latenten Fehler notwendig und wird insbesondere in der ISO 26262 gefordert.

Es versteht sich von selbst, dass die Absicherung und Bewertung solcher Systeme mit traditionell moderierten FMEDAs nicht oder nur unvollständig möglich ist, sondern dass es vielmehr computer-gestützter Simulationsmethoden bedarf, um die Komplexität solcher Systeme auch sicherheits-technisch zu beherrschen.

## Automatisierte Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse

Der an der Bergischen Universität Wuppertal verfolgte Ansatz setzt auf eine hierarchische Entwicklung und unterscheidet dabei zwischen der System- und Komponentenebene.



Dabei wird das Gesamtsystem zu Entwicklungsbeginn in Simulink modelliert und analysiert. In dieser ersten Phase ist es ausreichend, die Subsysteme (z. B. Spannungsteiler, Differenzverstärker) lediglich als einfache Verhaltensmodelle abzubilden. Gleichzeitig wird untersucht, ob die gewählte Systemarchitektur auch im Fehlerfall das System in einen sicheren Zustand überführen kann. Durch diese frühe Einbindung der Fehler- und Toleranzanalyse in die Architekturentscheidung werden daher auch wichtige Erkenntnisse bereits zu Beginn der Entwicklung gewonnen, sodass etwaige Anpassungen ohne weitreichende Konsequenzen erfolgen können.

Nach Festlegung der Systemarchitektur werden die einzelnen Subsysteme auf der Komponentenebene entwickelt und implementiert. Die Modellierung der realen Schaltung erfolgt dabei meist unter SPICE. Auf dieser Ebene wird für jedes einzelne Subsystem eine vollständige Fehleranalyse durchgeführt.

Abschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Subsysteme auf der Systemebene zusammengetragen, um eine Gesamtsimulation mit realen Ausfallursachen und Auswirkungen durchführen zu können.

Je nach Komplexität der Subsysteme und des Gesamtsystems fallen hierbei große Datenmengen an, so dass die Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse erhebliche Rechenleistung benötigt.

Der eigens hierfür entwickelte und optimierte Algorithmus nutzt dabei die Ähnlichkeit vieler Fehlerbilder innerhalb von Subsystemen zueinander aus, was bei der Betrachtung und Simulation des Gesamtsystems eine erhebliche Reduktion des Rechenaufwands und der für die Analyse benötigten Zeit zur Folge hat.

Mit Hilfe der beschriebenen Methodik und dem hohen Grad an parallelisierter Ausführung können somit auch komplexe Systeme in einer moderaten Zeit vollständig analysiert werden. Dabei wird in allen Phasen der Fehleranalyse die Durchgängigkeit der Werkzeugkette wie auch die Konsistenz der Daten sichergestellt.

### Anwendung der Methodik

Zu Testzwecken der beschriebenen Methodik wurde für ein Steuergerät eines großen Industriepartners der Sicherheitsnachweis erbracht. Hierzu wurden für alle Bauelemente Einzel- und Doppelfehleranalysen durchgeführt und vollautomatisiert bewertet (**Abb. 2**).

Der Vergleich mit der zuvor manuell durchgeführten FMEDA ergab große Übereinstimmungen. Mit Hilfe der an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelten Methodik konnte die Ausfallanalyse jedoch mit einem Bruchteil des Aufwands der klassischen FMEDA erstellt werden.

Die betrachteten Fehlerfälle waren von deutlich größerer Vollständigkeit, vor allem was die Betrachtung von Doppelfehlern und möglicher latenter Fehler betraf. ■

**Abb. 1:** Auswirkung der kombinatorischen Explosion auf die Anzahl der Gesamtfehlerdurchläufe

**Abb. 2:** Teilanalyse (hier dargestellt: Sensorüberwachung)

### KONTAKT

#### BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik  
Lehrstuhl für Sensorik und messtechnische Systeme  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Butzmann  
Rainer-Gruenter-Straße 21 / Geb. FC, Raum 2.20, 42119 Wuppertal  
Tel.: +49 (0)202 439-1814 / 1987 (Sekretariat), Fax: +49 (0)202 439-1932  
butzmann@uni-wuppertal.de  
[www.emt.uni-wuppertal.de](http://www.emt.uni-wuppertal.de)

# H<sub>2</sub>-SENSOREN FÜR AUTOMOTIVE APPLIKATIONEN

Im Rahmen des Projektes „Wasserstoffdetektoren in Elektrofahrzeugen / Hydrogen detectors in electric vehicles (H2D4EV)“ wurden miniaturisierte, feuchtekompensierte H<sub>2</sub>-Sensoren für Brennstoffzellen-Fahrzeuge entwickelt. Einsatzfelder dieser H<sub>2</sub>-Sensoren im Brennstoffzellen-Fahrzeug sind typabhängig die Abgasmessung am Stack oder das H<sub>2</sub>-Monitoring in der Umgebung der Brennstoffzelle. Die entwickelte Sensorik ist hinsichtlich weiterer mobiler und stationärer H<sub>2</sub>-Applikationen skalierbar.

Die beiden realisierten H<sub>2</sub>-Sensortypen zur Abgasmessung am Brennstoffzellenstack und zum H<sub>2</sub>-Monitoring in der Umgebung der Brennstoffzelle detektieren hochselektiv jeweils H<sub>2</sub>-Konzentrationen bis 10%. In beiden H<sub>2</sub>-Gassensortypen sind zwei verschiedene Prinzipien zur H<sub>2</sub>-Messung, ein H<sub>2</sub>-selektiver Metalloxid(MOX)-Halbleiter-Gassensor sowie ein Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) integriert.

Die Funktion eines MOX-Gassensorelements beruht auf der Leitwertsänderung der gassensitiven MOX-Halbleiterschicht in Folge der Einwirkung von Gasen. MOX-Halbleitergassensoren haben eine hohe Sensitivität im einstelligen ppm-Bereich. Durch den Einsatz spezifischer filterbeschichteter gassensitiver MOX-Halbleiter-Schichten kann eine sehr hohe H<sub>2</sub>-Selektivität dieser Sensoren erreicht werden. Allerdings ist die Genauigkeit bei der Detektion höherer Gaskonzentrationen begrenzt [1].

H <sub>2</sub> -MOX-Halbleiter-Gassensor	Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD)
+ Kleine Konzentrationen	+ Große Konzentrationen
+ Hohe Empfindlichkeit	+ Hohe Linearität
+ Kurze Ansprechzeit	+ Hohe Genauigkeit
+ Breiter Messbereich	+ Hohe Stabilität
+ Hohe Selektivität	+ Verschmutzungsresistent
- Geringe Genauigkeit bei großen Konzentrationen	- Geringe Selektivität
- Verschmutzungsempfindlich	- Temperaturempfindlichkeit

Abb. 1: Vergleich von Vor- und Nachteilen der H<sub>2</sub>-Gassensor-Messprinzipien MOX-Gassensor und WLD [1]

## KONTAKT

### UST UMWELTSENSORTECHNIK GMBH

Dr. Olaf Kiesewetter  
Dieselstr. 2 und 4  
99331 Geratal  
OT Geschwenda  
Tel.: +49 (0)36205 713-0  
o.kiesewetter@  
umweltsensortechnik.de  
www.umweltsensortechnik.de

Ein Wärmeleitfähigkeitsdetektor ist für die Detektion höherer Gaskonzentrationen geeignet. Die Funktion des WLDs beruht auf der Abkühlung eines beheizten Sensorchips durch das umgebende zu messende Gas (z. B. H<sub>2</sub>). Die Abkühlung ist von der Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases abhängig. Durch Messung der Leistungsaufnahme des WLDs bei konstanter Temperatur kann die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gases bestimmt werden [1].

Mit der patentierten innovativen Kombination dieser beiden Messprinzipien im 1- bzw. 2-Chip-Design in den realisierten H<sub>2</sub>-Sensoren werden deren

Vorteile genutzt und deren Nachteile kompensiert (Semicon®-Prinzip). Die damit erreichte diversitäre Redundanz ermöglicht zusammen mit spezifischen in den Sensoren integrierten Funktionen, wie z. B. die Selbstdiagnose und die Signalisierung von Fehlerfällen auch während des Messvorgangs sowie die Erkennung und die Kompensation von Kontaminationen, H<sub>2</sub>-Sensorsysteme mit hoher Sensitivität, Selektivität, Stabilität und Sicherheit. Spezifische Automotiv-Anforderungen wie z.B. Vereisungsresistenz, d.h. Funktionsfähigkeit des Sensorsystems nach Auftauen bzw. Enteisung innerhalb von 5s sowie die Resistenz gegenüber deionisiertem Wasser, als Kondensat der Brennstoffzelle, werden ebenfalls erfüllt. Die umgesetzten Sensorkonzepte sind für die Realisierung von kundenspezifischen Lösungen zum Einsatz in sicherheitskritischen Systemen geeignet und bedarfsweise zertifizierbar. Des Weiteren sind diese Sensorkonzepte und deren Komponenten u.a. für automotive Anwendungen validierbar sowie für die perspektivische wirtschaftliche Serien- bzw. Großserienproduktion geeignet.

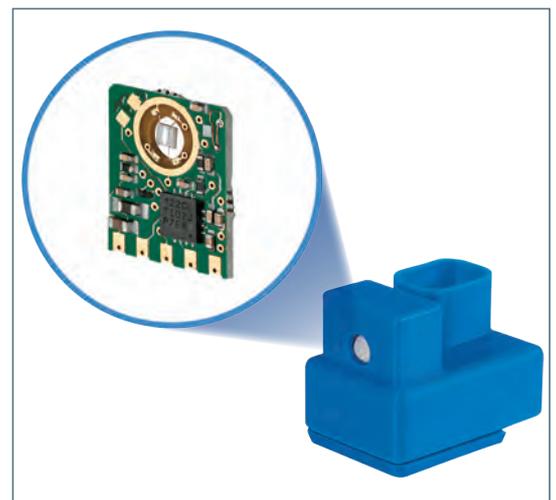


Abb. 2: Muster eines aktiven H<sub>2</sub>-Gassensors (L x B x H ca. 34 x 23 x 26 mm) zur Umgebungsüberwachung einer Brennstoffzelle im Fahrzeug, Detail Elektronik (L x B ca. 12 x 10 mm mit integriertem keramischen H<sub>2</sub>-Gassensorelement L x B ca. 1,5 x 1,5 mm)

**Bild 3** zeigt das Blockschaltbild des realisierten H<sub>2</sub>-Sensors zum H<sub>2</sub>-Monitoring in der Umgebung einer Brennstoffzelle. Die eingesetzten Sensorelemente sind in Hybridtechnologie (keramisches Trägersubstrat mit mikrostrukturierter Platin-Dünnschicht, abgedeckt mit einer Passivierungsschicht sowie für den MOX-Gassensor zusätzlich eine H<sub>2</sub>-sensitive Metalloxid-Halbleiterschicht) realisiert. Als H<sub>2</sub>-Sensorelement kommt eine Variante mit MOX-Gassensor und WLD auf einem Chip zum Einsatz. Das keramische Pt100-Element dient als Referenz-Temperatursensor.

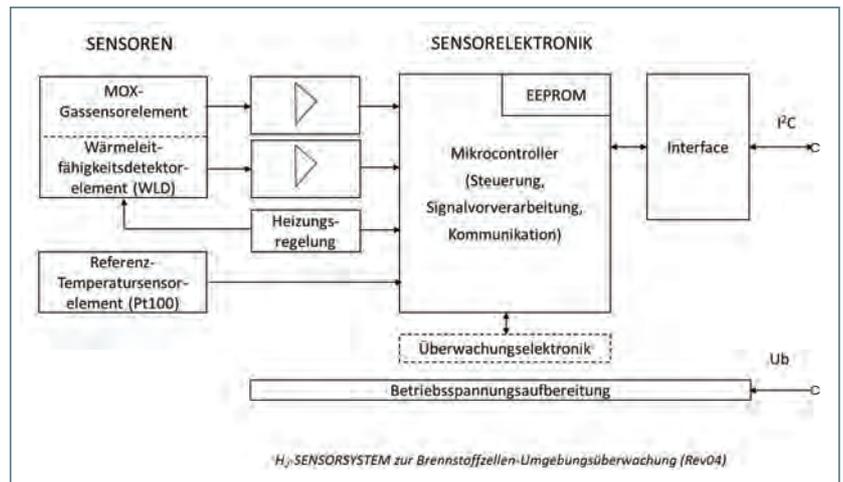
Der H<sub>2</sub>-Gassensor zur Abgasüberwachung einer Brennstoffzelle im Fahrzeug (**Bild 4**) ist komplexer aufgebaut.



**Abb. 4:** Muster eines aktiven H<sub>2</sub>-Gassensors (L x B x H ca. 36 x 23/43 x 28 mm) zur Abgasüberwachung einer Brennstoffzelle im Fahrzeug/Detail Elektronik (L x B ca. 28 x 20 mm mit Gassensorkopf ca. Ø 13 mm)

Im Sensorkopf sind ein H<sub>2</sub>-selektives MOX-Multi-elektrodenstruktur-Gassensorelement, ein differentielles Wärmeleitfähigkeitssensorelement (DWLD) mit Feuchtesensorelement auf einem Chip und ein Pt100-Referenz-Temperatursensorelement integriert. Diese Sensorelemente auf keramischer Basis sind ebenfalls in der oben beschriebenen Hybridtechnologie realisiert (**Bild 5**).

Zur Realisierung der Enteisung des Sensors innerhalb von 5s wird das MOX-Gassensorelement verwendet. Dieses H<sub>2</sub>-selektive Multi-elektrodenstruktur-MOX-Gassensorelement verfügt über mehrere Elektrodenpaare für die gassensitive Schicht auf dem Chip. Durch die unterschiedlichen Längen-Breiten-Verhältnisse der Elektroden können unterschiedliche Schichtwiderstände gemessen werden, wodurch z.B. die Kompensation von Sensordriften möglich ist. Das separate DWLD-Element dient zur Erfassung und Unterscheidung zwischen den verschiedenen Energieflüssen (Gasphase und Gehäuse).



**Abb. 3:** Blockschaltbild des realisierten H<sub>2</sub>-Sensors zum H<sub>2</sub>-Monitoring in der Umgebung einer Brennstoffzelle

Im Rahmen des Projekts wurden diese Sensoren erfolgreich getestet und evaluiert. Sensorkonzepte und eingesetzte Technologien bieten die Basis zur auftragsbezogenen Realisierung kunden- bzw. applikationsspezifischer Lösungen.

Das Projekt „Wasserstoffdetektoren in Elektrofahrzeugen / Hydrogen detectors in electric vehicles (H2D4EV)“ wurde im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II) des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr gefördert.

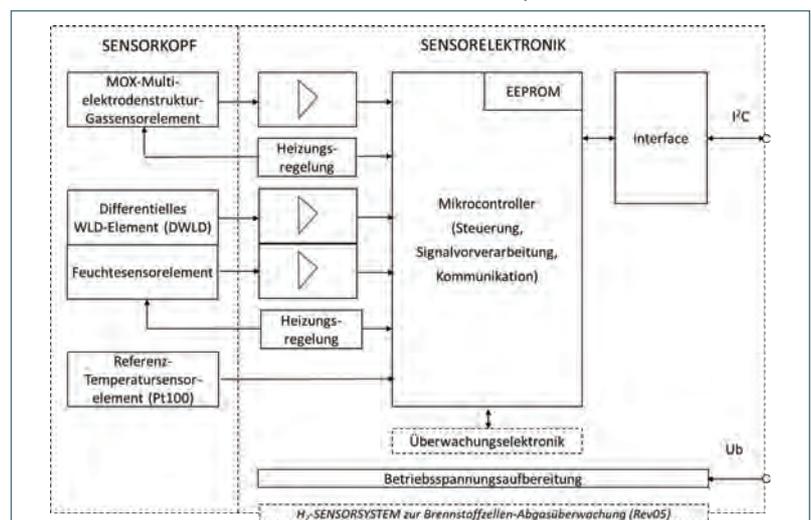
Änderungen dieser Informationen und der technischen Ausführung vorbehalten!

LITERATUR:

- [1] Kiesewetter, O., Krauß, A., Kiesewetter, N., Müller, J., Bose, M., Schenk, St., May, M.: „Innovative H<sub>2</sub>-Sensorik für Brennstoffzellen-Fahrzeuge“, Tille, T. (Herausgeber), Automobil-Sensorik 3, pp. 97-114, ISBN 978-3-662-61259-0, Springer-Vieweg, Springer Verlag GmbH, Berlin, 2020

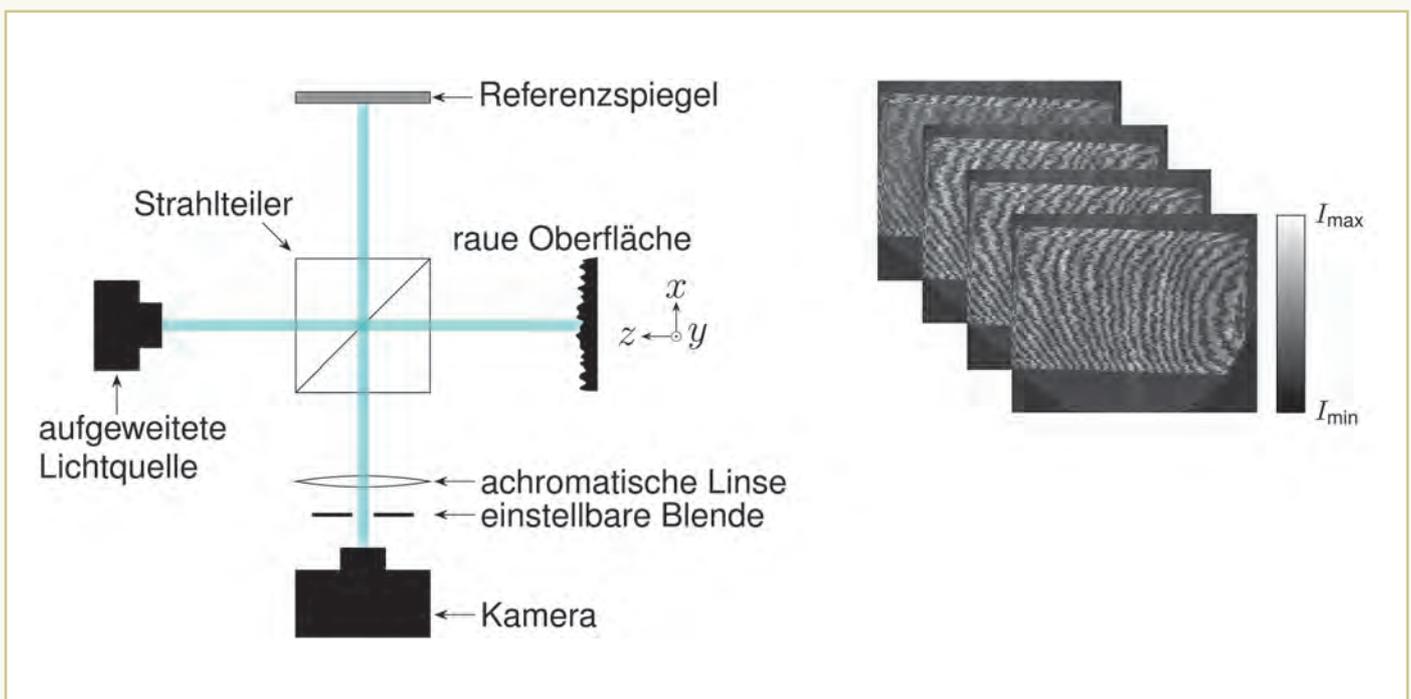
Semicon® ist ein eingetragenes Warenzeichen der UST Umweltsensortechnik GmbH, Dieselstr. 2 und 4, 99331 Geratal OT Geschwenda, Germany.

**Abb. 5:** Blockschaltbild des realisierten H<sub>2</sub>-Sensors zur Abgasüberwachung am Brennstoffzellenstack



# FORSCHUNG AUF DEM GEBIET DER SPECKLE-MESSTECHNIK AM LEHRSTUHL FÜR MESS-SYSTEM- UND SENSORTECHNIK (MST) DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN (TUM)

Dr.-Ing. Franziska Brändle, Dr.-Ing. Martin Jakobi, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Alexander W. Koch



**Abb. 1:**  
Aufbau eines Speckle-Interferometers (Michelson-Interferometer) (links) mit beispielhaften Interferogrammen (Rauheitsmessung:  $\lambda = 488,0 \text{ nm}$ ) (rechts) [Quelle: F. Brändle, MST, nach [7]]

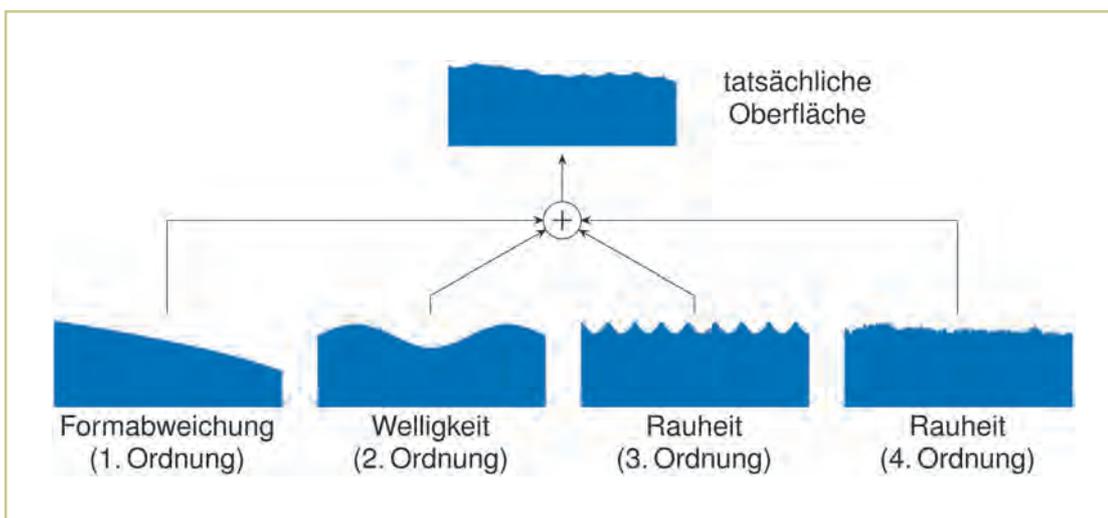
Die Forschungsschwerpunkte von Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Alexander W. Koch umfassen faseroptische und optomechatronische Messsysteme, Lasermesstechnik, holographische Speckle-Interferometrie, Fluoreszenzanalyse, Dünnschichtmesstechnik, Bild- und Sensordatenverarbeitung, Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR-Spektroskopie), Umweltmesstechnik, Multisensorsysteme und medizinische Messverfahren.

Professor Koch studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität München (TUM) und wurde 1988 an der Universität der Bundeswehr München promoviert. 1988 bis 1992 war er Research Fellow der Max-Planck-Gesellschaft am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und habilitierte sich 1992 für das Fachgebiet Elektrophysik. Im gleichen Jahr folgte er einem Ruf auf die Professur für Messtechnik an die Universität des Saarlandes. Er leitet seit 1998 den Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik (MST), der mittlerweile Teil der TUM School of Computation, Information and Technology (CIT) ist.

Die Lehre am MST konzentriert sich auf die Gebiete der Sensortechnik, der photonischen Messsysteme sowie der lasergestützten Messverfahren, regelmäßig auch am German Institute for Science and Technology, GIST-TUM ASIA, in Singapur.

nes Materials anhand der Rauheit erkannt werden kann [3] sowie im medizinischen und biologischen Bereich für die Qualität von pharmazeutischen Pillen [4], deren Rauheit die Wirkung der Pillen beeinflusst, bei Injektionsnadeln für die Blutentnahme [5] oder bei Biomaterialien für orthopädische Implantate [6]. Für die oben genannten Anwendungen kann die Speckle-Messtechnik (genauer die Speckle-Interferometrie [7] (siehe **Abb. 1**)) eingesetzt werden da sie viele Industrieanforderungen erfüllt: sie arbeitet berührungslos und zerstörungsfrei, ist kostengünstig, weist eine hohe spektrale Auflösung auf und besitzt aufgrund der geringen Messzeit Echtzeitfähigkeitspotenzial. Die Speckle-Interferometrie ermöglicht die Bestimmung der Oberflächenrauheit durch die Charakterisierung der Speckle-Eigenschaften.

Für die Rauheit gibt es keine einheitliche Definition. Nach DIN 4760 [8] weicht eine gefertigte

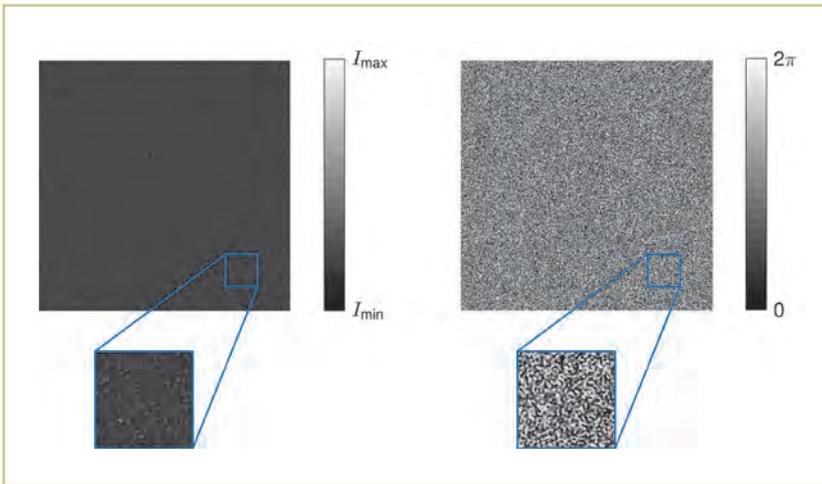


**Abb. 2:** Gestaltabweichungen von rauen Oberflächen unterschiedlicher Ordnung nach DIN 4760 [Quelle: F. Brändle, MST]

Aufgrund der MST-Patentstrategie verfügt Professor Koch auf den Gebieten der Messsystem- und Sensortechnik über zahlreiche Patente und setzt sich besonders für den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis ein. Aus den Forschungsschwerpunkten von Professor Koch wird im Folgenden das Gebiet der Speckle-Messtechnik vorgestellt.

