

Fraunhofer IPM

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

**Jahresbericht 2025/2026**

# Messen • Kontrollieren • Optimieren

JOSEPH VON
**FRAUNHOFER**
1787–1826

**Jahresbericht 2025/2026**

# Messen • Kontrollieren • Optimieren

*Titelbild: Effizientes Zustandsmonitoring unter Wasser. Das Underwater LiDAR System ULi ist ein autonom agierendes Lasermesssystem.*
*Mehr zum Thema autonome Messrobotik auf S. 33–34*

# New Space – neue Chancen für anspruchsvolle Messtechnik

## Robuste und zuverlässige Systeme: im Weltraum und auf der Erde

**Sehr geehrte Kundinnen und Kunden,**
**sehr geehrte Partnerinnen und Partner,**

nie war es so günstig und so einfach wie heute, Satelliten zu bauen und zu launchen. Kleinsatelliten für Kommunikation, Navigation, Erdbeobachtung, Logistik und vieles mehr ermöglichen die Umsetzung neuer Geschäftsideen und schaffen einen boomenden Raumfahrtmarkt. Wir sind entschlossen, die Chancen des »New Space« zu nutzen – für unsere Kundinnen und Kunden und für unsere eigene Forschung und Entwicklung.

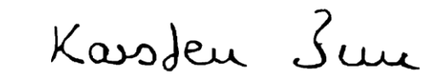
Forschung für den »New Space« findet in all unseren vier Fachabteilungen statt – einige Beispiele: Mit einem drohnenbasierten System erfassen wir terrestrische Referenzdaten zur Validierung und Kalibration von Satellitendaten und -instrumenten. Wir entwickeln Messmethoden, mit denen sich Kameras und Sensoren für den Weltraumeinsatz testen lassen. Auch können unsere Systeme die Qualität kommerziell hergestellter Bauteile für die Satelliten-Volumenfertigung prüfen. Unsere Sensoren detektieren unerwünschte Restmagnetisierungen, und mit Heatpipes und Peltier-Kühlern sorgen wir für effektives Temperaturmanagement in Satelliten. Auf der »Space Tech Expo« in Bremen im November 2025 waren alle Geschäftsfelder vertreten, und die Aufbruchstimmung war deutlich zu spüren!

Die Geschichte des Fraunhofer IPM begann mit Raketen für Atmosphärenuntersuchungen unter der Leitung von Prof. Dr. Karl Rawer. Ein hoher TRL und extreme Robustheit auch unter widrigen Bedingungen – damit punkteten bereits die ersten Entwicklungen unseres Instituts. Diese Eigenschaften prägen bis heute unseren technischen Anspruch – im »New Space« ebenso wie in allen Bereichen, in denen unsere Technologien und Systeme zum Einsatz kommen. Was wir bauen, funktioniert dauerhaft, zuverlässig und auch in sehr unkooperativen Umgebungen – eine freundliche Umschreibung für heiß, ätzend, vibrierend oder schmutzig.

Heben Sie also gern mit uns ab zu neuen Erfolgen – im »New Space«, aber auch hier auf unserem schönen Planeten Erde!

Damit Ihnen nichts entgeht, melden Sie sich gern zu unserem **monatlichen Newsletter** an und folgen Sie uns in den sozialen Medien, insbesondere auf LinkedIn. Sprechen Sie uns auch gern direkt an!

Herzlichst, Ihr



*Karsten Buse, Institutsleiter*



**Die neue Raumfahrt bietet enorme wirtschaftliche Chancen. Gemeinsam mit der Industrie werden wir sie nutzen.«**

**Prof. Karsten Buse, Institutsleiter**

# Inhalt


**Editorial** . . . . . **3**

**Überblick** . . . . . **4**

Wer wir sind. Was wir tun. . . . . 5

Zahlen . . . . . 7

Organisation . . . . . 9

Kuratorium . . . . . 10

Investitionen . . . . . 11

Professuren . . . . . 12

**Magazin** . . . . . **13**

Kurz berichtet . . . . . 14

Drei Fragen an: Angelina Waigand . . . . . 18

Fotostory: Ein Tag im Labor . . . . . 19

Kundeninterview: Schütz GmbH Messtechnik . . . . . 20

**Geschäftsfelder** . . . . . **22**

**Produktionskontrolle** . . . . . 23

Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen . . . . . 24

Fokus: Echtheitsprüfung und Produktauthentifizierung . . . . . 27

**Objekt- und Formerfassung** . . . . . 29

Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen . . . . . 30

Fokus: Autonome Sensorsysteme . . . . . 33

**Gas- und Prozesstechnologie** . . . . . 35

Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen . . . . . 36

Fokus: Spurengassensorik . . . . . 39

**Photonische Systeme** . . . . . 41

Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen . . . . . 42

Fokus: Optische Materialien . . . . . 44

**Index** . . . . . **46**

Publikationen . . . . . 47

Patente . . . . . 50

Doktorarbeiten . . . . . 51

Großprojekte . . . . . 52

Netzwerk . . . . . 53

**Fraunhofer-Gesellschaft** . . . . . **54**

**Impressum** . . . . . **55**

# **Überblick** Fraunhofer IPM



*Beim Aufbau von Spiegeloptiken ist eine ruhige Hand gefragt – manchmal sogar mehrere Hände.*

# Wer wir sind. Was wir tun.

**Unsere optischen Technologien und Systeme machen industrielle Prozesse effizienter, nachhaltiger und zuverlässiger. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft erschaffen wir maßgeschneiderte Lösungen – vom Mess- und Prüfsystem bis zu optischen High-End-Komponenten für die Spitzenforschung.**

## Unsere Mission

Wir entwickeln Messtechnik und erweitern die Welt des Messbaren. Dazu forschen wir an physikalischen, insbesondere photonischen Technologien. Wir verfolgen neue Ansätze zur Analyse von Messdaten und erhöhen damit deren Nutzen. So schaffen wir Lösungen für effizienten Ressourceneinsatz, Qualität und Zuverlässigkeit.

## Unsere Vision

Wir etablieren uns als führendes Institut für industrielle Messtechnik und produktiv nutzbare Messdaten. Ausgehend von unserer exzellenten Forschung steigern wir Technologie-Reifegrade und tragen so spürbar zu Nachhaltigkeit, Sicherheit und Fortschritt bei.

## Zusammenarbeit mit uns

Als Industriekunde profitieren Sie von der wissenschaftlichen Expertise unseres Teams und von einer erstklassigen technischen Infrastruktur. Mit Know-how, Kreativität und Engagement schaffen wir gemeinsam mit Ihnen Innovationen – zugeschnitten auf Ihre ganz spezifische Fragestellung.

### Es gibt unterschiedliche Wege, mit uns zusammenzuarbeiten.

**Individuell: industrielle Auftragsforschung**
Wir entwickeln Lösungen für spezifische Messaufgaben der Industrie – von der Ideenfindung über die Systementwicklung oder Kleinserienherstellung bis zur Installation von Messsystemen vor Ort.

**Im Verbund: öffentlich geförderte Projekte**
Komplexe technische Problemstellungen oder neue Forschungsfelder gehen wir gemeinsam mit anderen Fraunhofer-Instituten oder Forschungseinrichtungen und Industriepartnern an – unterstützt durch Fördermittel von Land, Bund oder der EU.

**Langfristig: strategische Partnerschaften**
Im Rahmen einer strategischen Partnerschaft unterstützen wir Sie langfristig bei technologischen Fragen und Innovationsprozessen. Exklusivität ist für größere Themenbereiche möglich und die Erfahrung in der Zusammenarbeit sorgt für besonders hohe Effizienz.

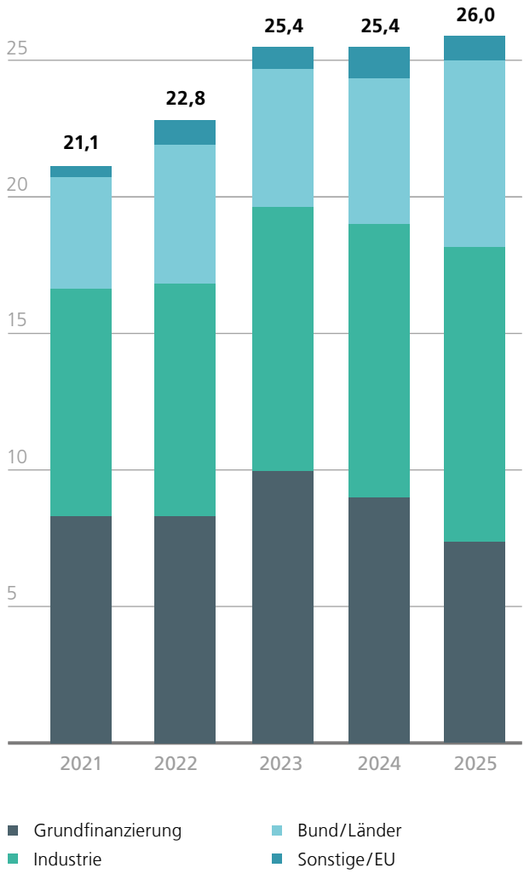
## Unser Angebot

- Technologiestudien und Beratung
- Analysen und Messungen
- Technologie- und Systementwicklung
- Installation und Service

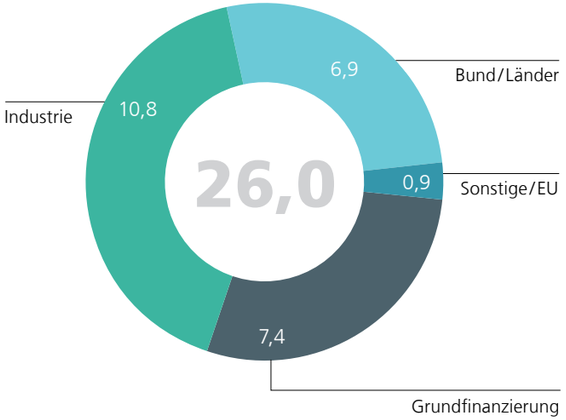


# **Zahlen** Fraunhofer IPM

**Entwicklung** Betriebshaushalt in Mio. Euro

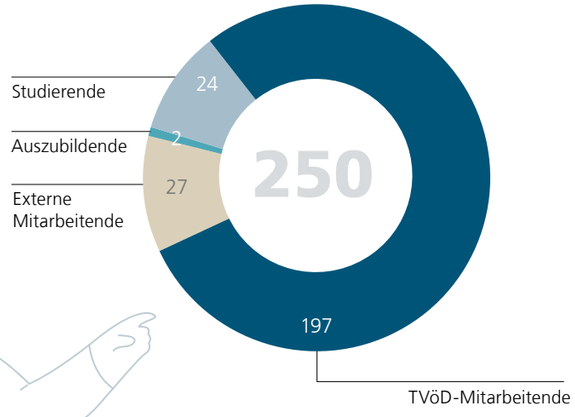



**Betriebshaushalt** 2025 in Mio. Euro

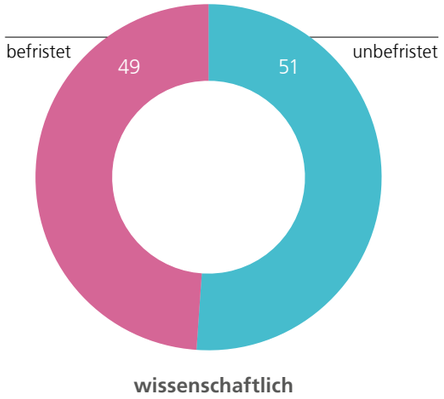





## **Mitarbeitende** 2025

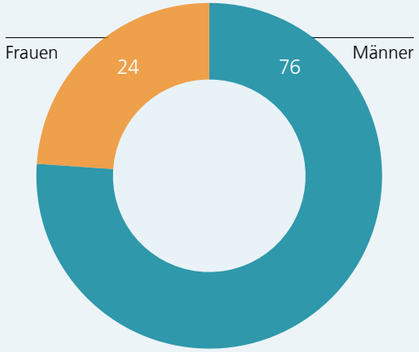



## **Beschäftigte nach TVöD** Anteil befristeter/unbefristeter Verträge 2025 in %

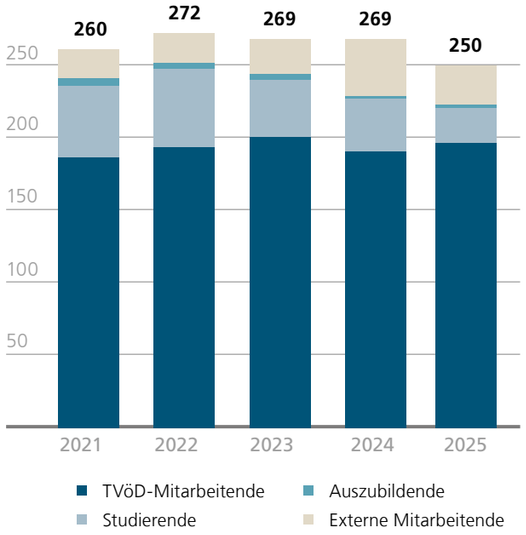


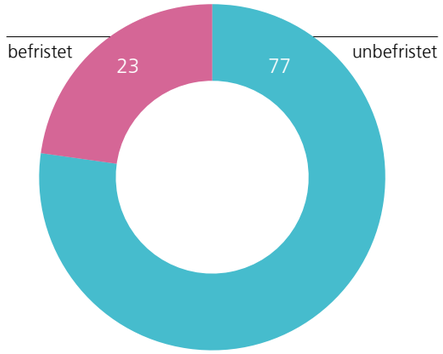

**wissenschaftlich**

## **Wissenschaftliche Mitarbeitende** 2025 in %




## **Entwicklung** Anzahl der Mitarbeitenden




**nicht-wissenschaftlich**

## **Nationalitäten unserer Mitarbeitenden** 2025



# Organisation

## INSTITUTSLEITUNG



**Institutsleiter**
Prof. Dr. Karsten Buse



Stellv. Institutsleiter
Prof. Dr. Daniel Carl



Forschung und Strategie
Dr. Milena Hugenschmidt



Organisations-entwicklung
Dr. Heinrich Stülpnagel



Betriebstechnik
Benjamin Schlegel



Mechanik und Konstruktion
Thomas Hinrichs

## VERWALTUNG UND IT



**Verwaltungsleiterin**
Angelina Waigand



Verwaltung
Marvin Steinebrunner



Informations- und Telekommunikationstechnik
Gerd Kühner



Recruiting und Personalentwicklung
Saskia Sailer

## KOMMUNIKATION UND MEDIEN



**Leiter Kommunikation und Medien**
Holger Kock

## PRODUKTIONSKONTROLLE

Seite 23



**Abteilungsleiter**
Prof. Dr. Daniel Carl



Optische Oberflächenanalytik
Dr. Alexander Blättermann



Inline Vision Systeme
Dr. Tobias Schmid-Schirling



Geometrische Inline-Messsysteme
Dr. Alexander Bertz

## OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

Seite 29



**Abteilungsleiter**
Prof. Dr. Alexander Reiterer



Mobiles terrestrisches Scanning
Dr. Philipp von Olshausen



Airborne- und Unterwasser-Scanning
Dr. Christoph Werner



Autonome Messrobotik
Dr. Dominik Merkle



Mobile Bahn-Messtechnik
Dr. Kira Zschiesche



3D-Geodaten-Analyse
Benedikt Rombach

## GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

Seite 35



**Abteilungsleiter**
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein



Integrierte Sensorsysteme
Dr. Benedikt Bierer



Spektroskopie und Prozessanalytik
Dr. Raimund Brunner



Thermische Messtechnik und Systeme
Dr. Katrin Schmitt



Kalorische Systeme
Dr. Kilian Bartholomé

## PHOTONISCHE SYSTEME

Seite 41



**Abteilungsleiter**
PD Dr. Frank Kühnemann



Nichtlineare Optik und Quantensensorik
Dr. Jens Kießling

# **Kuratorium** Gut beraten

**Bei wegweisenden Entscheidungen und strategischen Fragen bauen wir auf ein hochkarätig besetztes Team, das Erfahrung und Expertise aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft einbringt. Einmal jährlich trifft sich das Kuratorium zum persönlichen Austausch in Freiburg – mit dabei sind auch Vertreterinnen und Vertreter der Fraunhofer-Gesellschaft. Anfang 2026 übernahm unser langjähriges Kuratoriumsmitglied Stephanie Busse den Vorsitz des Gremiums.**

## Vorsitzende

Stephanie Busse
DB InfraGO AG

## Mitglieder

Sebastian Bannert
Robert Bosch GmbH

Mehran Ghahremanpour
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Dr. Mathias Jonas
Internationale Hydrographische Organisation

Prof. Dr.-Ing. Katharina Klemt-Albert
RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Baumanagement, Digitales Bauen und Robotik im Bauwesen

Dr. Fabian Lausen
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Dr. Stefan Raible
Sciosense Germany GmbH

Prof. Dr. Michael Totzeck
Carl Zeiss AG

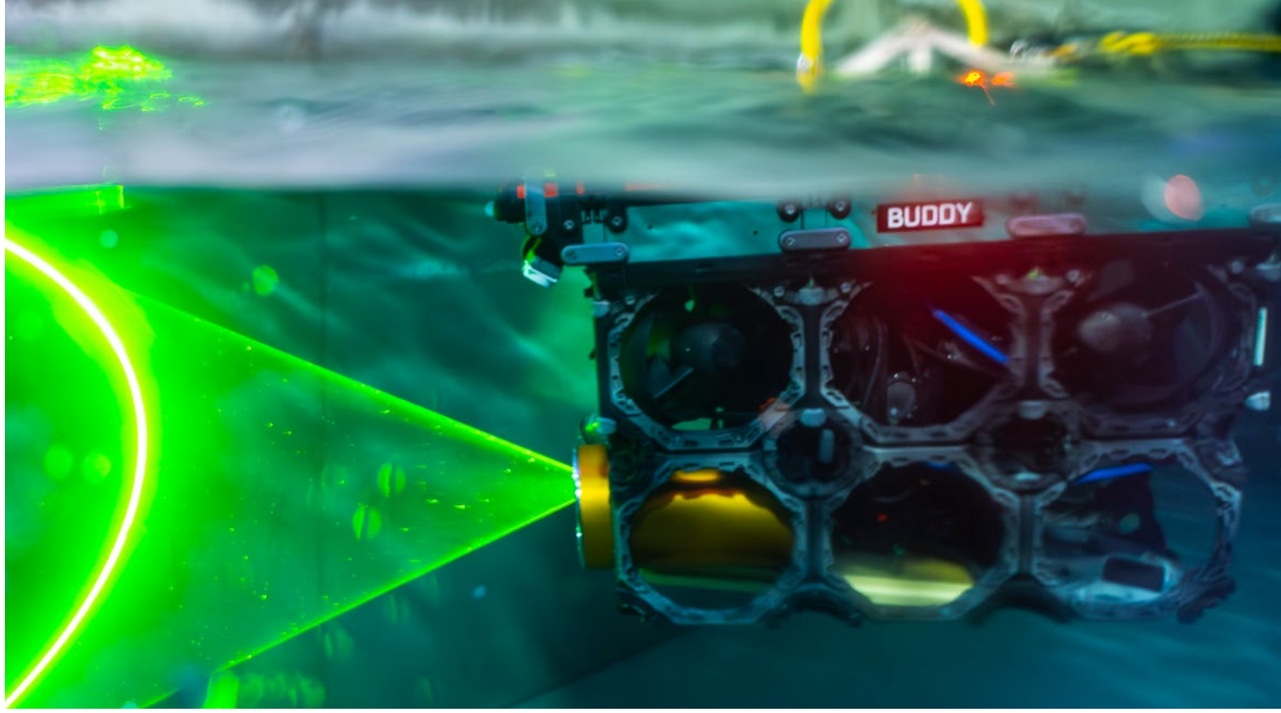
Prof. Dr. Ulrike Wallrabe
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK



*Gute Stimmung beim Kuratoriumstreffen im Juli 2025. Die Besetzung des Gremiums hat sich im Jahr 2026 geändert.*

# **Investitionen** 2025

**Für bestmögliche Forschungsbedingungen haben wir auch 2025 in Geräte und Infrastruktur investiert. Eine exzellente technische Infrastruktur ist neben der Expertise und dem Engagement unserer Mitarbeitenden eine entscheidende Voraussetzung für unsere Forschung und Entwicklung.**




*Installiert auf einer Sensorplattform kann unser LiDAR-System autonom navigieren und Messungen unter Wasser ausführen.*

## Zwei neue Trägerplattformen für die autonome Messrobotik

Für die Erfassung schwer zugänglicher oder gefährlicher Umgebungen haben wir einen Roboterhund als Trägerplattform angeschafft. Der Vierbeiner bewegt sich auch in unebenem Gelände und überwindet Stufen und Hindernisse, sodass er beispielsweise auf Baustellen, in Gebäuden, Tunneln, Minen oder Waldgebieten genutzt werden kann. Ausgestattet mit unseren LiDAR- und Kamerasensoren kann der Roboterhund neue Messaufgaben übernehmen und zusätzliche Anwendungsfelder wie z. B. die Rettungsrobotik erschließen.

Eine leistungsfähige Drohne bietet uns auch in der Luft neue Möglichkeiten zur Entwicklung autonomer Messsysteme. Das Unmanned Aircraft System (UAS) erfüllt die Anforderungen für künftige Specific Operations Risk Assessments (SORA) und ist hierfür mit verschiedenen Sicherheitsvorrichtungen (z. B. einem Fallschirm) ausgestattet. Somit ist der Betrieb in Zukunft auch über dichtbesiedelten Bereichen möglich.

## Optisches Trackingsystem

Für die Entwicklung autonomer robotischer Messplattformen steht uns ein neues optisches Trackingsystem zur Verfügung. Das OptiTrack-System basiert auf mehreren Kamerasystemen und ist in der Lage, Position und Orientierung (6 Freiheitsgrade) mehrerer Objekte in einem gewissen Volumen hochgenau in Raum und Zeit zu messen. Das Tracking von mobilen Plattformen und Sensoren hilft uns, Methoden zur simultanen Lokalisierung und Kartierung (SLAM) zu erforschen, die bei der autonomen Navigation von Messplattformen zum Einsatz kommen. Zusätzlich kann die Information des Tracking-Systems genutzt werden, um Multisensorsysteme zu kalibrieren.

## Ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug

Seit August 2025 können wir unsere Unterwassersensorik auf einem eigenen ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug testen. Das ROV (Remotely operated underwater vehicle) dient z. B. als Trägerplattform für das Underwater LiDAR System ULi. Es ist mit Doppler-Velocity-Logs (DVL), Trägheitsnavigationssystem, Drucksensor und Kamera ausgestattet, die die Verortung des Messsystems unter Wasser stützen. Für den autonomen Messbetrieb kann die Robot Operating System-Schnittstelle (ROS) genutzt werden. Mit der Plattform werden wir Messungen in der Unterwasser-Testmesstrecke am Institut und in unterschiedlichen Gewässern unter realen Messbedingungen durchführen.

## Industrieroboter mit Schutzzaun

Unsere Fluoreszenz-Laserscanner werden von Industrieunternehmen weltweit genutzt, bislang überwiegend zur Prüfung kleiner und mittlerer Bauteile mit einer Fläche von zirka einem halben Quadratmeter. Für die Weiterentwicklung unserer Systeme verfügen wir nun über einen leistungsstarken kollaborativen Roboter (Cobot), der den Laserscanner über die Bauteiloberfläche bewegt und Bauteile von mehreren Quadratmetern erfassen kann. So können wir Versuche und Machbarkeitsstudien für die Qualitätsprüfung beim »Gigacasting« und andere Anwendungen mit großen Bauteilen, beispielsweise für die Luft- und Raumfahrt oder die Wasserstofferzeugung, zukünftig im Haus durchführen. Für realistische Prozessgeschwindigkeiten kann der Cobot-Modus deaktiviert werden; für diesen Fall ist die Anlage zum Schutz der Kolleginnen und Kollegen mit einem Schutzzaun ausgestattet.