Die genaue Kenntnis der Oberflächenrauheit ist in vielen industriellen Anwendungen notwendig: z.B. in der Optikindustrie bei der Überwachung der Herstellungsprozesse optischer Komponenten [1], bei Solarzellen, deren Wirkungsgrad von der mikroskopischen Struktur der Oberfläche abhängt [2], in der Materialanalyse, wo die Ermüdung ei-

ner Oberfläche (Ist-Oberfläche) von ihrer Idealform ab und setzt sich aus der Summe der geometrischen Abweichungen zusammen (siehe **Abb. 2**). Zur ersten Ordnung (Formabweichung) zählen Abweichungen in der Geradheit, Ebenheit und Rundheit, z.B. verursacht durch Abnutzung. Die Welligkeit (zweite Ordnung) ist eine wellenförmige Abweichung der Form, die periodisch auftritt, verursacht durch Störungen im Produktionsprozess, wie z.B. Werkzeugvibrationen. Die dritte Ordnung stellt die sogenannte periodische Rauheit dar, welche z.B. aus einem Drehprozess, der eine periodische Struktur auf der Oberfläche erzeugt, resultiert. Die vierte Ordnung ist die aperiodische Rauheit, die z.B. durch Sandstrahlen entsteht, wodurch sich eine stochastische Struktur ergibt. Mit der



**Abb. 3:** Typisches Speckle-Muster: Intensitätsverteilung (links), Phasenverteilung (rechts) [Quelle: F. Brändle, MST, nach [7]]

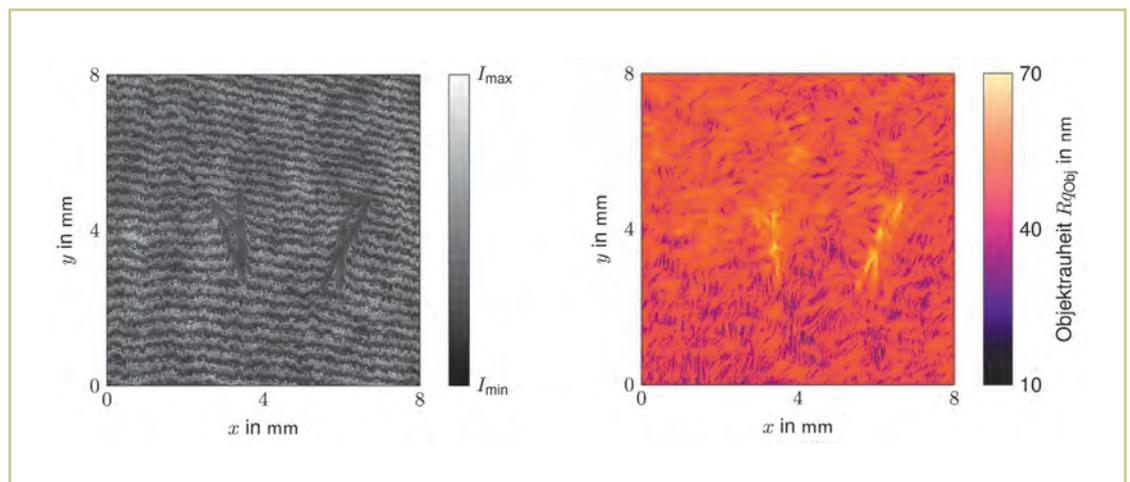
Speckle-Messtechnik lassen sich mikroskopische Rauheiten untersuchen, die in **Abb. 2** der vierten Ordnung zuzuordnen sind.

Um eine Oberfläche zuverlässig charakterisieren zu können, kommen in der Industrie genormte Rauheitsparameter zum Einsatz. Zu den gebräuchlichsten Parametern gehört die quadratische mittlere RMS (Root Mean Square) Rauheit  $R_q$  [9], um signifikante Abweichungen auf der Oberfläche zu erkennen und die RMS-Höhe  $S_q$  [10], die die Topografie einer rauen Oberfläche statistisch bestimmt und stabiler als  $R_q$  ist. Werden kohärente Lichtwellen, z. B. eines Lasers, an einer rauen Oberfläche (mit Rauheit in Größenordnung der Wellenlänge  $\lambda$ ) reflektiert (auch Wavelets genannt), entstehen sogenannte Laser-Speckles. Das Licht wird durch die mikroskopische Rauheit der Oberfläche gestreut. Daraus ergeben sich relative Verzögerungen in den Wavelets, die zu einer Phasenänderung führen. Wenn nun diese Wavelets interferieren, erhält der Beobachter die typische körnige

Struktur [11]. Die Intensität wird abrupt variiert und infolgedessen erscheinen helle und dunkle Flecken („Speckles“), verursacht durch die konstruktive bzw. destruktive Interferenz der Wavelets. Da es sich bei der mikroskopischen Rauheit der Oberfläche um eine zufällige Verteilung handelt, ist auch die Intensitätsverteilung zufällig verteilt (siehe **Abb. 3**).

Seit 1998 besitzt der MST eine große Expertise im Bereich der optischen Messtechnik, insbesondere der Speckle-Methoden, wobei die Entwicklung neuartiger Methodiken und die Realisierung innovativer Messaufbauten für präzisere Messergebnisse in verschiedensten Anwendungen im Vordergrund steht.

In [12] wurde eine Kartierung der rauen Oberfläche mittels räumlicher Lichtmodulatoren realisiert, um z. B. Defekte oder Fehlstellen zu lokalisieren. Dabei wird die Streifensichtbarkeit im Interferogramm, das aus der Überlagerung der zwei Lichtwellen im Interferometer resultiert, bestimmt. Auf dem räumlichen Lichtmodulator, der an der Stelle des Referenzspiegels platziert wird (siehe **Abb. 1**), findet eine Modellierung und Variation der Referenzrauheiten  $R_{q_{ref}}$  statt. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Oberflächenrauheit und Streifensichtbarkeit kann die zu untersuchende Rauheit  $R_{q_{obj}}$  gefolgert werden. Um die in [12] entwickelte Methodik auch auf reale Messungen (gekrümmte Interferenzstreifen) anzuwenden, wurde die Algorithmik um eine Richtungsbestimmung der Interferenzstreifen erweitert, was die laterale Auflösung und somit die Detektion von Oberflächenanomalien verbessert und eine räumliche Zuordnung der Defekte auf der rauen Oberfläche ermöglicht [13]. Die verbesserte Rauheitskartierung ist in **Abb. 4** veranschaulicht.



**Abb. 4:** Verbesserte Rauheitskartierung mittels eines räumlichen Lichtmodulators: Gemessenes Interferogramm ( $R_{q_{ref}} = 5 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 488,0 \text{ nm}$ ) (links), zugehörige Rauheitskarte (rechts) [Quelle: F. Brändle, MST, nach [13]]

Die Entwicklung einer industrietauglichen optischen Methode mit Berücksichtigung von Depolarisationseffekten bei sub-mikrometer rauen Oberflächen war Gegenstand der Forschung in [14, 15, 16]. Der Speckle-Effekt und eine Änderung der Polarisation treten auf, wenn Licht auf eine raue Oberfläche trifft. Hierdurch ergeben sich sogenannte depolarisierte Speckles, die veränderte Speckle-Eigenschaften besitzen und die eine Anpassung der Auswertungs-Algorithmen erfordern.

Eine Abbildung der physikalischen Realität von Experimenten erfordert damit eine Berücksichtigung der Depolarisation durch die raue Oberfläche. Um die erzielte Verbesserung durch die Berücksichtigung der Depolarisation zu verdeutlichen, wurde die neuartige Methode mit einem bestehenden Verfahren zur Rauheitsmessung verglichen. Die Forschung in [14, 15, 16] war Grundlage für das in [7] entwickelte polarisationsempfindliche Speckle-Interferometer für die Rauheitsmessung. Mithilfe einer Viertelwellenlängenplatte, die zur Hälfte im Referenzstrahl des Messaufbaus in **Abb. 1** platziert wurde, konnten die Depolarisationseffekte mit in Betracht gezogen werden.

Die Verbesserung durch die Depolarisationsberücksichtigung (Rauheitswerte der bestehenden Methode (keine Depolarisation) verglichen mit Rauheitswerten der entwickelten Methode) wurde hierbei für beide Wellenlängen sichtbar. Für den Fall kleiner Rauheiten ( $\lambda_1 = 488,0 \text{ nm}$ :  $Rq_{\text{Tast}} = 37 \text{ nm}$  und  $\lambda_2 = 632,8 \text{ nm}$ :  $Rq_{\text{Tast}} = 61 \text{ nm}$ ) sind die Schätzungen der bestehenden Rauheitsmethode zu groß, während die Werte der neuartigen Methode gut mit den Werten des Tastschnittgeräts übereinstimmen. Die Simulationsergebnisse der entwickelten Methode (Messaufbau und raue Oberflächen nach Modell in [7] simuliert) bestätigen diesen Trend. Somit liegt der Anwendungsbereich der Methode für sub-mikrometer Rauheiten zwischen ca. 20 nm bis 60 nm, wobei durch eine Weiterentwicklung des Messaufbaus eine Erweiterung denkbar ist.

In einem weiteren Forschungsprojekt wurden verschiedene Messaufbauten für die industrietaugliche Shearografie entwickelt. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die bidirektionale Shearografie für die 2D-Charakterisierung der Oberflächendehnung mit einer verbesserten Lichteffizienz und einer erhöhten Robustheit [17], ein doppelt empfindliches Echtzeit-Shearografie-System [18] und ein Einblenden-Gleichweg-Speckle-Interferometer mit unbegrenzter Scherung (Quasi-4f-Abbildungssystem) [19] gelegt.

Darüber hinaus wurde für die medizinische und biologische Anwendung eine Tiefpassfiltermethode zur Kompensation von Phasenaberrationen in der Digitalen Holographischen Mikroskopie (DHM) entwickelt und unter anderem anhand einer Messung eines menschlichen Blutausstrichs bestätigt [20]. Durch die Entwicklung eines interferometrischen Multibeam-Array-Mikroskops für die Single-Shot-Hochdurchsatz-Phasendiagnostik (und der Verifizierung durch Messung von Erythrozyten (in vitro) und von ungefärbten Pankreaskrebs-Gewebeschnitten einer Maus) konnte ein höheres zeitliches Auflösungsvermögen als mit der computergestützten Beleuchtungsmikroskopie erzielt werden und somit die Beschränkungen der konventionellen DHM überwunden werden, was für eine biomedizinische Anwendung von Bedeutung ist [21].

Die derzeitige Forschung beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Speckle-Methode, die z. B. für den Einsatz in der Neuropathologie geeignet ist und dabei helfen kann, chronische Krankheiten besser zu verstehen. ■

## LITERATUR

- [1] G. Kloppenburg, M. Knöchelmann, und A. Wolf. „Additive Fertigung transparenter Optiken“. In: R. Lachmayer und R. B. Lippert (Hg.): „Additive Manufacturing Quantifiziert“. Springer Berlin Heidelberg (2017), pp. 163–174. DOI: 10.1007/978-3-662-54113-5\_11.
- [2] H. Mäckel, H. Holst, M. Lohmann, E. Wefringhaus, und P. P. Altermatt. „Detailed Analysis of Random Pyramid Surfaces With Ray Tracing and Image Processing“. In: IEEE Journal of Photovoltaics 6.6 (2016), pp. 1456–1465. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2601947.
- [3] P. Zuluaga-Ramírez, Á. Arconada, M. Frövel, T. Belenguer, und F. Salazar. „Optical sensing of the fatigue damage state of CFRP under realistic aeronautical load sequences“. In: Sensors (Basel, Schweiz) 15.3 (2015), pp. 5710–5721. DOI: 10.3390/s150305710.
- [4] F. Salazar Bloise, L. Aulbach, M. Jakobi, und A. W. Koch. „Rauheitsmessung an pharmazeutischen Tabletten mittels Angularer Speckle-Korrelation“. In: tm – Technisches Messen 81.6 (2014), pp. 289–295. DOI: 10.1515/teme-2014-0403.
- [5] K. Yoshida, M. Watanabe, und H. Ishikawa. „Drawing of Ni-Ti shape-memory-alloy fine tubes used in medical tests“. In: Journal of Materials Processing Technology 118.1-3 (2001), pp. 251–255. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00930-X.
- [6] J. Leena, V. Arumugham, R. P. Rajesh, und C. V. Muraliedharan. „Nanoscale Surface Characterization of Ceramic/Ceramic Coated Metallic Biomaterials Using Chromatic Length Aberration Technique“. In: MAPAN 31.3 (2016), pp. 231–239. DOI: 10.1007/s12647-016-0173-5.
- [7] F. Brändle. „Polarization-Sensitive Speckle Interferometer for Roughness Measurement“. Shaker Verlag (Reports on Measurement and Sensor Systems) (2023), ISBN: 978-3-8440-9032-1.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 4760: Gestaltabweichungen; Begriffe; Ordnungssystem. Beuth Verlag GmbH, Juni 1982.

- [9] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009. Beuth Verlag GmbH, Juli 2010.
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe, Definitionen und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2:2021). Beuth Verlag GmbH, Dezember 2021.
- [11] R. Jones und C. Wykes. „Holographic and Speckle Interferometry. A discussion of the theory, practice and application of the techniques“. Cambridge Univ. Press (Cambridge studies in modern optics) (1989), ISBN: 9780521348782.
- [12] L. M. Aulbach, F. Pöller, M. Lu, S. Wang, und A. W. Koch. „Optical mapping of surface roughness by implementation of a spatial light modulator“. In: E. Novak und J. D. Trolinger (Hg.): „Applied Optical Metrology II“. San Diego, US: SPIE (2017), pp. 103730E (1–7). DOI: 10.1117/12.2270548.
- [13] F. Pöller, L. M. Bilgeri, F. Salazar Bloise, M. Jakobi, S. Wang, J. Dong, und A. W. Koch. „Rauheitsauswertung mit hoher lateraler Auflösung mittels räumlicher Lichtmodulatoren“. In: *tm – Technisches Messen* 86.s1 (2019), pp. 22–26. DOI: 10.1515/teme-2019-0042.
- [14] F. Pöller, F. Salazar Bloise, M. Jakobi, S. Wang, J. Dong, und A. W. Koch. „Non-Contact Roughness Measurement in Sub-Micron Range by Considering Depolarization Effects“. In: *Sensors (Basel, Schweiz)* 19.10 (2019), pp. 2215 (1–12). DOI: 10.3390/s19102215.
- [15] F. Pöller, F. Salazar Bloise, M. Jakobi, J. Dong, und A. W. Koch. „Improvement of Roughness Measurement in Sub-micron Ranges Using Contrast-based Depolarization Field Components“. In: J. Beyerer und T. Längle (Hg.): „OCM 2021 – Optical Characterization of Materials: Conference Proceedings“. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (2021).
- [16] F. Pöller, F. Salazar Bloise, M. Jakobi, J. Dong, und A. W. Koch. „Extension and Limits of Depolarization-Fringe Contrast Roughness Method in Sub-Micron Domain“. In: *Sensors (Basel, Schweiz)* 21.16 (2021), pp. 5572 (1–13). DOI: 10.3390/s21165572.
- [17] S. Wang, J. Dong, F. Pöller, X. Dong, M. Lu, L. M. Bilgeri, M. Jakobi, et al. „Dual-directional shearography based on a modified common-path configuration using spatial phase shift“. In: *Applied optics* 58.3 (2019), pp. 593–603. DOI: 10.1364/AO.58.000593.
- [18] J. Dong, S. Wang, M. Lu, M. Jakobi, Z. Liu, X. Dong, F. Pöller, et al. „Real-time dual-sensitive shearography for simultaneous in-plane and out-of-plane strain measurements“. In: *Optics express* 27.3 (2019), pp. 3276–3283. DOI: 10.1364/OE.27.003276.
- [19] J. Dong, S. Wang, A. K. Yetisen, X. Dong, F. Pöller, N. Ong, M. Jakobi, et al. „Shear-unlimited common-path speckle interferometer“. In: *Optics letters* 45.6 (2020), pp. 1305–1308. DOI: 10.1364/OL.382893.
- [20] J. Dong, A. K. Yetisen, X. Dong, F. Pöller, M. Jakobi, Z. Liu, F. Salazar Bloise, et al. „Low-pass filtering compensation in common-path digital holographic microscopy“. In: *Applied Physics Letters* 117.12 (2020), pp. 121105 (1–5). DOI: 10.1063/5.0019209.
- [21] J. Dong, A. K. Yetisen, C. Zhao, X. Dong, F. Brändle, Q. Wang, M. Jakobi, et al. „Single-Shot High-Throughput Phase Imaging with Multibeam Array Interferometric Microscopy“. In: *ACS Photonics* 8.12 (2021), pp. 3536–3547. DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c01124.

## KONTAKT



## TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Computation, Information and Technology  
 Department of Electrical Engineering  
 Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik  
 Arcisstraße 21, 80333 München  
 Tel.: +49 (0)89 289-23344, Fax: +49 (0) 89 289-23348  
 a.w.koch@tum.de

[www.ee.cit.tum.de/mst](http://www.ee.cit.tum.de/mst)

# DRUCKSENSOREN FÜR ANSPRUCHSVOLLE WASSERSTOFF-ANWENDUNGEN IN EXPLOSIONSGEFÄHRDETEN BEREICHEN

Wasserstoff wird als alternative Energiequelle immer relevanter, sei es in der Industrie oder der Mobilität. Aber auch in der Energie-Infrastruktur, beispielsweise in Hochdruckspeichern, finden sich zahlreiche Applikationen. STW bietet für diese Anwendungen geeignete Drucksensoren mit ATEX-Zertifizierung.

Die Wasserstoff-Drucksensoren von STW basieren auf langjähriger Entwicklungserfahrung im Bereich leistungsfähiger und robuster Sensorik. Das Herzstück der Sensoren bilden robuste Druckmesszellen aus Edelstahl, die hochpräzise und hochauflösende Drücke bis zu 3000 bar erfassen können.

## Besondere Anforderungen bei der Druckmessung von Wasserstoff

Wasserstoff ist eines der anspruchsvollsten Medien für die Drucksensorkonstruktion. Ohne Gegenmaßnahmen kann das Gas in und durch Materialien, einschließlich Metalle, diffundieren, wodurch die Genauigkeit der Sensoren allmählich nachlässt und es zu Fehlfunktionen kommen kann. Gleichzeitig kann das Eindringen von Wasserstoff in ein Material zu dessen Versprödung und einer Beeinträchtigung seiner strukturellen Integrität führen. Um diesen Effekten vorzubeugen, hat STW ver-

stärkte Druckmesszellen-Designs mit Substraten aus wasserstoffunempfindlichen Materialien in Kombination mit widerstandsfähigen, aber hochempfindlichen Funktionsschichten entwickelt. Die darauf aufbauenden innovativen Sensoren verfügen zudem über die notwendige ATEX-Zertifizierung für die Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen.

Das STW-Knowhow für Anwendungen in EX-Schutzzonen macht die Drucksensoren zur richtigen Wahl in Hochdruck-Applikationen, in denen eine ATEX-Zertifizierung oftmals unabdingbar ist. Die langjährige Erfahrung in der Entwicklung entsprechend zertifizierter Sensoren, beispielsweise zur Druckerfassung in Gasflaschen, sowie ein auf die Anforderungen von Komponenten für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen abgestimmter Qualitätsmanagementprozess, sprechen für die Sensorik der Spezialisten aus Kaufbeuren. ■



## KONTAKT

### SENSOR-TECHNIK WIEDEMANN GMBH

Am Bärenwald 6  
87600 Kaufbeuren  
[www.stw-mm.com](http://www.stw-mm.com)

## SMX.igs-e – der smarte Neigungs- und Gyrosensor

Inertial Measurement Unit (IMU) ermöglicht erhöhte Stabilität dank Datenfusion

- IMU-Funktionalität, 6-Degree-of-Freedom Sensor (6DoF)
- Ausgabe von ein- oder zweidimensionalen Neigungswerten ( $\pm 90^\circ$ ,  $360^\circ$ )
- Konfigurierbare Tiefpassfilter und zusätzlicher Kalman-Filter zur Datenfusion für erhöhte Genauigkeit bei Bewegung
- Messbereich und Protokoll (CAN, CANopen, SAE J1939) sind frei wählbar
- Schutzklasse IP6K9K für den robusten Einsatz
- Voller Support der STW open-source Software-Plattform openSYDE zur einfachen Inbetriebnahme und Systemintegration

Funktional  
sichere  
Sensorvariante  
(SIL2 / PL d)  
ab Q3/2024  
verfügbar



SMX.igs-e

**STW** Making mobile machines perform.

Sensor-Technik Wiedemann GmbH

Am Bärenwald 6 • 87600 Kaufbeuren • Deutschland • [www.stw-mm.com](http://www.stw-mm.com)

AGRI TECHNICA Hannover

12. - 18.11.2023 - Halle 15, Stand G50

# STRATEGISCHE PARTNERSCHAFT SENSORIK E.V. (SPS)/CLUSTER SENSORIK

Stefanie Fuchs, Matthias Streller



**Strategische Partnerschaft Sensorik e.V. ist mehr als nur Netzwerken:  
Technologieentwicklung interdisziplinär und crosssektoral**

Hinter dem Potenzial von Sensorik und Messtechnik als „Enabling Technology“ stecken und wirken Menschen. Deren Kompetenzen über die eigenen Organisationen und Branchengrenzen hinaus zu verzahnen und sichtbar zu machen, steht im Fokus des bayerischen Sensorik-Netzwerks. Gemeinsam mit den gut 80 Mitgliedern aus Wirtschaft und Wissenschaft „Smart Sensor Systems“ in interdisziplinären Kooperationen zu entwickeln und zu realisieren, ist das Ziel des gut 20-köpfigen Netzwerk-Teams mit Sitz in Regensburg. Ebenso facettenreich wie die Branche Sensorik ist auch das Kompetenzspektrum dieses Teams. Egal ob tiefes technologisches Know-how, Methodenkompetenz, Erfahrung im Bereich Personal- und Organisationsentwicklung oder Öffentlichkeitsarbeit und Personalmarketing gefragt sind – die Angebote gehen über klassisches Netzwerken hinaus, sie adressieren sämtliche operative und strategische Fragestellungen von Unternehmen. Die Ergebnisse der Vernetzung regionaler Expertise – Prototypen, Konzepte, Ansätze für neue Geschäftsmodelle – macht das Clusterteam als bayerische Leuchttürme zudem als Sprachrohr der Branche auch international sichtbar.

Als Trägerverein des bayerischen Clusters Sensorik gibt die Strategische Partnerschaft Sensorik e.V. (SPS) seit über 15 Jahren international führenden, hoch innovativen Unternehmen und Institutionen ein Dach. Sie bündelt die Sensorik-Kompetenz, um aktive Wirtschaftsförderung für die Branche zu betreiben und ihr als Sprachrohr der Branche auch ein Gesicht auf internationalem Parkett zu geben. Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik sind für das regionale Sensorik-Netzwerk wichtige ergänzende Schnittstellen hin zu anderen Technologien, Branchen und Sektoren, aber auch Geschäftsfeldern. Das Cluster Sensorik repräsentiert die Branche auch in übergreifenden bayerischen Initiativen wie der Bavarian Chips Alliance. Leitlinien für ein technologisches Roadmapping und politische Handlungsempfehlungen liefert das Netzwerk in Form von wissenschaftlichen Studien sowie quantitativen und qualitativen Analysen. Aktivitäten finanziert das Sensorik-Netzwerk durch Fördermittel der Cluster-Offensive Bayern des Bayerischen Wirtschaftsministeriums, Vereinsbeiträge der Netzwerk-Mitglieder und weitere Fördergelder aus Projekten auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene.



**Ganzheitlicher Blick auf Technologieentwicklung**

Das Netzwerkmanagement konzentriert sich aktuell in der Zusammenarbeit mit Mitgliedern und Partnern auf interdisziplinäre und crosssektorale Ansätze unter dem Motto „Smart Sensor Systems – Mensch Technik Organisation“. Der ganzheitliche Blick auf Technologieentwicklung, Implementierung und -nutzung steht dabei an oberster Stelle: Neben technischen Faktoren sind ökonomische, soziale, ökologische und ethische Aspekte von Bedeutung. Technologischer Fortschritt soll die Bedürfnisse von Menschen, Organisationen und Regionen gleichermaßen adressieren. Die Cross-Cluster-Projekte des Netzwerks geben den Impuls, das hohe Potenzial für neue nachhaltige, technologiebasierte Lösungen auszuschöpfen.

Das Netzwerkmanagement hat bereits über 220 Innovationsprojekte im Bereich Sensorik mit einem Volumen von über 55 Millionen Euro zwischen den Netzwerk-Akteuren initiiert. Technisches Fachwissen trifft hierfür auf Netzwerk-Know-how in der Regensburger Geschäftsstelle: Die Expertise der 100%igen Tochter Sensorik-Bayern GmbH als langjähriger Forschungs- und Entwicklungspartner schätzen und nutzen die Mitglieder: In sämtlichen Bereichen der Sensortechnologien wie auch bei der Entwicklung von Elektronikhardware, Firmware und Prototypenserien sowie der Miniaturisierung und Optimierung bestehender Systeme stellt die Sensorik-Bayern GmbH für sie eine zusätzliche Ressource dar.

Das nachhaltige Wirken des Netzwerkmanagements haben externe Begutachtungen und Evaluierungen kontinuierlich bestätigt, jüngst im Jahr 2023. Bereits 2014 prämierte das Bundesministerium für Arbeit und Soziales die SPS als „Innovatives Netzwerk“ für Aktivitäten im Bereich der Fachkräftesicherung. Seit 2015 trägt das Sensorik-Netzwerk das Silber-Label, das europäische Qualitätssiegel der European Cluster Excellence Initiative (ECEI) für Netzwerkarbeit. 2021 folgte der „Personalmanagement Award“ auf Bundesebene im Bereich „HR Digital“.

**Was zeichnet unser Sensorik-Netzwerk aus?**

- Smart People for Smart Technology: Gemeinsam Trends und Technologien identifizieren, bewerten und neue Lösungen realisieren
- Gesamtheitliches Denken: Angebote für die Entwicklung von „Mensch – Technik – Organisation“
- „Vom Sensor bis in die Cloud“: Know-how entlang der Datenwertschöpfungskette
- Lernen von- und miteinander auf Augenhöhe: Austausch von Expertise und Wissen aus der betrieblichen Praxis in vertrautem Rahmen
- Erreichbarkeit: kurze Wege für gemeinsamen langfristigen Erfolg
- Regionale Kompetenz wird international sichtbar



**„Smart People for Smart Technology – gemeinsam Trends und Technologien bewerten und neue Lösungen realisieren“**

Rund 200 Veranstaltungen pro Jahr bieten Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik die Möglichkeit, sich unter dem Dach des Sensorik-Netzwerks auszutauschen. Ursprung aller Aktivitäten und Services sind dabei aktuelle Herausforderungen, Bedarfe und Interessen der Netzwerkmitglieder. Branchenspezifische Insights geben Sensorik-Experten u.a. in den Technologieforen, Praxisvorträgen und Exkursionen. In Seminaren und Workshops vermittelt das Netzwerk technologiespezifisches Fachwissen und fachübergreifendes Know-how für die betriebliche Praxis. Besonderes Gewicht liegt auch hier auf dem Austausch von Praktiker zu Praktiker und ihrem Lernen von- und miteinander auf Augenhöhe. „Vom Sensor bis in die Cloud“: Dieses Kompetenzspektrum entlang der (Daten-)Wertschöpfungskette ist im Netzwerk

vorhanden und bietet die Basis für neue technologische Lösungsansätze. Es braucht aber auch den Raum, damit „Smart People“ gemeinsam Trends und Technologien bewerten und neue smarte Lösungen realisieren können. Den erforderlichen vertrauten Rahmen hierfür bietet das Netzwerk seinen Akteuren.

Das Netzwerkmanagement versteht sich auch als Sprachrohr der Branche: Es betreibt nachhaltige Öffentlichkeitsarbeit und stärkt die Außenwahrnehmung der bayerischen Sensorik auf Landes-, Bundes und internationaler Ebene u.a. bei Kongressen, Messen oder Delegationsreisen. Regelmäßig erfährt die DACH-Region durch das monatlich erscheinende Sensorik-Magazin sowie in sozialen Medien aktuelle Informationen über Hightech-Produkte und Innovationen aus dem bayerischen Netzwerk. Mit einem großen Gemeinschaftsstand präsentiert das Netzwerk sich mit seinen Mitgliedern und ihren aktuellsten Entwicklungen auf der Messe SENSOR+TEST der internationalen Sensorik-Fachwelt.

**Perspektive „arbeiten, lernen und leben in Bayern“: Sensorik als attraktives, nachhaltiges Beschäftigungsfeld**

Wachsender Fachkräftebedarf ist auch für bayerische Unternehmen eine der größten Herausforderungen. Auch im Personalmarketing unterstützt das Netzwerkmanagement daher die Branche. In zielgruppenorientierten Netzwerk-Formaten können Vertreter der Mitgliedsunternehmen potenzielle Fachkräfte persönlich kennenlernen und Karrie-



remöglichkeiten vorstellen. Greifbar wird die Faszination Sensorik für Studierende, Absolventen oder auch Berufserfahrene bei der jährlichen Sensorik Summer School. Arbeitgeber und Arbeitnehmer bringt das Sensorik-Netzwerk daher an einen Tisch bzw. in einen Meeting-Raum oder in ein Labor, zeigt mit der mehrtägigen Tour durch Bayern auch internationalem Publikum, wie viel Hightech auch in entlegeneren Regionen zu finden ist. Das Cluster vertritt seine Mitglieder zudem mit einem Gemeinschaftsstand regelmäßig bei Jobbörsen, Hochschul- bzw. MINT-Karrieremessen und relevanten Recruiting-Events in Ergänzung zur Online-Jobwall.

### Potenziale der Sensorik durch Cross-Cluster-Kollaborationen heben

Zahlreiche Cross-Cluster-Projekte in den vergangenen Jahren zeigen, wie Sensorik als Enabling Technology in andere Branchen und Bereiche wirken kann. Eine neue Generation von Leiterplatten – biobasiert bzw. biologisch abbaubar, individuell anpassbar bzgl. ihrer elektrischen sowie mechanischen Eigenschaften – war z.B. Gegenstand des Projekts **NextGenPCB** der bayerischen Cluster Sensorik und Neue Werkstoffe, die damit Gedanken der bayerischen Bioökonomiestrategie operativ aufgriffen. Best-Practice-Lösungen im Netzwerk haben gezeigt: Werden ökologische Gesichtspunkte bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt, entstehen Vorteile auch auf ökonomischer und funktionaler Ebene.

Die Expertise aus den Welten Materialien und Sensorik hat die SPS mit dem bayerischen Cluster MAI Carbon im Cross-Cluster-Projekt **Smart Composites** im Jahr 2022 gebündelt. Sensorik lässt sich mittlerweile einfach in die Faserverbundwerkstoffe integrieren – smarte Materialien für eine digitale und intelligente Welt entstehen. Die Integration neuer und leistungsfähigerer Sensorik bedeutet im Bereich der Produktion für Faserverbundwerkstoffe sinkende Kosten und steigende Wettbewerbsfähigkeit der Materialien. Aber auch neue Einsatzfelder haben die Cluster in ihrer Zusammenarbeit identifiziert und pilotiert mit Hilfe der Sensorik-Bayern GmbH, u. a. im Hochleistungssport.

Der Einsatz künstlicher Intelligenz ist ein branchenübergreifendes, unumgängliches Thema. Insbesondere in der Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz im und am Sensor liegt hohes Potenzial. Sensorik ermöglicht die Etablierung neuer Geschäftsmodelle und eine Entwicklung der Unternehmen weg vom Hardware-, hin zum Informationslieferanten. Seit 2020 engagiert sich

das Netzwerk daher mit dem Cluster Mobility & Logistics Regensburg, dem IT Sicherheitscluster e.V. und der BioPark Regensburg GmbH in der gemeinsamen **KI-Initiative AIR (Artificial Intelligence Regensburg)**. Das Sensorik-Netzwerk bringt sich hier mit dem Kompetenzschwerpunkt „Data-driven Business“ ein, u. a. mit neu entwickelten Qualifizierungskonzepten. Unternehmen integrieren neue Tools und Methoden für eine digitale Transformation in ihre Strukturen, sind dabei aber mit dem Problem konfrontiert, – oft wahllos gesammelte – Daten aufzubereiten. Nur wenn Daten zu Informationen werden, kann neue Wertschöpfung entstehen. 2024 wird geprägt sein von der Zusammenarbeit mit dem Cluster Nanotechnologie – der Fokus liegt auf dem betrieblichen Einsatz von neuer Quanteneffekt-Sensorik. Der branchenübergreifende Einsatz von Sensorik- und Messtechnik ist auch im bayerisch-österreichischen INTERREG-Projekt **SINOPES** Gegenstand.

### Bayerische Hightech-Lösungen für das kommunale Wassermanagement

Dass Cluster als Mediatoren auch bei der Bewältigung gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen wirken können, zeigt das Projekt **NUTSEN**. Angesichts der jetzt schon spürbaren Folgen der Klimakrise hat das Bundeskabinett im Frühjahr 2023 mit der Verabschiedung der Nationalen Wasserstrategie ein Zeichen gesetzt: Wasserwirtschaft soll effizient, resilient und nachhaltig gestaltet werden. Hohes Potenzial birgt die Kombination von Sensorik und aktuellen Umwelttechnologien in diesem Kontext. Schon jetzt vorausschauend digitale Lösungen im kommunalen Wassermanagement zu nutzen, kann daher ein entscheidender Schritt im Umgang mit den klimatischen Veränderungen sein. Praktikable Lösungen gibt es auch „vor der eigenen Haustür“: Bayerische Anbieter liefern bereits nutzerfreundliche Hightech-Lösungen, um Leckagen auf einfachem, schnellem Weg zu lokalisieren oder Wasserparameter zu messen, Anlagen zu überwachen oder zu steuern. Diese Lösungen sind oft nur noch nicht flächendeckend bekannt bei kommunalen Betreibern und Verwaltungen, ebenso fehlen den Anbietern oft die Kenntnisse über die konkreten Bedarfe vor Ort für das Feintuning ihrer Anwendungen. Im Projekt NUTSEN hat das Sensorik-Netzwerk mit dem bayerischen Umweltcluster alle Akteure an einen Tisch gebracht. Ein Pilotprojekt mit einer bayerischen Kommune und einem Anbieter, moderiert durch die Cluster, läuft bereits. Gemeinsam greifen die Cluster nebst dem kommunalen Wassermanagement nun zusätzlich das Thema „industrielles Wassermanagement“ auf.



**Begleitung bei der Transformation der Fahrzeugindustrie und Zulieferer**



Mit rund 350.000 Beschäftigten ist die Automotive-Branche eine Schlüsselindustrie für Beschäftigung, Wachstum und Innovation in der Region Regensburg. Das Sensorik-Netzwerk unterstützt mit dem Cluster Mobility & Logistics im Projekt **transform.r** (gefördert vom BMWK) die Branche, insbesondere kleine und mittlere Unternehmen, beim Wandel hin zur Elektromobilität. Neue Kompetenzentwicklungsangebote sollen bei der Transformation helfen, „Connected Secure Systems für Automotive“ lautet ein neues – eigens für die Branche entwickeltes – Trainingsangebot im Sensorik-Netzwerk. Die beiden Cluster etablieren zudem u. a. das Forum „Automobilwirtschaft Regensburg“, um ein gemeinsames Zielbild für die Region zu entwickeln.

**Gemeinsame Technologieentwicklung – Berater, Begleiter und Sparringspartner auf Augenhöhe**



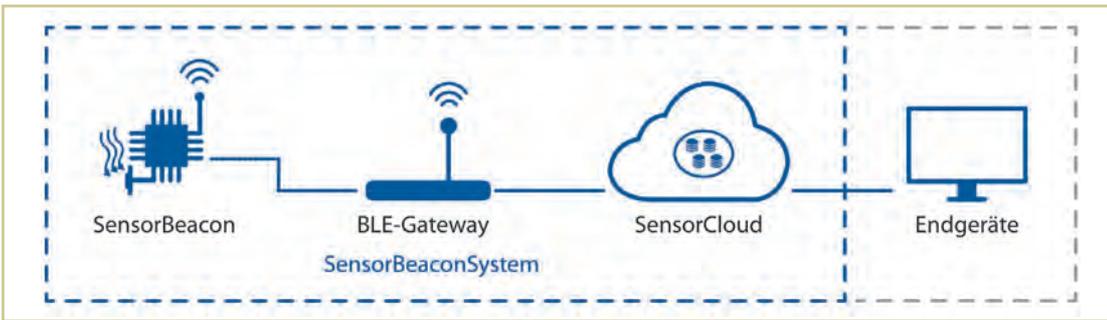
Alleinstellungsmerkmal der Strategischen Partnerschaft Sensorik e.V. ist ihre 100%ige Tochter, die Sensorik-Bayern GmbH. Das Team aus Sensorik-Experten ist mit seinem Know-how zusätzliche Ressource für Mitglieder und Partner: Kleine und mittelständische Unternehmen begleitet sie bei der Realisierung neuer Ideen mit der Entwicklung von Elektronikhardware, Firmware und Prototypenserien sowie der Miniaturisierung und Optimierung bestehender Systeme. Für Entwicklungsabteilungen großer Unternehmen ist sie Sparringspartner auf Augenhöhe, berät von der Idee bis zur Vorserie mit



tiefer Expertise im Bereich Sensortechnologien. Die Unterstützung bei Qualitätssicherung, Technologierecherchen, Machbarkeitsstudien und dem Scouting geeigneter Kooperationspartner zählt zu den weiteren Angeboten der Regensburger Ingenieure. Mehrere gemeinsame Projekte mit Netzwerkmitgliedern sind ein guter Beleg dafür, wie Hightech-Innovation gelingen kann.

Entstanden ist mit dem SensorBeacon-System u. a. **eine modulare und flexible IIoT-Entwicklungs-umgebung** in einem BMBF-geförderten Projekt. Sie lässt sich flexibel auf verschiedene Anwendungsfelder mit jeweils spezifischen Funk- sowie drahtgebundenen Sensorknoten anpassen und ermöglicht die Lagebestimmung oder die Erfassung von Beschleunigungen, Kraftmessung, (Luft-)Temperatur, Luftqualität sowie Abständen. Das System bietet Möglichkeiten zur lokalen Edge-Datenverarbeitung und Weitergabe über Industrie-Bus-Interfaces bis hin zur Modellierung digitaler Zwillinge in der Cloud mit applikationsspezifischen Auswertungen, wie Betriebsstundenzähler oder Schwellwertüberwachung mit Triggerfunktionen. Diese Lösung hat sich nun in verschiedenen Einsatzszenarien schon bewährt, u. a. im Maschinen- und Anlagenbau bzw. in der Produktion zur Zustandsüberwachung und Erhebung von Metadaten, für das Umweltmonitoring oder auch im Hochleistungssport, wo Sensorik zur Optimierung und Analyse von Trainingsdaten zunehmend an Bedeutung ge-

 <p><b>Sensoren und Sensorsysteme</b> Sensorsysteme für applikationsspezifische Sensorik, Elektronik- und Firmware-Design</p>	 <p><b>Industrial IoT</b> Cloud- und Edge-Know-how, drahtlose Datenübertragung</p>	 <p><b>Security</b> Verschlüsselte Datenübertragung in Sensornetzwerken, Lösungen für vertrauenswürdige Elektronik</p>	 <p><b>KI</b> Sensornähe Künstliche Intelligenz</p>
--	---	---	--



winnt. Besonders herausfordernd ist dies jedoch beim Kanusport. Sensoren müssen wasserfest sowie kompakt sein und zugleich präzise Daten liefern. Dem deutschen Olympioniken Hannes Aigner und seinem Trainerstab haben bayerische Sensoriklösungen die Echtzeitauswertung von Daten während der Fahrt durch den Augsburger Wildwasserkanal ermöglicht.

**Hochleistungsfähige Mikroelektronik in Kombination mit Sensorik und eingebetteter Software** sammelt und verarbeitet Prozessdaten in Industrieanlagen mit dem Ziel einer umfassenden Digitalisierung von Produktionsprozessen und Betriebsabläufen. Das BMBF-geförderte Projekt **„SiEvEI 4.0 – Sichere und intelligente Elektroniksysteme für vertrauenswürdige Elektronikprodukte in Industrie 4.0“** sorgt für den Brückenschlag von klassischer Sensorik zu KI-basierten, sicherheitsrelevanten und vertrauenswürdigen Elektroniksystemen, die dann u.a. im Bereich der kritischen Infrastruktur, für hochautomatisiertes Fahren oder auch zur Absicherung von Fertigungsumgebungen zum Einsatz kommen können. Die entwickelten Smart Secure ITEMS bilden aktuell die Basis für eine optimierte Version der BLE-Funksensorknoten.

Umwelt- und Fertigungsdaten wie Temperatur, Betriebsgeräusche von Anlagen und Maschinen, Luftfeuchte oder auch -qualität lokal zu erheben, mittels künstlicher Intelligenz (KI) zu verarbeiten, zu bewerten und im Abgleich mit Qualitäts- und Produktivitätsparametern auch in verschiedenen

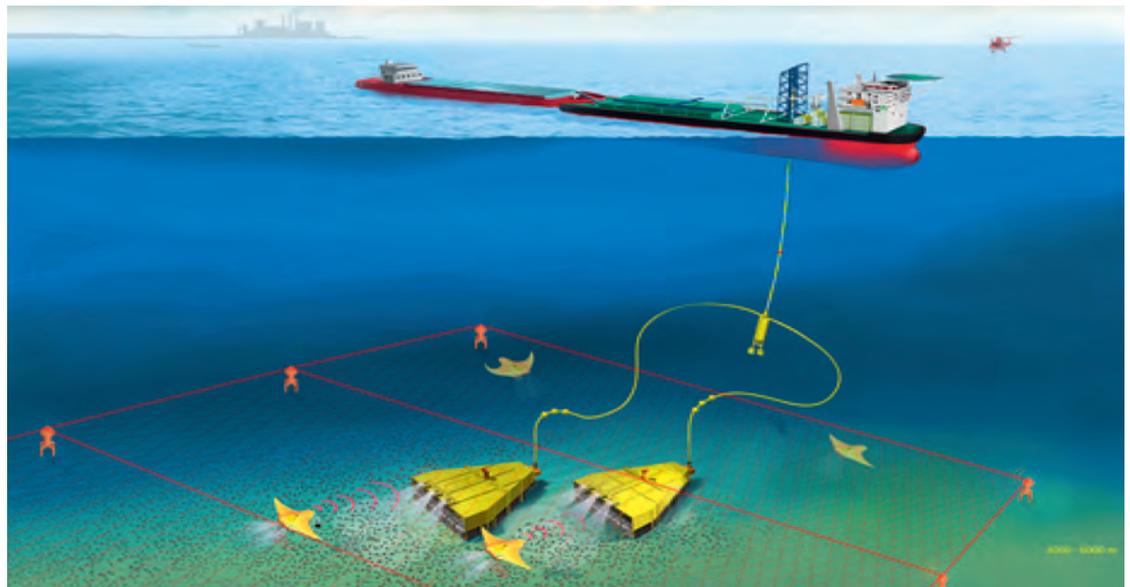
verteilten Fertigungen zu optimieren und zu verfolgen, das gibt es noch nicht. Es wäre jedoch ein Gamechanger: Komponenten- und Technologieanbieter, Systemintegratoren, sogar Endanwender erhielten zusätzliche Informationen und Transparenz. Das Projekt **AdaPEdge** (Förderung durch das BMBF) wagt den Schritt von der „Fertigung 4.0“ zur „Fertigung 4.0++“ und verspricht mehr Resilienz und Produktivität. Minderwertige oder gefälschte Materialien sollen detektierbar, Störungen im Verlauf der gesamten Wertschöpfungskette transparent und der Produktionsprozess kontinuierlich angepasst werden können. Zum Einsatz kommt hier die offene Architektur RISC-V. Die Sensorik-Bayern GmbH entwickelt hierfür ein Sensor-Mesh. Die Secure Smart Sub-Edge Modules (S<sup>2</sup>EM) erfassen und verdichten KI-basiert frei verfügbare Daten.



**Bionic RoboSkin – modulare sensorische Oberflächen für die Robotik unter rauen Umgebungsbedingungen**

Eine weitere Innovation aus der F&E-Abteilung des Clusters ist die **Bionic RoboSkin** (Förderung im BMBF-Programm „Elektronik- und Sensorsysteme für neuartige Robotikanwendungen (SensoRob)“). Die flexible Sensorhaut bildet das zentrale Element einer Roboterplattform, die unter Wasser oder in Umgebungen mit besonders rauen Bedingungen wertvolle Daten sammeln und auswerten kann, u.a. spürt sie mittels Magnetfeldmessungen me-





tallische Strukturen wie Seekabel, Versorgungsleitungen und Munition auf und kartographiert diese. Die Grundlage der Bionic RoboSkin bildet ein dreidimensionaler Textilverbund. Auf diesem textilen Träger wurden neben feuchtigkeitsbeständigen elektrischen Verbindungen für Energieversorgung und Kommunikation auch eingewebte Sensorstrukturen realisiert. Weitere Sensoren sowie die zentrale Steuereinheit des autonomen Serviceroboters wurden in Form hochkompakter Module auf den textilen Träger montiert und elektrisch mit diesem verbunden. Inspiration hierfür lieferte das Tierreich – Vorbild war der Manta-Rochen. Der Roboter-Rochen war bereits in der Ostsee bei Nienhagen im Einsatz für erste Erkundungen.

Mit Hilfe eines digitalen Zwillings lässt sich sogar die Flügelstellung dreidimensional in Echtzeit abbilden – hierdurch kann der Rochen sein Schwimmverhalten immer optimal an seine Umgebung anpassen. Dieses Know-how ist sogar für andere

Branchen interessant – z. B. die Medizintechnik. In Dresden will ein Team der Universitätsklinik das Wissen nun im Bereich der Handchirurgie bzw. bei der Entwicklung von telemedizinischen Rehamaßnahmen einsetzen. Die Sensorik-Bayern GmbH ist daher am Projekt **3DHandSens** laut Zuwendungsbescheid (gefördert durch die EKfZ-Stiftung) beteiligt. Mit der TU Dresden und dem Fraunhofer IWS entwickelt sie ein 3D-gedrucktes, an den Patienten spezifisch angepasstes Exoskelett mit integrierter, miniaturisierter Sensorik, das eine exakte Messung der Ausrichtung von Fingergliedern ermöglichen und Patienten mit Handverletzungen weiterhelfen soll.

Auch das Projekt **„DeepSea Protection“** verarbeitet die Ergebnisse aus Bionic RoboSkin: Hier wird ein multisensorisches Monitoringsystem für den produktionsbegleitenden Umweltschutz beim Tiefseebergbau entwickelt, aufgebaut und getestet. Es ermöglicht die operative Erhebung und feinskalige Verifizierung von geologischen und topographischen Daten, detaillierte Analysen zur Rohstoffverteilung und zugleich die nähere, aktuelle Untersuchung der Tiefseeökologie. Mit dem Sensordatenaggregationsmodul der Sensorik-Bayern GmbH lassen sich sensorische und telemetrische Daten der Multiparametersonden zusammenführen. Es umfasst die Anbindung an die jeweiligen Komponenten der sogenannten „Tiefsee-Kalmare“ – also des intelligenten Bodennetzwerks in Form von kleinen Wasserfahrzeugen –, die Rohdatenprozessierung und Ergebnisdatenübertragung in die Sensor-Cloud der Sensorik-Bayern GmbH, die sich schon in anderen Einsatzszenarien bewährt hat.



**KONTAKT**

**STRATEGISCHE PARTNERSCHAFT SENSORIK E.V.  
BAYERISCHES CLUSTERMANAGEMENT SENSORIK**

Stefanie Fuchs, Matthias Streller  
 Franz-Mayer-Straße 1, 93053 Regensburg  
 Tel.: +49 (0)941 630916-0, info@sensorik-bayern.de  
[www.sensorik-bayern.de](http://www.sensorik-bayern.de)



# VIBROAKUSTISCHE ZUSTANDSÜBERWACHUNG – ZUVERLÄSSIGKEIT HOCH – KOSTEN RUNTER –

AMITRONICS hat in der industriellen Automation und Überwachung eine Reihe von Innovation erzielt, die die Prozessüberwachung und -wartung maßgeblich verändern könnten. Dank des Einsatzes fortschrittlicher Technologien arbeitet AMITRONICS seit Jahren daran, Fertigungsprozesse effizienter und zuverlässiger zu gestalten, um gleichzeitig Ausfallzeiten zu minimieren. Ihr Überwachungssystem (VAM) extrahiert dabei die wichtigsten Informationen aus den Maschinen- und Anlagenschwingungen.

Das VAM-System misst mit akustischen Emissionssensoren im Ultraschallbereich. AMITRONICS entwickelt intelligente Extraktions- und Komprimierungsverfahren, um aus den großen Datenmengen wertvolle Informationen zu gewinnen. Durch multisensorische Zustandsüberwachung und schnelle Datenverarbeitung werden strukturdynamische Ereignisse in Echtzeit erkannt. Die Integration algorithmischer Intelligenz, darunter Machine-Learning Methoden zur Erkennung von

Anomalien, erhöht die Genauigkeit des Überwachungsprozesses. Die Daten werden so aufbereitet, dass sie vom Kunden direkt für übergreifende Modelle verwendet werden können. Dazu nutzt AMITRONICS vielseitige, etablierte Schnittstellen wie Digital-IO, MQTT, OPCUA, UDP/TCP und unterstützt die IT-Abteilungen bei der Integration der notwendigen Softwarekomponenten. Die Entwicklung von Qualitäts- und Ausfallmetriken erfolgt in der AMITRONICS Cloud-Infrastruktur. ■

## KONTAKT

### AMITRONICS ANGEWANDTE MIKRO- MECHATRONIK GMBH

Dr. Norbert Rümmler  
Waldmeisterstraße 99  
80935 München  
Tel.: +49 (0)89 35064-858  
norbert.ruemmler@amitronics.de  
www.amitronics.de



Angewandte Mikromechatronik GmbH  
**AMITRONICS**

## ZUSTANDSÜBERWACHUNG

SELBSTLERNENDES CONDITION  
MONITORING SYSTEM ZUR  
AUTOMATISIERTEN STRUKTUR-, PROZESS-  
UND MASCHINENÜBERWACHUNG



# WENN DER CHIP ZUM SPION WIRD



**Abb. 1:**  
Beladen der Raith Velion FIB-SEM  
mit einer Probe über die Haupt-  
schleuse. Foto: Fraunhofer EMFT /  
Bernd Müller

**Nicht jeder Detektiv schleicht nachts mit hochgeschlagenem Mantelkragen durch dunkle Hinterhöfe. Beim Kampf gegen manipulierte Chips sind eher Laborkittel und High-Tech gefragt. Forschende des Fraunhofer EMFT sind auf die Analyse von Hardware-Komponenten spezialisiert, um schädliche Manipulationen am Chip, wie etwa Hardware-Trojaner oder Fälschungen zu detektieren, welche sicherheitsrelevante Features des Chips umgehen oder weniger wirksam machen können. Dadurch fällt es potentiellen Angreifern leichter, Zugriff auf personenbezogene Daten zu erhalten oder gar Bausteine, die in sicherheitsrelevanter Infrastruktur verbaut werden, auslesen oder beeinflussen zu können. Gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Instituten und Partnern aus der Industrie arbeiten sie an einer durchgängigen Methodik zur Sicherung der Vertrauenswürdigkeit elektronischer Systeme.**

In sicherheitsrelevanten Systemen wie Maschinen, Fahrzeugen, medizinischen Geräten und kritischen Infrastrukturen sind Chips verbaut, auf denen komplexe Schaltungen mit Milliarden von Bauelementen untergebracht sind. Diese Hochleistungs-Chips sind wahre Hightech-Wunder – aber gleichzeitig auch eine Achillesferse für die Systeme, in denen sie enthalten sind: Denn technologisch versierte Angreifer haben es oft genau auf diese Chips abgesehen, um sensible Daten auszulesen oder Geräte funktionsunfähig zu machen. Um solche Manipulationen zu erkennen, ist es wichtig, nicht nur die Funktion der Schaltungen, sondern auch ihr Layout auf Herz und Nieren zu prüfen.