# **Professuren** Universität Freiburg

**Fraunhofer IPM ist mit vier Professuren und einer Privatdozentur an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg vertreten. Durch die enge Anbindung an eine der forschungsstärksten ingenieurswissenschaftlichen Fakultäten Deutschlands sind wir an Spitzenforschung und Ausbildung exzellenter Nachwuchskräfte beteiligt.**




*Bestens vernetzt auf dem »Campus Flugplatz«: Wir kooperieren eng mit der Technischen Fakultät der Universität Freiburg.*

universität freiburg

## Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

### Professur für Optische Systeme

Prof. Dr. Karsten Buse
PD Dr. Ingo Breunig
imtek.de/professuren/optische-systeme

IMTEK

Forschungsschwerpunkte
- Nichtlinear-optische Materialien
- Optische Flüstergalerieresonatoren
- Miniaturisierte Festkörperlaser
- Optische Frequenzkonverter (optisch-parametrische Oszillatoren, OPO)
- Schnelles Durchstimmen von Laserfrequenzen
- Integrierte Optik

### Professur für Gassensoren

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein
Dr. Katrin Schmitt
imtek.de/professuren/gassensoren

IMTEK

Forschungsschwerpunkte
- Mikrostrukturierte Gassensoren
- Mikrostrukturierte IR-Strahler für das MIR
- Laserspektroskopie
- Kompakte optische Gasmesssysteme
- Photoakustik
- Katalytische Sensoren für brennbare Gase
- Systemintegration

## Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH

### Professur für Monitoring von Großstrukturen

Prof. Dr. Alexander Reiterer
Dr. Annette Schmitt
uni-freiburg.de/tf-inatech-mls

INATECH
INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME

Forschungsschwerpunkte
- Inspektion und Überwachung von Großstrukturen
- Entwicklung und Implementierung neuartiger Sensorkonzepte auf Basis von Laserscannern und Kameras
- Datenanalyse und -interpretation, dabei Fokus auf die Verknüpfung von Einflussparametern, verursachenden Kräften und gemessenen Veränderungen
- Entwicklung und Umsetzung kompletter Systemketten – von der Datenakquisition bis zur Datenauswertung

### Professur für Produktionskontrolle

Prof. Dr. Daniel Carl
uni-freiburg.de/tf-inatech-pk

INATECH
INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME

Forschungsschwerpunkte
- Erforschung neuer optischer Mess- und Prüfverfahren mit Fokus auf flexibler Einsatzfähigkeit in rauen Produktionsumgebungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Vollständige Automatisierung der Qualitätssicherung durch intelligentes Zusammenspiel mit Robotik sowie hybriden Ansätzen regelbasierter Datenauswertung und KI
- Entwicklung von Feedback-Verfahren zur Steuerung / Regelung von Produktionsprozessen
- Rückverfolgbarkeit von Bauteilen über den gesamten Produktlebenszyklus

# **Magazin** Kurz berichtet



*Bei der Reinigung von Lithiumniobat-Kristallen ist Fingerspitzengefühl nötig.*

# Spatenstich für das Ingenieurzentrum Nachhaltigkeit

Am 22. Juli 2025 haben wir mit rund 90 geladenen Gästen aus Politik, Wissenschaft und Industrie den Spatenstich für das Ingenieurzentrum Nachhaltigkeit (IZN) in unserem Institut gefeiert. Das neue Gebäude auf dem Campus Flugplatz wird die intensive Zusammenarbeit der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg unter dem Dach des Instituts für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) stärken.

Exzellente technische Infrastruktur, ein modernes Arbeitsumfeld und nachhaltige Architektur – all das wird das neue dreistöckige IZN-Gebäude auf rund 2.700 Quadratmetern bieten. Nur einen Steinwurf entfernt vom Fraunhofer IPM, der Technischen Fakultät, dem Freiburger Innovationszentrum (FRIZ) und dem Neubau der Hahn-Schickard-Gesellschaft sollen Forschungsaktivitäten zum Thema Nachhaltigkeit an einem Ort gebündelt werden. Bald wird hier interdisziplinär für eine nachhaltige Industrie geforscht, entwickelt und getestet – von Energieeffizienz bis zu smarten Materialien. Die Investitionssumme von 36 Millionen Euro wird gemeinsam von der Fraunhofer-Gesellschaft, dem Bund und dem Land Baden-Württemberg getragen.

»

Der Neubau steht für den Anspruch, Forschung in die Mitte der Gesellschaft zu tragen – als Innovationsmotor für nachhaltige Entwicklung, wirtschaftliche Stärke und verantwortungsvolle Zukunftsgestaltung.«

*Michael Kleiner, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg*




*Im Juli 2025 wurde der Spaten für den Neubau des Ingenieurzentrums Nachhaltigkeit gesetzt. Dort sollen zukünftig die Fraunhofer-Professuren des Instituts für Nachhaltige Technische Systeme INATECH untergebracht werden.*

**Fraunhofer in Freiburg**

Freiburg ist einer der größten Fraunhofer-Standorte in Deutschland. Fünf Institute arbeiten hier seit Jahren erfolgreich an zukunftsweisenden Technologien. Gemeinsam beschäftigen sie rund 2700 Mitarbeitende und erzielen einen Gesamtumsatz von rund 300 Millionen Euro mit der Entwicklung und Erforschung von Technologien in den Bereichen Materialien, Halbleiter, Sicherheit, Resilienz, Messtechnik und Photonik sowie erneuerbare Energien.

# Space Tech Expo Europe: Aufbruchstimmung im »New Space«

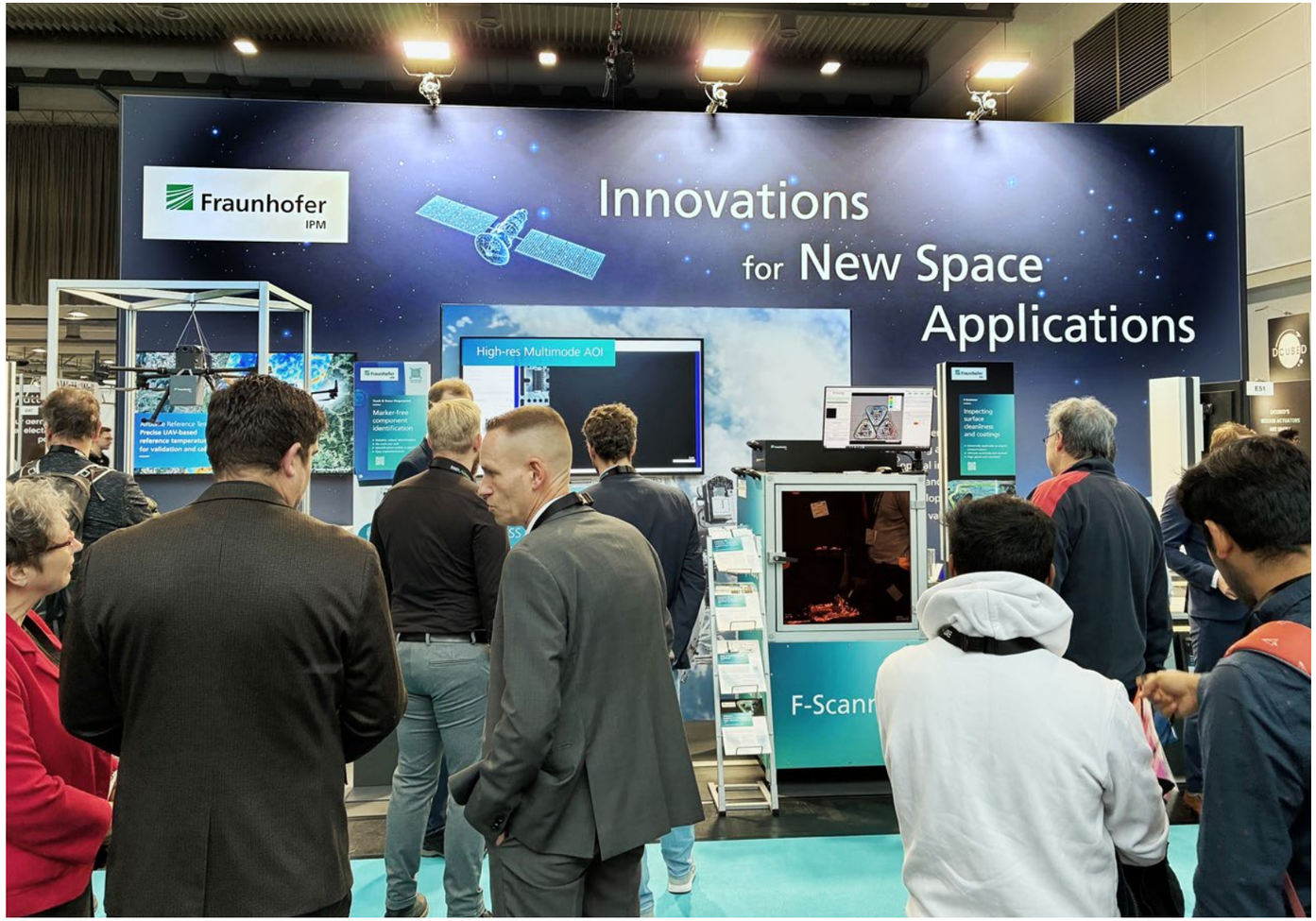
Erstmals war Fraunhofer IPM 2025 auf der Space Tech Expo Europe in Bremen vertreten. Das Interesse am Stand war enorm! Unsere Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen stellten Technologien für das thermische Management, magnetische Schirmung oder die Prüfung magnetischer Reinheit vor. Diskutiert wurde auch, wie sich unsere optischen Verfahren zur Bauteil- und Materialprüfung für New-Space-Anwendungen einsetzen lassen. Denn: In der Luft- und Raumfahrt der Zukunft kommen mehr und mehr Standardbauteile – so genannte Commercial off-the-shelf parts (COTS) – zum Einsatz, für die sehr hohe Qualitätsanforderungen gelten. Hier sind leistungsfähige Messsysteme gefragt. Auch das Interesse an maßgeschneiderten Lichtquellen und Technologien zur Qualitätskontrolle optischer Materialien war groß. Außerdem zeigten wir, wie sich Daten unserer drohnenbasierten Messsysteme für die Validierung und Kalibrierung thermischer Satelliten nutzen lassen.

Mit unserer Initiative knüpfen wir an unsere Gründungsgeschichte als Fraunhofer-Institut für Physikalische Weltraumforschung IPW an. Nachdem das Institut in den 1980er Jahren den Schwerpunkt auf die industrielle Messtechnik verlagert hatte und auf den heutigen Namen umbenannt wurde, sehen wir heute reichlich Potenzial, mit unseren Messverfahren und Komponenten die aufstrebende New-Space-Industrie zu unterstützen – und können auf umfangreiche Erfahrung mit Weltraumprojekten aufbauen.

**Mehr Info**

Jüngere Erfolge zeigen, dass wir Luft- und Raumfahrtunternehmen mit unseren Technologien viel Mehrwert bieten können.«

*Prof. Dr. Karsten Buse, Institutsleiter*




*Großer Andrang an unserem Stand auf der Space Tech Expo Europe in Bremen.*



# 11. Gassensor-Workshop: Austausch zwischen Wissenschaft und Industrie

Der 11. Gassensor-Workshop war ein voller Erfolg. Bei strahlendem Sonnenschein trafen sich am 20. März 2025 rund 80 Teilnehmende aus Wissenschaft und Industrie an unserem Institut, um sich über Innovationen und Perspektiven in der Gassensorik auszutauschen. In insgesamt acht Fachvorträgen stellten international anerkannte Expertinnen und Experten technologische Entwicklungen und Anwendungen vor. Zudem gab es ausreichend Gelegenheit zur Vernetzung.

Sophie Emperhoff von der Infineon Technologies AG präsentierte einen differenziellen MEMS-basierten Wärmeleitfähigkeitssensor, der für die präzise Detektion von Wasserstoff in Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb entwickelt wurde. Dr. Martin Herold von ScioSense B.V. sprach über den Einsatz von Gassensoren in der Batteriesicherheit. In seinem Vortrag beleuchtete er, welche Gefahren von Gasen in Batterien ausgehen und wie Gassensoren zur Vermeidung von Sicherheitsrisiken beitragen können.

Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten kapazitiver Feuchtesensoren besprochen. Wo liegen die Grenzen dieser Technologie und welche innovativen Ansätze gibt es? Diese Fragen beantwortete Dr. Katrin Gajo von Innovative Sensor Technology IST AG in ihrem Vortrag. Die kapazitive Feuchtemessung spielt eine zentrale Rolle bei der genauen Bestimmung von Feuchtigkeitsniveaus, was vor allem in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie von Bedeutung ist.

Wir waren mit einem Beitrag von Dr. Johannes Herbst vertreten. Er zeigte, wie sich Erdgasrohre mithilfe resonanter Laser-Photoakustik vom Fahrzeug aus auf Leckagen prüfen lassen.

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Gassensoren, insbesondere im Hinblick auf nachhaltige, zukunftsfähige Technologien, wurden sehr deutlich. Der Austausch von Ideen und Erfahrungen stärkt die Zusammenarbeit innerhalb der Branche – und wir freuen uns jetzt schon auf das nächste Event 2027, bei dem wir uns alle wieder treffen, um die Zukunft der Gassensorik zu gestalten.

GASSENSOR WORKSHOP

## Schon jetzt vormerken: 12. Gassensor-Workshop am 18. März 2027

**Mehr Info**

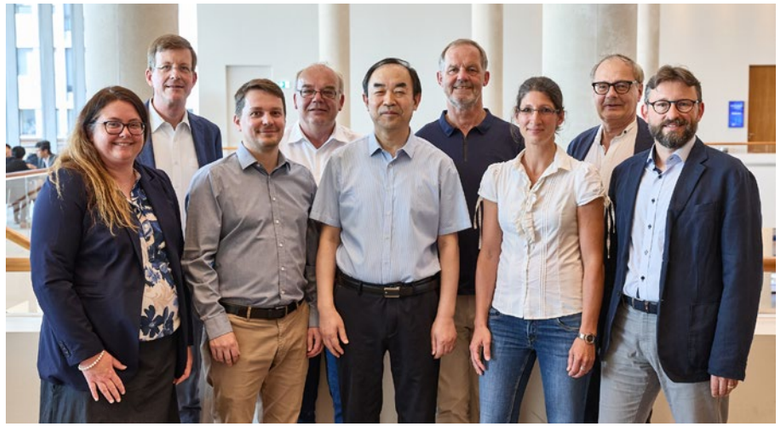
# Chemische Sensoren im Fokus: Fraunhofer IPM war Gastgeber des IMCS 2025

*Strahlendes Wetter, packende Vorträge, spannende Diskussionen: Mehr als 80 Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft tauschten sich über Trends in der Gassensorik aus.*

Zur zwanzigsten Ausgabe des International Meeting on Chemical Sensors (IMCS) trafen sich in Freiburg mehr als 300 Expertinnen und Experten aus Forschung und Industrie. Das Meeting wurde erstmals von Fraunhofer IPM geleitet. Vom 22. bis zum 26. Juni diskutierten Teilnehmende aus aller Welt wissenschaftliche Fortschritte und industrielle Anwendungen auf dem Gebiet der chemischen Sensorik.

Die Vorträge deckten die gesamte Bandbreite der chemischen Sensorik ab: von elektrochemischen Sensoren und Metalloxid-Sensoren über Biosensoren, Nanosensoren und MEMS-/NEMS-Sensoren bis hin zu Lab-on-Chip-Systemen, Sensormaterialien, Simulationen und Datenanalyse.

Vorgestellt wurden u. a. Biosensoren für das Monitoring von Körperfunktionen, MEMS- und NEMS-Sensoren für die hochgenaue Erkennung von Spurengasen sowie Lab- und Organ-on-a-chip-Anwendungen für Medizin oder Klimaforschung. Neben den Vorträgen gab es zwei Postersessions und eine Industrieausstellung. Das Eröffnungsevent am Fraunhofer IPM und die verschiedenen Abendveranstaltungen boten reichlich Gelegenheit zum Networking.



*Das Kernteam der IMCS 2025 (v.r.n.l): Jochen Kieninger (Publication Chair), Gerald Urban (Program Chair) Katrin Schmitt (Local Scientific Chair), Albert van den Berg (Plenary Speaker), Lanqun Mao (Plenary Speaker), Jürgen Wöllenstein (Conference Chair) Andreas Günter (Plenary Speaker), Peter Lieberzeit (Executive Steering Committee Chair), Carolin Pannek (Local Organization Chair).*

**International Meeting on Chemical Sensors (IMCS)**

Das **IMCS** findet seit 1983 alle zwei Jahre in unterschiedlichen Städten weltweit statt. Die nächste Tagung ist für Juli 2027 im kanadischen Montreal geplant.

# Fraunhofer Photonica 2025: Startpunkt für die Forschungskarriere

Vom 22. bis zum 27. September besuchten 19 internationale Nachwuchswissenschaftler und -wissenschaftlerinnen drei Fraunhofer-Institute, um Einblicke in die Photonik-Forschung zu erhalten. Die einwöchige Reise begann bei uns in Freiburg, führte dann zum Fraunhofer IOSB in Ettlingen und Karlsruhe und endete am Fraunhofer ILT in Aachen.

Das Programm der Summer School war vielseitig: Los ging es mit einem kleinen E-Gitarrensolo. Wussten Sie, dass sich aus den Schwingungen einer Gitarrensaite viel über optische Frequenzkonversion lernen lässt? Neben spannenden Vorträgen zu Themen wie nichtlineare Optik, digitale Holographie, Infrarottechnologie und Spektroskopie wurde mit Laserscanning, einem »Laserlabyrinth«, Kristallwachstum und Schlierenfotografie experimentiert. Die Teilnehmenden durften die Labore besichtigen und Fragen an Forschende und Institutsleitungen stellen. Sie erhielten Einblick in die angewandte Forschung und konnten sich über Karrieremöglichkeiten bei Fraunhofer informieren. Das kam gut an: »Mir hat die ganze Erfahrung sehr gefallen. Bei jedem Besuch und jeder Vorlesung wurde die Idee, Forschung mit der Industrie zu verbinden, deutlich, und das fand ich besonders gut.«

Veranstaltet wurde die Fraunhofer Photonica vom Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces unter der Leitung des Fraunhofer IPM. Dr. Milena Hugenschmidt, Leiterin des Organisationsteams und wissenschaftliche Referentin der Institutsleitung am Fraunhofer IPM, begleitete die Teilnehmenden auf ihrer Reise.



*Die Reise durch die Welt der Photonik begann am Fraunhofer IPM. Danach besuchten die 19 Teilnehmenden das Fraunhofer IOSB in Karlsruhe/Ettlingen und das Fraunhofer ILT in Aachen.*

»Es ist wunderbar zu sehen, wie sich die Teilnehmenden für angewandte Forschung begeistern. Wir hoffen, viele von ihnen als Mitarbeitende bei uns wiederzusehen.«

*Dr. Milena Hugenschmidt, Leiterin des Organisationsteams und wissenschaftliche Referentin der Institutsleitung*

FRAUNHOFER PHOTONICA

**Fraunhofer Photonica**

Ziel der Summer School ist es, junge, talentierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für die Themen des Fraunhofer-Verbunds Light & Surfaces zu begeistern und ihnen die Karrieremöglichkeiten aufzuzeigen, die die Fraunhofer-Gesellschaft im Allgemeinen und der Verbund im Speziellen bieten.

**photonica.fraunhofer.de**

# Industrie-Workshop Produktionskontrolle: Mess- und Prüfsysteme live erleben

Wie können optische Mess- und Prüfverfahren helfen, die industrielle Produktion zu optimieren? Und wie können Unternehmen mit Fraunhofer zusammenarbeiten, um Messtechnik in der eigenen Fertigung gewinnbringend einzusetzen? Der »Industrie-Workshop Produktionskontrolle« am 25.–26. September 2025 bot Vertreterinnen und Vertretern aus der Industrie die Gelegenheit, diese Fragen gemeinsam mit uns zu erörtern und viele unserer Systeme live zu erleben.

Klar wurde: Das Potenzial optischer Mess- und Prüftechnik für die Qualitätssicherung und Prozesskontrolle ist riesig. Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zeigten, wie unterschiedliche optische Technologien für die automatisierte Qualitätsprüfung genutzt werden können: von der holographischen 3D-Bauteilvermessung über die schnelle Inspektion im freien Fall, die Prüfung der Bauteilsauberkeit mithilfe von Fluoreszenzverfahren bis zur Inspektion ultradünner Schichten auf Basis von Infrarot-Spektroskopie. Die mehr als 20 Gäste zeigten sich beeindruckt vom Reifegrad der Technologien. Einige hatten auch eigene Bauteile im Gepäck und konnten sich bei Probemessungen vor Ort von der Leistungsfähigkeit der Mess- und Prüftechnik überzeugen. Zusätzlich zu Fachvorträgen erläuterten Philipp Klemenz und Hülya Sevgin von der IHK Südlicher Oberrhein in ihren Gastvorträgen, wie die Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer und einem Industrieunternehmen praktisch funktionieren kann und welche Fördermöglichkeiten es gibt. Eine Folgeveranstaltung ist für 2026 geplant.



*Die Teilnehmenden konnten probeweise eigene Bauteile mit unseren Systemen prüfen – und waren beeindruckt vom Reifegrad der Technologien.*

# Drei Fragen an: Angelina Waigand



**Angelina Waigand ist seit Juli 2025 Verwaltungsleiterin am Fraunhofer IPM. Bevor sie zu uns kam, war sie als Klinikmanagerin bei den Oberberg Kliniken tätig. Das Potenzial für Veränderung steht für sie an erster Stelle – sowohl beruflich als auch privat.**

**Was war Dein erster Eindruck von Deinem neuen Arbeitsplatz?**

Mich hat die Vielseitigkeit der Themen am Fraunhofer IPM fasziniert. Ich fand und finde es immer noch beeindruckend, wie wir es mit unseren verschiedenen Fachgebieten schaffen, eine gemeinsame Sprache zu finden. Es ist überraschend ähnlich zum Krankenhaus. Menschen mit den unterschiedlichsten Expertisen arbeiten gemeinsam an einem Ziel.

**Was macht für Dich eine moderne Verwaltung aus?**

»Verwaltung« ist für mich 90er Jahre. Der Begriff ist sehr old school. Ich würde die Verwaltung gerne als »Zentrale Dienste« definieren, denn wir sind ja Dienstleister für die anderen. Im Krankenhaus sind die ärztliche Versorgung und die Pflege das Kerngeschäft, also alles, was direkt am Patienten verläuft. Hier sind es Forschung und Entwicklung. Aber wir sind mehr als der »Support«, wir halten den Betrieb am Laufen. Wenn die IT oder der Einkauf nicht laufen, dann können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht arbeiten. Damit die verschiedenen Abteilungen effizient zusammenarbeiten können, ist es wichtig, vorausschauend zu planen und gut zu kommunizieren. Ich habe Checklisten entwickelt, um Prozesse zu vereinfachen. Außerdem arbeite ich in jedem Team mit festen Tandems, die einander vertreten können. So laufen die Dinge weiter, auch wenn jemand ausfällt. Da uns ein Generationenwechsel bevorsteht, beschäftige ich mich auch viel mit dem Thema Wissensmanagement und arbeite an einer passenden Umsetzung. Ich merke immer wieder, wir alle sind Zahnräder in einem System. Wenn eines stehen bleibt, fällt das vielleicht nicht sofort auf, aber wenn mehrere stehen bleiben, dann wird es eng.