Die vorbereitende Präparation der Chips ist jedoch bei Strukturen und Schichtdicken im Bereich von wenigen 10 nm eine äußerst diffizile Angelegenheit. Zudem müssen alle Designregeln und Spezifikationen exakt wiedergegeben werden. Dazu ist eine Vielzahl an hochaufgelösten Bildern notwendig, die im Zuge eines Chipscans gemacht werden. Damit wird eine gesamte Abbildung des Chips in all seinen Schaltungslagen realisiert. Entscheidend ist, dass die Abbildung absolut stabil ist, da sich sonst bei der Überprüfung des Layouts Fehler einschleichen und folglich Defekte übersehen werden können.

### Hochpräzise Layouts im nm-Bereich

In mehreren vom BMBF geförderten Forschungsprojekten bündeln das Fraunhofer EMFT, die TU München, die Infineon AG sowie die Raith GmbH ihr Know-how, um Methoden zur Rückpräparation und Gewinnung von Layoutinformationen für hochintegrierte Sicherheitsschaltungen zu entwickeln. Beim Projekt SyPASS etwa ging es um die effiziente und fehlerfreie Abbildung des Layouts hochintegrierter Schaltungen mit einer Strukturgröße von nur 40 nm. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von etwa 50.000 nm. Die Forschungspartner erarbeiten neue Lösungen zum Freilegen sowie zum präzisen, rasterelektronenmikroskopischen Abbilden von Chipstrukturen. Aus diesen Bildern erzeugen sie hochaufgelöste Mosaikbilder einzelner Ebenen, die dann über mehrere Ebenen hinweg exakt aufeinander abgestimmte Layouts rekonstruieren. Ziel ist es, kleinste Abbildungsfehler automatisch zu erkennen und zuverlässig zu korrigieren.

Basierend auf dieser hochpräzisen Layoutabbildung will das Forschungsteam im Vorhaben RESEC eine Methode zur Rekonstruktion hochintegrierter Schaltungen entwickeln. Dabei erproben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler den

Einsatz moderner Machine-Learning-Methoden bei der Bildverarbeitung, Strukturerkennung und Prüfung der Schaltungsinformationen. Um ihre Methodik umfassend zu verifizieren, analysieren sie Integrierte Schaltungen unterschiedlicher Technologie, Topologie und Komplexität. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit den Entwurfsdaten sollen Hardware-Trojaner zuverlässig erkannt werden.

Ein weiterer Meilenstein in der Analyse von kleinsten Strukturgrößen bis hin zu 7nm wurde im im Projekt TRAICT realisiert. In dem von der Fraunhofer Gesellschaft finanzierten Vorhaben arbeiten mehrere Fraunhofer-Institute zusammen, um verschiedene Analysemethoden anhand eines kommerziellen 5G-Routers mit 7 nm CMOS Baustein exemplarisch in einzelnen Bereichen zu demonstrieren.

### Ein Beitrag zur technologischen Souveränität und Wettbewerbsfähigkeit

Dabei kommen speziell konzipierte Testbausteine zum Einsatz, deren Layout bekannt ist. Die gewonnenen Daten müssen von einer sehr hohen Qualität sein, um das Layout über alle zum Teil wenige 10 nm dicke Ebenen hinweg exakt zu reproduzieren. Für die Projekte sind Systeme zur nanoskaligen Präparation, Bilderzeugung und Analyse erforderlich, die durch die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) und das im Rahmen des Europäischen Strukturfonds REACT geförderte Projekt Trusted Electronics Bavaria Centers beschafft wurden. Diese werden in einem besonders geschützten, nach Common Criteria EAL6 zertifizierten Sicherheitslabor betrieben, um auch hochklassifizierte Integrierte Schaltungen für Security-Anwendungen untersuchen zu können.

Die Forschungsarbeiten tragen dazu bei, die globale Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und die technologische Souveränität Deutschlands zu fördern. Denn vertrauenswürdige Elektronik ist gerade im Kontext zur globalen politischen Lage ein zentraler Baustein, um Sicherheit, Unabhängigkeit, Innovationsfähigkeit, den Schutz geistigen Eigentums und die Stärkung der lokalen Wirtschaft sicherzustellen. ■

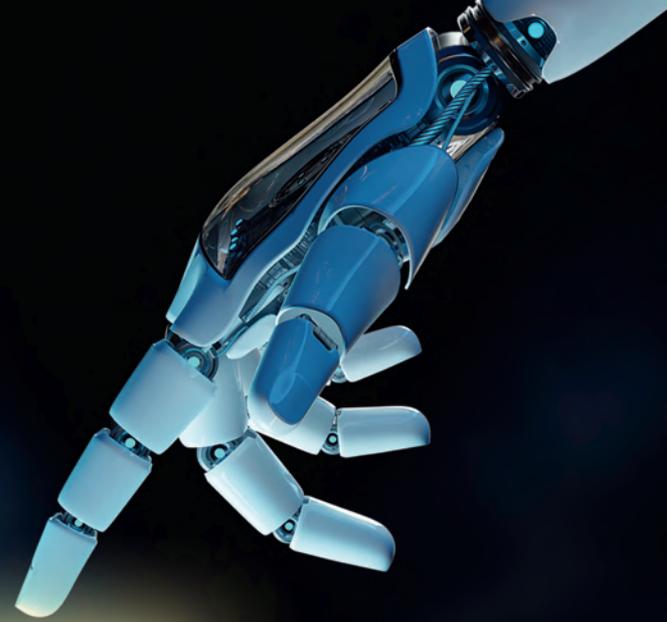
### KONTAKT

#### FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MIKROSYSTEME UND FESTKÖRPER-TECHNOLOGIEN EMFT

Hansastraße 27d, 80686 München

Tel.: +49 (0)89 54759-198, [contact@emft.fraunhofer.de](mailto:contact@emft.fraunhofer.de)

[www.emft.fraunhofer.de](http://www.emft.fraunhofer.de)



mesago

sps

12. – 14.11.2024  
NÜRNBERG

# Bringing Automation to Life

33. Internationale Fachmesse  
der industriellen Automation

Praxisnah.  
Zukunftsweisend.  
Persönlich.

Entdecken Sie die Innovationen von morgen auf der SPS 2024.

Vom einfachen Sensor bis hin zu intelligenten Lösungen, vom heute Machbaren bis hin zur Vision einer umfassend digitalisierten Industrielwelt - Die SPS bildet mit ihrem einzigartigen Konzept das komplette Spektrum der smarten und digitalen Automation ab.

Werden Sie Teil des Automation-Hotspots und finden Sie maßgeschneiderte Lösungen für Ihren Anwendungsbereich.



Mehr Informationen unter  
[sps-messe.de](https://sps-messe.de)



# MESSNETZWERKE MIT GERINGEM AUFWAND, MOBIL ODER STATIONÄR

Eine komplexe Messdatenerfassung ist oft recht preisintensiv. In Zeiten der Kostenreduzierung sind flexible Lösungen gefragt, die nach Bedarf beliebig erweitert werden können. Die digitale ALMEMO® Messtechnik bietet einfache Netzwerke für nur wenige Sensoren bis hin zur umfangreichen Messdatenerfassung. Eine zeitgemäße Datenkommunikation ist selbstverständlich. Die Technologie bietet zudem die einzigartige Möglichkeit vorhandene, analoge Sensorik zu digitalisieren und in das Messnetzwerk zu integrieren.



Als Einstieg dient der hochpräzise Allzweck-Datenlogger ALMEMO® 202S/204 mit 2 oder 4 Eingängen. Bereits wenige Geräte bilden ein funktionsreiches und zuverlässiges Messnetzwerk zur Erfassung unterschiedlichster Messgrößen. Die Geräte können wie die Sensorik fest installiert oder mobil verwendet werden. Die Messung erfolgt in Echtzeit und wird im Gerätespeicher abgelegt. Für Monitoring und Auswertung steht die Messsoftware WinControl zur Verfügung. Die Vernetzung der

Geräte funktioniert kabelgebunden, drahtlos über Bluetooth, WLAN oder Ethernet. Genauso wird die Peripherie angesteuert. Die Netzwerktechnologie ist stets im smarten ALMEMO® Stecker untergebracht und benötigt kaum Platz. Das Messnetzwerk kann über das Endgerät des Anwenders angesteuert und konfiguriert werden. ALMEMO® WLAN Module können für lokale Netzwerke als Access-Point oder über externe WLAN-Netzwerke als Client, zum Beispiel über ein Firmennetzwerk betrieben werden. Die Messeingänge an den Geräten sind für den Anschluss multifunktionaler Sensoren ausgelegt und können über den intelligenten Anschlussstecker mit Rechenfunktionen programmiert werden. Die Einsatzbereiche sind vielseitig und reichen von der Überwachung sensibler Prozesse bis zum umfangreichen Monitoring unterschiedlichster Messplätze. Für Aufgaben in Forschung und Entwicklung ist die ALMEMO® Technologie prädestiniert.



## KONTAKT

### AHLBORN MESS- UND REGELUNGSTECHNIK GMBH

Eichenfeldstraße 1  
83607 Holzkirchen  
Tel.: +49 (0)8024 300 70  
info@ahlborn.com  
www.ahlborn.com

## messen was geht ...

Datenlogger, Messgeräte und Sensoren  
für jeden Einsatz  
Universell, modular & vernetzbar

Software zur Auswertung

Akkreditiertes Kalibrierlabor  
für Temperatur, Feuchte, Strömung  
und elektrische Größen

Fragen Sie uns!  
Tel: 08024 300 70



AHLBORN

# DIE MESSTECHNIK-MESSE – THE MEASUREMENT FAIR SENSOR+TEST 2024 – MIT NEUEN HIGHLIGHTS



Die international führenden Fachmesse für Sensorik, Mess- und Prüftechnik und wichtigste Plattform für Neuheiten und Trends, **SENSOR+TEST**, öffnet vom 11. bis 13. Juni 2024 im Messezentrum Nürnberg wieder ihre Tore. Anbieter, Forscher und Entwickler aus dem Bereich der Sensorik, Mess- und Prüftechnik treffen hier auf Anwender aus nahezu allen Industriebereichen. In den Messehallen finden Experten die gesamte messtechnische Systemkompetenz für die Mess-, Prüf- und Überwachungsaufgaben aller Branchen – vom Sensor bis zur Auswertung. Begleitet wird die **SENSOR+TEST** nicht nur von einem interessanten digitalen Angebot, sondern von einigen Neuerungen, die Besucher in Nürnberg erleben dürfen. Willkommen zum Innovationsdialog!

## Neue Sonderfläche: Innovative Calibration

Das Thema „Kalibrierung“ steht bei den meisten Unternehmen derzeit ganz oben auf der Agenda, denn der Einsatz moderner digitaler und automatisierter Kalibrierkonzepte ist für die gesamte technische Industrie entscheidend geworden. Die „Innovative Calibration Area“ in Halle 2 und die Best-Practice-Präsentationen im Technologieforum während der gesamten Messe bieten Gelegenheit zum Austausch und zeigen, wie Sensoren, Messgeräte und Systeme in Zukunft mit minimalem Aufwand präzise sichergestellt werden können. Dieses Konzept dient als ideale Plattform für einen Innovationsdialog zwischen Herstellern, Kalibrierdienstleistern und Anwendern. Das Technologieforum der SENSOR+TEST bietet ein dynamisches Programm mit Best-Practice-Vorträgen am Vormittag, in denen erfolgreiche Anwendungen der Aussteller vorgestellt werden. Teilnehmer können ebenfalls an hochkarätigen Tutorials und Sondersitzungen teilnehmen, in denen die Bedeutung, die Strategien und die digitale Zukunft der Kalibrierung diskutiert werden.

## „Technology & Application Guided Tours“

Zur SENSOR+TEST 2024 wird es erstmals professionell geführte „Technology & Application Guided Tours“ zu ausgewählten Themen geben. An den drei Messtagen stehen folgende zur Auswahl: Künstliche Intelligenz in Sensorik, Mess- und Automatisierungstechnik, Mobile Testing sowie Sensorik, Mess- und Prüftechnik für die Wasserstoff-Industrie. Jede Tour findet in Deutsch und Englisch statt und gibt dem Besucher einen fundierten Überblick über sein bevorzugtes Themengebiet.

## Fachforum

Auf dem traditionellen Forum in der Messehalle präsentieren die Aussteller der SENSOR+TEST 2024 an allen drei Veranstaltungstagen neue Entwicklungen, Produkte und Anwendungsmöglichkeiten. Auch in den Fachforen werden sich zahlreiche Vorträge mit „Kalibrierung“ und mit den Themen der „Technology & Application Guided Tours“ befassen.

## Parallele Kongresse

Ihr Fachwissen können Teilnehmer auf zwei parallel stattfindenden Kongressen vertiefen: Im Mittelpunkt der 22. GMA/ITG-Fachtagung „Sensoren und Messsysteme 2024“ stehen neuartige und innovative Sensorkonzepte, Sensoren und Sensorsysteme für den industriellen Einsatz. Gerade

letztere haben in letzter Zeit besondere Aufmerksamkeit erfahren, z.B. bildgebende Sensoren, vernetzte Sensoren, kognitive Sensoren, metrologische KI-Anwendungen, spektroskopische und energieautarke Sensoren.

Die ETTC 2024 – European Test and Telemetry Conference ist die internationale Plattform für Telemetrie, Fernsteuerung, Testinstrumentierung und Datenverarbeitung für Raumfahrt, Luft- und Raumfahrt, Automotive und andere industrielle Anwendungen. Sie findet in Kooperation mit der SENSOR+TEST statt und hat eine eigene Ausstellung in Halle 2. Diese Konferenz ist nicht nur eine Veranstaltung, sie ist ein Tor zur Zukunft der Mobilität. Die ETTC 2024 bringt Experten aus der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und anderen Branchen zusammen und konzentriert sich auf neue Energien und Antriebskonzepte.

## SENSOR+TEST digital

Wie bereits in den vergangenen Jahren wird auch die kommende SENSOR+TEST einen großen digitalen Anteil aufweisen. So können sich Besucher und Interessierte rund um das Jahr über die Neuheiten und Technologien der Aussteller informieren – über Newsletter, die Website und über eine durchgängige Präsenz in den Social-Media-Kanälen. Das bietet eine hervorragende Möglichkeit zum ganzjährigen Technologieaustausch rund um die Themen von Sensorik und Messtechnik.

## Das Ausstellungsspektrum

Das Ausstellungsspektrum umfasst das gesamte Angebot von Komponenten, Systemen und Lösungen für Aufgaben in der Industrie und in zahlreichen Branchen:

- Sensorelemente, Sensoren, Sensorsysteme und sensorische Messgeräte, Dienstleistungen, Forschung und Entwicklung für Sensortechnologien
- Messtechnische Systeme, Geräte, Komponenten und Software
- Mess- und Prüftechnik für Fahr-/Flugzeugtechnik, Material- und Qualitätsprüfung, kundenspezifische Mess- und Prüfsysteme
- Labormesstechnik, Kalibrier-, Analyse- und Prüfgeräte
- Kalibriersysteme und -dienstleistungen für die Mess- und Prüftechnik

Weitere Details zur Messe und den begleitenden Veranstaltungen finden Sie unter:

<http://www.sensor-test.de>

### Besucherstruktur

Internationale Experten, Entwickler und Entscheider aus allen Branchen, in denen technisch gemessen wird, nutzen die SENSOR+TEST regelmäßig als „Werkzeugkasten“, der sie mit aktuellem Know-How versorgt, um Investitionen vorzubereiten oder zu tätigen.

### Daten und Fakten

Datum:  
**11.- 13. Juni 2024**

Ort:  
**Messegelände**

Stadt:  
**Nürnberg**

Veranstalter:  
**AMA Service GmbH**  
**31515 Wunstorf**  
**Tel.: +49 5033 9639-0**

# DRAHTLOSE SENSORSYSTEME FÜR DIE NÄCHSTE GENERATION DER DIGITALEN PRODUKTION

Christian Viehweger, Abdallah Adawy, Frank Wendler, Meriam Ben Ammar, Bilel Ben Atitallah, Ghada Bouattour, Olfa Kanoun



Information ist die Grundlage aller Steuerungen, Abläufe und Planungen. Digitale Produktionssysteme zeichnen sich dadurch aus, dass Sensorik verteilt und vernetzt arbeitet, mit zentralen Steuerungen verbunden ist, Daten aufbereitet und visualisiert und damit dem Anwender als Entscheidungsgrundlage dient. Dabei ist besonders nützlich, dass sich Sensorsysteme heutzutage energiesparsam, klein und platzsparend sowie drahtlos integrieren lassen. Die Abläufe werden dadurch wenig beeinträchtigt, Elektronik wird nachrüstbar, ermöglicht die Anbindung von älteren Systemen und durch die Drahtlosigkeit entfällt die Anschlussproblematik. Integrierbar sind alle Bereiche, vom Arbeiter über die Anlagen bis hin zum Werkstück. Die Kommunikation kann dabei über gängige Schnittstellen wie ZigBee, Bluetooth Low Energy oder WiFi erfolgen. Die Energieversorgung kann ebenfalls drahtlos ausgelegt werden, wobei sich oft induktiv gekoppelte Systeme eignen. In vielen Fällen eignet sich ebenfalls eine autarke Energieversorgung auf Basis von Energy Harvesting zur Versorgung der Systeme.

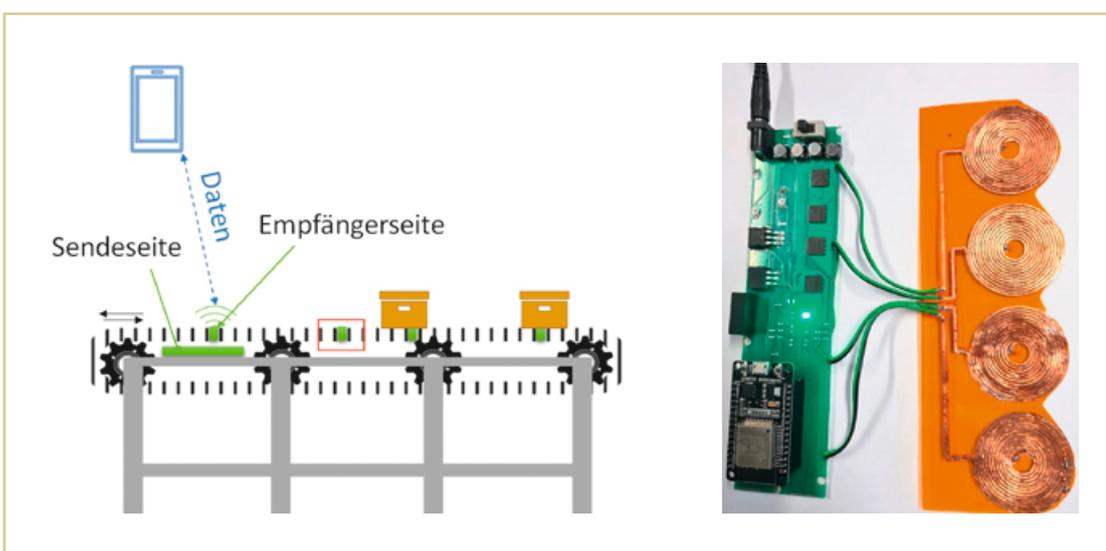
Drahtlose Sensorsysteme an Maschinen und Anlagen mit induktiver Energieübertragung (IPT) haben ein großes Potenzial für eine Vielzahl von Anwendungen im industriellen Bereich. Die Möglichkeit, verschiedene Geräte in rauen Umgebungen mit einer solchen Technik zu versorgen und ebenfalls bewegte Teile ohne Kabel anzubinden, sind entscheidende Vorteile. Batterielose Geräte sind zunehmend gefragter, weil der Faktor Wartung entfällt oder deutlich reduziert wird. Bei bewegten Komponenten gibt es in der Regel Schwierigkeiten bei der Versorgung von Sensoren oder Messwertgebern. Bei Schleifringübertragern sind Bürsten die gebräuchlichste Methode, die verwendet werden kann. Diese Bürsten müssen jedoch regelmäßig gewechselt werden, wobei ihre Lebensdauer begrenzt ist und in den meisten Fällen schlecht vorbestimmt werden kann. Auch das Material der Bürsten spielt dabei eine wichtige Rolle wodurch die Bestimmung der voraussichtlichen Austauschzeit noch komplizierter wird. Nicht zu vernachlässigen sind die Probleme mit der Erhitzung und der eventuell auftretenden Korrosion. Mit IPT-Systemen können diese Probleme überwunden werden, sie können sowohl Energie als auch Daten ohne physischen Kontakt zwischen bewegten oder rotierenden Teilen übertragen.

Ein IPT-System besteht aus zwei magnetisch gekoppelten Schaltungen, die als Sender- und Empfängerschaltungen bezeichnet werden. Der Senderkreis besteht aus einem Hochfrequenz-Gleichstrom-Wechselrichter, der an die Stromversorgung angeschlossen ist, einem Kompensationszweig und einzelnen oder mehreren Sendespulen. Der Empfängerschaltkreis hat einzelne oder mehrere Empfängerspulen, die über einen Wechselstrom-

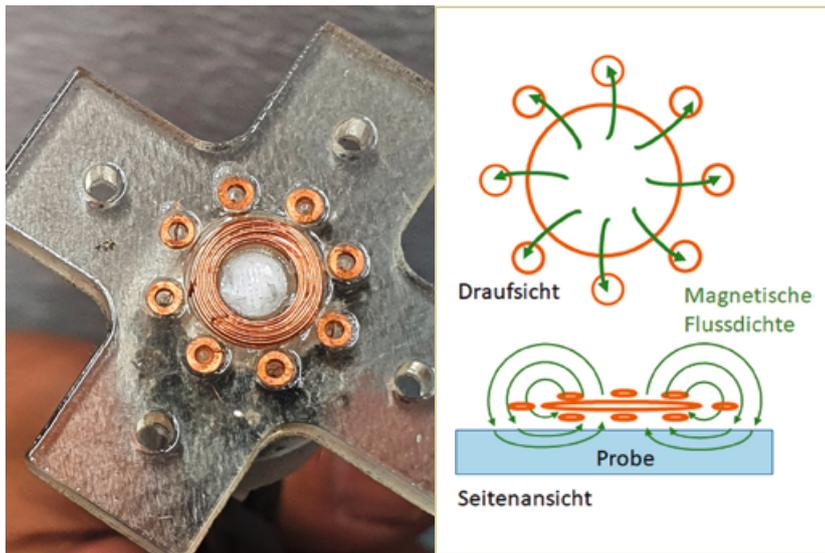
Gleichrichter und den Kompensationszweig mit der Last verbunden sind. Durch verschiedene Modifikationen und Steuerungstechniken kann diese Technologie angepasst werden, um die Leistung und die Übertragungsdistanz sowie die Effizienz der Leistungsübertragung zu erhöhen.

Die Effizienz der Leistungsübertragung ist die größte Herausforderung für diese vielversprechende Technik. Einer der Hauptfaktoren, der die Leistung und die Effizienz der Leistungsübertragung beeinträchtigen kann, ist der Versatz zwischen den Spulen von Sender und Empfänger. Das IPT-System mit mehreren Sendern kann nicht nur zur Verbesserung der Systemeffizienz eingesetzt werden, sondern bietet auch die Möglichkeit, den Empfänger frei zu platzieren.

IPT-Systeme können für verschiedene Anwendungen im Industriesektor eingesetzt werden, z. B. zur Überwachung von Förderbändern. Fördersysteme stellen das Rückgrat der Produktion dar. Sie müssen gewartet und gegen Ausfall gesichert werden. Verschiedene Überwachungssysteme können eingesetzt werden, um den Zustand eines Förderers zu bewerten. Der kritischste Punkt, mit dem die meisten von ihnen konfrontiert sind, ist die Versorgung der eingebauten Sensoren. Da sich das Förderband bewegt, können die Sensoren nicht über Drähte an die Stromversorgung oder an die Hauptsteuereinheit angeschlossen werden. Stattdessen werden z. T. wenig nachhaltige austauschbare Batterien verwendet. Eine intelligentere Technik zur Versorgung dieser Sensoren ist das IPT-System. Es können verschiedene Arten von IPT-Systemen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Spulen und einem breiten Spektrum von Betriebsfrequenzen



**Abb. 1:** Überwachungssystem für den Verschleiß von Förderbändern (links); drahtloses Energieübertragungssystem mit Sendespulen und Elektronik (rechts).