**Wie siehst du die Zukunft unseres Instituts?**

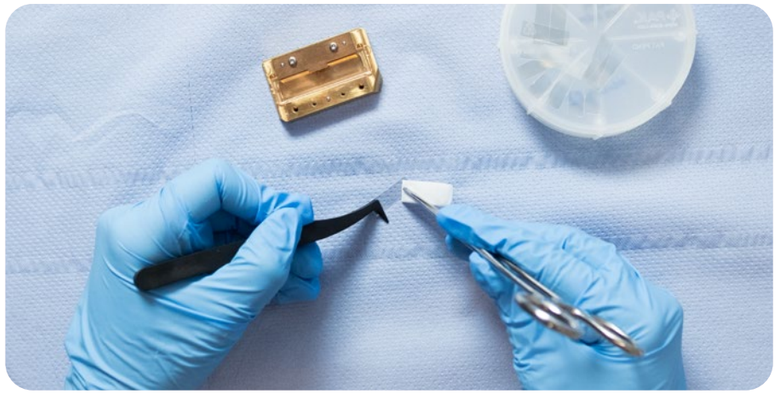
Ich sehe viel Licht, denn es ist ein sehr starkes Institut, was sich am Ende des Jahres immer wieder beweist. Wir leisten ganz schön viel hier. Und mir ist es wichtig, die Bedürfnisse der Mitarbeitenden zu berücksichtigen. Wir müssen von unten nach oben und auch abteilungsübergreifend denken. Wir brauchen Formate, in denen wir gemeinsam erarbeiten, welche Themen den einzelnen Mitarbeitenden oder einer Gruppe wichtig sind. Fortbildung ist der Hauptschlüssel dafür und ein wichtiges Werkzeug für die Personalentwicklung. Gerade wir Führungskräfte sind Vorbilder und müssen uns weiterentwickeln, Bedürfnisse wahrnehmen und darauf reagieren. Als Arbeitgeber müssen wir einen Führungsstil finden, der auch den neuen Generationen gerecht wird. Wir müssen anpassungsfähig bleiben, offen für Veränderung und bereit zu lernen. Aber genau das gefällt mir so an der Verwaltungsarbeit, dass man so viele Dinge verändern und optimieren kann und die Freiheit dazu hat.

Mein Wunsch oder meine Vision für das Institut ist, dass wir noch besser zusammenarbeiten und aufeinander achten. Dass wir in die Prävention gehen und immer auch den Menschen und nicht nur die Leistung sehen! Dabei sollten wir vor allem die mentale Gesundheit nicht außer Acht lassen. Denn das ist eines der großen Themen unserer Zeit.

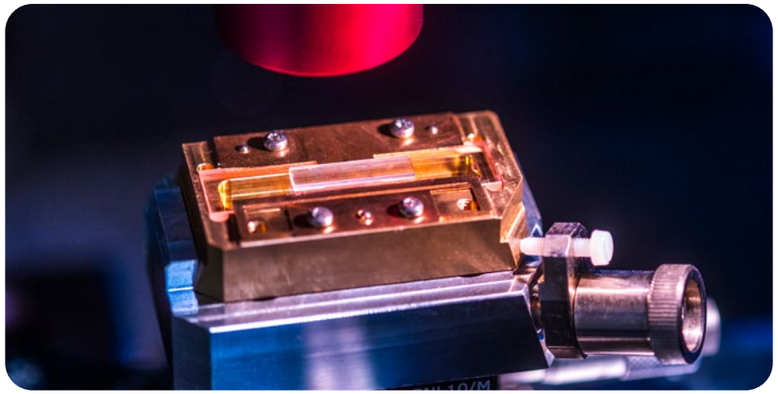
Ich möchte, dass wir alle am gleichen Strang ziehen und aufeinander achten. Teamarbeit ist mir dabei wichtig und auch der Spirit!«

*Angelina Waigand, Verwaltungsleiterin*

# Ein Tag im Labor:
# Um welches Verfahren handelt es sich hier?*



Mit meiner Pinzette halte ich einen periodisch gepolten Lithiumniobat-Kristall (PPLN) im Chipformat. Als Erstes reinige ich seine Oberflächen gründlich mit einem Linsenputztuch.



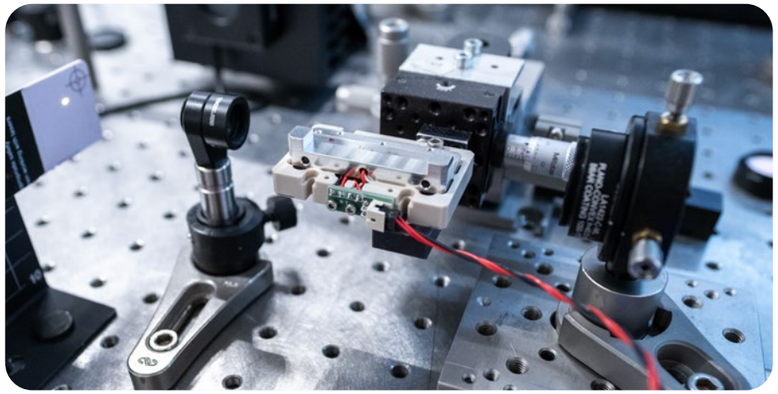
Dann wird der Chip ordentlich gelöchert. Mit einem Laser schreibe ich Wellenleiter in den Kristall. Diese dienen dazu, das Licht in mikroskopisch kleinen Kanälen zu führen.




Von meinem Computer aus, steuere ich den Prozess. Auf dem linken Bildschirm sehe ich meinen Programmcode, auf dem rechten verfolge ich den Fortschritt des Laserprozesses.




Unter dem Mikroskop schaue ich mir meinen Kristall-Chip mit den Wellenleitern genauer an. Lohnt es sich, ihn zu weiterzuverwenden?



Ja! Ich füge den Chip in meinen Laboraufbau ein und schalte den Laser an. Der bearbeitete Kristall ändert die Wellenlänge des Laserlichts.

**»Ich habe maßgeschneidertes Licht erzeugt – und durch den Wellenleiter läuft dieser Prozess effizienter ab!«**

*Anna-Rosa Waidhas, Projektleiterin*

* nichtlineare Frequenzkonversion in PPLN-Wellenleitern

# Kundeninterview

## Schütz GmbH Messtechnik

### »Nur Innovation treibt voran.«

*Volker Heimburger*

**Schütz Messtechnik entwickelt, betreibt und verkauft Messtechnik für Gasnetzbetreiber. Im Gespräch erklärt Geschäftsführer Volker Heimburger, was die Branche unter Druck setzt, weshalb Kooperationen mit Forschungspartnern wie Fraunhofer IPM für mittelständische Entwickler entscheidend sind, und wie aus Laborlösungen marktfähige Feldtechnik wird.**

**Fraunhofer IPM: Herr Heimburger, wer ist Schütz Messtechnik – in zwei Sätzen?**

**Volker Heimburger:** Wir sind Dienstleister und Gerätehersteller für Gasnetzbetreiber. Unsere Kernkompetenz ist innovative Gasmesstechnik – selbst entwickelt, gefertigt und weltweit vertrieben.

**Wie sind Sie Geschäftsführer der Firma geworden?**

Ich bin Diplom-Ingenieur für Nachrichtentechnik, war erst in der Entwicklung bei Schütz und habe die Firma Ende 1999 von der Gelsenwasser AG übernommen. Seit Januar 2000 führe ich sie – also inzwischen seit über zwei Jahrzehnten.

**Was ist Ihr Geschäftsmodell: Dienstleistung oder Gerätetechnik?**

Beides. Und genau diese Synergie ist unser Vorteil. Neue Geräte kommen zuerst in die eigene Dienstleistung, dort haben wir das Probefeld und bringen sie dann in den Markt.

**Warum suchen Sie Kooperationen mit Forschungseinrichtungen?**

Weil wir keinen »wissenschaftlichen Pool« in der Tiefe vorhalten können – dafür sind wir zu klein. Hochqualifizierte Fachleute in speziellen Technologien baut man als Mittelständler nicht einfach so auf; deshalb gehen wir gezielt auf Partner wie Fraunhofer IPM zu.

**Was war Ihr konkretes Ziel in der Zusammenarbeit mit uns?**

Wir waren auf der Suche nach hochempfindlicher, schneller Methanmesstechnik, die deutlich besser ist als das, was standardmäßig am Markt verfügbar ist. Ob Photoakustik oder eine andere Methode ist uns eigentlich egal: Entscheidend sind



*Volker Heimburger ist nicht nur Geschäftsführer der Schütz GmbH Messtechnik, sondern auch Arbeitskreisvorsitzender für Rohrnetzüberprüfung bei der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e.V. (figawa).*

### Schütz GmbH Messtechnik

Seit über 50 Jahren ist die Schütz GmbH Messtechnik als Dienstleister und Gerätehersteller für Gasnetzbetreiber tätig. Die Kernkompetenz liegt in der Entwicklung innovativer Gasmesstechnik. Sämtliche Geräte werden im Haus entwickelt, gefertigt und weltweit vertrieben. Um neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in die Produktentwicklung einfließen zu lassen, steht Schütz im laufenden Austausch mit Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Das Gerätesortiment reicht von Gasmessgeräten und Emissionsmesstechnik über Sonden, Absauganlagen und Spezialmessgeräte bis hin zum kompletten Messfahrzeug.

Empfindlichkeit, Reaktionsgeschwindigkeit und Robustheit im realen Einsatz.

**Was ist für Sie »typisch Fraunhofer IPM«?**

Die Praxisorientierung. Wenn wir ein Problem haben, wird darauf reagiert – schnell, direkt und lösungsorientiert. Und es gibt klare Ansprechpartner, mit denen man Dinge zügig klärt. Das ist für uns enorm viel wert, weil wir im Feld »im Feuer stehen«.

**Welche Kräfte verändern Ihren Markt gerade am stärksten?**

Zwei Dinge: erstens der regulatorische Druck durch EU-Vorgaben zu Methanemissionen und zweitens der Personalmangel. Wir bekommen einfach nicht genug Leute, um die nötigen Kilometer klassisch zu Fuß zu prüfen. Das treibt Technologiewechsel und Automatisierung voran.

**Was muss Messtechnik heute leisten, um am Markt zu bestehen?**

Sie muss Benchmarks erfüllen, die im Feld bereits gelten: Geschwindigkeit, Empfindlichkeit, Nachweisbarkeit. Und sie muss regelwerksfähig sein. Am Ende zählt, dass Messungen dokumentiert und anerkannt werden.

**Wohin geht die Entwicklung? Was kommt als Nächstes?**

Die Photoakustik erlaubt kleinere Messsysteme: vom fahrzeuggestützten System hin zu tragbaren, handgehaltenen Geräten. Langfristig sehen wir weitere Gase wie $NH_3$ als Thema und perspektivisch auch autonome Systeme, etwa Drohnen, weil Zeitdruck und Dokumentationspflichten weiter steigen werden.

**Haben Sie eine Maxime, nach der Sie handeln?**

Nur Innovation treibt voran. Man muss Risiken eingehen können und genug richtig machen, damit man sich auch das Scheitern leisten kann.

**Besten Dank für das Gespräch!**




*Projektleiter Dr. Johannes Herbst (links) im Gespräch mit Volker Heimburger.*

# Geschäftsfelder

## Im Auftrag des Kunden



*Hands-on: An einem Material-prüfstand testen wir elektro-kalorische Materialsysteme.*

# **Überblick** Produktionskontrolle

»So schnell messen, wie Hersteller produzieren: Das ist unser Beitrag für mehr Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit.«

*Prof. Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter*

Wir entwickeln optische Systeme und bildgebende Verfahren, mit denen sich Oberflächen prüfen und komplexe 3D-Strukturen in der laufenden Produktion präzise vermessen lassen. Das Ziel sind geregelte und damit effizientere Prozesse. Unsere Systeme messen so schnell und so genau, dass Verunreinigungen oder kleinste Defekte auch bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten erkannt und in Echtzeit klassifiziert werden. In Kombination mit markierungsfreier Einzelteilverfolgung ermöglichen unsere optischen Sensoren und Messsysteme somit in vielen Fällen erstmals eine 100-Prozent-Echtzeitkontrolle. Damit kommt ihnen eine Rolle als »enabling technology« zu – für die Umsetzung einer Industrie 4.0-Strategie in der modernen Produktion.

Eingesetzt wird eine große Bandbreite an Technologien, darunter Infrarot-Reflexionsspektroskopie, Fluoreszenzverfahren oder digitale Holographie. Diese kombinieren wir mit sehr schneller hardwarenaher Bild- und Datenverarbeitung sowie intelligentem Handling – beispielsweise für die Rundumprüfung im freien Fall oder die 3D-Messung direkt in Bearbeitungszentren. Die kundenspezifisch optimierten Systeme werden in unterschiedlichen Branchen eingesetzt – von der Umformtechnik im Automobilbereich über die Qualitätssicherung bei Medizinprodukten bis zur Elektronikfertigung.

**Optische Sensoren und bildgebende Verfahren**

**Kundenspezifisch optimierte Systeme**

**Datenaufnahme und -auswertung in Echtzeit**

## Unsere Gruppen und Themen

### Optische Oberflächenanalytik

- Elementanalyse in komplexen Mehrschichtsystemen und Flüssigkeiten
- Analyse filmischer Beschichtungen und Verunreinigungen
- Detektion und Klassifikation partikulärer Verunreinigungen

### Inline Vision Systeme

- Oberflächeninspektion und Maßhaltigkeitsprüfung von Halbzeugen und Bauteilen
- Inspektion von Langprodukten auf Oberflächenfehler und Geradheit
- Markierungsfreie Bauteilidentifikation in der Produktion und mobil per App

### Geometrische Inline-Messsysteme

- Präzise Vermessung von Funktionsflächen im Produktionstakt
- Vollflächige, bildgebende 3D-Vermessung von Werkstücken direkt in der Werkzeugmaschine, am Roboter sowie auf Koordinatenmessmaschinen mit einem Messsystem
- Schnelle, dynamische Verformungsmessung in 3D



**Wir arbeiten perfekt zusammen. Wie die Mechanik, Optik, und Elektronik in unseren Systemen.«**

# **Highlights** Produktionskontrolle

## Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

**Im Forschungsfeld Produktionskontrolle haben wir 2025 viele spannende Projekte begonnen oder erfolgreich abgeschlossen – einige stellen wir Ihnen hier vor.**

Projekte MIAME / SWAP

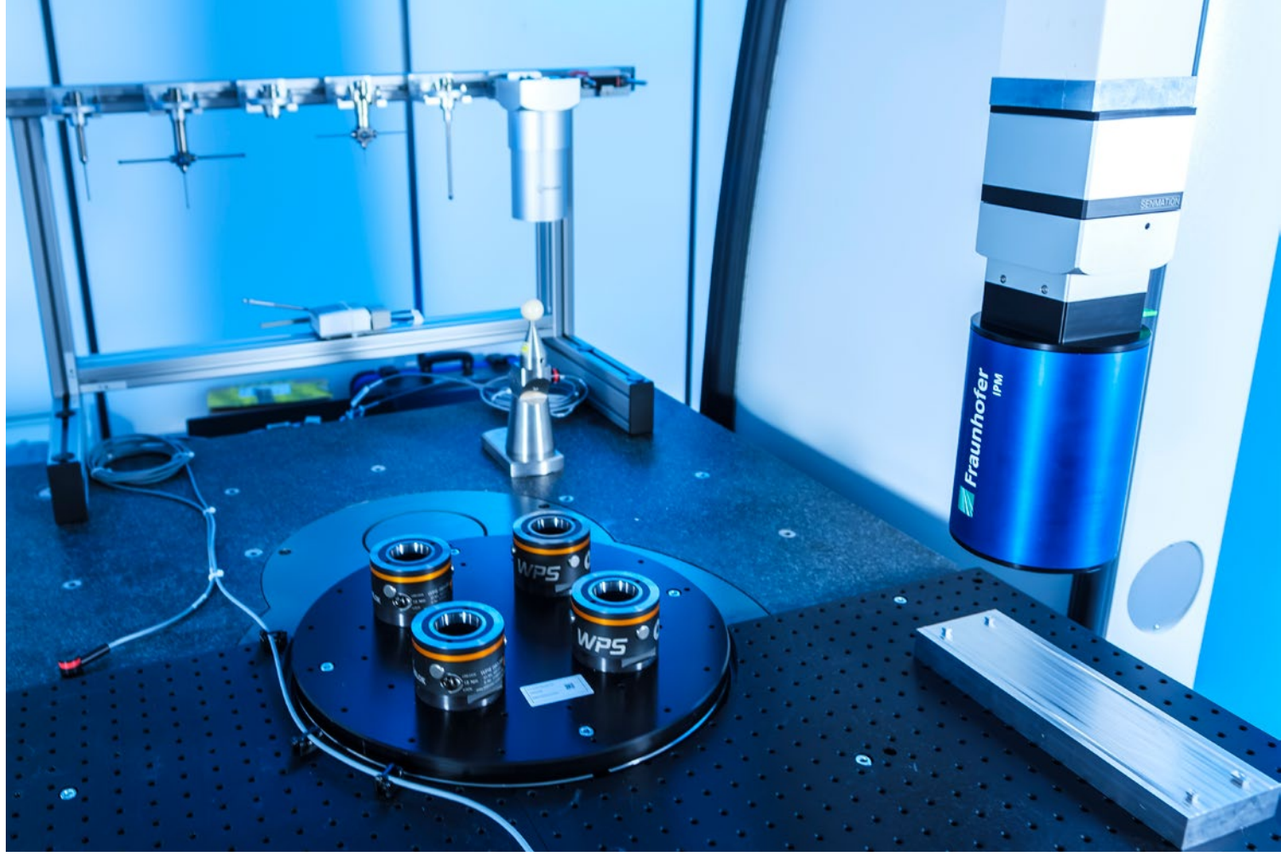
### Digitale Holographie am Roboter und am Koordinatenmessgerät

**Unsere digital-holographischen Sensoren werden immer öfter an Gantry-Mehrachssystemen, Robotern und nun auch vollständig kabellos an einem Koordinatenmessgerät eingesetzt.**

Die digitale Mehrwellenlängen-Holographie ist eine leistungsstarke Methode für die schnelle und hochgenaue Vermessung der Oberflächentopographie von Bauteilen. Am Fraunhofer IPM haben wir die Methode in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt – nicht nur mit Blick auf Geschwindigkeit, Genauigkeit und Datenverarbeitung, sondern auch für den Einsatz in Kombination mit verschiedenen Trägersystemen: Die jüngste Version des digital-holographischen Sensors HoloTop NX ist kaum größer als eine Konservendose und kann kabelgebunden in der Werkzeugmaschine oder an einem Industrieroboter installiert werden. Das System ermöglicht flächige Messungen münzgroßer Objekte in weniger als einer Sekunde und erzeugt dabei bis zu 90 Millionen 3D-Punkte. So können Bauteile direkt in der Fertigung mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich vermessen werden. Inzwischen haben die Forschenden den digital-holographischen Sensor erstmals auch vollständig kabellos in ein Koordinatenmessgerät (KMG) integriert. Die Arbeiten bauen auf den Ergebnissen der Fraunhofer-Projekte MIAME und SWAP auf.

Aufgrund ihrer sehr hohen Messgenauigkeit gelten KMG als Goldstandard für die Maßhaltigkeitsprüfung von Bauteilen. KMG messen typischerweise taktil, indem ein Messkopf mithilfe eines Verfahr- und Positionierungssystems in drei Dimensionen hochpräzise über die Bauteiloberfläche bewegt wird und einzelne Messpunkte anfährt. Fraunhofer IPM verfügt über eines der genauesten am Markt erhältlichen KMG. Diente das Gerät bisher dazu, die Messmittelfähigkeit unserer Holographie-Systeme nachzuweisen, so nutzen wir es nun erstmals als Trägersystem für einen digital-holographischen Sensor. HoloTop NX wurde über das SENMATION-Sensorwechselsystem vollständig kabellos in das KMG integriert. Der Vorteil: KMG sind äußerst genau kalibriert, was eine hochgenaue Referenzierung der optischen Messung ermöglicht.

Die optische Erweiterung kann eine sinnvolle Ergänzung zur taktilen Messung in einem KMG sein, denn der digital-holographische Sensor ist der taktilen Messung in puncto Messgeschwindigkeit und Messpunktdichte deutlich überlegen. Bei einer Vergleichsmessung an einem zirka 30 × 7 cm² großen Testobjekt erzeugte HoloTop NX innerhalb von acht Minuten mehr als 1,4 Milliarden 3D-Messpunkte, während das KMG bei maximaler Genauigkeit 360 Messpunkte innerhalb von 18 Minuten aufzeichnete. Statt einer lateral grob aufgelösten Einzelpunktdarstellung zeigte das holographische Messergebnis lückenlos das Oberflächenprofil des Prüflings in einer vergleichbaren Genauigkeit von unter 1 µm. So können kritische Bereiche von Bauteiloberflächen wirtschaftlich vollflächig vermessen werden, während das taktile System an Stellen misst, die für optische Sensoren bisher nicht erreichbar sind. Solche Stellen sind typisch für viele sicherheitsrelevante Präzisionsbauteile in der Luftfahrt, im Fahrzeugbau oder in der Medizintechnik. Perspektivisch soll auch hier digital-holographisch vermessen werden. Die Forschenden haben bereits erste optische Taster und Spiegeloptiken entwickelt, mit denen der Sensor den Prüfling dank des großen Arbeitsbereichs aus verschiedenen Winkeln und Entfernungen messen kann.




*HoloTop NX, integriert in das Koordinatenmessgerät Leitz Infinity. Dank Nullpunktspannsystem lassen sich die Prüflinge unkompliziert präzise positionieren.*

**Projekte MIAME (Mikrometer auf Meter) und SWAP (Heterogene, auslastungsoptimierte Roboterteams und Produktionsarchitekturen), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Prepare-Projekt, Leitprojekt)**

Projekt Coil-Twin

## Gewusst wo: Markierungsfreie Positionsbestimmung auf dem Coil

**Ein kamerabasiertes System ermöglicht die Zuordnung von exakter Position und Prozessdaten bei Endlosmaterial und schafft damit die Voraussetzung für die Rückverfolgung fehlerhafter Abschnitte über die gesamte Fertigungskette.**

Kaltwalzen, Auf- und Abwickeln, Dressieren, Beölen – technische Bänder wie z. B. Karosserieplatten oder Elektrodenfolien durchlaufen mehrstufige Prozesse, bis sie vereinzelt und weiterverarbeitet werden. An unterschiedlichen Stellen im Fertigungsprozess prüfen Inspektionssysteme die Oberflächenbeschaffenheit, Beschichtung, Beölung, Rauheit oder Sauberkeit der Bänder. In der Stückgut-Fertigung können als defekt erkannte Teile problemlos aussortiert werden. Beim Endlosmaterial hingegen müssen fehlerhafte Abschnitte in späteren Prozessschritten gezielt herausgeschnitten werden. Wie aber findet man einen einmal erkannten Defekt auf einem kilometerlangen Band wieder? Die Frage der Positionsbestimmung bei Endlosmaterial ist bisher nur unzureichend gelöst. In der Praxis werden nicht selten meterlange Bandabschnitte aufgrund einzelner kleiner Fehler großzügig aussortiert, da die Position des Fehlers nicht genau lokalisiert werden kann.