**Abb. 2:** Sensorkopf des Multi-Sensorsystems mit Zentralspule zur induktiven Spektroskopie und Ring aus Empfangsspule zu Anisotropiemessung (links); Einsatz des Sensorsystems zur kontaktlose Messung im Zugversuch (rechts).

verwendet werden. Der vertikale und horizontale Abstand zwischen Sender und Empfänger, die erforderliche Mindestleistung und die Effizienz der Leistungsübertragung sind die wichtigsten Faktoren, die bei der Entwicklung solcher Systeme berücksichtigt werden sollten. Multisenderschaltungen können den Empfänger an verschiedenen Positionen versorgen. Um den Energieverbrauch zu minimieren, kann nur die entsprechende Senderspule aktiviert werden um den Empfänger zu versorgen, während die anderen Spulen deaktiviert sind.

Neben den Produktionsanlagen lassen sich auch Werkstücke und Materialien kontaktlos überwachen, ohne Kameras einsetzen zu müssen. Wirbelstromsensorik eignet sich bestens zur prozessbegleitenden Messung von Werkstücken, deren geometrischer Eigenschaften und Materialparameter und kann damit zum Beispiel die Qualitätssicherung unterstützen.

Die Grundlage hierfür sind bestehende Erkenntnisse aus der Charakterisierung magnetischer Materialien und den Zusammenhängen zwischen mechanischen und magnetischen Eigenschaften. Da mechanische Einflüsse wie Korngröße, mechanische Spannung, Versetzungsdichte und Legierungszusammensetzung großen Einfluss auf das magnetische Verhalten der Materialien haben, bietet sich die Möglichkeit diese Einflüsse durch magnetische Messverfahren zu bestimmen. Durch die große Anzahl der Einflussfaktoren und das entstehende Problem der Effekttrennung ist die Kombination mehrerer Verfahren in diesem Feld üblich. Dennoch entstehen beim industriellen Einsatz zusätzliche Herausforderung wie die Kom-

ensation von geometrie- und positionsbedingten Abweichungen und zusätzliche Anforderungen durch die Prozessgestaltung, wie hohe Temperaturen und hohe Werkstücksgeschwindigkeiten. Um Systeme inline-fähig zu gestalten werden zwei verschiedene kontaktlose Messverfahren eingesetzt. Zum einen erfolgt eine getrennte Messung der magnetischen Permeabilität und des Abstands zum Werkstück aus dem spektralen Verhalten der zentralen Anregungsspule über induktive Spektroskopie. Zum anderen erfolgen eine Messung der magnetischen Anisotropie und eine Bewertung der Verkippungssituation über einen Ring von Senserspulen. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Analyse der Positionierung von Sensor und Werkstück und erlaubt die Kompensation von kleineren Variation durch Fehlstellung. Die magnetische Anisotropie ist hierbei stark korreliert zu mechanischen Spannungen im Material. Die magnetische Permeabilität ist beeinflusst von Änderungen im Gefüge. Daraus ergeben sich viele Anwendungsfelder, wie die störungsfreie Materialprüfung, Verschleißanalyse, Wareneingangsprüfung und kontaktlose Analyse mechanischer Spannungen.

Zusätzlich zu den Produktionsanlagen und Werkstücken lässt sich auch der Arbeiter selbst einbeziehen. Messtechnik kann genutzt werden um die Produktivität zu steigern oder die Gesundheit der Mitarbeiter zu gewährleisten, indem z. B. vor Überlastung gewarnt wird oder Gefahrensituationen erkannt werden. Piezoelektrische Energiewandler sind bestens geeignet um die dafür erforderliche körpernahe Sensorik zu versorgen, neben vielen weiteren Anwendungsfeldern zur Energieversorgung von Systemen durch Nutzung von Vibrationen.

Piezoelektrische Energiewandler können hinsichtlich ihrer Materialien unterschieden werden in Keramik, Einkristalle, Polymere und Nanokomposite. Jedes piezoelektrische Material hat seine eigenen Eigenschaften, Funktionen und Anwendungsbereiche, die für dieses Material am besten geeignet sind. Eine wichtige Rolle spielen die Designfrequenz, die Flexibilität und die Größe. Piezoelektrische Rundmembranaufnehmer eignen sich aufgrund der gleichmäßigen Schwingungsverteilung, der einfachen Montage und der Langlebigkeit besonders gut für industrielle Anwendungen. Ihre runde Form vereinfacht die Integration und bietet gleichbleibende mechanische Eigenschaften, wodurch sie vielseitig einsetzbar sind. Eine dünne piezoelektrische Schicht, die wie eine Scheibe geformt und auf einer Metallunterlage befestigt

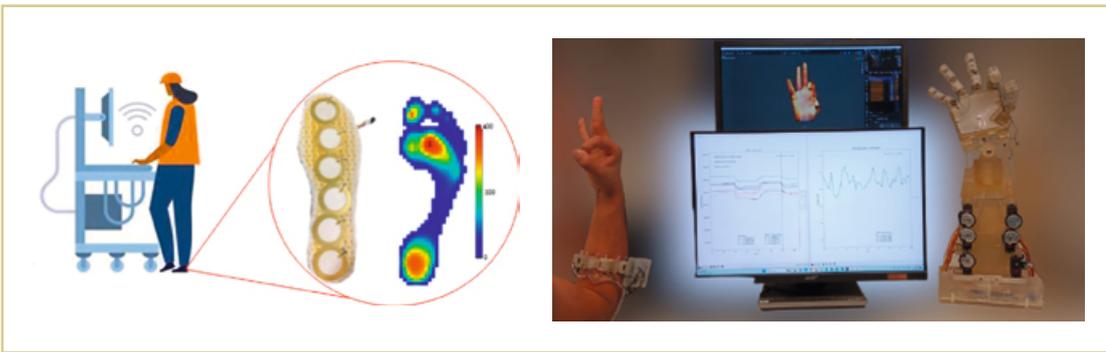


Abb. 3:

Arbeiter mit sensorischer Schuheinlage zur Messung der Kraftverteilung (links, Alamy ID: 2M5D4D9); Armband zu Steuerung von Roboterarmen (rechts).

ist, bildet die kreisförmige Membran des Wandlers. Die Elektrode dient als Kernkomponente bzw. innere Schicht, das piezoelektrische Material als Zwischenschicht und die Metallunterlage als äußere Schicht.

Für die Arbeitssicherheit können die Wandler beispielsweise in Schuhe integriert werden. Dies erfordert eine sorgfältige Auswahl der piezoelektrischen Materialien und ihrer Anordnung in der Schuhstruktur. Die Sensoren müssen so konstruiert sein, dass sie verschiedene mechanische Reize wie Druck und Vibrationen genau erfassen und quantifizieren können, die als Datenerfassungssysteme zur Überwachung der Bewegungen und der Körperhaltung eines Arbeitnehmers dienen können. Die Sensoren erfassen dynamische Informationen darüber, wie der Körper einer Person über ihre Füße mit der Umgebung interagiert.

Die erfassten Daten können die Druckverteilung, Gangmuster und Kraftvektoren beinhalten und für eine eingehende Analyse der Bewegungen und der Produktivität des Arbeiters sowie dessen Belastungen verwendet werden. Diese Informationen können zur Optimierung industrieller Prozesse, zur Verbesserung der Arbeitseffizienz und zur Verringerung des Risikos von Verletzungen am Arbeitsplatz genutzt werden. In sturzgefährdeten Umgebungen können piezoelektrische Sensoren plötzliche Änderungen der Beschleunigung oder Ausrichtung erkennen, die auf einen Sturz hindeuten. Diese Informationen können genutzt werden, um Notfallmaßnahmen auszulösen.

Die Sensorsysteme können als Schuheinlage ausgeführt werden und sich durch Energie versorgen, die aus den mechanischen Kräften gewonnen wird, die beim Gehen entstehen. Diese Energie kann zur drahtlosen Versorgung von elektronischen Geräten mit geringem Stromverbrauch, wie z. B. Sensoren oder Kommunikationsmodule, genutzt werden.

Perspektivisch werden diese Systeme nicht nur zur reinen Messung sondern auch zur Steuerung eingesetzt. So lassen sich beispielsweise über die Messung von Kräften, Dehnung oder Druck Steuerungen auslegen, mit denen man u. a. Roboterarme direkt steuern kann.

Die Professur Mess- und Sensortechnik der TU Chemnitz beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Forschung an autarken, draht- und berührungslosen Messsystemen. Diese lassen sich für eine Vielzahl an Anwendungen adaptieren. Die hier beschriebenen Lösungen wurden unter anderem in Projekten entwickelt und erprobt, wie dem AiF ZIM Projekt WearTrack oder dem DFG Schwerpunktprogramm SPP2183 zur Eigenschaftsregelung von Umformprozessen. Die Professur beschäftigt sich ebenfalls mit tragbarer Elektronik sowie Mensch-Maschine Interaktion und der Körperüberwachung.

## KONTAKT

### TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Professur Mess- und Sensortechnik  
 Prof. Dr.-Ing. Olfa Kanoun  
 Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz  
 Tel.: +49 (0)371 531-36931

[www.tu-chemnitz.de/etit/messtech](http://www.tu-chemnitz.de/etit/messtech)

# INSTITUT FÜR GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK UND MESSTECHNIK – FACHGEBIET SENSORIK + MESSTECHNIK –

Prof. Dr.-Ing. Stefan Zimmermann

Das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik der Leibniz Universität Hannover konzentriert seine Aktivitäten auf die Erforschung neuer physikalischer und chemischer Sensorprinzipien sowie die Entwicklung neuer Sensoren (insbesondere Nanosensoren) bis hin zu kompakten Messsystemen zur schnellen Detektion kleinster Stoffkonzentrationen in Flüssigkeiten und Luft überwiegend für medizin-, bio-, umwelt- und sicherheitstechnische Anwendungen. Hierbei werden sowohl grundlegende wissenschaftliche Fragestellungen untersucht als auch applikationsorientierte Forschungsprojekte in enger Kooperation mit wissenschaftlichen, klinischen und industriellen Partnern durchgeführt.

Das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik verfügt über langjährige Erfahrungen und umfassendes Know-how im Bereich der (bio)chemischen Sensorik. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung kompakter hochauflösender **Ionenmobilitätspektrometer (IMS)** mit Nachweisgrenzen im pptv-Bereich für eine schnelle Analyse gasförmiger und flüssiger Proben. Hierbei werden alle relevanten Aspekte von der analytischen Systemmodellierung und numerischen FEM-Simulation über den Systementwurf, die Konstruktion und Bauteilfertigung bis hin zur **Entwicklung spezieller Elektronik**, wie schnelle, sehr rauscharme Verstärker und Datenerfassungsmodule mit hoher vertikaler und zeitlicher Auflösung, betrachtet. Ein besonderer Fokus liegt auf der Entwicklung **nicht-radioaktiver Ionisationsquellen**. Hierzu zählen Elektrosprayionisationsquellen, dielektrisch behinderte und Koronaentladungsquellen, UV-Ionisationsquellen sowie schwache Röntgen- und nicht-radioaktive Elektronenstrahler, die neben der IMS auch in der Massenspektrometrie, Gaschromatographie (Elektroneneinfangdetektoren) und Sensorik (Ionisationsdetektoren) Anwendung finden.

In diesem Zusammenhang werden auch verwandte Themen untersucht, wie die **Ionisationspro-**

**zesse bei Atmosphärendruck (API)**, und neue Verfahren erforscht, wie der Betrieb eines **IMS bei reduziertem Druck (HiKE-IMS)** mit dem Ziel einer schnellen, direkten und quantitativen Erfassung von Spurengasen selbst in komplexen Gasgemischen. Weiterhin werden **kombinierte Systeme** aufgebaut, wie kompakte IMS mit geschlossenem Gaskreislauf und schneller gaschromatographischer Vortrennung (**GC-IMS**) oder Kopplungen mit der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (**HPLC-IMS**) und Massenspektrometern (**IMS-MS**). Mehrstufige IMS mit integrierter Fragmentierung (**IMS-FAT-IMS**) bieten ganz neue Identifikationsmöglichkeiten anhand substanzspezifischer Fragmente.

Neben der Ionenmobilitätsspektrometrie werden am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik auch **Gassensoren** auf Basis neuartiger Sensorprinzipien sowie **elektromagnetische Sensoren und Messverfahren**, beispielsweise zur nicht-invasiven Überwachung von Bioprozessen durch die Reaktorwand oder die Charakterisierung von menschlichem Gewebe, entwickelt. Hierzu zählen auch Biosensoren auf Basis von Split-Ring-Resonatoren. Sensorentwurf und -optimierung werden durch die **Entwicklung analytischer Modelle** und numerische **FEM-Simulationen** unterstützt.

Für die erfolgreiche Realisierung von Sensoren bis hin zu kompletten Messsystemen besteht umfassendes Know-how bei der **Entwicklung applikationsspezifischer Elektronik**.

Das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik verfügt über **hervorragend ausgestattete Laborkatorien und Werkstätten, wie Chemielabore mit Referenzanalytik und Gasdosiersystemen für die Einstellung definierter Gaskonzentrationen im unteren ppb<sub>v</sub>-Bereich, Elektroniklabore und mechanische Werkstätten (CNC)** zur Bauteilfertigung bis hin zur Kleinserienproduktion. Sowohl die mechanischen als auch die Elektronikwerkstätten werden von erfahrenen Mitarbeitern geleitet.

#### Ausstattung und Know-how auf einen Blick:

Detektion kleinster Stoffkonzentrationen in Gasen und Flüssigkeiten, kompakte hochauflösende Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) mit Nachweisgrenzen im pptv-Bereich, GC-IMS, HLPC-IMS, IMS-MS, HiKE-IMS, nicht-radioaktive Ionisationsquellen (UV, DBD, CD, ESI, Röntgen- und Elektronenstrahler), Gassensoren, Nanosensoren, elektromagnetische Sensoren, spezielle Elektronik inklusive Messverstärker, Systemmodellierung und FEM-Simulationen, elektronische und mechanische (CNC) Werkstätten, Gasdosiersysteme (ppt<sub>v</sub>-Bereich).

#### Ionenmobilitätsspektrometrie

Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) sind kompakte Messgeräte zur schnellen Detektion kleinster Stoffkonzentrationen mit Nachweisgrenzen im ppt<sub>v</sub>-Bereich und Messzeiten unterhalb einer Sekunde. Anwendungen reichen von der Sicherheitsüber die Medizin- bis hin zur Prozessmesstechnik, wo oft eine schnelle Analyse von Stoffgemischen gefordert ist. Sei es der Nachweis von Sprengstoffen im Rahmen von Personenkontrollen, die quantitative Bestimmung von Metaboliten in der Ausatemluft im klinischen Umfeld oder die Überwachung der Umgebungsluft – die Ionenmobilitätsspektrometrie überzeugt hier durch den geringen instrumentellen Aufwand kombiniert mit hoher analytischer Leistungsfähigkeit.

Das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik konzentriert seine Aktivitäten auf die Entwicklung und Konstruktion sogenannter Flugzeitionenmobilitätsspektrometer. Das zugrundeliegende Prinzip lässt sich leicht anhand von drei Schritten erklären. Im ersten Schritt wird die Probe in die Gasphase überführt, in den Ionisationsbereich geleitet und dort

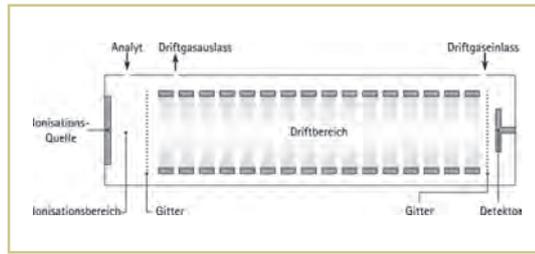


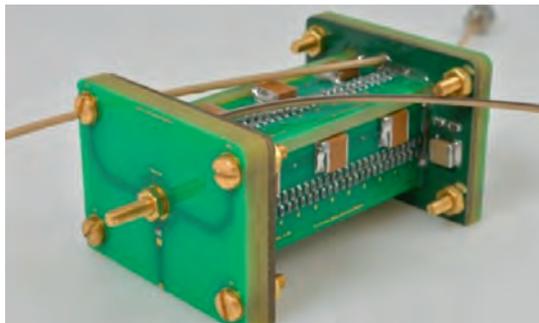
Abb. 1: Schematische Darstellung eines Ionenmobilitätsspektrometers

ionisiert. Zur Ionisation eignen sich verschiedene Ionisationsquellen, siehe weiter unten. Die ionisierten Moleküle werden im zweiten Schritt durch ein schaltbares Ionentor in den Driftbereich geleitet. Im Driftbereich kommt es aufgrund eines elektrischen Driftfeldes zu einer Driftbewegung in Richtung Ionendetektor. Die Driftgeschwindigkeit wird neben der elektrischen Feldstärke von der Mobilität der Ionen im Driftgas bestimmt. Ionenspezies mit unterschiedlicher Ionenmobilität benötigen daher eine unterschiedliche Driftzeit vom Ionentor bis zum Detektor. Im letzten Schritt erfolgt die zeitliche Erfassung des Ionenstroms am Detektor, der den Driftbereich abschließt. Mithilfe des so gewonnenen Ionenmobilitätsspektrums lässt sich aufgrund der stoffspezifischen Ionenmobilitäten die Zusammensetzung einer Probe ermitteln. **Abbildung 1** zeigt den schematischen Aufbau eines IMS.

Die zwei wesentlichen Leistungsmerkmale eines IMS sind das Auflösungsvermögen als Maß für die Trennleistung und die Nachweisgrenze. Das Auflösungsvermögen, ermittelt als Verhältnis von Driftzeit zu Peakbreite bei halber Peakhöhe, der meisten kommerziell erhältlichen IMS liegt im Bereich von 20 bis 60. Abhängig von der Substanz lassen sich Nachweisgrenzen im pptv-Bereich bei Messzeiten von unter einer Sekunde erreichen. Um den Anforderungen verschiedener Applikationen gerecht zu werden, forscht das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik an verschiedenen Ionisationsquellen und IMS-Konstruktionen. Das Spektrum reicht dabei von sehr baukleinen Systemen (15 mm x 15 mm x 90 mm) mit einem Auflösungsvermögen von 65 und einer Koronaentladung als Ionisationsquelle, siehe **Abbildung 2**, über besonders



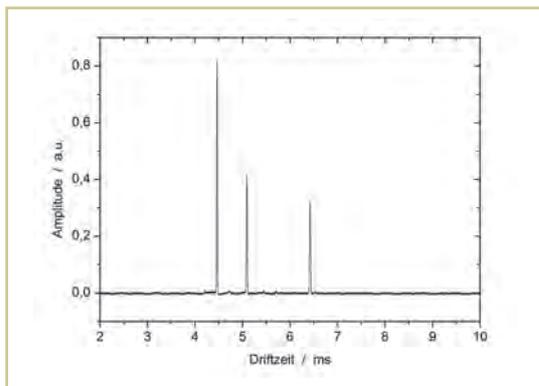
Abb. 2: Miniaturisiertes IMS mit Korona-Ionisationsquelle



**Abb. 3:**  
Sehr kostengünstig herstellbares mini-IMS aus Leiterplatten mit radioaktiver Ionisationsquelle



**Abb. 4:**  
Kompaktes IMS (75 mm Driftlänge) mit ultra-hohem Auflösungsvermögen



**Abb. 5:**  
Spektrum einer Luftprobe mit Dimethylmethylphosphonat

kostengünstig herstellbare IMS aus Leiterplatten mit hoher analytischer Leitungsfähigkeit, siehe **Abbildung 3**, bis hin zu kompakten IMS mit ultra-hohem Auflösungsvermögen von bis zu 250, siehe **Abbildung 4**.

Mit einem Auflösungsvermögen von bis zu 250, siehe **Abbildung 5**, verfügt das Fachgebiet Sensorik und Messtechnik über das weltweit beste Auflösungsvermögen im Verhältnis zur Driftlänge für einfach geladene Ionen. Diese extrem hohe Trennleistung ermöglicht erstmals die Trennung von Isotopologen mit einem IMS, wodurch sich eine Vielzahl weiterer Anwendungsgebiete erschließt, wie die Detektion und Trennung mit Isotopen markierter Stoffe.

### Hochenergie-Ionenmobilitätsspektrometrie (HiKE-IMS)

Wie bereits oben erwähnt kombinieren Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) als Spurengasdetekto-

ren einen geringen instrumentellen Aufwand mit extrem hoher Sensitivität bei gleichzeitig kurzer Messzeit von unter einer Sekunde. Dies wird durch eine chemische Gasphasenionisation bei einem Druck von etwa 1000 mbar ermöglicht, bei der die Analyten über chemische Reaktionen durch vorher erzeugte Reaktantionen ionisiert werden. Dieser Prozess bringt neben seinen Vorteilen jedoch auch drei entscheidende Nachteile mit sich: Erstens erfolgt die Ionisation nur dann, wenn für diese ein möglicher Reaktionspfad besteht, für eine Ionisation per Protonentransferreaktion muss beispielsweise die Protonenaffinität des Analyten höher sein als die der Reaktantionen. Dies führt zu einem eingeschränkten messbaren Stoffspektrum und erklärt auch die Abhängigkeit der Sensitivität für bestimmte Substanzen von der Luftfeuchtigkeit im IMS. Zweitens können nach der Ionisation des Analyten noch weitere, ungewollte Ionisationsreaktionen auftreten, bei denen andere Substanzen die Ladung bereits ionisierter Analyten an sich ziehen, wodurch es zu chemischen Querempfindlichkeiten kommt. Drittens führt die begrenzte Anzahl an Reaktantionen zu einem begrenzten Dynamikbereich.

Ein Ansatz, die genannten Nachteile ohne Vortrennung von Stoffgemischen oder Verzicht auf die hocheffiziente chemische Gasphasenionisation zu minimieren, ist das vom Fachgebiet Sensorik und Messtechnik erstmals vorgestellte Hochenergie-Ionenmobilitätsspektrometer (High Kinetic Energy IMS, HiKE-IMS). Hier laufen die chemischen Reaktionen in der Gasphase nicht bei 1000 mbar ab, sondern bei einem Druck von 10...60 mbar und in einem starken elektrischen Feld. Hierdurch können die Ionen eine hohe kinetische Energie erreichen, was zu einer Veränderung der ablaufenden Reaktionen führt, beispielsweise wird die Protonenaffinität der Reaktantionen durch das Abspalten angelagerter Wassermoleküle reduziert und so das messbare Stoffspektrum erheblich vergrößert. Gleichzeitig führt die Kombination aus verkürzter Reaktionszeit, sehr hoher Dichte an Reaktantionen und geringer Dichte an Analytmolekülen zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit von ungewollten Reaktionen zwischen bereits ionisierten Analyten und neutralen Molekülen, einer immer noch sehr hohen Sensitivität und einem deutlich verbesserten Dynamikbereich.

Ein Anwendungsbeispiel des HiKE-IMS zeigt **Abbildung 6** anhand der gleichzeitigen Bestimmung von Benzol, Toluol und Xylol (BTX) in Luft. Benzol ist aufgrund der geringen Protonenaffinität mit klassischen IMS nur schwer und aufgrund der höheren

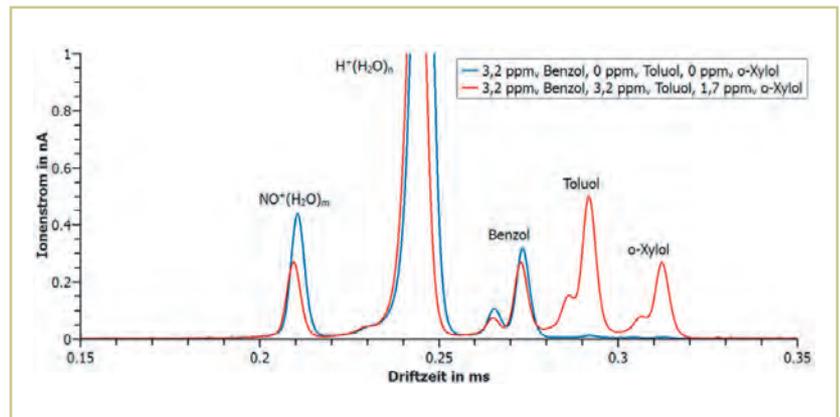
Protonenaffinitäten von Toluol und Xylol in einem BTX-Gemisch praktisch gar nicht nachweisbar. Dabei reichen schon kleinste Konzentration an Toluol oder Xylol, um eine deutlich höhere Konzentration an Benzol chemisch vollständig zu unterdrücken. Wie in **Abbildung 6** gezeigt, bleibt im HiKE-IMS die Signalintensität der Benzolpeaks (aufgrund von zwei möglichen chemischen Ionisationswegen über  $\text{NO}^+$  und  $\text{H}^+$  bilden sich zwei Ionenspezies und somit zwei Benzolpeaks) trotz Zugabe von Toluol und Xylol in vergleichbaren Konzentrationen nahezu unverändert. Die Nachweisgrenze für Benzol bei hoher Luftfeuchte von 90% r.H. und gleichzeitiger Anwesenheit von Toluol und Xylol mit Konzentrationen im zweistelligen ppm<sub>v</sub>-Bereich liegt bei 10 ppb<sub>v</sub> für eine Messzeit von nur zwei Sekunden.

### Ionisationsquellen

In der Gasesstechnik existieren zahlreiche Detektoren und Messsysteme, wie Massenspektrometer (MS), Ionenmobilitätsspektrometer (IMS), Photoionisations- (PID) und Elektroneneinfangdetektoren (ECD), die die nachzuweisenden Analyten zunächst ionisieren und dann detektieren. Gegebenenfalls erfolgt zur Identifikation vor der Detektion noch eine Ionentrennung. Der Ionisationsprozess ist somit der erste Schritt in der Messkette und hat bereits einen großen Einfluss auf die analytische Leistungsfähigkeit des Systems, wie Sensitivität, Nachweisgrenze und Querempfindlichkeit.