Im Projekt Coil-Twin, das im November 2025 startete, arbeiten wir an einem markierungsfreien Verfahren zur Positionsbestimmung für Endlosmaterial. Es soll ermöglichen, Prozessdaten einer Position



*Ein kamerabasiertes System ermöglicht es, während der Produktion erkannte fehlerhafte Abschnitte auch später zuverlässig wiederzufinden.*

auf dem Coil oder einem bereits vereinzelten Bandabschnitt zuzuordnen – mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern. So entsteht ein digitaler Bandzwilling, der eine effiziente Qualitätssicherung und adaptive Prozesssteuerung ermöglicht. Grundlage ist die am Fraunhofer IPM entwickelte Track & Trace Fingerprint-Technologie, die ursprünglich für die markierungsfreie Identifikation von Stückgut entwickelt wurde. Das Verfahren nutzt die individuelle Oberflächenstruktur des Materials als Erkennungsmerkmal. Dass dies selbst auf feinpolierten Oberflächen funktioniert, konnte bereits gezeigt werden.

Zur Positionsbestimmung auf Endlosmaterial nimmt eine Kamera während der Produktion wiederholt die Bandoberfläche auf. Aus jedem hochaufgelösten Kamerabild wird ein digitaler Fingerabdruck errechnet und in einer Datenbank zusammen mit Positionsangabe und Prozessdaten hinterlegt. Wird der Bandabschnitt mit dem Fingerprint später erneut aufgenommen, kann über einen Abgleich der passende Fingerprint in der Datenbank samt Positionsangabe und Prozessdaten aufgerufen werden. Herausfordernd für die Positionsbestimmung sind vor allem die hohen Bandgeschwindigkeiten und raue Produktionsbedingungen.

Für die Echtzeitverarbeitung der Bilddaten werden neue Algorithmen entwickelt und parallel-rechnende Grafikkarten eingesetzt. Um auch bei vibrierendem Band hochaufgelöste Bilder aufzunehmen, setzen die Forschenden erstmals auf einen Ansatz, der ohne mechanische Fokusnachführung auskommt. Angelehnt an die aus der Fotografie bekannte »Scheimpflug-Bedingung« wird der Kamerasensor gekippt und erreicht somit eine höhere Schärfentiefe, sodass unabhängig von der tatsächlichen Bandposition immer ein Bildbereich scharf abgebildet wird.

Ziel des Projekts ist ein Demonstrator, der in eine Coil-Anlage integriert und gemeinsam mit unserem Projektpartner Fraunhofer IGP unter realen Bedingungen getestet wird. Mehr als ein Dutzend Industrieunternehmen begleiten die technische Umsetzung.

**Projekt Coil-Twin (Digitaler Zwilling für Endlosmaterial durch markierungsfreie Positionsbestimmung), gefördert vom BMWE (Industrielle Gemeinschaftsforschung IGF), Projektkoordination Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.D**

**Mehr zur Track & Trace Fingerprint-Technologie**

Projekt Star Track

## Positionsbestimmung: mikrometergenau aus großer Entfernung

**Im Kontext der laserbasierten Trägheitsfusion ist die Positionsbestimmung der Brennstoffkapseln ein ungelöstes Problem. Ein spektralkodierter Sensor könnte die Lösung für das Target-Tracking sein.**

Im Dezember 2022 verkündete die US-amerikanische National Ignition Facility (NIF) einen Durchbruch bei der Kernfusion. Erstmals wurde bei der laserbasierten Trägheitsfusion mehr Energie freigesetzt als durch die Laser eingebracht wurde. Von diesem Proof-of-Physics zum Kraftwerk ist es jedoch noch ein langer Weg. Dabei wird es auch auf Messtechnik ankommen.

Beim Experiment am NIF zielten 192 Laser auf eine einzige in einer Reaktorkammer exakt positionierte Brennstoffkapsel. Für einen zukünftigen Kraftwerksbetrieb müssten jedoch etwa zehn Brennstoffkapseln pro Sekunde gezündet werden. Die Kapseln müssen mit hoher Geschwindigkeit in den Reaktor geschossen und exakt zum richtigen Zeitpunkt von den Lasern getroffen werden. Im Projekt Star Track haben wir ein neuartiges optisches Messverfahren für die Positionsbestimmung entwickelt, mit dem sich die Flugbahn von Objekten in der typischen Größe eines Fusionstargets hochgenau messen lässt.

Die Anforderungen an die Messtechnik mit Blick auf einen realen Reaktorbetrieb sind extrem: Die Position eines wenige Millimeter großen Objekts, das sich mit bis zu 400 Metern pro Sekunde bewegt, soll aus einem Abstand von mehreren Metern bestimmt werden – bis auf 25 Mikrometer genau und mit einer Wiederholrate von 10 Hz.

Das Team ließ sich von der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung inspirieren und entwickelte diese Methode für Messungen über größere Distanzen und die laterale Erfassung von Objekten weiter. Bei der chromatisch-konfokalen Abstandsmessung wird der Messort breitbandig spektral kodiert. Drei diskrete Laserlichtquellen im roten, grünen und blauen Spektralbereich kodieren die Position des Targets, die dann anhand des reflektierten Lichts über eine Bestimmung des Farbschwerpunkts bestimmt wird. Im Labor wurden erste vielversprechende Messungen mit einem Sensorprototyp durchgeführt. Zukünftige Forschung zielt darauf ab, die Messgenauigkeit bis in den einstelligen Mikrometerbereich zu steigern. Dies ist Voraussetzung, um die Ableitung des Regelsignals für die Ansteuerung der Laser weiter zu beschleunigen. Das leistungsfähige Messverfahren ist auch für weitere industrielle Anwendungen, zum Beispiel in der Robotik, interessant.

**Projekt Star Track (Spektralaufgelöstes Target-Tracking für laserbasierte Trägheitsfusion), gefördert vom Land Baden-Württemberg (VwV Invest BW – Praxissprints)**

Projekt LiMO-Praxis

## Mehr Effizienz bei der direkten Lithiumextraktion

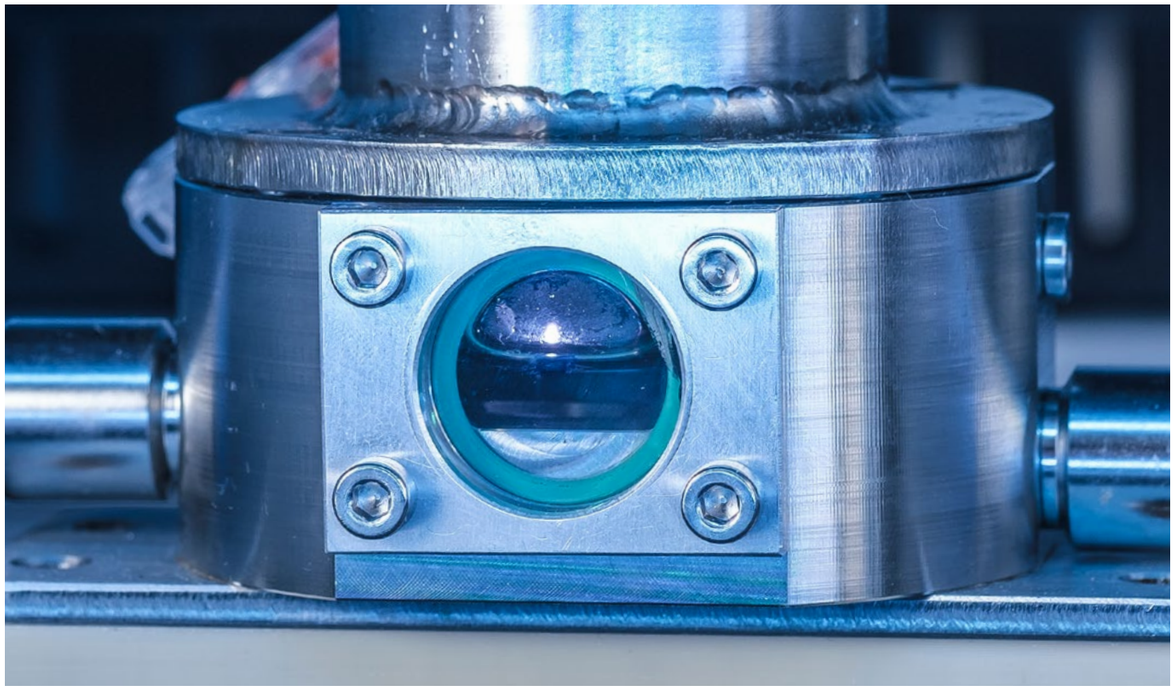
**Ein LIBS-basiertes Inline-Monitoring-Verfahren reguliert den Prozess der direkten Lithiumextraktion (DLE). Das konnte im Labor und in ersten Feldtests gezeigt werden.**

Saubere Energie erzeugen und dabei zusätzlich wertvolle Rohstoffe gewinnen – das verspricht die direkte Lithiumextraktion (DLE) aus Thermalsole. Beim DLE-Verfahren wird das »weiße Gold« aus einer Flüssigkeit über Adsorption und Desorption gewonnen. So kann es z. B. als Beiprodukt bei der geothermischen Wärmegewinnung, aber auch beim hydraulischen Fracking in der Gasförderung extrahiert werden. Das Verfahren ist effizienter, schneller und umweltschonender als das verbreitete Evaporationsverfahren. Daher setzen auch wichtige Lieferstaaten wie Chile für die Zukunft auf DLE. Für Europa, insbesondere Deutschland, könnte dieser Ansatz ein Gamechanger bei der Gewinnung des kritischen Rohstoffs sein, denn gewaltige Lithium-Reserven schlummern in geothermalen Solen, z. B. im Oberrheingraben. Nur wenn diese Reserven gehoben werden, können die strengen EU-Vorgaben für mehr Rohstoffunabhängigkeit eingehalten werden.

Im Rahmen des Projekts LiMo und des Folgeprojekts LiMo-Praxis, das 2025 abgeschlossen wurde, haben wir ein Inline-Monitoring-Verfahren für den DLE-Prozess entwickelt und in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie erfolgreich getestet. Bei dem auf Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS) basierenden Verfahren erzeugt ein Kurzpulslaser ein Plasma aus einer geringen Menge der Flüssigkeit. Die spektroskopische Auswertung des Plasmas ermöglicht quantitative Aussagen über die Elementzusammensetzung und erfolgt in Echtzeit. Auf Basis der Messdaten kann der Sorptions- und Desorptionsprozess geregelt und somit die Effizienz der Extraktion erhöht werden. Die alternative ICP-OES-Methode (Inductively Coupled Plasama – Optical Emission Spectroscopy) ist auf kontrollierte Laborbedingungen angewiesen, da sie eine Probenentnahme und -verdünnung erfordert, während die LIBS-Methode eine direkte Messung unter realen Prozessbedingungen ermöglicht. Testmessungen mit dem LiVision-System im Labor und im Feld zeigten, dass eine genaue Messung auch bei den im Extraktionsprozess vorherrschenden hohen Temperaturen und Drücken funktioniert.

Auch beim Batterie-Recycling wird die DLE-Methode zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Mithilfe des zum Patent angemeldeten LIBS-Verfahrens lassen sich neben Lithium weitere Elemente wie Natrium, Kalium und Magnesium quantitativ bestimmen, um den Recyclingprozess mit nur einer Methode umfassend zu überwachen.

**Projekt LiMO-Praxis, gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg (Invest BW – Praxissprints)**



*Messzelle des LiVision-Systems für den DLE-Prozess: Der Sensor misst den Lithiumgehalt der Sole während des Extraktionsprozesses hochgenau und in Echtzeit.*

»Wir messen den Lithiumgehalt inline, direkt in der Flüssigkeit und können so den Extraktionsprozess regeln.«

*Dr. Carl Basler, Projektleiter*

# **Fokus** Echtheitsprüfung und Produktauthentifizierung

## Origify von Bosch zeigt, wie durch enge Kooperation von Forschung und Industrie aus einer Idee ein marktfähiges Produkt wird.




Die Idee kam bereits 2008 auf: Wie wäre es, die individuelle Oberflächenstruktur von Industriebauteilen zu nutzen, um diese zu einem späteren Zeitpunkt in einer großen Charge wiederzuerkennen – ganz ohne Markierungen? An Bosch-Zündkerzen probierten wir unser Konzept aus. Eine Kamera nimmt einen Bereich der Bauteiloberfläche hochaufgelöst auf, digitalisiert die Daten mithilfe eines von uns entwickelten Algorithmus und hinterlegt sie in einer Datenbank gemeinsam mit einer ID. Für die spätere Identifikation wird der Prozess wiederholt und die Daten werden mit den Datenbankeinträgen abgeglichen. In der industriellen Produktion bietet das Verfahren neben der Authentifizierung den Vorteil, dass auch preiswerte Massenbauteile ohne Zusatzkosten rückverfolgt und Produktionsdaten mit einzelnen Bauteilen verknüpft werden können.

### Von der Industrie in den Konsumgütermarkt

In mehreren Machbarkeitsstudien konnten wir bereits 2009 zeigen, dass unser Konzept funktioniert. Knapp zehn Jahre später testeten wir die Technologie in einem Bosch-Werk für Partikelsensoren. Das Ergebnis: Eine Wiedererkennungsrate von 99,8 Prozent bei über 50.000 Bauteilen – und das unter den rauen Bedingungen im Produktionsumfeld. Oliver Steinbis, seinerzeit Projektpartner, war beeindruckt und wollte mehr. Er erkannte das Potenzial der markierungsfreien Technologie für die Echtheitsprüfung und die Produktauthentifizierung und hatte dabei auch den Konsumgütermarkt im Blick. Dieser Markt stellt jedoch ganz andere Anforderungen an die Technologie als das industrielle Umfeld. Der »proof of principle« gelang unter kontrollierten Bedingungen und mit aufwändiger Ausrüstung. Das Prüfobjekt wurde exakt positioniert, ausgeleuchtet und mit einer hochauflösenden Industriekamera aufgenommen. Für die Echtheitsprüfung durch Laien – mit dem Smartphone und potenziell an jedem beliebigen Ort – musste die Technologie robuster und unabhängiger werden von äußeren Einflüssen wie Belichtung, Aufnahmewinkel, Kameramodell oder auch Abnutzungsspuren auf den Oberflächen. Fraunhofer IPM nahm die Herausforderung an und Bosch investierte kontinuierlich in die exklusive Weiterentwicklung für das Smartphone und die Cloud. So sicherte sich Bosch Technologieführerschaft in der markierungsfreien Identifikation – mit einem Algorithmus, der heute als weltweit führend in diesem Bereich gilt.

### Origify: Echtzeit-Verifikation per Smartphone

Der lange Atem zahlte sich aus: 2025 wurde die Bosch Secure Authentication GmbH gegründet und brachte Origify an den Markt. Origify nutzt die bildbasierte Authentifizierungstechnologie, um die Echtheit von Luxusgütern, Medikamenten oder auch Banknoten und Sicherheitsdrucken zu prüfen. Im Januar 2026 stellten die Firmengründer Florian Hachenberger und Oliver Steinbis Origify auf der Technologiemesse CES in Las Vegas vor.

*Echt oder Fake? Produktoberflächen sind so individuell wie ein Fingerabdruck. Mit der Origify-App können Verbraucherinnen und Verbraucher die Produktechtheit anhand von Oberflächenmerkmalen prüfen. Kern der Technologie ist ein Algorithmus von Fraunhofer IPM.*

## Vom Projekt zur strategischen Partnerschaft

Vom ersten Projekt 2008 bis zur Gründung von Bosch Secure Authentication 2025 wuchsen die Entwicklungsteams von Fraunhofer IPM und Bosch eng zusammen. »Diese strategische Partnerschaft ist dem gegenseitigen Vertrauen zu verdanken, das beide Partner zueinander hatten«, sagt Oliver Steinbis, heute Technischer Geschäftsführer des Unternehmens. So sieht es auch Daniel Carl, der die Entwicklung von Anfang an begleitete. »Mittlerweile verbindet uns auch eine emotionale Zugehörigkeit – es liegt uns einfach am Herzen, dass Origify erfolgreich ist.« Gut also, dass die erfolgreiche Kooperation mit der Unternehmensgründung keineswegs beendet ist. Fraunhofer IPM wird auch in Zukunft die Weiterentwicklung von Origify eng begleiten, denn die Technologie muss kontinuierlich an technologische Änderungen von Endgeräten und neue Geschäftsmodelle angepasst werden.

### Kampf gegen Produktpiraterie

Medikamente, Uhren, Schuhe, Wein, Autoreifen oder Visa – der Handel mit gefälschten Produkten macht laut OECD etwa 2,5 Prozent des weltweiten Handelsvolumens aus. Die Folgen der Produktpiraterie für Unternehmen und Verbraucher sind enorm und reichen von finanziellen Verlusten über Gesundheits- und Sicherheitsrisiken bis zum geschädigten Markenimage. Mit Origify bietet Bosch Secure Authentication eine Lösung, mit der sich Produkte anhand ihrer natürlichen Oberflächenstruktur eindeutig und ohne Veränderung des Produkts authentifizieren lassen, ohne Marker wie z. B. Codes, Labels oder Chips. Die Bosch Secure Authentication GmbH wurde 2025 als 100-prozentige Tochtergesellschaft der Robert Bosch GmbH gegründet und ist Teil der Bosch-Gruppe.

### Wie funktioniert Origify?

Das Konzept und die zugrundeliegende Technologie wurden in Kooperation mit Fraunhofer IPM entwickelt. Grundgedanke ist die Biometrie der Dinge: Jede Oberfläche hat bei sehr genauer Betrachtung individuelle Merkmale, ähnlich wie ein Fingerabdruck. Für die Echtheitsprüfung wird jedes Produkt einmalig mit einer Kamera erfasst, z. B. während der Produktion. Ein Algorithmus analysiert die erfassten Oberflächenmerkmale, digitalisiert die Daten und speichert sie als Bitfolge manipulationssicher in der Cloud. Für die Verifizierung scannen Nutzer das Produkt mit der Origify-App oder einem stationären Kamera-Device. Der Abgleich mit den Datenbankeinträgen erfolgt in Echtzeit.

Bosch Secure Authentication GmbH

»Wir sehen uns in dieser Partnerschaft als verlängerte Werkbank und fühlen uns als Teil des Origify-Teams.«

*Prof. Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter Produktionskontrolle*

# Produktionskontrolle | Messen & Veranstaltungen

## Teilnahme

**all about automation**
Friedrichshafen, 25.–26.02.2025
Stand EDIH Südwest

**43. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung**
Stuttgart, 06.–08.05.2025
Eigener Stand

**Control**
Stuttgart, 06.–09.05.2025
Stand Geschäftsbereich Vision

**SKZ: Barriere-Verbundfolien**
Würzburg, 01.–02.07.2025
Fachtagung

**IPFA 2025**
International Symposion on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits
Malaysia, 05.–06.08.2025

**parts2clean**
Stuttgart, 07.–09.10.2025
Stand Geschäftsbereich Reinigung

**Quantum Effects**
Stuttgart, 07.–08.10.2025
Stand QuantumBW (Fraunhofer)

**Space Tech Expo Europe**
Bremen, 18.–20.11.2025
Eigener Stand

**43. Vortrags- und Diskussionstagung Werkstoffprüfung**
Dresden, 27.–28.11.2025
Vortrag

## Eigene Veranstaltungen

**Online-Forum Produktionskontrolle**
29.01.2025
3D-Geometrie & Rauheit

09.04.2025
Bildgebende Verformungsmessung – hochgenau und dynamisch

**Industrie-Workshop Produktionskontrolle**
25.09.–26.09.2025
Neue optische Inline-Methoden: 3D-Oberfläche | Beschichtung | Reinheit

## Geplant für 2026

**EUROGUSS**
13.–15.01.2026

**New Space Acceleration Days**
04.–05.02.2026

**GM Innovation Day**
18.02.2026

**Clean event**
23.04.2026

**Zukunft.Lab.Schwarzwald**
21.05.2026

**Arnold IT Systems Technologietag**
16.07.2026

**all about automation**
26.–27.08.2026

**Schraubenfachtagung HS Offenburg**
22.–23.09.2026

**SEMICON Europa**
10.–13.11.2026

**EuroBLECH**
20.–23.10.2026

**Space Tech Expo Europe**
17.–18.11.2026



# **Überblick** Objekt- und Formerfassung

»3D-Daten automatisiert erfassen und prozessieren: Das ist unser Beitrag zur Digitalisierung von Infrastruktur und Umwelt.«

*Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter*

Wir entwickeln maßgeschneiderte Messsysteme für die optische Zustandserfassung von Infrastruktur-Objekten und großen Strukturen. Dabei decken wir die gesamte 3D-Daten-Prozesskette ab – von der automatisierten Erfassung über die Referenzierung und Analyse bis hin zur Visualisierung von Form und Lage der Objekte.

Unsere robusten LiDAR-Systeme und maßgeschneiderten Beleuchtungs- und Kamerasysteme erfassen die Umgebung von bewegten Plattformen aus – extrem schnell, präzise und dreidimensional. Typische Messbereiche erstrecken sich bis in den 100-Meter-Bereich. Speziell entwickelte Software wertet die gemessenen Daten vollautomatisiert aus. Für die Analyse nutzen wir KI-basierte Methoden wie beispielsweise »Deep Learning«. So bilden unsere Messdaten die Grundlage zur digitalisierten Planung und Instandhaltung baulicher Infrastruktur.

**Schnelle, präzise und robuste Sensoren**

**Miniaturisierte Messsysteme**

**Software zur Datenanalyse**

## Unsere Gruppen und Themen

### Mobiles terrestrisches Scanning

- Systeme für Mobile Mapping-Fahrzeuge
- Systeme für Regelstraßenfahrzeuge
- Sensor- und Datenfusion für Komplettsysteme

### Mobile Bahn-Messtechnik

- Systeme für Messzüge
- Systeme für Regelzüge
- Sensor- und Datenfusion für Komplettsysteme

### Airborne- und Unterwasser-Scanning

- Systeme für autonome Flugplattformen
- Systeme für Anwendungen unter Wasser
- Signalanalyse für schwierige Messumgebungen

### Autonome Messrobotik

- Adaptierung von Messsensorik für robotische Systeme
- Integration von robotischen Komplettsystemen
- Umsetzung kooperativer Systeme

### 3D-Geodaten-Analyse

- KI-basierte semantische Anreicherung von 2D- und 3D-Daten
- Echtzeit-Visualisierung räumlicher Daten
- Erstellung synthetischer Messdaten
- Plattformunabhängige Systeme

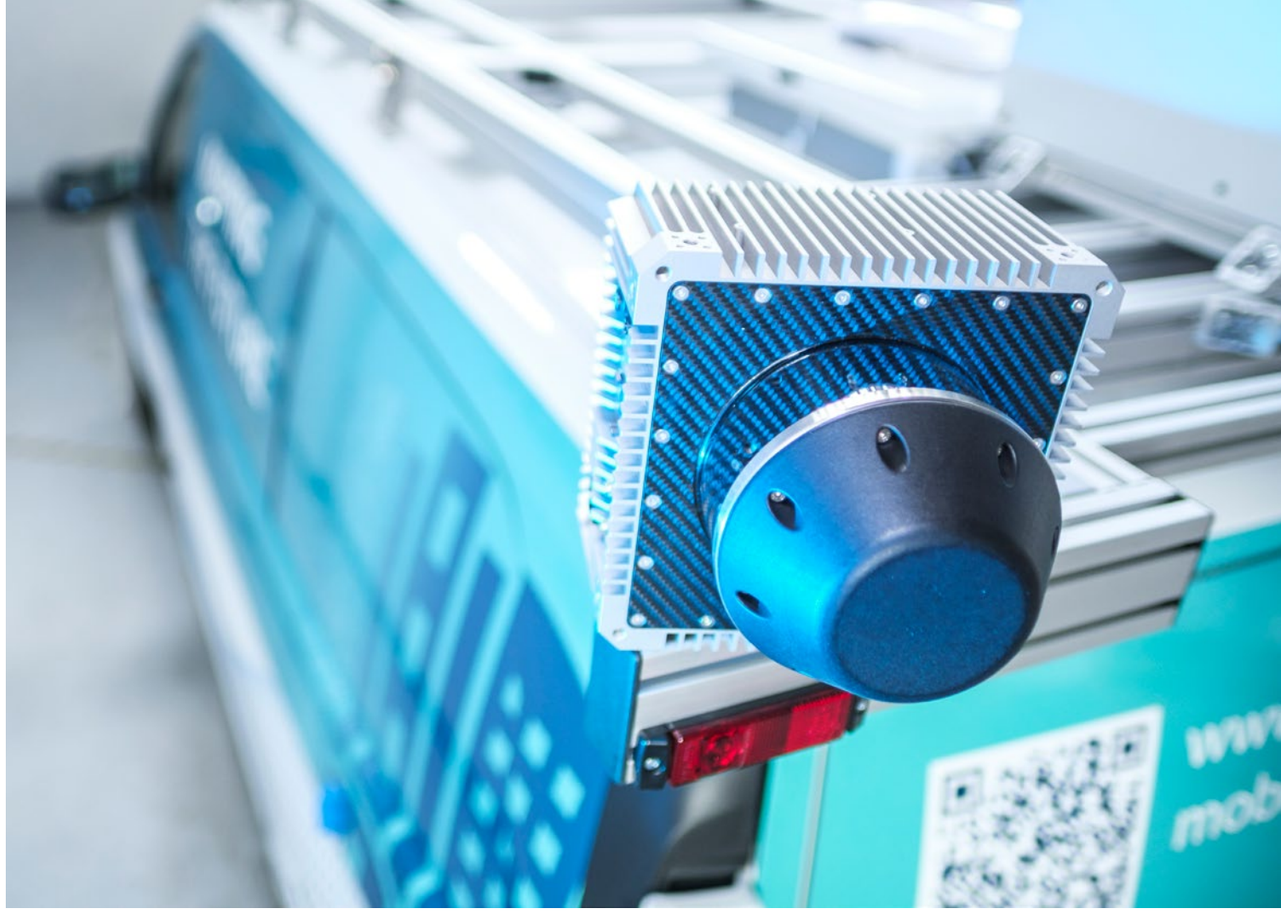


**Im Labor kalibrieren wir unsere Laserscanner für den Einsatz – zum Beispiel auf Schiene und Straße.«**

# **Highlights** Objekt- und Formerfassung

## Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

**Im Forschungsfeld Objekt- und Formerfassung haben wir 2025 viele spannende Projekte begonnen oder erfolgreich abgeschlossen – einige stellen wir Ihnen hier vor.**



Projekt Stackable Scanner

### Flexibles LiDAR-System für mobile Plattformen

**Der Mobile Precise Scanner MPS, unsere neueste Entwicklung im Bereich Laserscanning, nutzt erstmals das Pulslaufzeitverfahren für hochpräzises Mobile Mapping.**

Unsere LiDAR-Sensoren zur mobilen 3D-Erfassung von Umgebungen gehören zu den leistungsfähigsten weltweit. Der Mobile Precise Scanner MPS erweitert unser Portfolio um einen besonders kompakten und leichten, aber dennoch leistungsstarken Profilscanner. Entwickelt wurde das System im Rahmen des Ende 2025 abgeschlossenen Projekts Stackable Scanner. Mit einem Messbereich von mehr als 100 Metern und einer Scanrate von 300 Hz setzt der MPS neue Maßstäbe für das Mobile Mapping. Das rund 4 Kilogramm leichte LiDAR-System kann auf Straßen- oder Schienenfahrzeugen zur Zustandserfassung von Infrastruktur, aber auch auf autonomen Robotik-Plattformen für Indoor-Anwendungen eingesetzt werden. Dank der sehr hohen Scanrate erzielt der MPS eine hohe Profildichte auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten. Mit einem Scanwinkel von vollen 360° und hoher Auflösung erfasst der Scanner auch schmale Objekte wie beispielsweise Schilder oder Oberleitungen.

Mit dem MPS setzt das Entwicklungsteam erstmals konsequent auf einen modularen Ansatz: Je nach Messaufgabe können mehrere Scanner ganz einfach „gestackt" werden, um eine höhere Punktdichte zu erreichen. Dabei teilen sich die einzelnen Sensoren zentrale Komponenten wie z. B. die Recheneinheit. Die mechanische Konstruktion ist so ausgelegt, dass keine separate Kalibration nötig ist.

Anders als seine Vorgängersysteme basiert der MPS auf dem Pulslaufzeitverfahren (auch Time-of-Flight, ToF). Bisher galt das Phasenlaufzeitverfahren aufgrund seiner hohen Präzision als Methode der Wahl für unsere Profilscanner. Dank technologischer Fortschritte bei Lichtquellen, Detektoren, Signalwandlern, Elektronik und Recheneinheiten misst der MPS mit Submillimeter-Präzision und damit sogar präziser als vorherige Systeme. Und das Pulslaufzeitverfahren hat weitere Vorteile: ToF-basierte Systeme ermöglichen Messungen über Distanzen von mehr als hundert Metern und lassen sich sehr kompakt realisieren. Auch die Datenauswertung wurde im Vergleich zu Vorgängersystemen aufgewertet: Ausgewertet wird die volle Echofolge jedes Laserpulses, sodass auch Mehrfachechos zuverlässig detektiert werden (Full Waveform Signalauswertung). So können Objekte auch durch Vegetation oder beispielsweise Zäune hindurch erfasst werden. Der MPS kann um Kameras, GNSS-Empfänger und eine inertiale Messeinheit (IMU) ergänzt werden und ist so als selbstständiges System universell einsetzbar. Auch Schnittstellen für die Integration in vorhandene Mobile-Mapping-Systeme sind vorhanden. Seit Beginn 2026 ist der MPS für Testmessungen im Einsatz.

**Projekt Stackable Scanner, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)**

*Unser neuester LiDAR-Sensor ist gerade einmal so groß wie ein halber Schuhkarton und kann auf unterschiedlichen Trägerplattformen installiert werden.*

Projekt ECHO

## Kompaktes Bahnmesssystem dank innovativer Signalauswertung

**Ein LiDAR-System, installiert auf Personen- oder Güterzügen, soll die Voraussetzung für ein engmaschiges Zustandsmonitoring von Oberleitungen schaffen.**

Ein Drittel aller Störungen im Bahnverkehr geht auf defekte Oberleitungen zurück. Einer der Gründe sind zu große Wartungsintervalle. Und das liegt an den Kosten: Mehrere Millionen Euro müssen Bahnbetreiber für einen einzigen Messzug aufbringen; der Einsatz erfordert geschultes Personal und aufwändige Planungen. Insbesondere Nebenstrecken werden daher oftmals nur alle paar Jahre vermessen. Im Projekt ECHO, das Anfang 2026 startete, entwickeln wir ein kompaktes laserbasiertes Oberleitungsmesssystem für den Einsatz auf Regelzügen. Es soll die Fahrdrahtabnutzung genauer als 0,5 mm und die referenzierte Lage der Oberleitung genauer als 2 cm bestimmen – bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h.

Das Team setzt dazu auf einen völlig neuen Ansatz für die Signalauswertung, nämlich die vollständige Analyse der LiDAR-Echos. Wurde bei Vorgängersystemen lediglich die Laufzeit des Hauptreflexes eines Laserpulses ausgewertet, um die Entfernung zum Messobjekt zu berechnen, soll für das neue System die gesamte Amplitude, also der genaue zeitliche Verlauf des reflektierten Laserpulses analysiert werden. Aus diesem vollständigen Echo und mit 5 Milliarden Messungen pro Sekunde lassen sich detaillierte Informationen zur Fahrdrahtlage und zur Restdicke der Fahrdrähte ableiten. Der Vorteil: Das System kann auf Kameras und aufwändige Beleuchtung verzichten und lässt sich somit kompakt und energieeffizient realisieren. Leistungsfähige Prozessorchips der neuesten Generation machen diesen Ansatz möglich. Sie digitalisieren elektrische Detektorsignale so schnell, dass die angestrebten fünf Milliarden Messungen pro Sekunde in Echtzeit im Messsystem verarbeitet werden können. Dabei werden Fehlstellen erkannt und klassifiziert. Die digitalen Daten werden noch während der Fahrt über das 5G-Netz in eine zentrale Datenbank übertragen. Ziel ist ein Demonstrator, der in der Endphase des Projekts 2028 gemeinsam mit der Freiburger Verkehrs AG getestet werden soll.

**Projekt ECHO (Messung der Verunreinigung und Geometrie von Bahnoberleitungen mittels Analyse des Echos von Laserpulsen), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)**

»Indem wir das komplette LiDAR-Signal auswerten, können wir auf Kameras verzichten.«

*Dr. Kira Zschiesche, Gruppenleiterin*

Hydrographie: Pramuka Field Work 2025

## Detaillierte 3D-Modelle von Unterwasserstrukturen

**Ein deutsch-indonesisches Forschungsteam hat unsere Unterwasser-LiDAR-Sensoren ULi und ABS in Indonesien getestet.**

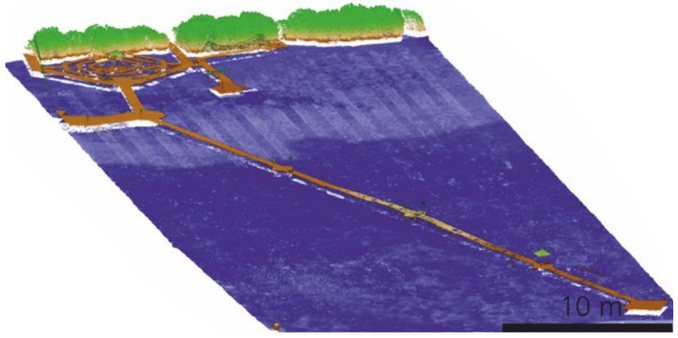
Die Kartierung von Meeresböden, Küstenstreifen und maritimen Ökosystemen gewinnt aufgrund einer intensiveren wirtschaftlichen Nutzung und ökologischer Fragestellungen zunehmend an Bedeutung. Ein Forschungsteam der HafenCity Universität Hamburg (HCU) und des indonesischen Institut Teknologi Bandung hat im Herbst 2025 Sensorik und Messverfahren für Unterwassermessungen und bathymetrische Messungen in indonesischen Gewässern getestet. Neben Sonar- und Photogrammetrie-Sensoren kamen unsere High-End-LiDAR-Systeme Underwater LiDAR System ULi und Airborne Bathymetric Laser Scanner ABS zum Einsatz. Im Rahmen der einwöchigen Forschungsmission wurden umfangreiche Messungen im Meer rund um die indonesische Insel Pramuka durchgeführt, das mit bis zu 12 Meter Sichttiefe ideale Bedingungen für Unterwasser-Messungen bietet.

Laserbasierte Messtechniken für die Anwendung unter Wasser gewinnen zunehmend an Bedeutung. Das Underwater LiDAR System ULi erfasst Objekte unter Wasser um ein Vielfaches präziser als beispielsweise Sonar-Systeme. Der Airborne Bathymetric Laser Scanner ABS ermöglicht räumlich hochauflösende bathymetrische Messungen aus der Luft. Diese LiDAR-Daten ergänzen klassische akustische oder kamerabasierte Messdaten und sind dank einer hohen räumlichen Auflösung Grundlage für detaillierte 3D-Modelle von Unterwasserstrukturen. In Indonesien wurden die von der HCU erworbenen Systeme ULi und ABS zum ersten Mal parallel eingesetzt, um dieselbe Szene zeitgleich aus der Luft und unter Wasser mit LiDAR zu erfassen. Von den fusionierten Daten versprechen sich die Wissenschaftler eine noch höhere Datenqualität. Die Daten aus der Messkampagne fließen zusammen mit Satellitendaten in ein öffentlich zugängliches Datenmodell. Dies soll helfen, weltweite Standards in der Hydrographie zu verbessern. Die HCU hat inzwischen ein weiters ABS erworben, um Gewässer mit mehreren kooperierenden Systemen simultan, effizient und mit automatisch angepassten Messparametern zu erfassen.

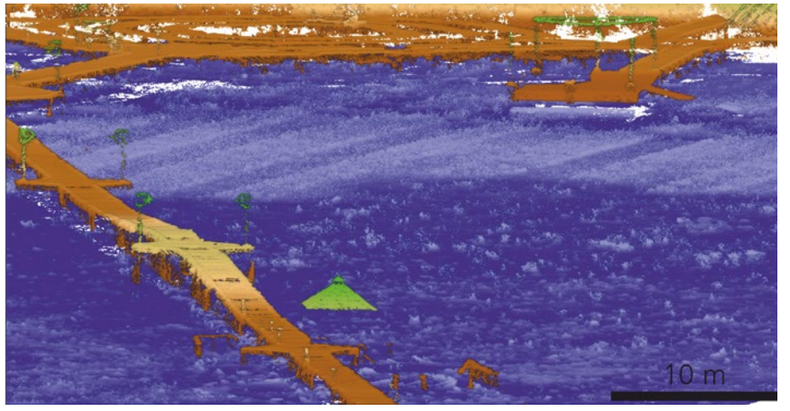


*Der Airborne Bathymetric Laser Scanner über der Küste von Pramuka.*

**Video**




*Das LiDAR-System erzeugt ein hochaufgelöstes Bild der Unterwasser-Topographie.*



Projekt SatCalVal

## Daten für Daten: UAV-gestützte Validierung und Kalibrierung von Thermal-Satellitendaten

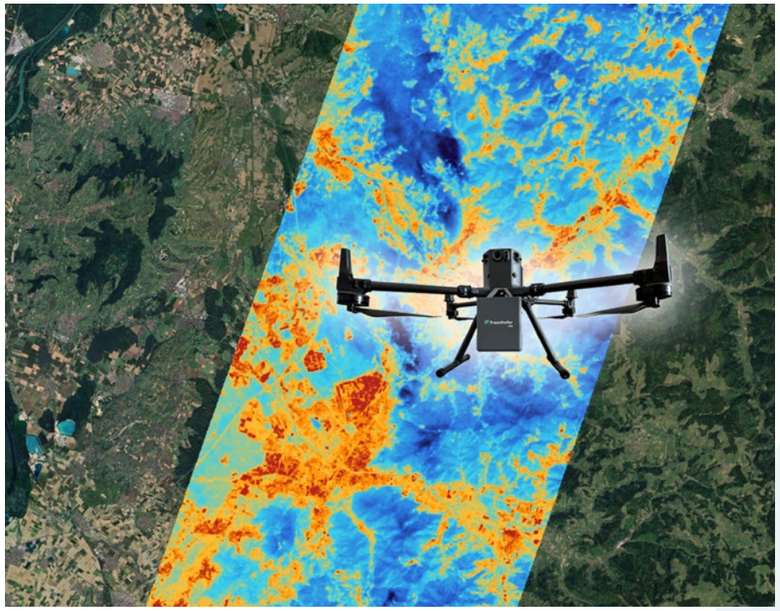
**Ein drohnenbasiertes Messsystem liefert Temperatur-Referenzdaten für thermische Satelliten. Es passt Flugrouten optimal an die Datenerfassung durch den Satelliten an und kann bei Bedarf völlig autonom agieren.**

Zahlreiche thermische Satelliten umkreisen die Erde und liefern Temperaturdaten der Erdoberfläche. Klimamodelle und Wettervorhersagen basieren auf diesen Daten. Aber auch Landwirte, Stadtplanerinnen, Energieanlagenbetreiber und viele weitere Akteure beziehen thermische Satellitendaten in ihre Planungen und Entscheidungen ein. Die Bodenauflösung der Satellitendaten liegt mittlerweile im Bereich von nur noch mehreren zehn Meter – hochgenaue Daten von Referenzflächen zur Validierung der Daten und Kalibrierung der Satelliten können die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Satellitendaten erhöhen. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie »SatCalVal« haben Forschende von Fraunhofer IPM in Kooperation mit der constellr GmbH ein drohnenbasiertes Messsystem entwickelt, das Temperatur-Referenzdaten während Satellitenüberflügen bereitstellt.

Das Airborne Reference Temperature System ART misst die Bodentemperatur verschiedener Oberflächen wie z. B. Wasser, Erdboden, Sand oder Asphalt aus der Luft mithilfe eines Pyrometers mit einer Genauigkeit von bis zu 0,5 K. Dabei passt es die Flugmuster an, um die mittlere Referenztemperatur der Satellitenpixel für den Zeitpunkt des Überflugs so genau wie möglich zu bestimmen.

Das kompakte und leichte Messsystem kann auf unterschiedliche Drohnen integriert werden, ist aber auch als »Drone-in-a-box«-Lösung zu haben. Das heißt: Das System agiert völlig autonom, gesteuert von einem Drohnenhangar aus – vom Start über eine definierte Messroutine bis zur Landung. Damit werden Referenzmessungen während Satellitenüberflügen auch in Gebieten möglich, die schwer zugänglich sind.

Das ART-System kann stationär oder mobil – z. B. auf einem Straßenfahrzeug oder einem Schiff – eingesetzt werden. Einstellungen wie das zu messende Areal, das Flugmuster, Sensorparameter und die maximale Windgeschwindigkeit sowie der Datendownload und die Kamera-Ferninspektion werden über eine Webschnittstelle gesteuert. Dies ermöglicht einen autarken und wartungsarmen Betrieb.



*Die Auflösung thermischer Satellitenbilder liegt mittlerweile im Bereich mehrerer zehn Meter pro Bildpixel. Ein autonomes Drohnensystem liefert genaue Daten, die für die Validierung und Kalibrierung des Satelliten genutzt werden.*

»Mit der »Drone-in-a-box«-Lösung können neben Thermaldaten auch weitere Satellitendaten automatisiert validiert und kalibriert werden.«

*Dr. Dominik Merkle, Gruppenleiter*

# **Fokus** Autonome Sensorsysteme

## Autonom agierende Messroboter mit adaptiver Sensorik erhöhen die Effizienz und die Datenqualität beim Mobile Mapping.



Die Digitalisierung von Planungs- und Instandhaltungsprozessen erfordert immer präzisere und aktuelle Umgebungsdaten. Gleichzeitig sollen Messkampagnen möglichst effizient ablaufen, im Idealfall ganz ohne den Einsatz von Fachpersonal. Intelligente Sensoren, die autonom agieren, sind die Antwort auf die stetig steigenden Anforderungen an Kartierungsprojekte oder Inspektionsaufgaben.

### Selbst ist der Sensor: autonom dank Echtzeitdaten

Unsere Forschungsgruppe »Autonome Messrobotik« arbeitet seit 2024 an der Entwicklung autonomer robotischer Systeme für die 3D-Datenerfassung. Ziel sind möglichst selbstständig agierende Multi-Sensorsysteme, die auch in Umgebungen messen, die für bemannte Plattformen schwer zugänglich, zu gefährlich oder schlicht zu groß sind. Die Forschenden nutzen unterschiedliche Trägerplattformen – von Drohnen über unbemannte Landfahrzeuge (Unmanned Ground Vehicles, UGVs), Trolleys, ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) bis zu Roboterhunden. Je nach Messaufgabe werden kommerzielle oder eigene Sensoren – darunter auch LiDAR-Systeme – auf die Plattformen integriert. Wellenlänge, Messdistanz, Messbereich und Auflösung werden jeweils optimal auf den Anwendungsfall angepasst.

Voraussetzung für den autonomen Betrieb sind Echtzeitdaten der Umgebung. Software für die Echtzeit-Datenprozessierung ist daher immer Bestandteil der autonomen Messsysteme. So ist es möglich, Qualität und Vollständigkeit der Daten bereits während der Daten zu kontrollieren. Die Lokalisierung, Kartierung und Navigation der Messsysteme basiert dabei auf den Umgebungsdaten. Für die autonome Navigation der Roboterplattformen kommen SLAM-Methoden (Simultaneous localization and mapping) zum Einsatz, die auch in rauen und dynamischen Umgebungen funktionieren.

Je nach Grad der Autonomie sind nutzerfreundliche Tools nötig, um die Sensorsysteme effizient, bequem und sicher zu steuern – auch aus der Ferne. Das Team entwickelt Lösungen für die Mensch-Maschine-Interaktion, die umfangreiche Steuerungs-, Sicherheits- und Assistenzfunktionen bereitstellen. Aber auch vollkommen autark agierende Lösungen sind bereits im Einsatz: Das Airborne Reference Temperature System ART zur Validierung und Kalibrierung thermischer Satellitendaten beispielsweise kann als vollständig autarkes »Drone-in-a-box«-System betrieben werden.

### Flexible Sensorauswahl und selektives Messen

Großer Messbereich, hohe Auflösung – das ist der Anspruch und gleichzeitig ein Zielkonflikt bei der Überwachung von Bauwerken, Verkehrswegen oder der Kartierung ausgedehnter land- oder forstwirtschaftlicher Flächen. Nicht immer ist es sinnvoll, große Areale in Gänze mit größtmöglicher Präzision aufzunehmen. Selektive Erfassung, flexible Sensorauswahl und iterative Ansätze sind die Schlüssel in diesem Spannungsfeld. Intelligente, adaptive Sensorik wird zukünftig in der Lage sein, weitgehend selbstständig zu entscheiden, wo es sich lohnt, genauer hinzuschauen. Messdaten werden in Echtzeit ausgewertet, sodass als kritisch identifizierte Bereiche gezielt in den Fokus genommen werden können, indem z. B. spezifische Sensoren angesteuert, Geschwindigkeit oder Flughöhe angepasst werden.

### Strukturen iterativ erfassen

Dies ist beispielsweise sinnvoll bei der luftgestützten Inspektion großer Strukturen wie etwa Brücken oder Staudämmen. Hier produziert eine durchgehend hochaufgelöste Messung unnötig große Datenmengen, statt gezielt Anomalien aufzuzeigen. Für eine höhere Effizienz bei der Erfassung setzen wir auf einen iterativen Ansatz: Die Sensoren nehmen das Bauwerk zunächst mit

*Autonome Trägerplattformen wie dieser Roboterhund machen es möglich, durch Echtzeit-KI selbst schwer zugängliche Umgebungen vollständig und in der notwendigen Datenqualität zu erfassen.*

geringerer Auflösung auf, um mögliche Fehlstellen zu identifizieren. Erkennt die semantische Bildauswertung einen Riss, so passt das System Trajektorien und Sensoreinstellungen an, um den kritischen Bereich detailliert zu erfassen und Aussagen über die exakte Rissbreite und -länge zu ermöglichen. Das Drohnensystem kann dadurch sehr kompakt sein, was Genehmigungshürden und Sicherheitsrisiken reduziert und den Einsatz mit weniger Sperrzeiten ermöglicht.