Am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik werden verschiedene Ionisationsquellen untersucht. Hierzu gehören UV-Strahlungsquellen, welche Photonen emittieren und eine direkte Ionisation der Analyten ermöglichen. Aufgrund der direkten Ionisation ist die erreichbare Sensitivität im Vergleich zur chemischen Gasphasenionisation für viele Substanzen jedoch geringer. Außerdem können nur Substanzen mit einer niedrigeren Ionisierungsenergie als die des Photons (üblicherweise 10,6 eV) ionisiert und somit nachgewiesen werden. Dies führt bereits während der Ionisation zu einer Diskriminierung von Analyten mit höherer Ionisierungsenergie und einem eingeschränkten Stoffspektrum. UV-Strahlungsquellen mit höherer Photonenenergie besitzen immer noch eine zu geringe Lebensdauer. Dennoch werden UV-Strahlungsquellen für spezielle Anwendungen am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik in der Ionenmobilitätsspektrometrie (UV-IMS) eingesetzt.

Eine andere Ionisationsmethode nutzt chemische Gasphasenreaktionen zur Ionisation der Analyte. Durch Ausnutzung der Feldüberhöhung an einer



**Abb. 6:** Gleichzeitige Messung von Benzol, Toluol und o-Xylol mittels eines HiKE-IMS

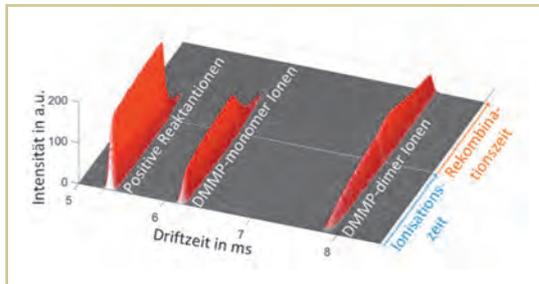
spitzen Elektrode kann es beispielsweise zu einer Koronaentladung kommen, wobei freie im elektrischen Feld beschleunigte Elektronen eine chemische Gasphasenionisation (Atmospheric Pressure Chemical Ionization, APCI) initiieren. Die Ionisation wird dabei durch das thermodynamische Gleichgewicht bestimmt und ist besonders effizient, wenn das chemische Gleichgewicht ganz auf der Seite der Analytionen liegt. So können bereits kleinste Stoffkonzentrationen schnell nachgewiesen werden. Nachteilig an Korona-Ionisationsquellen sind die begrenzte Lebensdauer der Elektrodenspitze und die damit einhergehende zeitliche Veränderung der Ionisationseigenschaften sowie die Bildung von Stickoxiden in Luft, welche den Ionisationsprozess ebenfalls negativ beeinflussen können.

Zu den in der Ionenmobilitätsspektrometrie am häufigsten eingesetzten Ionisationsquellen gehören radioaktive Beta-Strahler, die hochenergetische Elektronen emittieren und so ebenfalls eine chemische Gasphasenionisation einleiten. Nachteilig sind die mit radioaktiven Strahlungsquellen verbundenen gesetzlichen Auflagen sowie die konstante und dauerhafte Elektronenemission, so dass die Strahlungsintensität nicht variierbar ist. Eine nicht-radioaktive Alternative mit vergleichbaren Ionisationsprozessen ist eine schwache Röntgenquelle mit einer geringen Beschleunigungsspannung von unter 5 kV. Neben der einstellbaren Strahlungsintensität ist diese Quelle abschaltbar. Nachteilig ist die große Eindringtiefe selbst schwacher Röntgenstrahlung in Luft. Durch eine spezielle Konstruktion des Ionisationsbereichs konnte am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik ein Röntgen-IMS mit sehr hoher Sensitivität und ultrahohem Auflösungsvermögen realisiert werden.

Weiterhin wird die Realisierung baukleiner nicht-radioaktiver Elektronenstrahler vorangetrieben, siehe



**Abb. 7:**  
Baukleiner nicht-radioaktiver  
Elektronenstrahler



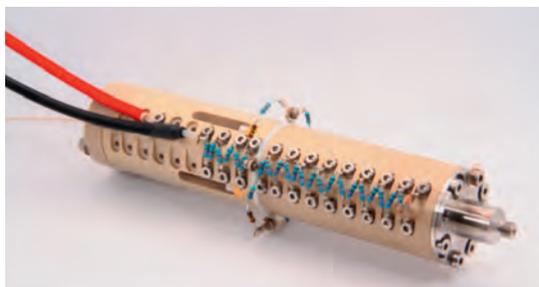
**Abb. 8:**  
Ionenmobilitätsspektren mit  
Variation der Ionisations- und  
Rekombinationszeit

**Abbildung 7.** Diese Elektronenstrahler emittieren hochenergetische Elektronen, die eine chemische Gasphasenionisation analog zu radioaktiven Strahlungsquellen initiieren.

Die Elektronenemission eines nicht-radioaktiven Elektronenstrahlers kann dabei gezielt gesteuert werden. Besonders interessant ist hier die Möglichkeit eines gepulsten Betriebes mit Pulsdauern von nur 20 ns und geregelter Emissionsstrom. Über die Einstellung der Pulslänge ist eine Variation der Ionisationsdauer möglich, was Untersuchungen zur Ionenbildungskinetik ermöglicht. Zudem kann eine Rekombinationszeit eingestellt werden (Zeit zwischen Abschalten der Elektronenquelle und Öffnen des Ionentores), wodurch die



**Abb. 9:**  
Foto eines Elektrosprays



**Abb. 10:**  
Foto eines kompakten ESI-IMS

ionenspezifische Rekombination untersucht werden kann. Durch Variation der Ionisations- und Rekombinationszeit lässt sich der Informationsgehalt erhöhen und so die Stofferkennung verbessern. Ionen mit hoher Bildungsrate können im Spektrum betont (kurze Ionisationszeit und kurze Rekombinationszeit) oder kurzlebige Ionen diskriminiert werden (lange Rekombinationszeit). **Abbildung 8** zeigt Ionenmobilitätsspektren mit variabler Ionisations- und Rekombinationszeit.

**Elektrosprayionisation-IMS (ESI-IMS)**

In Grund- und Oberflächengewässern findet sich eine Vielzahl an von Menschen verursachten Kontaminationen. Beispiele hierfür sind der Eintrag von Schwermetallen aus gewerblichen Betrieben oder der Industrie, Verunreinigungen durch Düngemittel und Pestizide aus der Landwirtschaft, sowie die Kontamination durch Medikamente aus dem kommunalen Abwasser. Mit dem Nachweis der genannten Verunreinigungen in Grund- und Oberflächengewässern befasst sich ein Teilbereich der Wasseranalytik. Für die Analyse von Flüssigkeiten ist die Elektrosprayionisation (ESI) eine häufig eingesetzte Ionisationsmethode. Ein Elektrospray ermöglicht in nur einem Vorgang die Ionisation von flüssigen Proben sowie deren Übertragung in die Gasphase. Unter dem Einfluss eines starken elektrischen Feldes am Ende einer spitzen Metallkapillare (ESI-Nadel) entsteht aus der flüssigen Probe ein feiner Nebel von geladenen Tröpfchen, siehe hierzu **Abbildung 9**.

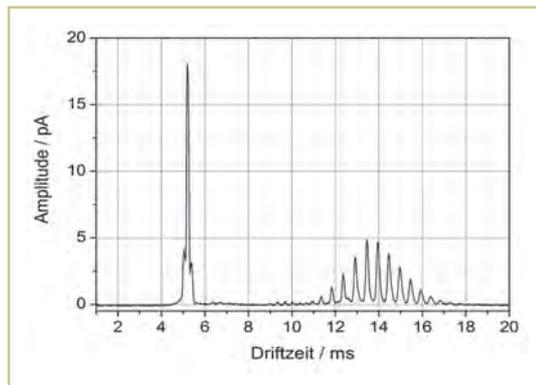
In einem nachfolgenden Prozess, basierend auf Verdampfungsprozessen des Lösungsmittels sowie dem weiteren Zerfall der Tröpfchen, werden aus den Tröpfchen Ionen in der Gasphase erzeugt. In Verbindung mit einem Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) lassen sich mit dieser Ionisationsmethode flüssige Proben direkt in die Gasphase überführen und ionisieren. Anschließend können die generierten Ionenspezies mit Hilfe eines IMS nach Kollisionsquerschnitt, Masse und Ladung separiert und detektiert werden. So ein kompaktes ESI-IMS ist daher als mobiles, schnelles Messinstrument für die Wasseranalytik sehr interessant. Am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik werden daher verschiedene Konstruktionen von ESI-IMS zur Analyse von wässrigen Proben untersucht. Ein Beispiel eines nur 150 mm langen Aufbaus mit hoher Sensitivität und einem Auflösungsvermögen von 100 zeigt **Abbildung 10**. Mit diesem Aufbau lässt sich in nur 2 s Messzeit und mit einem hohen Wasseranteil von 50% des Lösungsmittels eine Nachweisgrenze von 4 µg/l für das Herbizid Benta-

zon erzielen. In **Abbildung 11** ist beispielhaft ein hochauflösendes Spektrum des Oligomers Triton X-100 zu sehen.

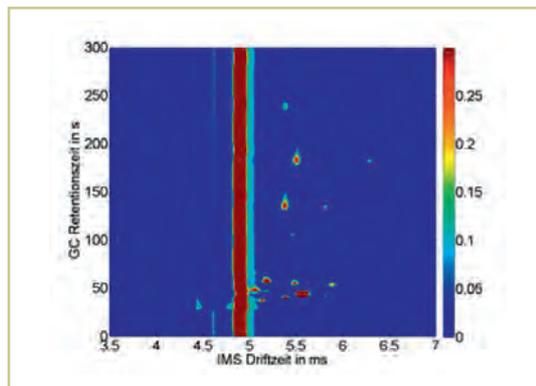
**Atemluftanalyse in der Medizintechnik**

Der menschliche Körper atmet eine Vielzahl an flüchtigen Substanzen aus. Das wohl bekannteste Beispiel ist die Abgabe von Kohlenstoffdioxid. Weiterhin werden etliche gering konzentrierte Stoffe ausgeatmet. Ein Teil dieser Substanzen sind Stoffwechselprodukte, die von den Zellen im Körper in den Blutkreislauf abgegeben werden. Über die Lungenbläschen gelangen flüchtige Stoffe dann in die Ausatemluft. Die Zusammensetzung der Ausatemluft spiegelt demnach in gewisser Weise auch die Zusammensetzung des Blutes wider. Anstatt einer aufwändigen und teuren Analyse des Blutes sollten somit durch eine Analyse der Ausatemluft Aussagen über den aktuellen physiologischen Zustand eines Patienten möglich sein. Beispielsweise lässt sich nach dem Genuss von Alkohol, der Blutalkoholspiegel anhand der Alkoholkonzentration im Atem ermitteln. Der Vorteil bei der Analyse von Atemluft besteht darin, dass eine Messung nicht-invasiv erfolgt und sie quasi kontinuierlich z.B. während einer Operation oder der Beatmung von Intensivpatienten durchgeführt werden kann. Allerdings erfordert die hohe Sensitivität, die bei der Atemluftanalyse notwendig ist, auch eine hohe Selektivität. Die Vielzahl an exogenen und endogenen Substanzen müssen eindeutig voneinander unterschieden und quantitativ gemessen werden.

Am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik werden daher spezielle Messgeräte entwickelt, die Substanzen in geringsten Konzentrationen nachweisen können und die eine gute Unterscheidung dieser Substanzen ermöglichen. Geeignet sind z.B. Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) mit gaschromatographischer (GC) Vortrennung. Der Hauptvorteil von IMS besteht darin, dass geringste Stoffkonzentrationen (pptv-Bereich) in weniger als einer Sekunde nachgewiesen werden können. In Kombination mit einem Gaschromatographen kann bereits eine gute Vortrennung der einzelnen Substanzen im Atem erreicht werden. Jede Messung lässt sich in einer zweidimensionalen Darstellung visualisieren, wobei auf der x-Achse die Driftzeit im IMS und auf der y-Achse die GC-Retentionszeit aufgetragen wird. In **Abbildung 12** ist eine beispielhafte Atemluftanalyse gezeigt. Jeder Punkt stellt eine gemessene Substanz dar. Für klinische Studien wurde am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik ein hochempfindliches, hochauflösendes GC-IMS



**Abb. 11:** ESI-IMS-Spektrum von 50 µl/l Triton X-100 in Ethanol

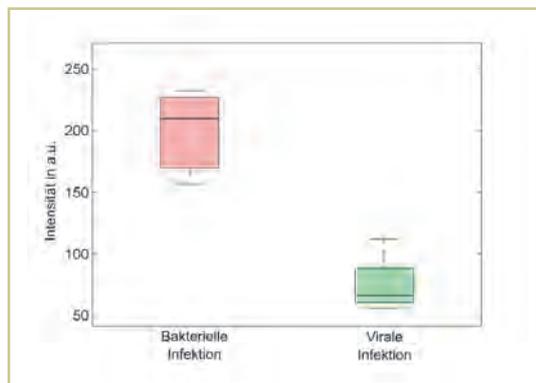


**Abb. 12:** Atemluftanalyse mittels GC-IMS

entwickelt, siehe **Abbildung 13**. Aufgrund des integrierten Gaskreislaufes benötigt dieses System keine externe Gasversorgung. In einer aktuellen



**Abb. 13:** Foto des GC-IMS mit integriertem Gaskreislauf



**Abb. 14:** Boxplot einer Substanz, hinsichtlich derer sich der Atem von Probanden mit einer bakteriellen Infektion der oberen Atemwege vom Atem der Probanden mit viraler Infektion unterscheidet.

Studie wurde mit diesem GC-IMS untersucht, ob durch die Analyse der Ausatemluft eines erkälten Probanden zwischen bakteriellen und viralen Infektionen der oberen Atemwege unterschieden werden kann. Es konnten dabei zwei Substanzen im Atem gefunden werden, die möglicherweise eine bakterielle gegen eine virale Infektion diskriminieren, siehe **Abbildung 14**. Ziel ist eine Unterstützung der ärztlichen Diagnose zur Vermeidung unnötiger Antibiotikagaben.

### Messelektronik

Allgemein betrachtet wandeln fast alle Sensoren eine zu messende Größe in eine elektrische Größe wie Strom oder Spannung um, häufig unter Zuhilfenahme weiterer Ströme und Spannungen. Beispielsweise liefert ein Thermoelement eine von der Temperaturdifferenz abhängige Spannung oder eine Vollbrücke aus Dehnungsmessstreifen eine zur Dehnung proportionale Brückenspannung. Hieraus folgt ein wichtige Konsequenz: Die Qualität des mit einem Sensor erzielbaren Messergebnisses hängt nicht nur von der Qualität des Sensors selbst ab, sondern auch von der Qualität der elektronischen Signalerfassung und -verarbeitung sowie der zur Verfügung gestellten Hilfsspannungen und -ströme. Insbesondere bei der Entwicklung neuartiger Sensorkonzepte und Anwendungen müssen daher immer auch die Anforderungen an die Elektronik mit betrachtet werden. Häufig lässt sich die Qualität der Messergebnisse bzw. die Leistungsfähigkeit der Sensoren durch eine angepasste und optimierte Elektronik verbessern.

Beispielsweise messen Flugzeitionenmobilitätsspektrometer die Zeit, die die Ionen zum Zurücklegen einer definierten Strecke in einem definierten elektrischen Feld benötigen. Hieraus ergeben sich bereits drei elektronische Herausforderungen – es werden schnelle Hochspannungsschalter, um alle Ionen zu einem definierten Zeitpunkt in die Driftstrecke zu überführen, stabile Hochspannungsquellen, um ein konstantes und definiertes elektrisches Driftfeld zu gewährleisten, sowie schnelle, rauscharme Transimpedanzverstärker, um den auf

den Detektor auftreffenden Ionenstrom in eine proportionale Spannung zu wandeln, benötigt.

Am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik wurde speziell für die Anforderungen in der IMS ein Transimpedanzverstärker entwickelt, welcher bei einer Bandbreite von 175 kHz eine Verstärkung von 5 G $\Omega$  aufweist und über die gesamte Bandbreite integriert einen Gesamttauschstrom von lediglich 9,7 pA erreicht. Dies ermöglicht im Vergleich zu den vorher eingesetzten kommerziellen Verstärkern bei gleicher Messdauer eine um eine Größenordnung bessere Nachweisgrenze beziehungsweise bei gleicher Nachweisgrenze eine Reduzierung der Messdauer um zwei Größenordnungen.

Für die Entwicklung neuer Sensoren und Messsysteme wird am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik ein eigens hierfür entwickeltes, modulares Elektroniksystem genutzt, welches spezialisierte Funktionen auf einzelnen Einschubkarten im Euroformat zur Verfügung stellt. Dieses ist in einer beispielhaften Konfiguration in **Abbildung 15** zu sehen. Zum einen stehen so häufig benötigte Grundfunktionen, wie das Erzeugen, Messen und Regeln von Spannungen, Temperaturen und Durchflüssen, direkt zur Verfügung und können durch die Modularität in der jeweils benötigten Anzahl in das Messsystem eingesetzt werden. Zum anderen können durch Sensorneuentwicklungen benötigte neue Funktionen als neue Einschubkarten realisiert und diese aufgrund der gewählten Systemarchitektur ohne Änderungen an anderen Karten oder der Software integriert und angesteuert werden.

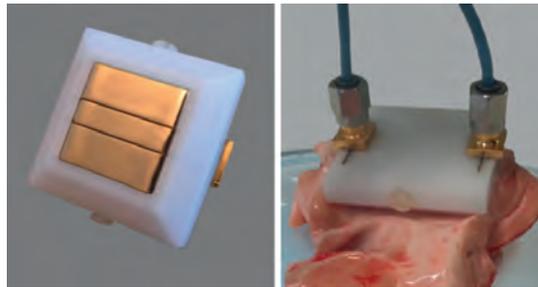
### Bestimmung des Wassergehaltes in Gewebe

Während einer Autopsie kann die Quantifizierung der Ödeme im Hirnngewebe Hinweise auf die Todesursache liefern, da Agoniezeit (Dauer der Sterbephase) und Wassergehalt im Gewebe in direkter Verbindung zueinander stehen. Eine lange Agoniezeit geht z.B. mit einer starken Ödembildung im Gehirn einher, da während der Agonie das Gehirn großem Stress ausgesetzt ist, es deswegen expandiert und sich Ödeme bilden. Bei einer kurzen Agoniezeit hingegen werden alle Körperfunktionen sofort gestoppt und dem Gehirn somit keine Zeit zur Expansion gegeben. Deswegen sind in diesem Fall auch keine Ödeme vorzufinden. Im Rahmen einer gerichtsmedizinischen Untersuchung kann somit die Bestimmung des Wassergehaltes im Gewebe bei der Diagnose der Todesursache unterstützen. Dies ist insbesondere im Falle multippler möglicher Todesursachen von großer Wichtig-



Abb. 15:  
Modulare Messelektronik für die  
Sensorentwicklung

keit, oder wenn keine offensichtlichen Anzeichen für die Todesursache vorzufinden sind, wie zum Beispiel bei der Unterscheidung zwischen plötzlichem Kindstod und dem Tod durch ein Schädeltrauma. Bislang existiert kein standardisiertes Verfahren zur Quantifizierung von Ödemen im menschlichen Gehirn. Die gängige Praxis ist die Untersuchung des Gehirngewichts und die subjektive Beurteilung der Ventrikelkompression sowie Schwellungen im Gehirn durch den Obduzenten, weswegen eine belastbare, objektive Diagnose nicht gewährleistet ist. Zudem können kleine, aber für die Differenzierung von Todesursachen essentielle, Unterschiede praktisch nicht nachgewiesen werden. Ziel ist daher die Entwicklung einer schnellen, kostengünstigen, in der Handhabung einfachen aber genauen Messtechnik zur Erfassung der Gewebefeuchte von menschlichen Organen. Grundlage ist die Bestimmung der effektiven Permittivität der Gewebeprobe bei 500 MHz mit einem speziell entwickeltem koplanaren Tastkopf, siehe **Abbildung 16**. Hiermit ist es erstmalig möglich innerhalb einer Sekunde bis auf  $\pm 2\%$  genau den Wassergehalt in Organen zu bestimmen. Sämtliche Komponenten des Messsystems (Tastkopf, Mess- und Auswerteelektronik) sind einfach aufgebaut und sehr kostengünstig herstellbar. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Rechtsmedizin der Medizinischen Hochschule Hannover wurde mit einem Demonstrator bereits erfolgreich der Zusammenhang zwischen effektiver Permittivität und Wassergehalt in menschlichen Organen untersucht. Erste Auswertungen zeigen, dass so tatsächlich Rückschlüsse auf die Dauer der Agonie möglich sind. Darauf aufbauend wurde das Potential dieser Technik in der Medizinischen Hochschule Hannover bezüglich der objektiven Einordnung des plötzlichen Kindstods erforscht. Das gleiche System eignet sich auch zur nicht-invasiven Überwachung des Zellwachstums in Einwegbioreaktoren. Weitere Anwendungen, wie die Beurteilung der Wundheilung durch den Wundverband hindurch, sind denkbar.



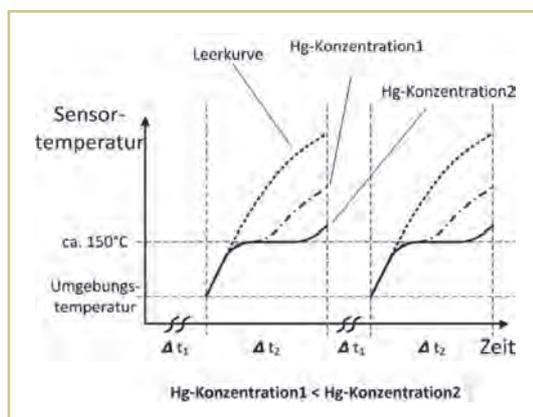
**Abb. 16:** Messung der Hirnfeuchte mit einem koplanaren Tastkopf

teme benötigt, welche möglichst kontinuierlich mit einer ausreichend hohen Nachweisempfindlichkeit Quecksilber schnell detektieren können.

Für die Entwicklung solcher Systeme wird am Fachgebiet Sensorik und Messtechnik u.a. an einem neuartigen kalorimetrischen Sensorprinzip für die Quecksilberdetektion geforscht. Hierbei wird nanostrukturiertes Gold genutzt, welches bei Kontakt mit Quecksilber an der Oberfläche Amalgam bildet. Die geringe Wärmekapazität des nanostrukturierten Goldes ermöglicht ein besonders schnelles Aufheizen des Materials, so dass die Quecksilbermoleküle schnell wieder in die Gasphase übergehen. Aufgrund der Desorptionsenthalpie des Quecksilbers unterscheidet sich die Aufheizkurve des reinen Goldes von der Aufheizkurve des amalgamierten Goldes, was den Messeffekt darstellt. In **Abbildung 17** ist der theoretische Verlauf der Aufheizkurve für reines Gold und für amalgamiertes Gold im Vergleich gezeigt. In der Aufheizkurve des amalgamierten Goldes ist ein Plateau zu erwarten, da ab einer gewissen Temperatur die Heizenergie für die Desorption der Quecksilbermoleküle genutzt wird und damit nicht mehr zur Erwärmung des Goldes zur Verfügung steht. Ein weiterer Effekt, der sich zur Quersilberbestimmung nutzen lässt, ist die geringere Wärmeleitung der Amalgamschicht im Vergleich zu reinem Gold. Dies führt zu einem entgegengesetzten

**Kalorimetrischer Nanosensor zur Quecksilberbestimmung in Luft**

Im Bereich der Sicherheitstechnik stellt die Überwachung der Quecksilberkonzentration in der Luft eine große Herausforderung dar. Quecksilber wird in großen Mengen durch industrielle Prozesse freigesetzt, bedeutende Emissionsquellen sind beispielsweise die Öl- und Erdgasförderung. Da Quecksilber hochtoxisch ist, erfordert das Arbeiten mit Quecksilber besondere Schutzmaßnahmen. Es werden kompakte Quecksilbermesssys-



**Abb. 17:** Messprinzip eines kalorimetrischen Quecksilbersensors

Effekt, d.h. die Aufheizkurve des amalgamierten Goldes sollte bei gleicher Heizleistung oberhalb der Aufheizkurve des reinen Goldes liegen. Welcher Effekt sich schließlich zur Bestimmung der Quecksilberkonzentration in Luft besser eignet, ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

### Split-Ring-Resonator als Biosensorplattform

Split-Ring-Resonatoren sind hochempfindliche elektrische Leiterstrukturen, welche unter anderem zur elektromagnetischen Materialcharakterisierung (Messung der relativen Permittivität) oder zur Detektion von Biomolekülen verwendet werden und grundlegend aus nur einer Streifenleitung und einem ringförmigen Resonator bestehen. An einer Stelle des Resonators befindet sich ein Schlitz, welcher als Kapazität fungiert. Mit einem Netzwerkanalysator oder einer reduzierten Messelektronik wird die Transmission einer elektromagnetischen Welle vom Sender zum Empfänger entlang der Streifenleitung in Abhängigkeit von der Fre-

quenz gemessen. Bei einer Anregungsfrequenz außerhalb der Resonanz, ist die ringförmige Resonatorstruktur praktisch feldfrei, weswegen sich die elektromagnetische Welle quasi ungedämpft auf der Streifenleitung ausbreiten kann. Im Resonanzfall koppelt die elektromagnetische Welle in den Ring ein, was jetzt zu kleinen Feldstärken auf der Empfängerseite der Streifenleitung führt. Die Transmission bei einer Anregung mit der Resonanzfrequenz ist also stark gedämpft. Die Resonanzfrequenz dieser Schaltung wird zum einen durch den Umfang des Rings und zum anderen durch die Kapazität des Schlitzes bestimmt, was hier als Sensoreffekt ausgenutzt wird. Die Kapazität kann analog zur Antennentechnik als eine kapazitive Verlängerung der Ringstruktur aufgefasst werden. Es ergeben sich Resonanzfrequenzen für Wellenlängen mit  $\lambda/2$  deutlich größer als der Umfang des Kreises.

Das grundlegende Messprinzip basiert auf einer Kapazitätsänderung des Schlitzes durch eine Materialprobe oder die spezifische oder unspezifische Bildung von Molekülen, was durch eine Verschiebung der Resonanzfrequenz detektiert wird. Hierdurch lässt sich eine sehr hohe Sensitivität erreichen, weswegen diese Leiterstrukturen in den letzten Jahren vermehrt im Bereich der Sensorik und Messtechnik eingesetzt werden. Eine mögliche Anwendung ist die Bestimmung der Polarisierbarkeit (relative Permittivität) eines Materials. Weiterhin ist aber auch, bei entsprechender Funktionalisierung des Schlitzes, anhand der Detektion spezifischer Molekülbindungen die selektive Erfassung von Biomarkern möglich. **Abbildung 18** zeigt den experimentellen Aufbau eines Split-Ring-Resonators als Biosensor. ■

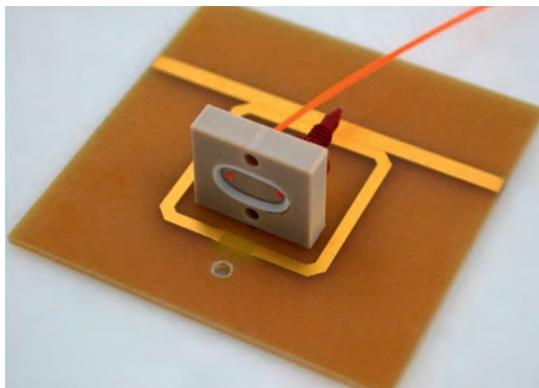


Abb. 18:  
Split-Ring-Resonator als Biosensor  
für C-reaktives Protein (CRP)

#### KONTAKT

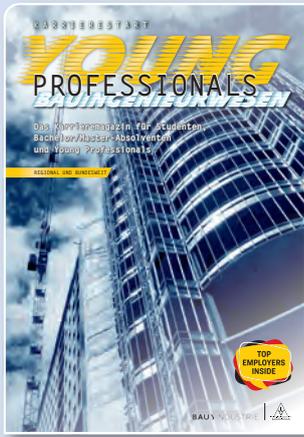


#### LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik  
Fachgebiet Sensorik + Messtechnik  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Zimmermann  
Appelstraße 9A, 30167 Hannover  
Tel.: +49 (0)511 762-4672, Fax: +49 (0)511 762-3917  
zimmermann@geml.uni-hannover.de

[www.geml.uni-hannover.de/de/smt](http://www.geml.uni-hannover.de/de/smt)

WÄHLEN SIE DAS ERFOLGSMAGAZIN FÜR IHRE PERSÖNLICHE KARRIERE

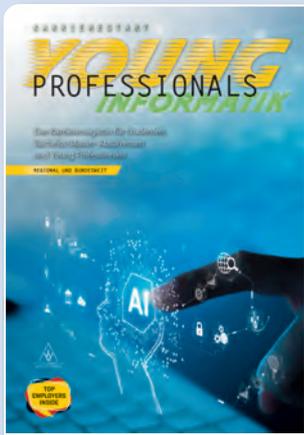


K A R R I E R E P L A N U N G  
I H R E C H A N C E N

B E R U F S F E L D E R  
I H R E M Ö G L I C H K E I T E N



I N T E R N E T  
J O B S U C H E



B E W E R B U N G  
S T E L L E N A N G E B O T E



Ja, ich bin interessiert und bitte um Zusendung eines kostenfreien Exemplars

**KARRIERESTART YOUNG PROFESSIONALS**

Bauingenieurwesen  Elektrotechnik/IT  Informatik oder  Maschinenbau

Name \_\_\_\_\_

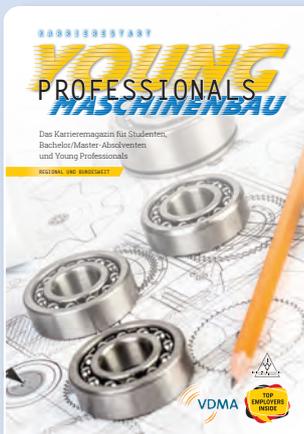
Firma \_\_\_\_\_

Straße \_\_\_\_\_

PLZ/Ort \_\_\_\_\_

Telefon \_\_\_\_\_

E-Mail \_\_\_\_\_



**ALPHA** Informationsgesellschaft mbH  
Finkenstraße 10 • 68623 Lampertheim • Telefon 06206 939-0  
magazin@alphapublic.de • www.alphapublic.de

# **SENSOR+TEST 2024**

Die Messtechnik-Messe  
11. – 13. Juni 2024, Nürnberg

---

# **SPS – SMART PRODUCTION SOLUTIONS**

12. – 14. November 2024, Nürnberg

---

# **electronica**

12. – 15. November 2024  
Weltleitmesse und Konferenz der Elektronik

---

# **17. Dresdner Sensor-Symposium**

25. – 27. November 2024  
Dorint Hotel Dresden

# ZWEI GRUNDLEGENDE MESSPRINZIPIEN

Im Fokus der Arbeit von Galltec+Mela steht das Messen und Kontrollieren von Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Neben der Temperatur ist die Luftfeuchte eine wichtige Messgröße u.a. für industrielle Prozesse, Qualitätskontrolle oder unser Wohlbefinden. Wir haben das Know-How um mit zwei sehr grundlegend unterschiedlichen Messprinzipien die Luftfeuchte zu messen: hygrometrisch und kapazitiv.

## Die hygroskopische POLYGA®-Fasern

Basierend auf der bekannten Tatsache, dass menschliches Haar seine Länge in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit ändert, hat GALLTEC® die einzigartige hygroskopische POLYGA®-Fasern entwickelt, die ihre Länge in Abhängigkeit zur Luftfeuchtigkeit ändert – sie ist in unerreichtem Ausmaß langzeitstabil und zu 100 % wasserfest. In Hygrostaten wird die Längenveränderung über ein Hebelsystem auf einen Mikroschalter übertragen. In Transmittern wird sie in elektrische Widerstandswerte konvertiert.

## Hochdynamischer Kapazitiver MELA®-Sensorchip

In seiner firmeneigenen Reinraumproduktion stellt MELA Sensortechnik GmbH sehr genaue und hochdynamische kapazitive Dünnschichtchips her. Auf ein keramisches Trägermaterial wird ein System von Schichten aus einer Elektroden-Struktur, einem von MELA® entwickelten hygroskopischen Polymer und einer extrem dünnen wasserdampfdurchlässigen Goldschicht aufgetragen. Das Polymer absorbiert und desorbiert Wasserdampf in der Atmosphäre, wodurch sich dessen Permittivität ändert, was wiederum eine Änderung der elektrischen Kapazität des Chips bewirkt. Diese Kapazität ist direktes ein Maß für relative Feuchte. ■

## KONTAKT

### GALLTEC+MELA

Marvin Kiel  
Boschstraße 4  
71149 Bondorf  
Tel.: +49 (0)7457 9453-0  
sensoren@galltec.de  
www.galltec-mela.de

## Hygrometrisch und kapazitiv

# Technik zur Messung der Luftfeuchte

Engagierte Mitarbeiter mit großem Erfahrungsschatz und junge, kreative Ingenieure sind am Werk die unterschiedlichsten Messaufgaben exakt und zuverlässig zu lösen.



Seit mehr als 50 Jahren Hersteller und Entwickler von Feuchtesensoren

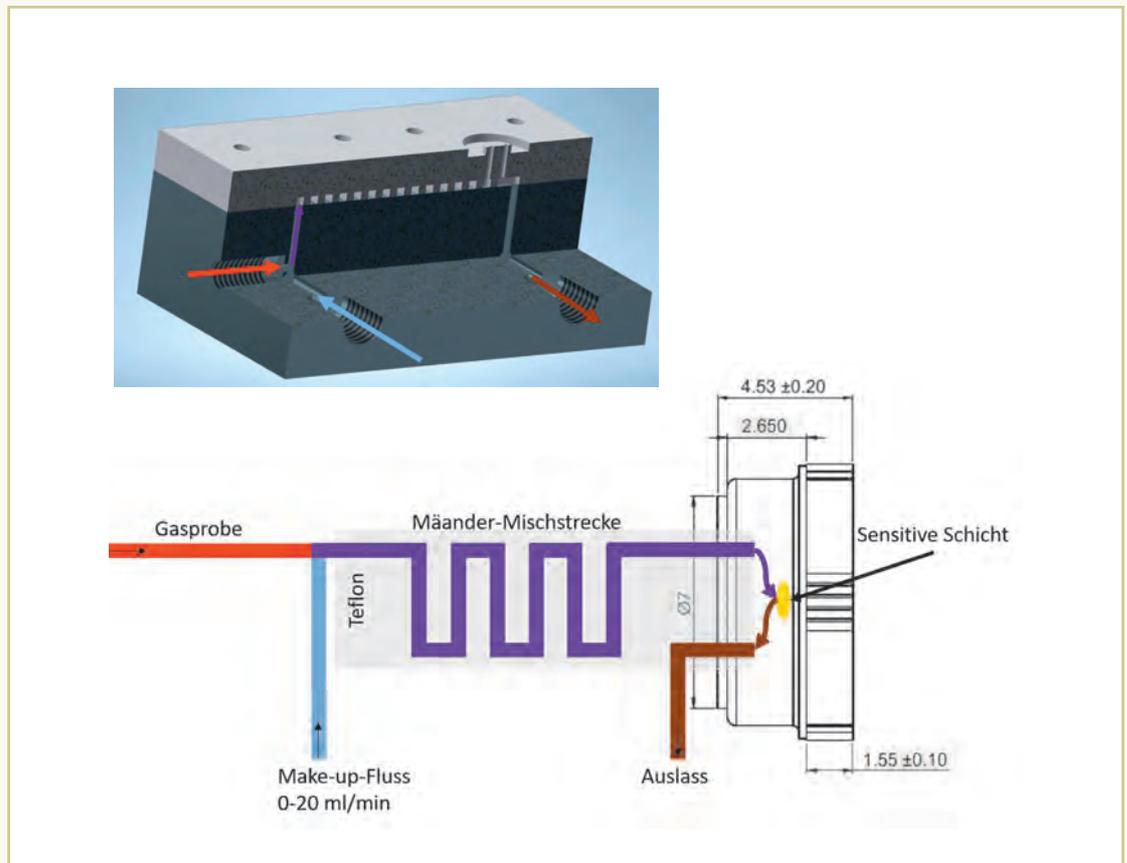
Feuchte- und Temperaturmesstechnik *high quality*

**Galltec**  
+mela

Tel.: 0049 7457 9453-0  
sensoren@galltec.de  
www.galltec-mela.de

# SENSITIVITÄT UND SELEKTIVITÄT VEREINT: APPLIKATIONEN FÜR GC-MOS-SYSTEME

Oliver Brieger, Christian Bur, Andreas Schütze



**Abb. 1:**  
Oben: CAD-Design der Sensor-  
kammer mit Anschlüssen für  
Sensorrestriktion, Make-up-Fluss  
(blau), Auslass (braun) und den  
eigentlichen Sensor.  
Unten: Schematische Darstellung  
des Flusswegs der Gasprobe (rot)  
nach Trennung in der GC-Säule.

Die Durchführung schneller und hochwertiger Gaszusammensetzungsanalysen vor Ort ist ein lang gehegter Wunsch in der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Seit Jahrzehnten gilt die Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) als Goldstandard zur Analyse von unbekanntem Gassubstanzgemischen. GC-MS-Systeme sind jedoch aufgrund ihrer komplexen Struktur und Größe nicht portabel, was den Einsatz in Feldumgebungen und bei schnellen Vor-Ort-Analysen einschränkt. Zudem erfordern sie Expertenwissen und sind in der Anschaffung und im Betrieb kostenintensiv. Für gewöhnlich werden Proben bspw. durch Thermodesorptionsröhrchen genommen, in ein Labor geschickt und anschließend zeitlich versetzt analysiert.

Diese Praxis ist teuer und schließt in vielen Anwendungen die Möglichkeit zur unmittelbaren Handlungsempfehlung bzw. Reaktion auf das Analyseergebnis aus. An einer kostengünstigen Alternative wird in verschiedenen Richtungen geforscht. Ein vielversprechender Ansatz bedient sich der besonderen Vorteile von Metalloxid Halbleiter (MOS, Metal Oxide Semiconductor) Gassensoren:

- kompakte Größe und leicht zu integrieren
- hohe Empfindlichkeit auf verschiedene Gase und flüchtige Verbindungen
- schnelles Ansprechverhalten
- relativ geringe Kosten

und koppelt sie mit den Trennungseigenschaften einer GC-Säule, um die notwendige Selektivität zu erzielen. Ein miniaturisiertes Handgerät (ähnlich dem XPID von Dräger, das eine GC-Säule mit einem Photoionisationsdetektor nutzt) ist seit jeher Ziel dieser Umsetzung. In ersten Voruntersuchungen wurde bereits die Leistungsfähigkeit solcher GC-MOS-Systeme präsentiert [1].

Die Anwendungsgebiete für solche Miniatur-GC-MOS-Systeme sind vielfältig und reichen von Umweltüberwachung und Lebensmittelqualitätskontrolle bis hin zur forensischen Analytik und medizinischen Diagnostik. Beispielsweise könnten diese Systeme zur schnellen Identifizierung von Schadstoffen in der Luft, zur Detektion von Markern aus Lebensmittelproben oder zur Analyse von Atemproben eingesetzt werden. Jede dieser Anwendungen bringt andere Zielsubstanzen, Störgrößen und Konzentrationsbereiche mit sich. Gerade im Bereich der Innenraumluftqualitätsuntersuchung zeigt sich die Herausforderung, ein Sensorsystem auf verschiedene Zielgrößen zu trainieren und gleichzeitig alle relevanten Störgrößen zu kompensieren [2]. Einen Ansatz mit einem MOS-Gassensor und einer GC-Säule lässt diese Untersuchungen mittels korrekter Sensor- und GC-Säulenwahl mit beeindruckender Empfindlichkeit zu [3]. Die systemische Integration von MOS-Gassensor und GC-Säule in ein Gesamtsystem ist hierbei jedoch entscheidend und bisher unzureichend untersucht.

Insbesondere im Design und in der Kopplung fluidischer Bauteile besteht ein deutlicher Handlungsbedarf, um ein solches System erfolgreich zu realisieren. Die nahtlose Integration von Mikrofluidik, Probeninjektion, Trennsäulen und Detektoren erfordert innovative Lösungen, um eine effiziente und zuverlässige Funktionalität zu gewährleisten. Darüber hinaus erfordert die Integration von MOS-Gassensoren als GC-Detektoren eine umfassende

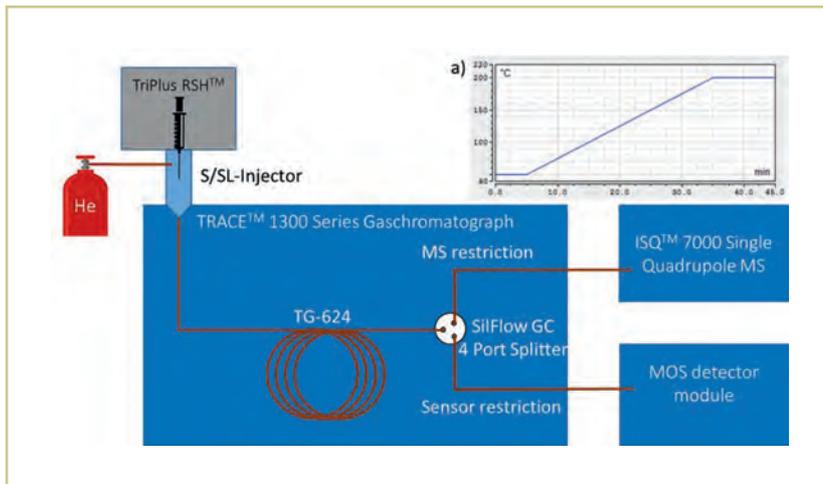
Charakterisierung und Optimierung. Verschiedene Parameter wie Betriebsweise in Form von Temperaturmodulation, Stabilität des Signals und Trennleistung müssen sorgfältig beurteilt werden, um die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu optimieren.

In den meisten Anwendungen wird eine GC-Säule mit einem Trägergas wie Wasserstoff, Helium oder Stickstoff betrieben. Für das Funktionsprinzip eines MOS-Gassensors ist eine Sauerstoffversorgung aber essenziell. Ohne ist der Sensor auf viele reduzierende Komponenten blind oder sehr unempfindlich, da das Funktionsprinzip auf der Reaktion der zu detektierenden Substanzen mit ionosorbiertem Sauerstoff beruht [4]. Gleichzeitig kann nicht durch jede GC-Säule ein sauerstoffhaltiges Gasgemisch als Trägergas geführt werden, da dieses die stationäre Phase der Säule zerstören kann. Eine Sauerstoffzufuhr nach Trennung der Substanzen, aber vor dem GC-Detektor – ein sogenannter Make-up-Fluss – wird daher benötigt. Für tragbare miniaturisierte Handgeräte wird der Ansatz von gefilterter Luft als Trägergas der GC-Säule untersucht, um die Notwendigkeit von Gaskartuschen oder Gasflaschen zu umgehen.

Ein Beispiel für ein MOS-Detektormodul mit einem mikrostrukturierten Gassensoren (AS-MLV-P2, ScioSense, Eindhoven, Niederlande) ist in **Abbildung 1** dargestellt. In einem Testaufbau wurde eine Kammer entwickelt, die den Sensor mit Sauerstoff versorgt und gleichzeitig die von der Säule eluierende Substanz schnell zum Sensor führt. Eine Mäander-Mischstrecke stellt hierbei sicher, dass Make-up-Fluss und eluierende Substanz bis zum Sensor vermischt sind, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Der Mischgasstrom wird direkt in die Kappe des Sensors geführt. Der gesamte Aufbau hinter der Säule zum MOS-Gassensor besitzt ein Totvolumen von weniger als 200 µl und ist mit einem Make-Up-Fluss von 15 ml/min in weniger als 250 ms gespült. Steuerung und Datenaufzeichnung mit einer Abtastrate von 250 Hz werden mit einer selbstentwickelten Elektronik – dem Analog Sensor Board – realisiert [5].

### Charakterisierung eines MOS-Detektors

Zur Charakterisierung des MOS-Detektors wurde dieser mit einem laborüblichen GC-MS (TRACE 1300 GC, Thermo Fisher Scientific Inc.) gekoppelt – mit einer Erweiterung: Die Probe soll nach der Trennung nicht einfach zum Detektor geführt werden, sondern zwischen den zwei Detektoren, MOS-Sensor und Massenspektrometer (MS),



**Abb. 2:** Schematischer Aufbau des GC-MOS Detektors zur simultanen Messung mit dem Massenspektrometer an einem kommerziell erhältlichen GC-MS. a) Temperaturprogramm des Ofens. [6]

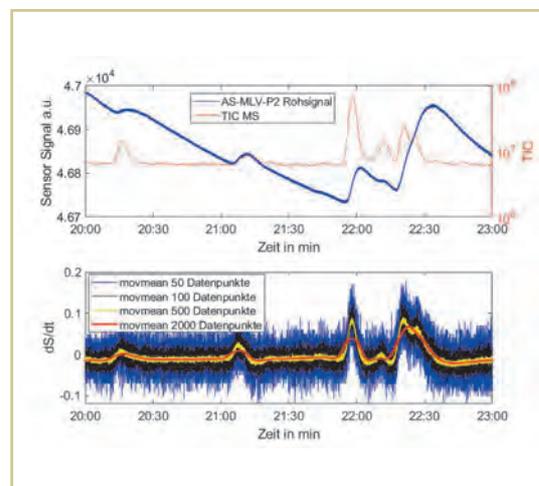
gleichmäßig aufgetrennt werden. Dadurch wird jeweils ein Chromatogramm durch MS und MOS-Detektor erzeugt, was die Bewertung eines MOS-Gassensors als GC-Detektor in einer Messung erlaubt, während das MS Retentionszeit und eluierende Substanz einander zuordnet.

Um diesen Aufbau mit passiven Elementen zu verwirklichen, ist ein korrekt dimensioniertes Restriktionspaar hinter der Säule erforderlich. Dieses lässt sich mit Hilfe einer analytischen Beschreibung des fluidischen Aufbaus über das Gesetz von Hagen-Poiseuille herleiten. So lässt sich der Volumendurchfluss  $Q_{out}$  am Ausgang eines Rohrabschnittes durch

$$Q_{out} = \frac{\pi \cdot R_{Res}^4 (p_{in} - p_{out})}{8 \cdot \eta \cdot (T_{Res}) \cdot L_{Res}} \cdot \frac{p_{in} + p_{out}}{2p_{out}}$$

beschreiben. Hierbei ist  $R_{Res}$  der Radius,  $L_{Res}$  die Länge und  $T_{Res}$  die Temperatur der Restriktion,  $p_{in}$  der Eingangsdruck,  $p_{out}$  der Ausgangsdruck und  $\eta$  die dynamische Viskosität der mobilen Phase.

**Abb. 3:** Testmessung mit Kalibrierstandard und AS-MLV-P2 bei 400 °C. Der Make-Up-Fluss ist auf 15 ml/min eingestellt.



Der finale Aufbau ist in **Abbildung 2** dargestellt. Das Trennungsverhältnis zwischen MS und MOS-Detektor lässt sich über den Eingangsdruck an der Trennsäule durch die Steuerungssoftware des Split/Splitless-Injektors einstellen.

Mit Hilfe des TriPlus RSH Autosamplers werden Proben reproduzierbar und genau konfigurierbar auf die Säule gegeben. Mit einem GC-MS-Kalibrierstandard (EPA 502/524.2: 58 VOCs (volatile organic compounds, deutsch: flüchtige organische Verbindungen) mit jeweils 200 µg/mL in Methanol) wurde der MOS-Detektor getestet. Es wurden 0,2 µl splitless injiziert, was 40 ng für jede gelöste Substanz entspricht. In **Abbildung 3** ist das Retentionszeitfenster zwischen 20:00 min und 23:00 min abgebildet. Es ist zu sehen, dass das Chromatogramm des AS-MLV-P2 von einem stetigen Rücklaufen überlagert ist. Dieses lässt sich über eine einfache zeitliche Ableitung kompensieren. Ein gleitender Mittelwert über das Ableitungssignal (500 Datenpunkte entspricht 2 s) verbessert das Signal-Rausch-Verhältnis maßgeblich, ohne die Peak-Integrität zu beeinträchtigen, wie es bei 2000 Datenpunkten zu sehen ist.

Die über den Wendepunkt des Sensorsignals (Maximum in der Ableitung) ermittelten Retentionszeiten des MOS-Detektors sind mit wenigen Sekunden Abweichung identisch zum Chromatogramm des MS. Neben Stickstoff, Sauerstoff und Argon werden nur wenige andere Substanzen nicht vom MOS-Detektor erkannt. Wiederholungsmessungen zeigen eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Mit einer Änderung der statischen Sensortemperatur auf andere Werte lassen sich bestimmte Substanzen noch sensitiver aufzeichnen [6].

**Applikationsbeispiel: Lebensmittelbewertung**

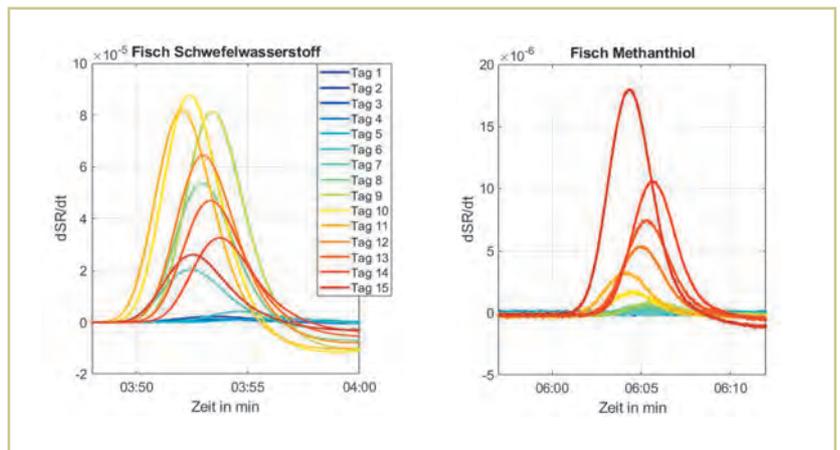
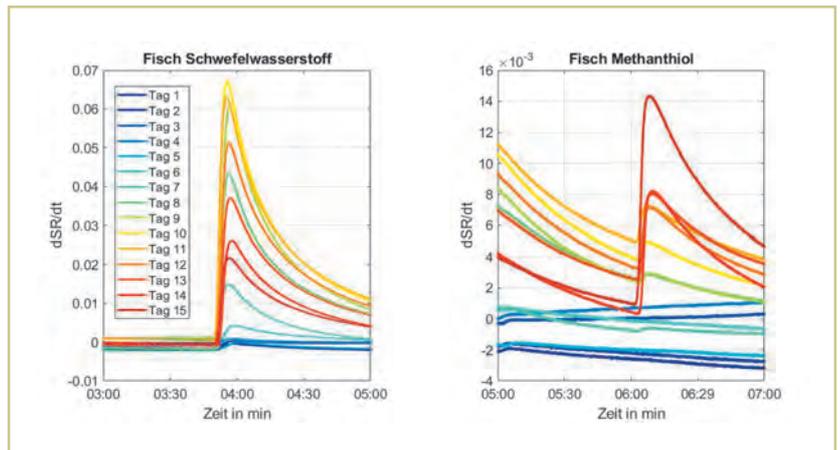
In der Lebensmittelindustrie gibt es viele Stellen in der Wertschöpfungskette, an denen man sich eine unmittelbare und objektive Zustandsbewertung wünscht. Häufig wird dieser humansensorisch durch Geruch und Aussehen ermittelt und benötigt geschultes Personal. Allerdings kann nicht jede Frucht/jeder Fisch/jede Nuss einzeln humansensorisch untersucht werden, obwohl bekannt ist, dass ein kleiner Auslöser zügig zur Reifung oder zum Verderb von Lebensmitteln eines ganzen Gebindes führen können. In vielen Situationen wären solche Fälle durch sensitive und selektive Untersuchung der Luftzusammensetzung bereits früh erkennbar und böten damit eine Möglichkeit für Korrekturen zur Vermeidung von Lebensmittelverlusten.