Ähnlich selektiv und adaptiv arbeitet ein robotergestütztes Kanalinspektionssystem, das wir im Projekt FlexiSKan entwickeln. Neben einem LiDAR-Scanner nutzt das System u. a. eine Panoramakamera anstelle von Schwenkkopfkameras für eine kontinuierliche vollständige Erfassung der Umgebung. Die Messdaten werden vorausschauend in Echtzeit ausgewertet, sodass im Falle einer erkannten Fehlstelle z. B. die Fahrgeschwindigkeit angepasst und somit die Aufnahmequalität erhöht werden kann. Eine laserbasierte 3D-Geschwindigkeitsmessung ermöglicht zudem die hochgenaue Verortung in geschlossenen homogenen Umgebungen. Hier erschweren homogene Oberflächen mit geringer Textur den Einsatz von SLAM auf Basis visueller Odometrie. Mögliche Einsatzgebiete eines solchen Inspektionssystems sind neben Kanälen unter anderem Pipelines, Schächte, Schornsteine, Tunnel oder Minen.

Unser Underwater LiDAR System ULi wird derzeit zu einem autonomen System weiterentwickelt, das Unterwasserstrukturen von einem AUV aus selbstständig erfasst. Das System soll 3D-Positions- und Intensitätsdaten für eine aktive simultane Positionsbestimmung und Kartierung (A-SLAM) nutzen. Dies ermöglicht es, die 3D-Daten in Echtzeit zu bewerten und bei Bedarf die Sensorparameter wie z. B. das Scanmuster oder die Messdistanz zum Objekt anzupassen, beispielsweise wenn das Wasser besonders trübe ist. Beim Airborne Bathymetric Laser Scanner ABS arbeiten wir an einer automatisierten Flugroutenplanung auf Basis von Collaborative Active SLAM (AC-SLAM), die eine mehrstufige Erfassung des zu vermessenden Gebiets vorsieht. Ziel ist es, die Zielgebiete vollständig zu erfassen und z. B. die Flughöhe dynamisch an die Trübheit des Wassers anzupassen.

Dank KI-basierter Lernstrategien wie Reinforcement Learning werden Sensorsysteme zunehmend in der Lage sein, Messparameter selbstständig anzupassen – und können dabei in Zukunft sogar auf Quellen aus einer »Extended Reality (XR)« zurückgreifen, also auf mannigfaltiges Hintergrundwissen zum jeweiligen Messobjekt.

»Die Autonomie der Systeme ist der Schlüssel für Messaufgaben, die bisher nicht möglich waren.«

*Dr. Dominik Merkle, Gruppenleiter*



# **Objekt- und Formerfassung** | Messen & Veranstaltungen

## Teilnahme

**Bau**
München, 13.–17.01.2025
Stand Fraunhofer-Allianz Bau

**INTERGEO**
Frankfurt 07.–09.10.2025
Eigener Stand

**Space Tech Expo Europe**
Bremen, 18.–20.11.2025
Eigener Stand

## Geplant für 2026

**AF-Verteidigung und Sicherheit in Deutschland**
03.–05.01.2026

**New Space Acceleration Days**
04.–05.02.2026

**OI Oceanology International**
10.–12.03.2026

**digitalBau**
24.–26.03.2026

**INTERGEO**
15.–17.09.2026

**InnoTrans**
22.–25.09.2026

**Space Tech Expo Europe**
17.–19.11.2026

## Eigene Veranstaltungen

**Arnold IT Systems Technologietag**
Freiburg, 15.07.2025
Kooperationsworkshop



# **Überblick** Gas- und Prozesstechnologie

»Sensorik und Energiewandler nach Maß: Das ist unser Beitrag für mehr Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit.«

*Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter*

Wir entwickeln und fertigen Mess- und Regelsysteme für Gase und Flüssigkeiten nach kundenspezifischen Anforderungen. Dabei setzen wir auf eine Reihe unterschiedlicher Technologien – von spektroskopischen Verfahren für die Gasanalytik über energieeffiziente Gassensoren bis hin zu thermischen Sensoren und Quantenmagnetometern für die Durchflussmessung. Die robusten Sensoren und Systeme kommen überall dort zum Einsatz, wo kurze Messzeiten, hohe Präzision und Zuverlässigkeit auch unter extremen Bedingungen gefragt sind – in der Abgasanalytik und Prozessmesstechnik ebenso wie in Umwelt-, Energie- und Medizintechnik.

Darüber hinaus entwickeln, konzeptionieren und bauen wir Systeme, um Wärme zu pumpen, zu wandeln, zu leiten oder zu schalten. Wir forschen an neuen Entwärmungs- und Temperierkonzepten mittles Heatpipes und Peltierelementen sowie an kalorischen Wärmepumpen.

**Miniaturisierte Sensoren und Systeme**

**Spektroskopische Verfahren**

**Thermische Sensoren**

**Kühlen mit kalorischen Systemen**

## Unsere Gruppen und Themen

### Integrierte Sensorsysteme

- Entwicklung und Prozessierung gassensitiver Materialien
- Photoakustische Gassensoren
- Mikrooptische Infrarot-Komponenten
- Miniaturisierte Gassensorsysteme

### Spektroskopie und Prozessanalytik

- Laserspektroskopische Gasdetektion
- Ferndetektion von Gasen
- Raman-Spektroskopie
- Auswerteverfahren

### Thermische Messtechnik und Systeme

- MEMS und MOEMS
- Thermische Messsysteme und IR-Detektoren
- Simulation physikalischer Prozesse
- Peltierkühlung und -temperierung
- Strukturelle, thermische und elektrische Analyse von Bauteilen und Materialien

### Kalorische Systeme

- Kühlen und Heizen mit kalorischen Materialien
- Entwicklung magnetokalorischer, elastokalorischer und elektrokalorischer Systeme
- Simulation thermischer Prozesse
- Entwicklung und Charakterisierung von Heatpipes für das thermische Management
- Quantenmagnetometrie zur kontaktfreien Durchflussmessung



**Wir messen Durchfluss nicht-invasiv und genau – mit Quantensensoren.«**

# **Highlights** Gas- und Prozesstechnologie

## Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

**Im Forschungsfeld Gas- und Prozesstechnologie haben wir 2025 viele spannende Projekte begonnen oder erfolgreich abgeschlossen – einige stellen wir Ihnen hier vor.**




Projekt SuperPile

### Thermopile-Detektoren für den Einsatz bei hohen Temperaturen

**Supergitter aus Gold und Nickel sollen Thermopile-Elemente fit machen für den Dauereinsatz bei Temperaturen von mehr als 200 °C.**

Die Temperatur ist ein Schlüsselparameter für die Effizienz und die Steuerung vieler industrieller Prozesse. Thermopile-Detektoren, allen voran solche basierend auf Antimon (Sb) und Bismut-Antimon-Legierungen (BiSb), überwachen bereits heute Temperaturen im industriellen Umfeld – kontaktlos und hochpräzise. Ihr Einsatz ist jedoch auf Umgebungstemperaturen bis maximal 200 °C begrenzt. In vielen industriellen Umgebungen – etwa bei der Wärmebehandlung oder in Trocknungsprozessen – herrschen deutlich höhere Temperaturen. Silizium-basierte Thermopiles halten zwar höheren Temperaturen stand, messen jedoch nicht ausreichend genau. Im Projekt SuperPile, das 2025 startete, entwickeln wir gemeinsam mit drei Partnerunternehmen aus der Industrie neuartige Thermopile-Sensoren, die bei hohen Temperaturen eingesetzt werden können und über lange Zeiträume sehr empfindlich messen. Die Arbeiten am Fraunhofer IPM zielen auf die Entwicklung eines neuartigen Thermopile-Chips als Kernelement von Thermopile-Detektoren.

Thermopiles sind thermische Strahlungssensoren. Sie messen die Temperatur über den thermoelektrischen Effekt. Dabei wandelt der Detektor die absorbierte Wärmestrahlung direkt in ein Spannungssignal um, das proportional zur Temperatur ist. Entscheidend für die Messempfindlichkeit ist die Güte des in den Thermoelementen eingesetzten Materials. Die Forschenden setzen für industrielle Anwendungen erstmals auf Au-Ni-Supergitterstrukturen. Jüngste Veröffentlichungen belegen die herausragenden thermoelektrischen Eigenschaften von Gold-Nickel-Legierungen. Das nanoskalige Schichtsystem soll nun erstmals in MEMS-Bauweise gefertigt werden, wobei die Schichten auf Si-Substraten durch Sputtern abgeschieden werden. Neben dem Materialsystem und dem Design des Thermopile-Chips wird im Rahmen von SuperPile auch die Prozesstechnologie zur Herstellung der Chips entwickelt.

**Projekt SuperPile (Supergitter-basierte Thermopile-Sensoren zum Dauereinsatz bei erhöhten Temperaturen), gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (Programm KMU-innovativ), Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH**

*Thermopile-Sensoren ermöglichen hochgenaue Temperaturmessungen. Sie werden auf Wafern hergestellt. Ein neuartiges Material soll den Einsatz der Sensoren im industriellen Umfeld bei sehr hohen Temperaturen ermöglichen.*

Projekt Druide

## Kolorimetrische Sensoren überwachen Luftfilter in Brennstoffzellen

**Kostengünstig herstellbare Farbumschlag-Sensoren detektieren Filterdurchbrüche in Echtzeit und ermöglichen somit eine bedarfsorientierte Filterwartung.**

Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen nutzen zugeführten Wasserstoff und Sauerstoff aus der Umgebungsluft, um elektrischen Strom zu erzeugen. Luftschadstoffe können dabei die platinbeschichtete Katalysator-Oberfläche der Zellen blockieren – auf Kosten der Leistung und Lebensdauer. Mehrstufige Gas- und Partikelfilter werden eingesetzt, um dies verhindern. Damit es nicht zu Filterdurchbrüchen kommt, werden die Filter turnusmäßig gewechselt – unabhängig von ihrer tatsächlichen Abnutzung. Im Projekt Druide, das Mitte 2025 abgeschlossen wurde, haben wir gemeinsam mit der smartGAS Mikrosensorik GmbH und der DataPhysics Instruments GmbH ein kolorimetrisches Sensorsystem für die Zustandsüberwachung gasabsorbierender Filter entwickelt, das Filterdurchbrüche in Echtzeit detektiert. So müssen die Filter in Zukunft nur dann getauscht werden, wenn die Filterqualität nicht mehr ausreicht.

Kolorimetrische Sensoren weisen Gase selektiv nach, können kostengünstig hergestellt werden und kommen mit wenig Energie aus: Bei Kontakt mit dem Zielgas kommt es zu einer chemischen Reaktion, die eine Farbänderung auslöst. Diese kann mit bloßem Auge oder mittels eines Detektors ausgelesen werden. Dringen in einer Brennstoffzelle unerwünschte Gasmoleküle durch den Kathodenfilter, so ändert sich die Farbe der Sensoroberfläche – je nach Gas reagiert der entsprechende Farbstoff und ändert seine Farbe.

Aufgabe des Teams am Fraunhofer IPM war es, gasochrome Farbstoffe für die Zielgase Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, die Stickoxide NO und $NO_2$, Ammoniak sowie die schwefelhaltigen Gase $H_2S$ und $SO_2$ zu synthetisieren. Die Farbstoffe wurden im Labor mithilfe eines UV/Vis-Spektrometers charakterisiert. Gemeinsam mit DataPhysics wurden daraus Tinten für einen Inkjet-Druckprozess entwickelt, die auf Glassubstrate gedruckt werden können. Der Projektpartner smartGAS baute einen mehrkanaligen Demonstrator des Sensorsystems auf, der erfolgreich im Labor getestet wurde.

**Projekt Druide (Gedruckte, farbumschlagsbasierte Gassensoren zur Überwachung von Filterdurchbrüchen in PEM-Brennstoffzellen), gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (Programm: KMU-innovativ)**

»

Wir haben für jedes Zielgas individuelle Farbstoffe identifiziert, auf ein Substrat gedruckt und getestet.«

*Ina Seiberlich, Projektleiterin*

Projekt PyroCO

## Gasdichtheit pyrotechnischer Gurtstraffer: schnelle Laserspektroskopie zur Temperaturbestimmung heißer Gase

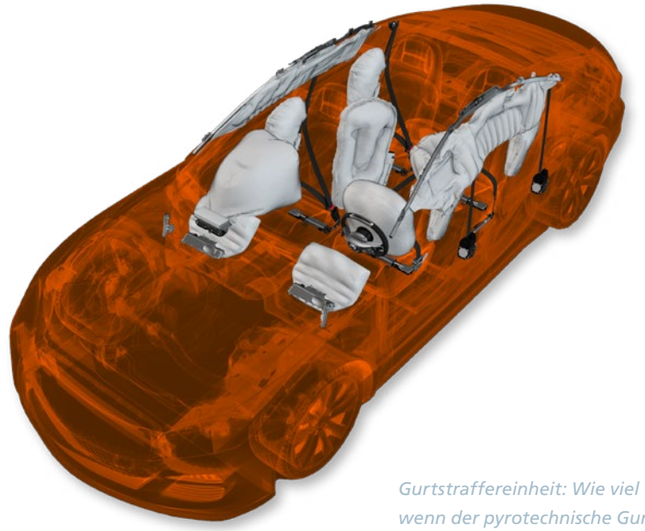
**Mithilfe direkter Absorptionsspektroskopie können sehr kurze Konzentrationsspitzen des Brandgases Kohlenmonoxid bei der Zündung pyrotechnischer Gurtstraffer gemessen werden.**

Wenn es mit dem Auto kracht, löst meistens eine kleine Zündpille aus. Viele Sicherheitsgurte verfügen über Gurtstraffer, die über Pyrotechnik in Millisekunden gezündet werden. Eine Technik, die der Sicherheit dient, sollte natürlich auch in sich sicher sein. Hier stellt sich die Frage: Wie hängen die CO-Emissionen mit der Gastemperatur bei der Zündung pyrotechnischer Gurtstraffer zusammen? Die ZF Lifetec, einer der führenden weltweiten Anbieter von Fahrzeugsicherheitssystemen, wollte dies im Rahmen der Entwicklung gasdichter Gurtstraffsysteme genauer wissen.

In einer Studie wurde zunächst eine schnelle Wärmebildkamera für den mittleren Infrarotbereich eingesetzt, um das räumliche und zeitliche Verhalten der Temperatur und des Gasaustritts zu untersuchen. Für die Messungen wurden die Gurtstraffer so getestet, dass ein signifikanter Gasaustritt bei der Zündung der Treibladung stattfand. Die Temperatur konnte mithilfe der Kamera nicht abschließend bestimmt werden, da der Emissionsgrad des Gases unbekannt und die zeitliche Auflösung der Kamera nicht hinreichend waren.

Im Rahmen des Projekts PyroCO wählte das Team daher einen laserspektroskopischen Messansatz, um die Gastemperatur und CO-Konzentration direkt nach der Zündung der Kapseln zu bestimmen. Bei den Messungen kam es vor allem auf Geschwindigkeit an, um die aus der Zündung resultierende Gaswolke im Bereich von Sub-Millisekunden zu analysieren. Daher wurden Spektren mit einer Messrate von 10 kHz aufgenommen und analysiert.

Für den CO-Nachweis setzten die Forschenden auf die Methode der durchstimmbaren Laserspektroskopie in einem Freistrahl-Aufbau. Die Emissionswellenlänge eines Interbandkaskadenlasers wurde auf ein charakteristisches Absorptionslinienpaar des CO-Moleküls im mittleren Infrarot bei 4,8 µm (2060 1/cm) abgestimmt. Durch die unterschiedliche Temperaturcharakteristik dieses Linienpaars war neben der Bestimmung der Konzentration auch eine Charakterisierung der Gastemperatur aus dem Absorptionsspektrum im Bereich von rund 200 °C bis 1500 °C möglich. Mittels Laserspektroskopie konnten somit die Kamerawerte validiert werden. Perspektivisch ermöglicht dies quantitative, bildgebende Aussagen über den Temperaturverlauf bei eventuellen Gasaustritten.



*Gurtstraffereinheit: Wie viel CO entweicht, wenn der pyrotechnische Gurtstraffer zündet? Messungen mit dem Laserspektrometer schaffen Gewissheit.*

Ausgründung: Qurie GmbH

## Elektrokalorische Kühlsysteme: Forschungsteam wagt Schritt in den Markt

**Mit festkörperbasierten Wärmepumpen auf Basis elektrokalorischer Materialien will das Start-up Qurie den traditionsreichen Markt für Kühlsysteme revolutionieren.**

Nach etwas mehr als zehn Jahren Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet kalorischer Kühlsysteme und Wärmepumpen ging im Januar 2026 die Qurie GmbH als Ausgründung von Fraunhofer IPM an den Start. Das Team um Gründer Dr. Kilian Bartholomé setzt mit Qurie auf die Elektrokalorik – eine Technologie, die die Temperaturänderung eines Festkörpermaterials unter Einfluss eines elektrischen Felds nutzt, um einen Kühlkreislauf zu etablieren. Vieles spricht für das disruptive Potenzial kalorischer Kühltechnologien: Kalorische Wärmepumpen arbeiten potenziell effizienter als Kompressoren. Letztere erreichen max. 50 Prozent des thermodynamisch möglichen Wirkungsgrades, während die theoretische Effizienz kalorischer Systeme bei über 80 Prozent liegt. So können potenziell 40 Prozent Antriebsenergie gespart werden. Zudem kommen die Systeme ohne schädliche Kältemittel aus, sind deutlich wartungsärmer und können perspektivisch günstiger produziert werden.

Entscheidend für die späteren Kosten eines elektrokalorischen Systems ist der Wärmetransport zwischen elektrokalorischem Material und den Wärmeübertragern. Genau für diesen zentralen Punkt hat die Forschungsgruppe in den vergangenen Jahren ein völlig neues Konzept für einen latenten Wärmeübertrag entwickelt und weltweit patentiert: Die elektrokalorischen Komponenten werden in ein Heatpipe-System integriert, was hohe Pumpfrequenzen und damit sehr hohe Leistungsdichten ermöglicht. Das junge Unternehmen sieht sich dank dieser Kerninnovation gut aufgestellt gegenüber alternativen Systemkonzepten kalorischer Kühlsysteme. Die Qurie-Mitarbeitenden werden von Frühjahr 2026 an in Freiburg zunächst Kühlsysteme für die Schaltschrankklimatisierung und Laserkühlung entwickeln. Von diesen Nischenmärkten ausgehend sollen in der Folge elektrokalorische Systeme für die gewerbliche Kühlung und später auch für den Konsumentenmarkt entwickelt werden. Bis Ende 2026 werden die Entwicklungsarbeiten parallel zum Start des Unternehmens im Rahmen des Projekts ELCH (Elektrokalorisches Heizen und Kühlen) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert (Forschungsprogramm EXIST).

Qurie
COOL. QUIET. CLEAN.



*Im Mai bezog das Qurie-Gründungsteam um Dr. Kilian Bartholomé (l.) und Dr. Christian Vogel (2.v.r.) Labor- und Büroräume im Freiburger Gewerbegebiet Haid.*

»

Kerninnovation und wichtigster Wettbewerbsvorteil ist unser patentiertes Konzept für den Wärmeübertrag mit Heatpipes.«

*Dr. Kilian Bartholomé, Gruppenleiter und Gründer*

# **Fokus** Spurengassensorik

## Die resonante Photoakustik eröffnet neue Wege zur präzisen Messung kleinster Gaskonzentrationen.



*Dieser photoakustische $SO_2$-Sensor überwacht die Alterung von $SF_6$-Isoliergas direkt im Transformator.*

Die Messung kleinster Gaskonzentrationen spielt eine entscheidende Rolle im Klimaschutz, in der Sicherheitstechnik und in der industriellen Prozessüberwachung. Mit der Entwicklung resonanter photoakustischer Sensoren hat Fraunhofer IPM das Potenzial eines seit über hundert Jahren bekannten physikalischen Effekts neu erschlossen. Unsere photoakustischen Sensorsysteme setzen weltweit Maßstäbe: Sie sind extrem empfindlich und schnell, dabei gleichzeitig kompakt, robust und kosteneffizient.

Die Photoakustik ist eine Technologie, die die Spurengassensorik grundlegend verändert. Wird ein Gas mit Licht einer passenden Wellenlänge bestrahlt, absorbieren die Gasmoleküle das Licht. Die aufgenommene Lichtenergie ist proportional zur Anzahl der Gasmoleküle und wandelt sich in Wärme um. Die dadurch entstehenden Druckänderungen erzeugen Schallwellen – ein Effekt, den Alexander Graham Bell bereits 1880 beschrieben hat. Entscheidend für die Detektion ist die Modulation der Lichtquelle: Ein periodisches An- und Ausschalten des Lichts führt zu einem rhythmischen Druckanstieg, der ein messbares akustisches Signal erzeugt. Dieses Signal ist direkt proportional zur Konzentration des Zielgases und kann somit für die Gasanalyse genutzt werden.

Das Prinzip erscheint simpel, doch die Umsetzung erweist sich als anspruchsvoll. Die entstehenden Schallpegel sind extrem niedrig, und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis erschwerte lange Zeit den Einsatz für anspruchsvolle Messungen. Erst durch das systematische Verständnis des Effekts – und durch technologische Kreativität – gelang es unseren Forschungsteams, die Photoakustik zu einer robusten, hochsensitiven und schnellen Messtechnik weiterzuentwickeln.

### Die Idee des akustischen Resonators

Den entscheidenden Durchbruch brachte die Idee, die Messzelle selbst als akustischen Resonator zu verwenden. Jede Messzellengeometrie hat eine spezifische Eigenfrequenz, bei der sie besonders stark mitschwingt. Wird die Lichtmodulation auf genau diese Frequenz abgestimmt, erwächst aus dem schwachen photoakustischen Signal ein verstärkter, klarer Resonanzton. Die Empfindlichkeit verbessert sich drastisch, die Messung wird stabil und präzise. Doch diese Verstärkung ist nur dann nutzbar, wenn die Resonanzfrequenz konstant bleibt. Temperaturänderungen, Druckschwankungen oder unterschiedliche Gaszusammensetzungen verschieben das akustische Verhalten – und damit die optimale Frequenz. Genau diese Herausforderung galt es zu lösen, um die Technologie praxistauglich zu machen.

### Resonanztracking: Der Schlüssel zur dauerhaften Resonanz

Unser Team entwickelte ein patentiertes Verfahren für eine stabile Resonanzfrequenz, das sogenannte Resonanztracking. Eine zweite Lichtquelle, meist eine LED, bestrahlt gezielt die Wand der Messzelle. Die absorbierte Strahlung erzeugt eine Schallwelle, die von der Elektronik genutzt wird, um die aktuelle Resonanzfrequenz zu bestimmen. Die Modulation der eigentlichen Messlichtquelle wird fortlaufend angepasst, sodass die akustische Zelle dauerhaft im resonanten Zustand bleibt. Diese Innovation löst ein Grundproblem der Photoakustik: Erstmals bleibt der Sensor immer optimal abgestimmt, unabhängig von den Umgebungsbedingungen. So werden Messungen im ppb-Bereich möglich – mit Reaktionszeiten unter einer Drittelsekunde und einem Aufbau, der klein, robust und energieeffizient ist.

### Hochleistungsmessung ohne optische Komplexität

Anders als etablierte laserbasierte Systeme, die auf empfindliche optische Resonatoren angewiesen sind, setzt die resonante Photoakustik auf widerstandsfähige, geometrisch robuste akustische Strukturen. Optische Systeme reagieren auf Schwingungen, Verschmutzung oder Temperaturdrift – akustische Resonatoren hingegen tolerieren diese Einflüsse weitgehend. Dies schafft die Voraussetzung für kompakte, feldtaugliche Geräte mit hoher Messqualität, die kosteneffizient produziert werden können. Dank dieser Eigenschaften eignet sich die Technologie besonders für mobile und industrielle Anwendungen, bei denen kurze Antwortzeiten und geringe Wartungsanforderungen entscheidend sind.

### Methanüberwachung im Feld – zuverlässig bei 50 km/h

Ein herausragendes Beispiel für die Leistungsfähigkeit ist das System LDEM 2000 zum Aufspüren von Methanleckagen, das Fraunhofer IPM gemeinsam mit der Schütz GmbH Messtechnik realisiert hat. Integriert in ein Messfahrzeug messen die Sensoren des LDEM 2000 Methankonzentrationen im ppb-Bereich im Vorbeifahren – bei Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h. Die sehr kurze Reaktionszeit verhindert Messlücken, selbst wenn die Leckage nur eine schmale, verdünnte Spur hinterlässt. Das System arbeitet zuverlässig unter realen Bedingungen wie Vibrationen, Feuchtigkeit, Schmutz oder wechselnden Winden. Damit erfüllt es die hohen Anforderungen der Gasnetzbetreiber und unterstützt bei der schnellen Umsetzung der neuen EU-Methanverordnung.

**Interview mit Volker Heimburger von Schütz Messtechnik (S. 20-21)**

### Monitoring kritischer Energieinfrastruktur

Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld photoakustischer Sensoren ist die Überwachung von Hochspannungsanlagen. Dort deutet die Bildung kleinster Mengen $SO_2$ auf die Alterung des Isoliergases $SF_6$ hin. Bisher war für den Nachweis eine manuelle Probenahme mit Laboranalyse notwendig. Ein am Institut entwickelter resonanter photoakustischer $SO_2$-Sensor ermöglicht nun erstmals eine direkte, kontinuierliche Messung. Der Sensor ist kompakt genug für die Integration in Transformatoren, arbeitet über Jahre batteriebetrieben und erreicht eine Nachweisgrenze von etwa 10 ppb. Damit eröffnet er neue Möglichkeiten für eine vorausschauende Wartung und erhöht die Betriebssicherheit im Energiesektor erheblich.

### Ein Werkzeug für Klimaschutz und Industrie 4.0

Durch einfache Integration, hohe Robustheit und außergewöhnliche Leistungsfähigkeit hat die resonante Photoakustik großes Potenzial für zahlreiche weitere Anwendungen: Umweltüberwachung, Industriemessungen, emissionsrelevante Prozesskontrolle oder die Sicherheitstechnik in komplexen Anlagen. Der globale Markt für Spurengasanalytik wächst stetig – und Fraunhofer IPM ist dabei, sich als technologischer Taktgeber zu etablieren.

»Resonante Photoakustik verändert die Gassensorik grundlegend. Sie macht Messungen möglich, die bisher als technisch oder wirtschaftlich unerreichbar galten.«

*Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter*



# **Gas- und Prozesstechnologie** | Messen & Veranstaltungen

## Teilnahme

**Sensor+Test**
Nürnberg, 06.–08.05.2025
Eigener Stand

**Quantum Effects**
Stuttgart, 07.–08.10.2025
Stand Quantum BW (Fraunhofer)

**Space Tech Expo Europe**
Bremen, 18.–20.11.2025
Eigener Stand

## Eigene Veranstaltungen

**11. Gassensor Workshop**
Freiburg, 20.03.2025

**International Meeting on Chemical Sensors IMCS**
Freiburg, 22.–26.06.2025
Konferenzleitung

## Geplant für 2026

**New Space Acceleration Days**
04.–05.02.2026

**Sensor+Test**
09.–11.06.2026

**Global Flow Measurement Workshop**
29.09.–01.10.2026

**Quantum Effects**
06.–07.10.2026

**Hydrogen Technology World Expo**
20.–22.10.2026

**Space Tech Expo Europe**
17.–19.11.2026

**Photonics BW Weiterbildungsseminar Quantensensorik**
26.–27.11.2026



# **Überblick** Photonische Systeme

»Laserwellenlängen nach Maß mittels Frequenzkonversion: Das ist unser Beitrag zur Entwicklung neuer optischer Messmethoden und Sensoren.«

*PD Dr. Frank Kühnemann, Abteilungsleiter*

Laser sind ein unverzichtbares Werkzeug in der Messtechnik und vielen anderen Bereichen. Dabei werden oft Wellenlängen benötigt, die nicht »off-the-shelf« verfügbar sind. Wir nutzen Methoden der nichtlinear-optischen Frequenzkonversion, um solche Wellenlängen maßgeschneidert für verschiedene Anwendungsbereiche zu erzeugen. Ein Schwerpunkt ist dabei die Konversion von einfrequentem Dauerstrich-Laserlicht, die besonders hohe Anforderungen an die Konversionseffizienz und Frequenzstabilität stellt.

Das Leistungsspektrum reicht von kundenspezifischen nichtlinear-optischen Kristallen für die Frequenzkonversion bis zur produktionsreifen Prototyp-Entwicklung von optisch-parametrischen Oszillatoren für OEM-Laser-Hersteller.

Von uns entwickelte Lichtquellen werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt, darunter Quantentechnologien, Nanophotonik, digitale Holographie, Raman-Spektroskopie, Fluoreszenz-Mikroskopie und in der Produktion mikrooptischer Beugungselemente.

**Laser-Lichtquellen**

**Photonische Quantensensorik**

**Wellenleiter**

## Unsere Gruppen und Themen

### Nichtlineare Optik und Quantensensorik

- Nichtlinear-optische Frequenzkonversion: schlüsselfertige Module für die Erzeugung von »Wellenlängen nach Maß« und für die Infrarot-Messtechnik
- Komponentenentwicklung: Maskenloses Polen von Kristallen für die Quasi-Phasenanpassung, Wellenleiter für die effiziente Frequenzkonversion

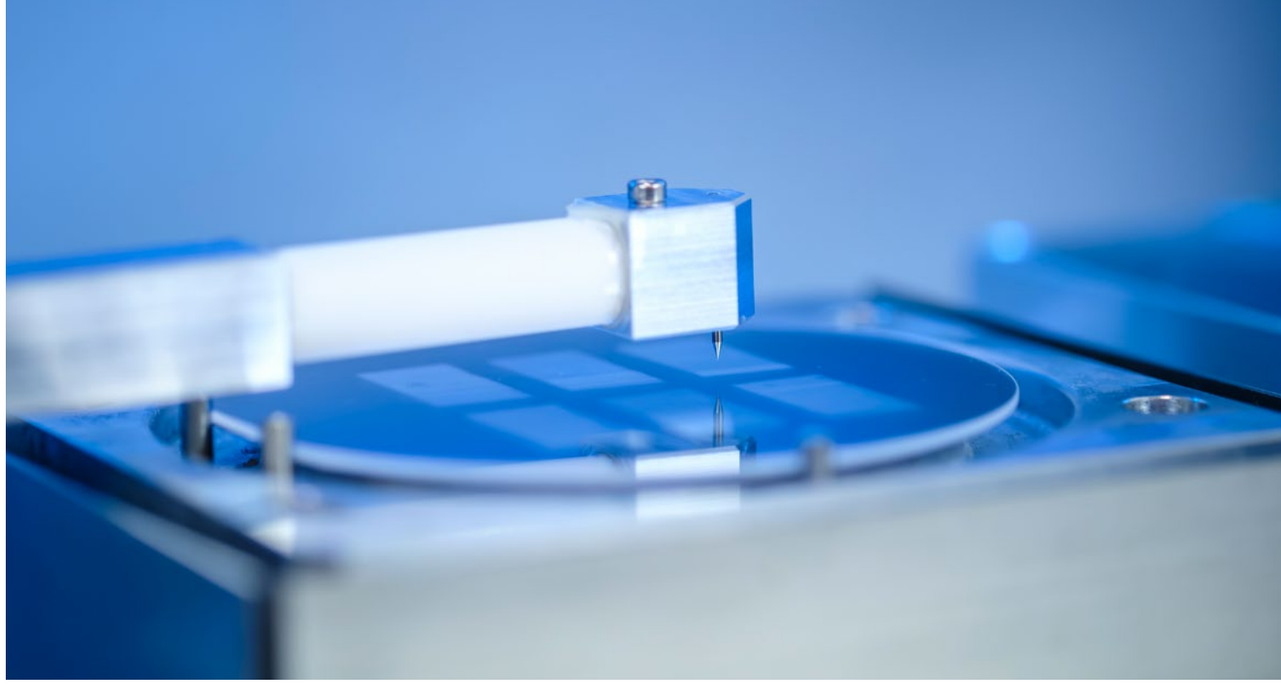


**Wir prüfen die Qualität unserer optischen Materialien akribisch.«**

# **Highlights** Photonische Systeme

## Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

**Im Forschungsfeld Photonische Systeme haben wir 2025 viele spannende Projekte begonnen oder erfolgreich abgeschlossen – einige stellen wir Ihnen hier vor.**



Projekt Kallipol

### Lithiumniobat flexibel strukturieren – ganz ohne Maske

**Mit einem maskenfreien Verfahren zum Polen von Lithiumniobat-Kristallen lassen sich spezielle Polungsmuster schnell, flexibel und in hoher Qualität herstellen – vom Einzelstück bis zur Kleinserie.**

Für viele Anwendungen in Messtechnik, Analytik, Quantentechnologie oder Photonik werden Wellenlängen benötigt, für die es keine geeigneten Laser am Markt gibt. Einen Ausweg bietet die Frequenzkonversion mithilfe nichtlinear-optischer Materialien. Kristalle wie Lithiumniobat ($LiNbO_3$) müssen dafür speziell strukturiert werden: Eine gezielte räumlich-periodische Umkehr der spontanen Polarisation des Kristalls (»periodisches Polen«) entscheidet darüber, welcher nichtlinear-optische Prozess unterstützt wird, und sichert eine hohe Konversionseffizienz. Die resultierenden Kristalle wie periodisch gepoltes $LiNbO_3$ (PPLN) sind die Grundlage für maßgeschneiderte Lichtquellen in einem sehr großen Wellenlängenbereich vom Sichtbaren bis in das mittlere Infrarot.

Die klassische Herstellung von PPLN-Kristallen ist aufwändig: Für jedes neue Polungsmuster wird eine eigene Fotomaske benötigt, hinzu kommen Belichtungsprozesse im Reinraum. Für die Massenproduktion identischer PPLN-Kristalle ist das effizient, weil ganze Wafer innerhalb von Sekunden gepolt werden können. Für Forschung, Entwicklung, Unikate oder Kleinserien ist dieses Verfahren dagegen zu langsam, teuer und unflexibel. Hinzukommt, dass manche spezielle Polungsmuster sich gar nicht per Fotomaske herstellen lassen.

Fraunhofer IPM hat in dem im Jahr 2025 abgeschlossenen Projekt Kallipol gemeinsam mit der Universität Freiburg ein maskenfreies Polungsverfahren entwickelt, das genau hier ansetzt: Statt Belichtung per Fotomaske schreibt eine Wolfram-Spitze das gewünschte Polungsmuster direkt in den Lithiumniobat-Kristall. Zwischen der Spitze und einer planaren metallischen Gegenelektrode liegt eine Hochspannung an. Direkt unter der Spitze entsteht dadurch eine lokal begrenzte Domäneninversion im Mikrometerbereich. Wird die geladene Spitze über die Oberfläche bewegt, lassen sich Domänenlinien seriell in den Kristall schreiben. Der elektrische Polungsstrom wird überwacht und kontrolliert, um hochwertige Polungsergebnisse sicherzustellen.

Die Vorteile liegen in den Möglichkeiten: Das serielle Schreiben erlaubt Domänenstrukturen, die per Maske nicht machbar sind, wie z. B. »fan outs« oder radiale Strukturen. Mit dem Verfahren lassen sich hochqualitative Polungen auch auf Wafern mit inhomogenen Eigenschaften herstellen. Und: Ohne Maske kann man das Design sehr schnell variieren. Das ist extrem wichtig beim Entwickeln neuer Strukturen oder beim Polen neuer Materialien. Die Mindestperiodizität liegt bei etwa 6 µm. Bearbeitet werden können Lithiumniobat- und Lithiumtantalat-Kristalle von Submillimeter- bis Mehrmillimeter-Dicke sowie Formate vom Einzelchip bis zum 3-Zoll-Wafer. Das Verfahren ist kompatibel mit stöchiometrischem, MgO-dotiertem und kongruent schmelzendem Lithiumniobat. Für Forschungsgruppen und Industriepartner eröffnen sich damit neue Wege zur Entwicklung neuer photonischer Bauelemente.

*Eine Wolfram-Spitze schreibt das gewünschte Polungsmuster direkt ins Material – flexibel und ohne aufwändige Maskenherstellung.*

»Wir schreiben Polungsmuster direkt in den Kristall – schnell, flexibel und ohne Fotomaske. Das verkürzt Entwicklungszyklen und eröffnet neue Freiheitsgrade für nichtlinear-optische Bauelemente.«

*Dr. Simon Herr, Projektleiter*

Projekt MirCoSens

## Infrarot-Laser für die Laboranalytik von morgen

**Eine wellenleiterbasierte Mittelinfrarot-Laserquelle soll präzise, schnell und kostengünstig durchstimmbares Licht für die Analyse kleinster Flüssigkeitsproben liefern.**

Viele Moleküle verraten ihre Identität im Infrarotlicht. Besonders im mittleren Infrarot liegen spektrale Signaturen, die für die Gas- und Flüssigkeitsanalytik entscheidend sind. Speziell in der Flüssigkeitsanalytik müssen dabei besonders große Spektralbereiche abgedeckt werden. Die Standard-Messtechnik ist hier die Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR-Spektroskopie) mit thermischen Strahlern. Bei stark absorbierenden Proben stößt sie jedoch an Grenzen. Eine Lösung wären Laserlichtquellen, doch diese halten aufgrund der speziellen Anforderungen nur langsam Einzug: Sie müssen einen großen Wellenlängenbereich abdecken und schnell in ihrer Wellenlänge abstimmbar sein. Die Anforderungen an die Linienbreite sind hingegen deutlich geringer als in der Gasanalytik.

Im Projekt MirCoSens entwickeln wir zusammen mit der SI Stuttgart Instruments GmbH und der CLADE GmbH eine neue Laserplattform speziell für die Anforderungen der Flüssigkeitsanalytik. Ziel ist eine breit durchstimmbare und industrietaugliche Lichtquelle, die kompakter und kostengünstiger ist als bisherige Lösungen. Angestrebt werden unter anderem ein Wellenlängenbereich von 975 bis 3800 nm, eine spektrale Bandbreite von weniger als 2 $cm^{-1}$, eine Durchstimmgeschwindigkeit von bis zu 20 nm/ms.

Ausgangspunkt ist das von SI Stuttgart Instruments entwickelte Konzept für gepulste optisch-parametrische Oszillatoren mit Faserrückkopplung, das ein besonders schnelles Abstimmen der Wellenlänge erlaubt. Im Projekt soll dieses weiterentwickelt werden, indem die Frequenzkonversion nicht mehr in einem Lithiumniobat-Volumenkristall erfolgt, sondern stattdessen in einem maßgeschneiderten Lithiumniobat-Wellenleiter. Dadurch werden weniger Komponenten und bewegliche Teile benötigt; zugleich steigt die Effizienz der Frequenzkonversion. Das senkt Pumpleistung, Baugröße, Kühlaufwand und Kosten. Die Forschenden am Fraunhofer IPM entwickeln im Projekt vergrabene Wellenleiter für die Frequenzverdopplung und die Erzeugung von Licht im mittleren Infrarot. Dafür nutzt das Team seine Kompetenzen im laserbasierten Schreiben von Wellenleitern, im periodischen Polen von Wafern sowie in der Bearbeitung nichtlinear-optischer Substrate.

Zur Herstellung der Wellenleiter werden per Ultrakurzpulslaser lokale Brechungsindexänderungen in das Volumenmaterial geschrieben, es entstehen »depressed-cladding«-Wellenleiter – ohne Reinraumprozess. Diese Wellenleiter sind schnell prototypisierbar und eignen sich auch für hohe Leistungen, weil Wärme im Volumenmaterial gut abgeführt werden kann. Während Lithiumniobat-Wellenleiter im nahen Infrarot bereits etabliert sind, ist ihr Einsatz im mittleren Infrarot noch Gegenstand aktueller Forschung. Erste Vorversuche am Fraunhofer IPM konnten Wellenleitung bis 3,2 µm demonstrieren; im Projekt sollen höhere Wellenlängen durch angepasste Strukturparameter erschlossen werden.

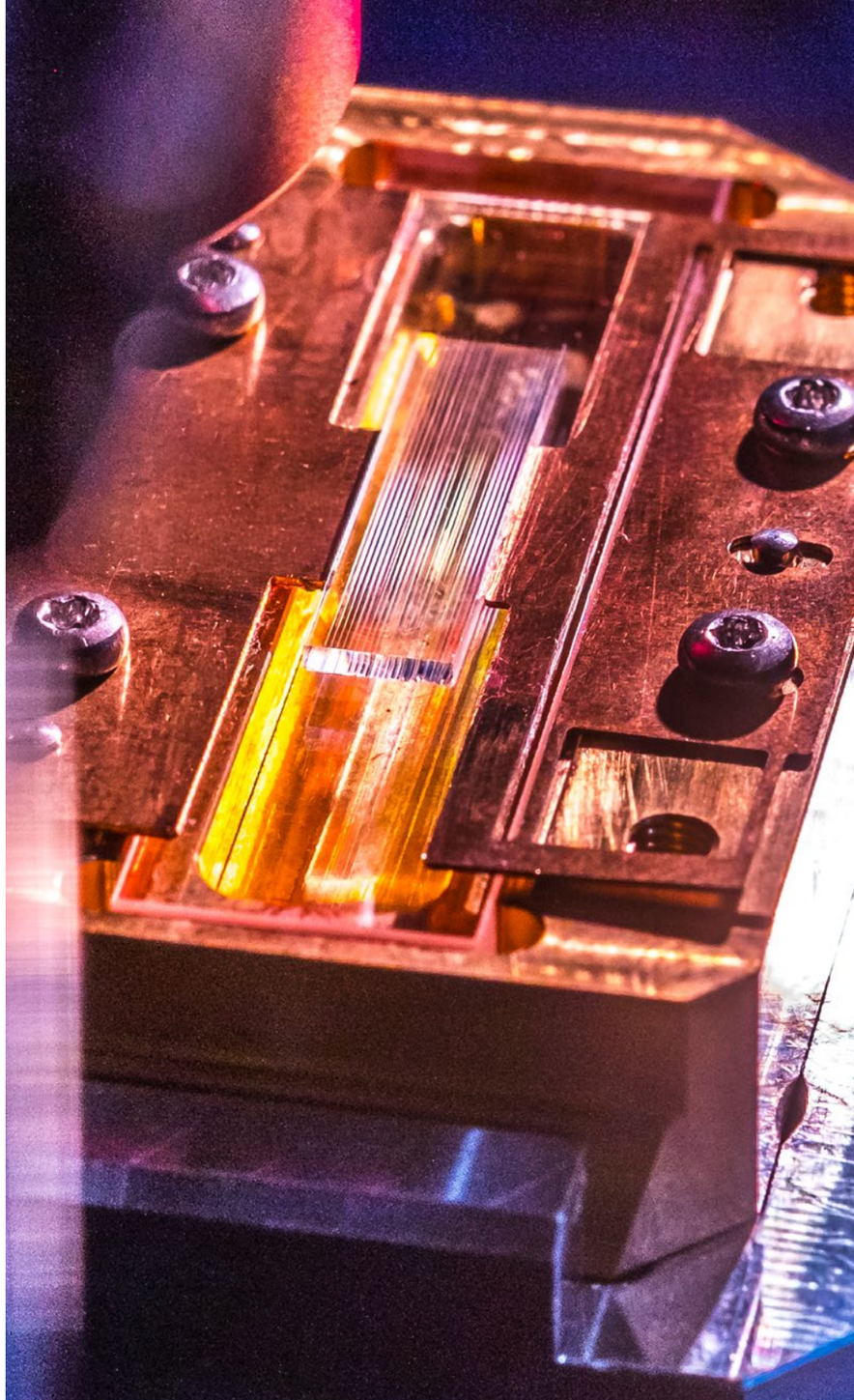
Die wichtigste Zielanwendung für diese neuen Infrarot-Laser liegt in der Bioanalytik im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 4 µm. Der Projektpartner CLADE GmbH bringt dafür sein Know-how in der Flüssigkeitsanalytik ein. Für die klassische FTIR-Technik ist der angestrebte Wellenlängenbereich schwer zugänglich, weil Wasser dort stark absorbiert. Laserbasierte Messungen mit höherer Brillanz könnten diesen Bereich erschließen und zusätzliche Informationen über Proteinstruktur, Hydratation, Faltung, Denaturierung oder Aggregation liefern. Für die Pharma- und Biotechnologie ist das relevant, weil Biomoleküle zunehmend schnell, exakt und mit sehr kleinen Probenvolumina charakterisiert werden müssen.

Das Projekt MirCoSens verbindet damit drei Kompetenzen: die Wellenleitertechnologie von Fraunhofer IPM, die Laser- und Systemtechnik von SI Stuttgart Instruments GmbH und die Bioanalytik von CLADE GmbH. Darüber hinaus sind neben der Flüssigkeitsanalytik noch weitere Anwendungsfelder für die neue Laserplattform denkbar – etwa Gasanalytik, Umweltüberwachung, Waferprozessierung, photonische integrierte Schaltkreise sowie Quantenforschung und Quantenkryptographie.