Im Projekt SiVERiS (gefördert durch die Deutsche Stiftung Umwelt (DBU) unter der Fördernummer 34806/01 [7]) wurde die Alterung verschiedener Lebensmittel im Kühlschrank humansensorisch, mit Referenzanalytik und MOS-Gassensoren untersucht. MOS-Gassensoren wurden hier sowohl als direkter Detektor an der Probe genutzt, als auch in MOS-Detektoren zur simultanen Messung mit einem Massenspektrometer. Untersucht wurden verschiedene Use Cases: Handel, Frischesensor und Akutprüfung. Im Use Case Handel wurden Hackfleisch, Fisch (Kabeljau), Bananen und Mandarinen untersucht. Am Beispiel von Hackfleisch und Fisch konnten neben weiteren Substanzen Schwefelwasserstoff und Methanithiol als Marker für Verderb ausgemacht werden. Mittels GC-MS kann der Konzentrationsverlauf aller Substanzen bei einer täglichen Messung verfolgt werden.

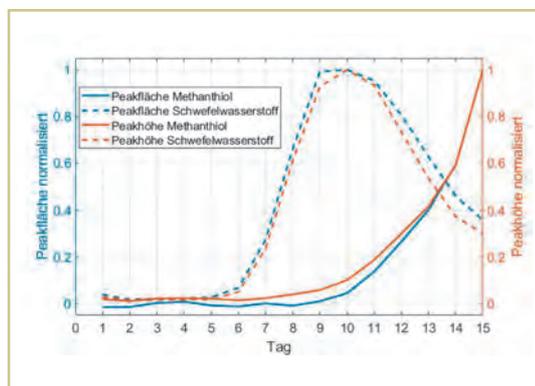
Peakhöhe und Peakfläche für die verschiedenen Tage sind in **Abbildung 6** dargestellt. Beide Parameter lassen sich nicht linear in die vorliegende Konzentration umrechnen, geben jedoch Aufschluss über den allgemeinen Konzentrationsverlauf. Für Schwefelwasserstoff ist zu sehen, dass die Konzentration nach Tag 10 wieder abfällt. Für Methanithiol ist auffällig, dass erst nach Tag 8 eine merkliche Änderung zu beobachten ist und diese mit der Alterung stetig wächst. Hier ist der Fisch bereits nicht mehr genießbar, weshalb Methanithiol eher Verderbsmarker als Frischemarker ist.

In einem alternativen Experiment wurden Mandarinen untersucht. Zwei dieser Mandarinen wurden intakt gelagert, während eine dritte Mandarine durch einen Sturz aus einer Höhe von 1 m gezielt beschädigt wurde. In **Abbildung 7** ist das Signal von D-Limonen (Retentionszeit 26:46 min) dargestellt. Es zeigt sich, dass die beschädigte Mandarine eine hohe D-Limonen-Emission aufweist, die mit der Zeit abfällt, während bei den beiden unversehrten Mandarinen nur eine vernachlässigbare Emission festgestellt wird. In einem großen Gebinde von Mandarinen kann eine auffällig hohe D-Limonen-Konzentration also auf beschädigte Früchte hinweisen, deren Verkauf oder Verarbeitung somit priorisiert werden sollte. Im Mittel liegen die berechneten Flächen (26:42 min – 26:54 min) für die unbeschädigten Mandarinen bei  $1,84 \cdot 10^4$  und  $6,60 \cdot 10^4$  (arbitrary unit). Die beschädigte Mandarine zeigt an Tag 2 die größte Fläche mit  $116 \cdot 10^4$  und selbst an Tag 15 noch  $39,0 \cdot 10^4$ . Damit also sehr gut vom Grundwert zu unterscheiden.

Sowohl beim Fisch als auch bei den Mandarinen sind quantitative Angaben einzelner Substanzen



nur begrenzt zielführend. So ist nicht zwangsläufig unterscheidbar, ob eine große Menge frischer Lebensmittel Quelle für eine bestimmte Substanz ist oder eine kleine Menge mit Beschädigung oder fortgeschrittener Alterung. Hier kann bei der Auswertung ein Vergleich zweier oder mehr Substanzen Abhilfe schaffen. So können die Peakverhältnisse zweier Markersubstanzen, die sich im Alterungsprozess unterschiedlich entwickeln, eine sicherere Zustandsbewertung ermöglichen.



**Abb. 4:** Schwefelwasserstoff- und Methanithiol-Messung von Mandarinen mit dem MOS-Detektor.

**Abb. 5:** Schwefelwasserstoff- und Methanithiol-Messung von Fisch an verschiedenen Tagen, Ableitung der Sensorreaktion.

**Abb. 6:** Auswertung der Peakhöhen (rot) und Peakflächen (blau) für Methanithiol (durchgezogene Linie) und Schwefelwasserstoff (gestrichelt). Normalisiert auf maximale Höhe.

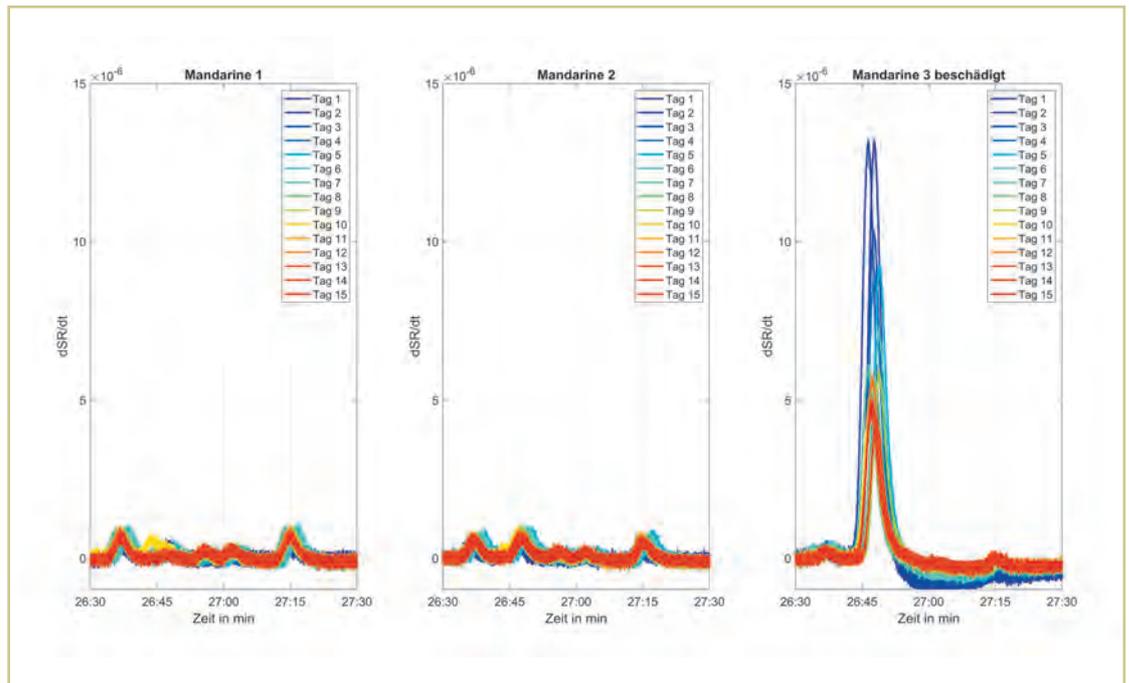


Abb. 7: D-Limonen Messung von Mandarinen mit dem MOS-Detektor.

### Weitere Applikationsbeispiele im Ausblick

Der Ansatz von GC-MOS-Systemen ist auf weitere Felder übertragbar. Eine Anpassung des Säulentyps und/oder der Länge lässt die Trennung verschiedenster Gasgemische zu. Gerade in Anwendungsfeldern, in denen sehr komplexe Gasgemische mit wechselnden Bedingungen analysiert werden müssen, ist es von großem Vorteil, Ziel- und Störgrößen getrennt messen zu können. Die vorgestellten Messungen zeigen Peakhalbwertsbreiten von etwa 5 s, abhängig von Konzentration und Retentionszeit. Eine Verkürzung der Messdauer in einem kompakten Aufbau ist durch eine kürzere Säule möglich, womit Analysen in wenigen Minuten realistisch sind.

Aber auch auf Sensorseite gibt es sehr viele freie Parameter, die auf die Applikation und die Zielsubstanzen abgestimmt werden können:

- MOS Gassensoren reagieren abhängig von ihrer Temperatur unterschiedlich sensitiv auf Gase. [6]
- Eine temperaturmodulierte Messung eines Peaks wie in [8] steigert die Sensitivität des Sensors für einen Retentionszeitabschnitt erheblich und lassen quantitative Rückschlüsse zu.
- Eine Variation des Make-up-Flusses kann die Empfindlichkeit auf manche Substanzen steigern [6].

Der vorgestellte Aufbau zeigt das Potential der Kombination von GC-Säule und MOS-Gassensor als kostengünstiges Analytikgerät für komplexe Gasgemische. Gerade der Atem von Menschen ist ein sehr komplexes und individuelles Gasgemisch mit äußerst großen Konzentrationsbereich [9]. Einzelne Komponenten im Atem quantitativ wiedergeben zu können ist eine nicht invasive diagnostische Applikation mit viel Potential. Neben der Früherkennung von Krankheiten über die Messung von Biomarkern, kann die Atemgasanalyse zum Drug Monitoring genutzt werden. Ein Sensorbasiertes System bietet die Möglichkeit bspw. auf Intensivstationen eine Echtzeitüberwachung der Konzentration des Anästhetikums Propofol im Patienten zu ermöglichen [10], [11], [12]. Die Koppelung einer GC-Säule mit einem MOS-Sensor als Detektor erbringt hier die nötige Spezifität auf die Zielsubstanz und ermöglicht sogar das gleichzeitige Monitoring mehrerer Medikamente mit nur einem Sensorsystem (vorausgesetzt, die Retentionszeiten unterscheiden sich signifikant). ■

Die Autoren danken DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt im Rahmen des Projektes SiVERiS unter dem Aktenzeichen 34806/01-36 für die finanzielle Zuwendung, sowie dem Projektpartner 3S GmbH – Sensors, Signal Processing, Systems für die exzellente Kooperation.

## LITERATUR

- [1] P. Boeker et al., „Comprehensive Theory of the Deans' Switch As a Variable Flow Splitter: Fluid Mechanics, Mass Balance, and System Behavior,” *Analytical Chemistry*, vol. 85, no. 19, p. 9021–9030, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac401419j>
- [2] Baur, T., Amann, J., Schultealbert, C., Schütze und A., „Field Study of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Temperature Cycled Operation for Selective VOC Monitoring in Indoor Air,” *Atmosphere*, Bd. 12, Nr. 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12050647>
- [3] S. Zampolli et al., „A palm-sized gas-chromatographic system for sub-ppb VOC detection in air quality monitoring applications,” *SENSORS*, 2006 IEEE, pp. 1163–1166, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2007.355837>
- [4] M. Madou und S. Morrison, *Chemical Sensing with Solid State Devices*, San Diego: Academic Press, 1989.
- [5] C. Fuchs, H. Lensch, O. Brieger, T. Baur, C. Bur und A. Schütze, „Concept and realization of a modular and versatile platform for metal oxide semiconductor gas sensors,” *tm - Technisches Messen*, vol. 89, no. 12, pp. 859–874, 3 Nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1515/teme-2022-0046>
- [6] O. Brieger, J. Joppich, C. Schultealbert, T. Baur, C. Bur und A. Schütze, „Microstructured MOS Gas Sensor as GC detector,” in *IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*, Aveiro, Portugal, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISOEN54820.2022.9789597>
- [7] „SiVERIS : Sichere Vermeidung von Lebensmittelverlusten durch Erkennung von Reife- und Verderbsprozessen mit intelligenten Sensorsystemen – DBU,” [Online]. Available: [https://cms.dbu.de/projekt\\_34806/01\\_db\\_2848.html](https://cms.dbu.de/projekt_34806/01_db_2848.html).
- [8] T. Baur, A. Schütze und T. Sauerwald, „Detektion von kurzen Gaspulsen für die Spurengasanalytik: Detection of short gas pulses for trace gas analysis,” *tm – Technisches Messen*, Bd. vol. 84, Nr. no. s1, pp. 88-92, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/teme-2017-0035>
- [9] B. d. L. Costello, A. Amann, H. Al-Kateb, C. Flynn, W. Filipiak, T. Khalid, D. Osborne und a. N. M. Ratcliffe, „A review of the volatiles from the healthy human body,” *J Breath Res.*, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1752-7155/8/1/014001>
- [10] L. M. Müller-Wirtz, F. Maurer, T. Brausch, D. Kiefer, M. Floss, J. Doneit, T. Volk, D. Sessler, T. Fink, T. Lehr und a. S. Kreuer, „Exhaled Propofol Concentrations Correlate With Plasma and Brain Tissue Concentrations in Rats” *Anesth Analg*, Bd. 132 (1), pp. 110–118, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000004701>
- [11] F. Maurer, L. Walter, M. Geiger, J. Baumbach, D. Sessler, T. Volk und S. Kreuer, „Calibration and validation of a MCC/IMS prototype for exhaled propofol online measurement,” *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, Bd. 145, pp. 293-297, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.06.052>
- [12] C. Bur, K. Karst, A. Schütze, F. Maurer, S. Radermacher, K. Hoffmann und S. Kreuer, „Measuring Exhaled Propofol in an Ex-Vivo Lung Model With Low-Cost Metal Oxide Gas Sensors,” in *Proc. EUROSENSORS XXXV*, Lecce, Italy, 10-13 Sept. 2023.



## UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

Lehrstuhl für Messtechnik

Oliver Brieger, Christian Bur, Andreas Schütze

Campus A5,1, 66123 Saarbrücken

c.bur@lmt.uni-saarland.de

[www.lmt.uni-saarland.de](http://www.lmt.uni-saarland.de)



**Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH**

Eichenfeldstr. 1  
83607 Holzkirchen  
Deutschland

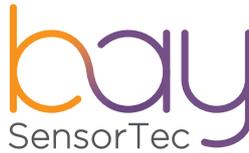
Datenlogger, Sensoren, Messsoftware, Kalibrierungen  
Tel.: 08024 3007 0 • amr@ahlborn.com



AMITRONICS  
Angewandte Mikromechatronik GmbH

**AMITRONICS**  
Angewandte Mikromechatronik GmbH

Waldmeisterstraße 99 +49 (0) 89 35064 858  
80935 München +49 (0) 173 3559079  
www.amitronics.de info@amitronics.de



**Bay SensorTec GmbH**  
Erfurter Straße 31  
85386 Eching, Deutschland  
+49 89 189 41 49-11  
info@bay-sensortec.com  
www.bay-sensortec.com

**Beckhoff Automation GmbH & Co. KG**  
Hülshorstweg 20  
33415 Verl  
Telefon: +49 5246 963-0  
info@beckhoff.com  
www.beckhoff.com

New Automation Technology **BECKHOFF**



Konrad-Zuse-Straße 14  
99099 Erfurt  
Germany  
TEL: +49 361 663 141 0  
e-MAIL: info@cismst.de  
WEB: www.cismst.de

**Ihr Experte**  
für Sensorik & Messtechnik

ALTHEN GmbH T +49 (0)6195 7 00 60  
Mess- & Sensortechnik F +49 (0)6195 7 00 666  
Dieselstrasse 2 info@althen.de  
D-65779 Kelkheim



www.althensensors.com/de

**Barksdale®**  
CONTROL PRODUCTS  
Barksdale, Inc./Barksdale GmbH  
A Subsidiary of Crane Co.

**Stammhaus**  
European Head Office

Barksdale GmbH  
Dorn-Assenheimer Str. 27  
61203 Reichelsheim  
Germany  
T: +49 (0) 603 5949-0  
F: +49 (0) 603 5949-111  
www.barksdale.de

**BD|SENSORS**  
pressure measurement

BD|SENSORS GmbH  
BD-Sensors-Straße 1 Tel. +49 9235 98 11 0  
D-95199 Thierstein Fax +49 9235 98 11 11  
www.bdsensors.de info@bdsensors.de

**DRUCK** auf höchstem NIVEAU.



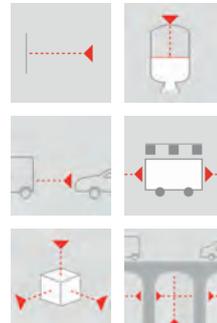
THE MEASUREMENT SOLUTION.



**Sensoren, Messgeräte und Systeme**  
für die Automatisierung

**burster präzisionsmesstechnik gmbh & co kg**  
Tel. +49-7224-645-0  
info@burster.com

burster.com



**DIMETIX**  
LASER DISTANCE SENSORS

**Dimetix AG**  
Degersheimerstrasse 14  
9100 Herisau  
Switzerland  
Tel: +41 71 353 00 00  
sales@dimetix.com  
www.dimetix.com

SWISS PRECISION

JAHRESMAGAZIN INGENIEURWISSENSCHAFT 2023/24

[www.messundsensortechnik-online.de](http://www.messundsensortechnik-online.de)



**Driesen + Kern GmbH**

Am Hasselt 25  
D-24576 Bad Bramstedt

Tel.: + 49 (0)4192 8170-13  
Fax: + 49 (0)4192 8170-99  
E-Mail: info@driesen-kern.de  
Internet: www.driesen-kern.de/dkp



Sensoren · Messgeräte · Datenlogger



**E-JOYN**

by Hirschmann Automotive GmbH  
Oberer Paspelsweg 6-8, A-6830 Rankweil  
www.hirschmann-automotive.com

**Manuel Linseder**

Global Area Manager E-JOYN

T +43 5522 307-1332  
M +43 664 846 42 74  
manuel.linseder@e-joyn.com



*Datenerfassung  
Transienten-Rekorder  
DAQ-Software*

**Elsys AG**

CH-5443 Niederrohrdorf  
Schweiz



Tel. +41 56 496 01 55  
info@elsys-instruments.com  
www.elsys-instruments.com



Feuchte- und  
Temperaturmesstechnik *high quality*



Tel. + 49 7457 9453-0  
sensoren@galltec.de  
www.galltec-mela.de

**Berührungslose  
Temperaturmessungen  
von -100 °C bis 3000 °C**

**HEITRONICS**  
Infrarot Messtechnik



HEITRONICS  
Infrarot Messtechnik GmbH  
Kreuzberger Ring 40  
65205 Wiesbaden  
Deutschland

Telefon: +49 611 973 93-0  
info@heitronics.com  
www.heitronics.com



**HENSOLDT Sensors GmbH**

Wörthstrasse 85  
89077 Ulm  
Germany

Tel.: +49 (0) 731 392-0  
jobs@hensoldt.net  
hensoldt.net/karriere

**IST Innovative  
Sensor Technology**

physical. chemical. biological.

**IST AG**

Stegrütistrasse 14 +41 71 9920100  
CH-9642 Ebnat-Kappel www.ist-ag.com  
Switzerland info@ist-ag.com



**Daniel Hofer**

Dipl. El.-Ing. FH  
Head of Product Management

KELLER Druckmesstechnik AG  
St. Gallerstr. 119, 8404 Winterthur  
Switzerland

+41 52 235 25 25  
+41 52 235 25 36  
d.hofer@keller-druck.com



www.keller-druck.com



*Laser-made solutions.*

**LCP Laser-Cut-Processing GmbH**  
Laseranwendungszentrum „Hermsdorfer Kreuz“  
Heinrich-Hertz-Str. 16 | 07629 Hermsdorf

+49 36601 9327-0  
vertrieb@lcp GmbH.de

www.lcp GmbH.de



**Gas-Messtechnik**

**LogiDataTech GmbH**  
Aschmattstrasse 7  
76532 Baden-Baden, Germany

fon +49 7221 97062 - 0  
fax +49 7221 97062 - 99  
email info@logidatatech.com  
web www.logidatatech.com

JAHRESMAGAZIN INGENIEURWISSENSCHAFT 2023/24

[www.messundsensortechnik-online.de](http://www.messundsensortechnik-online.de)



Präzise Sensoren und Messtechnik  
für Automation, Industrie und Maschinenbau

Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG

Königbacher Str. 15  
94496 Ortenburg / Germany  
www.micro-epsilon.com

Tel. +49 (0) 8542 168-0  
Fax +49 (0) 8542 168-90  
info@micro-epsilon.de

**MICROSENSOR**

Dipl.-Ing.  
**Kai Lu**

Head of Marketing & Sales

**MICRO SENSOR GmbH**

Girardetstr. 6, 45131 Essen, Germany  
M: +49 176 7387 7396  
kai.lu@microsensorcorp.de  
https://de.microsensorcorp.com

A 100% holding subsidiary of Micro Sensor Co., Ltd.

**novotechnik**  
Siedle Gruppe

Novotechnik  
Messwertaufnehmer OHG  
Horbstraße 12  
73760 Ostfildern (Ruit)  
Telefon +49 711 4489-0  
Telefax +49 711 4489-118  
www.novotechnik.de  
info@novotechnik.de



**Geschäftsbereich Optische Messsysteme**

Polytec GmbH · Polytec-Platz 1-7 · 76337 Waldbronn  
Tel. +49 7243 604-0 · om-info@polytec.de  
www.polytec.com



**Process Sensing Technologies PST GmbH**

Max-Planck-Str. 14  
61381 Friedrichsdorf  
Tel.: +49 (0) 7243 6019002  
christoph.arnswald@processsensing.com  
[www.processsensing.com](http://www.processsensing.com)

**SPEZIAKABEL  
KABEL KONFEKTION  
MESSTECHNIK**



**SAB BRÖCKSKES GmbH & Co. KG**

Grefrather Str. 204-212 b | 41749 Viersen | DEUTSCHLAND  
Telefon +49 (0) 2162 / 898-0  
www.sab-kabel.de | info@sab-cable.com



**SENSOR+TEST**

DIE MESSTECHNIK - MESSE  
The Measurement Fair

Nürnberg,  
**11. – 13. Juni 2024**

[www.sensor-test.com](http://www.sensor-test.com)

AMA Service GmbH - 31515 Wunstorf  
Tel. +49 5033 96390 - info@sensor-test.com

**STW** Making mobile  
machines perform.

**Sensor-Technik Wiedemann GmbH (STW)**

Am Bärenwald 6  
87600 Kaufbeuren  
Tel.: +49 8341 9505-0  
sensors@wiedemann-group.com  
www.stw-mm.com



**Dominik Schneider**  
Product & Market Segment Manager

YAGEO Nexensos GmbH  
Reinhard-Heraeus-Ring 23  
63801 Kleinostheim, Germany  
P +49 6181 35-2666  
M +49 176 10602988  
dominik.schneider@yageo.com  
www.yageo-nexensos.com



Kompetenz in keramischer Sensorik



**UST Umweltsensortechnik GmbH** | [www.umweltsensortechnik.de](http://www.umweltsensortechnik.de)  
Dieselstr. 2 und 4 | 99331 Geratal OT Geschwenda | Tel: +49(0)36205713-0

JAHRESMAGAZIN INGENIEURWISSENSCHAFT 2023/24

[www.messundsensortechnik-online.de](http://www.messundsensortechnik-online.de)



**sps**

12. – 14.11.2024  
NÜRNBERG

mesago

# Bringing Automation to Life

33. Internationale Fachmesse  
der industriellen Automation

Praxisnah.  
Zukunftsweisend.  
Persönlich.

Entdecken Sie die Innovationen von morgen auf der SPS 2024.

Vom einfachen Sensor bis hin zu intelligenten Lösungen, vom heute Machbaren bis hin zur Vision einer umfassend digitalisierten Industrielwelt - Die SPS bildet mit ihrem einzigartigen Konzept das komplette Spektrum der smarten und digitalen Automation ab.

Werden Sie Teil des Automation-Hotspots und finden Sie maßgeschneiderte Lösungen für Ihren Anwendungsbereich.



Mehr Informationen unter  
[sps-messe.de](https://sps-messe.de)





**+ KELLER**

# WASSERSTOFF DRUCKTRANSMITTER

WIR ENTWICKELN ZUKUNFT

**H<sub>2</sub>**



23SY-Ei-H2

## KELLER H2-PORTFOLIO

- Verschiedene Genauigkeitsklassen je Einsatzgebiet
- Selektierte Edelstahllegierung für minimale Materialversprödung
- Vergoldete Membran zur Reduktion der H<sub>2</sub>-Diffusion
- Metallisch dichtende Prozessanschlüsse
- Vollverschweisste Konstruktion, kein Elastomer in Kontakt mit dem Medium
- Hervorragende Langzeitstabilität und Langlebigkeit
- ATEX-zertifiziert

[keller-druck.com](http://keller-druck.com)