**Projekt MirCoSens (Wellenleiterbasierte Mittelinfrarotlaserquelle für die Flüssigkeitsanalytik), gefördert im Rahmen von KMU-innovativ Photonik und Quantensysteme.**

»Mit wellenleiterbasierter Frequenzkonversion wollen wir Mittelinfrarot-Laserquellen kompakter und wirtschaftlicher machen – und so neue Anwendungen in der Bioanalytik erschließen.«

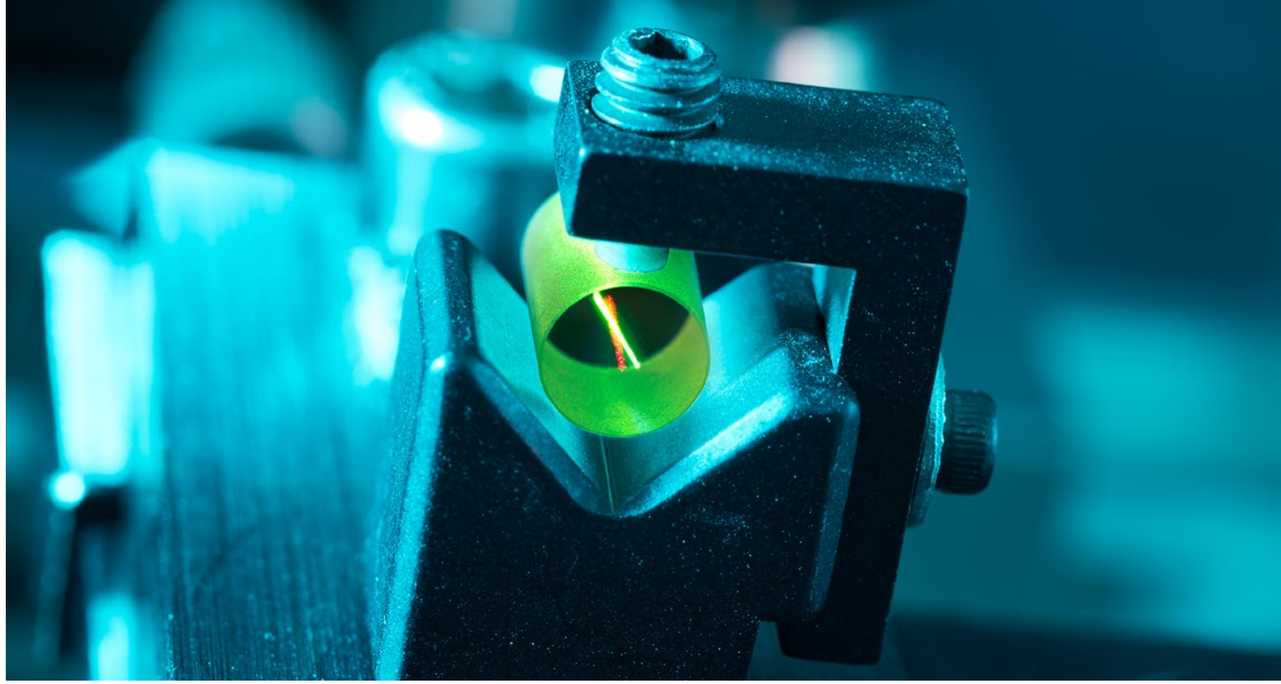
*Dr. Chiara Lindner, Projektleiterin*



*Vergrabene Wellenleiter – hier erkennbar als feine Linien im transparenten Lithiumniobat-Chip – eignen sich zur effizienten Frequenzkonversion im mittleren Infrarotbereich.*

# **Fokus** Optische Materialien

## Optische Materialien müssen immer höheren Leistungen standhalten. Dafür messen wir kleinste Absorptionen in Gläsern, Kristallen und Beschichtungen.



Die Entwicklung leistungsfähiger Laser und optischer Systeme verschiebt die Grenzen dessen, was Materialien leisten müssen: Hochleistungslaser, Präzisionsoptiken, Quanten- und Medizintechnik stellen immer höhere Anforderungen an transparente Materialien und optische Beschichtungen. Was für das Auge vollkommen klar erscheint, kann unter hoher Laserleistung zum Problem werden: Winzige Absorptionsverluste führen zu lokaler Erwärmung, thermischen Linsen, Verformungen oder langfristiger Schädigung. Je leistungsfähiger die optischen Systeme werden, desto entscheidender wird die Frage, wie rein, homogen und belastbar ihre Komponenten tatsächlich sind. Fraunhofer IPM entwickelt und nutzt hochsensitive photothermische Messverfahren, mit denen sich selbst extrem geringe Absorptionen in Volumenmaterialien und optischen Coatings nachweisen lassen. Für Bulk-Absorptionen werden Nachweisgrenzen im Bereich von $10^{-4}$ bis $10^{-6}$ $cm^{-1}$ erreicht, für Beschichtungen sogar bis $10^{-7}$ – abhängig von Wellenlänge und Material.

### Kleine Verluste, große Wirkung

Optische Materialien gelten oft dann als gut, wenn sie Licht möglichst verlustfrei übertragen oder reflektieren. Doch in Hochleistungsanwendungen reicht diese einfache Sicht nicht aus. Schon Verunreinigungen im Bereich von wenigen Millionstel (parts per million – ppm) können darüber entscheiden, ob eine Optik dauerhaft stabil bleibt oder im Betrieb driftet, altert oder beschädigt wird. Besonders kritisch sind Antireflex- und hochreflektierende Beschichtungen, Linsen, Spiegelrohlinge und transparente Substrate, wie sie in Lasersystemen eingesetzt werden. Fraunhofer IPM bietet dafür sowohl Servicemessungen zur Qualitätskontrolle in Lieferketten als auch kundenspezifische Messsysteme an. Das Messportfolio umfasst unter anderem AR- und HR-Coatings, Linsen und Mirror Blanks; die räumliche Auflösung liegt bei 50 µm transversal und 700 µm lateral.

### Wärme als Messsignal

Im Zentrum der Messungen steht die photothermische Common-Path-Interferometrie, kurz PCI. Das Verfahren nutzt ein »Pump-Probe«-Prinzip: Ein intensiver kontinuierlicher Pumpstrahl wird in die Probe fokussiert. Dort, wo das Material Licht absorbiert, entsteht lokal Wärme. Diese Erwärmung verändert den Brechungsindex und beeinflusst einen kreuzenden, schwächeren Probestrahl. Die daraus entstehenden Brechungs- und Beugungseffekte sind proportional zur Absorption der Probe und werden mit Lock-in-Technik erfasst. Wird die Probe entlang der z-Richtung durch die Wechselwirkungszone der Laserstrahlen bewegt, entstehen räumlich aufgelöste PCI-Daten, mit denen sich Beiträge aus dem Volumen und von Oberflächen getrennt bestimmen lassen.

Zum Test reichen Laserleistungen, die 100- bis 1000-fach kleiner sind als die später im Betrieb auftretenden. Das Prinzip ist elegant, weil es nicht einfach misst, wie viel Licht im Material absorbiert wurde. Stattdessen macht es die winzige Wärmespur sichtbar, die absorbiertes Licht im Material hinterlässt. So wird Absorption nicht nur als Verlustgröße verstanden, sondern als lokales Qualitätsmerkmal: Wo entsteht Wärme? In welcher Tiefe? In welchem Materialanteil? Und bei welcher Wellenlänge? Genau diese Fragen entscheiden in modernen optischen Systemen über Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Performance.

### Abstimmbares Licht für vollständige Spektren

Traditionell werden hochempfindliche Absorptionsmessungen häufig bei festen Laserwellenlängen durchgeführt – vor allem dort, wo die spätere Anwendung liegt. Fraunhofer IPM geht darüber

*Bei der photothermischen Common-Path-Interferometrie wird ein Pumpstrahl in die Probe eingestrahlt; dort, wo das Material Licht absorbiert, entsteht lokal Wärme, die den Brechungsindex verändert und so einen kreuzenden Probestrahl beeinflusst.*

hinaus und kombiniert PCI mit am Institut entwickelten kontinuierlich arbeitenden optisch-parametrischen Oszillatoren (OPO). Diese abstimmbaren Pumpquellen ermöglichen Absorptionsspektren über große Wellenlängenbereiche hinweg. Damit lassen sich nicht nur Einzelwerte bestimmen, sondern spektrale Fingerabdrücke von Materialien und Komponenten erfassen. Die OPO-basierten Laserlichtquellen decken Messbereiche im sichtbaren, nahinfraroten und mittleren Infrarot ab und können so oftmals Hinweise geben, was die Ursache der störenden Absorption ist (z. B. eine metallische Verunreinigung oder eine minimale Restfeuchte bei der Herstellung).

### Beschichtungen verstehen, statt nur bewerten

Besonders wertvoll ist die spektrale PCI-Messung bei hochreflektierenden dielektrischen Beschichtungen. Solche HR-Coatings bestehen aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Üblicherweise wird ihre Absorption als einzelner Wert für den gesamten Schichtstapel angegeben. Mit einer abstimmbaren Pumpquelle lässt sich dagegen ein Absorptionsspektrum aufnehmen. Wird die Wellenlänge über den hochreflektierenden Bereich hinaus variiert, verändert sich die Verteilung des elektrischen Feldes innerhalb des Schichtstapels. Dadurch wird die Absorption an unterschiedlichen Tiefen und in unterschiedlichen Materialanteilen sichtbar. Das eröffnet eine neue analytische Perspektive.

### Qualitätskontrolle und Komponentenentwicklung

In der Qualitätskontrolle reicht es oft nicht zu wissen, dass eine Beschichtung absorbiert. Entscheidend ist, welcher Materialanteil dafür verantwortlich ist, ob der Verlust im Substrat, an der Oberfläche oder im Schichtsystem entsteht und wie sich die Absorption über die Wellenlänge verändert. Fraunhofer IPM unterstützt Industrieunternehmen deshalb sowohl bei der Qualitätskontrolle als auch bei der Entwicklung neuer optischer Komponenten – durch wissenschaftliche Messauswertungen und speziell entwickelte Messsysteme.

Unsere Messverfahren machen geringste Absorptionen sichtbar – und sorgen für robustere optische Materialien, bessere Beschichtungen und zuverlässigere Lasersysteme.«

*PD Dr. Frank Kühnemann, Abteilungsleiter*



# **Photonische Systeme** | Messen & Veranstaltungen

## Teilnahme

**Laser World of Photonics**
München, 24.–27.06.2025
Stand der Fraunhofer-Gesellschaft

**Space Tech Expo Europe**
Bremen, 18.–20.11.2025
Eigener Stand

**845. WE-Heraeus-Seminar »Sensing with Quantum Light«**
07.–09.12.2025
Seminarleitung

## Eigene Veranstaltungen

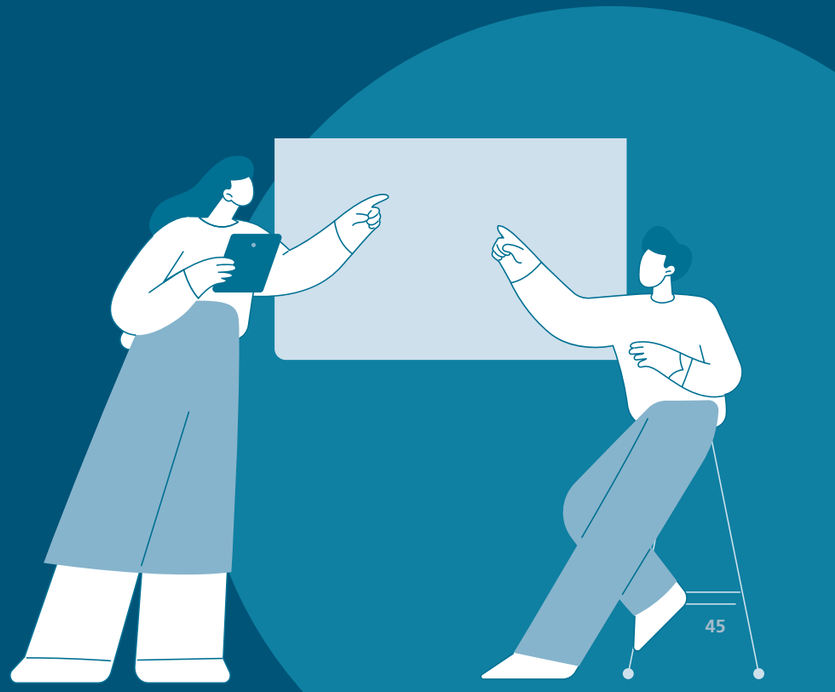
**Photonics BW Weiterbildungsseminar Quantensensorik**
Freiburg, 27.–28.11.2025
(Kooperationsveranstaltung)

## Geplant für 2026

**SPIE Photonics West**
20.–22.01.2026

**New Space Acceleration Days**
04.–05.02.2026

**Photonics BW Weiterbildungsseminar Quantensensorik**
26.–27.11.2026



# **Index** Fraunhofer IPM



*Was 2025 sonst noch wichtig war.*

# **Publikationen** 2025

Abel, C.; Ayres, N.J.; Ban, G. et al.

**Generating a highly uniform magnetic field inside the magnetically shielded room of the n2EDM experiment**

The European physical journal. C 85, 202 (2025)

Adolf Thies GmbH; Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme IMSAS; Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM (Hrsg.)

**KOGAST: Wartungsarme Schadstoff-Detektion mit kolorimetrischen Gas- und adaptierten Streulicht-Feinstaubsensoren**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2023 - 31.12.2024
Freiburg/Brsg., 2025, 29 S.

Asgharian Pournodrati, L.; Baba, M.; Gangelhoff, J.; Sörgel, U.

**Multi-scale Transformer-based classification of bathymetric LiDAR data in shallow water environments**

3rd International Workshop on 3D Underwater Mapping from Above and Below, Wien, 2025, 6 S., doi:10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W10-2025-1-2025

Asgharian Pournodrati, L.; Nouri Esfahani, A.; Gangelhoff, J.; Cramer, M.; Sörgel, U.

**Adaptive Sphere-Based Feature Extraction for Efficient Classification of Bathymetric LiDAR Data**

Dreiländertagung D-A-CH 2025 "Raumbezogene Bilddaten und Künstliche Intelligenz für nachhaltige Lebensräume", Muttenz/Basel, 2025, 9 S., doi:10.24407/KXP:192847599X

Bamerni, P.; König, J.; Mistry, L.-A.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Design and Validation of a High-Speed Miniaturized Thermocycler with Peltier Elements for Efficient PCR Thermal Cycling**

Sensors 25, 7046 (2025)

Behrendt, V.; Illg, J.

**Mit Fluoreszenzmessung zum effizienten Reinigungsprozess**

JOT. Journal für Oberflächentechnik 65(7), 48-49 (2025)

Binninger, R.; Triebel, F.; Schmitt, K.; Uhlmann, E.

**Forscher entwickeln thermoelektrisch temperierte Motorspindel**

Maschinenmarkt MM 131(4), 44-47 (2025)

Brunklaus, M.; Kellner, M.; Reiterer, A.

**Three-Dimensional Instance Segmentation of Rooms in Indoor Building Point Clouds Using Mask3D**

Remote sensing 17, 1124 (2025)

Buse, K.; Herr, S.; Breunig, I.

**Making waveguide frequency converters in lithium niobate robust for handling high-light powers by tailoring the electrical conductivity: theoretical considerations**

Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XXIV. Proceedings of SPIE 13347, 133470B (2025)

Callies, A.; Er-Raji, O.; Schot, R. et al.

**Optical Reabsorption Effects in Photoluminescence of Perovskites Conformally Coated on Textured Silicon**

Solar RRL 9, 2500048 (2025)

Chen, Z.; Yang, Q.; Lu, N.; Zhao, X.; Zhou, S.; Liu, H.; Buse, K.; Jia, Y.; Chen, F.

**Surface photosensitization enabled by embedded plasmonic nanoparticles in ferroelectric crystals for laser-induced periodic surface structures**

Applied Physics Letters 126, 131602 (2025)

Dinc, C.; Nitzsche, P.; Goldschmidt, J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Towards precise detection of stable atmospheric methane isotopes using OF-CEAS**

CLEO – Conference on Lasers & Electro-Optics: Applications and Technology, Long Beach, 2025, AA133_6, doi:10.1364/CLEO_AT.2025.AA133_6

Dinc, C.; Nitzsche, P.; Goldschmidt, J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Optimizing OF-CEAS for the Detection of stable methane isotopes in the atmosphere**

SMSI 2025: Conference on Sensor and Measurement Science International, Nürnberg, 2025, 31-32, doi:10.5162/SMSI2025/A1.4

Eckstein, V.; Schmid-Schirling, T.; Carl, D.; Wallrabe, U.

**Real-time deconvolution of light fields through pixel selection in the point-spread-function and direct inversion of the image formation process**

Applied optics 64, 587 (2025)

Gangelhoff, J.; Werner, C.; Reiterer, A.

**Luftgestützte hochaufgelöste Vermessung flacher Gewässer am Beispiel des Rheins**

Journal of applied hydrography 130, 36-41 (2025)

Geissler, J.; Mazzotti, G.; Rathmann, L.; Webster, C.; Weiler, M.

**Forest Snow Patterns Derived Using ClustSnow are Temporally Persistent Under Variable Environmental Conditions**

Water Resources Research 61, e2024WR038442 (2025)

Göbel, B.; Huurdeman, J.; Reiterer, A.; Möller, K.

**Robot-Based Procedure for 3D Reconstruction of Abdominal Organs Using the Iterative Closest Point and Pose Graph Algorithms**

Journal of imaging 11, 44 (2025)

Göbel, B.; Richter, A.; Rupitsch, S.; Reiterer, A.; Möller, K.

**3D-Scan hole detection for robot-assisted laparoscopic surgery**

IFAC Journal of Systems and Control, 34, 100336 (2025)

Goldschmidt, J.; Brugger, N.; Nitzsche, L.; Nitzsche, P.; Dinc, C.; Weber, C.; Breunig, I.; Schmitt, K.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.

**Dual Comb Spectrometer for the Determination of Stable Isotopic Ratios of Atmospheric $CO_2$ with Sub-Permille Precision at Atmospheric Pressure**

Analytical chemistry 97, 28254-28261 (2025)

Goldschmidt, J.; Brugger, N.; Wöllenstein, J.

**An Electro-optic Dual Comb Spectrometer for the Measurement of $\delta$13C in Atmospheric $CO_2$**

CLEO 2025– Conference on Lasers & Electro-Optics: Applications and Technology, Long Beach, 2025, AA130_3, doi:10.1364/CLEO_AT.2025.AA130_3

Gutekunst, J.; Rasser, R.; Blug, A.; Koss, P.

**Fast magnetic field imaging using an optically pumped magnetometer readout by a high-speed camera**

Journal of applied physics 138 , 224401 (2025)

Hartmann, S.; Valles, R.; Schmitt, A. et al.

**Digital Twin-Based Management of Sewer Systems: Research Strategy for KaSyTwin Project**

Water 17, 299 (2025)

# **Publikationen** 2025

Herr, S.; Tanaka, H.; Waidhas, A.-R.; Bonetti, G.; Hugenschmidt, M.; Bickermann, M.; Kühnemann, F.

**Towards a VUV Cw Laser Light Source**

CLEO/Europe-EQEC 2025: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, München, 2025, 1 S., doi:10.1109/CLEO/Europe-EQEC65582.2025.11111052

Jäkel, J.-I.; Heinlein, E.; Gölzhäuser, P.; Kellner, M.; Klemt-Albert, K.; Reiterer, A.

**How to Digitise Bridge Structures - A Systematic Review of the Status Quo for Creating Digital Building Information Modelling of Existing Bridge Structures in the Operational Phase**

Infrastructures 10, 47 (2025)

Khater, M.; Strauss, M.; Olshausen, P. v.; Reiterer, A.

**PU-Gaussian: Point Cloud Upsampling using 3D Gaussian Representation**

ICCVW 2025: IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops, Honolulu, 2025, 2644-2652, doi:10.1109/ICCVW69036.2025.00275

Kellner, M.; König, T.; Jäkel, J.-I.; Klemt-Albert, K.; Reiterer, A.

**3D bridge segmentation using semi-supervised domain adaptation**

Automation in Construction 172, 106021 (2025)

Kießling, J.

**E! 1984 GIGACOMB: Gigahertz-Doppelkamm-Quelle für die Bauelementecharakterisierung und Qualitätskontrolle; Teilvorhaben: Gigahertz-Doppelkamm-System: Datenerfassung, Auswertung und Systemdemonstration**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.11.2022 - 31.12.2024 Freiburg/Brsg., 2025, 10 S.

Kindorf, S.; Weber, C.; Bierer, B.; Wöllenstein, J.

**Optimizing Analog Front End Architectures for Enhanced SNR in Photoacoustic Imaging**

SMSI 2025: Conference on Sensor and Measurement Science International, Nürnberg, 2025, 177-178, doi:10.5162/SMSI2025/C7.3

Koss, P.; Busch, S.; Schimmerohn, M.; Schug, B.; Nunes, R. R.; Konanz, J.

**Magnetic Shielding Performance with Spray Coating**

EMC 2025: ESA Workshop on Aerospace, Seville, 2025, 6 S., doi:10.23919/AerospaceEMC64918.2025.11074943

Kunz, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Karlewski, F.; Federsel, P.; Wright, L.; Gawith, C.

**High-Precision Mid-Infrared Wavelength Measurement via Waveguide-Based MIR-to-NIR Upconversion**

CLEO/Europe-EQEC 2025: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, München, 2025, 1 S., doi:10.1109/CLEO/Europe-EQEC65582.2025.11109506

Laux, P.; Bertz, A.; Carl, D.; Reichelt, S.

**Large area roughness measurements using spectral speckle correlation**

Optical engineering 64, 074101 (2025)

Laux, P.; Schiller, A.; Bett, C.; Bertz, A.; Carl, D.; Reichelt, S.

**Influence of object motion on roughness measurements using spectral speckle correlation**

Optics Express 33, 48575 (2025)

Maier, E.; Herbst, J.; Rademacher, S.; Strahl, T.; Wöllenstein, J.

**Luftgestützte Ferndetektion von Propan und Methan**

tm – Technisches Messen 92, 437-448 (2025)

Mrokon, A.; Kraft, H.; Shin, D.; Tanaka, H.; Herr, S.; Buse, K.; Breunig, I.

**Electrically induced resonance shifts of whispering gallery resonators made of barium magnesium fluoride**

APL photonics 10, 096109 (2025)

Mrokon, A.; Shin, D.; Buse, K.; Breunig, I.

**The Piezoelectric Influence on Adiabatic Frequency Conversion in Lithiumc Niobate Whispering Gallery Resonators**

CLEO/Europe-EQEC 2025: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, München, 2025, 1 S., doi:10.1109/CLEO/Europe-EQEC65582.2025.11111374

Münch, F.; Hauer, B.; Breunig, I.; Carl, D.

**Multi-Angle Averaging Approach for Measuring the Coating Thickness on Thin Transparent Polymer Films**

Applied spectroscopy 79, 1615-624 (2025)

Nitzsche, P.; Dinc, C.; Goldschmidt, J.; Nitzsche, L.; Wöllenstein, J.; Schmitt, K.

**Comparison of a Quantum Cascade Laser and an Interband Cascade Laser for the Detection of Stable Carbon Dioxide Isotopes Using Tunable Laser Absorption Spectroscopy**

Applied spectroscopy 79, 862-871 (2025)

Pernau, H.-F.

**SF6Detect-AW: Studie zur Erstellung einer Detektions- und Absaugeinheit für SF6 in Schallschutzfenstern**

Abschlussbericht; Berichtszeitraum: 03.06.2024-31.05.2025 Freiburg/Brsg., 2025, 11 S.

Placke, M.; Lindner, C.; Mann, F.; Kviatkovsky, I.; Chrzanowski, H. M.; Kühnemann, F.; Ramelow, S.

**Applied Hyperspectral Mid-IR Quantum Imaging**

CLEO/Europe-EQEC 2025: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, München, 2025, 1 S., doi:10.1109/CLEO/Europe-EQEC65582.2025.11109494

Poku-Agyemang, K. N.; Reiterer, A.

**Weighted Multiple Point Cloud Fusion**

Journal of photogrammetry, remote sensing and geoinformation science 93, 65-78 (2025)

Poku-Agyemang, K. N.; Reiterer, A.

**Model-based planning of complex 3D laser scanning campaigns for bridge digitisation**

Automation in Construction 177, 106289 (2025)

Rasser, R.; Koss, P.; Knappe, S.; Buse, K.

**Towards a multi-channel zero-field optically pumped magnetometer for imaging**

EPJ Quantum Technology 12, 101 (2025)

Regina, D. J.; Riexinger, G.; Schmid-Schirling, T.; Carl, D.; Rödel, L.; Landwehr, I.; Sauer, A.

**Marker-Free Traceability in Battery Production from Continuous Electrode Foils to Cell‐Specific Individual Electrode Segments**

Batteries & supercaps 8, e202500148 (2025)

# **Publikationen** 2025

Schipper, J.; Unmüßig, S.; Wöllenstein, J.; Kaya, E.-M.; Mönch, S.; Bartholome, K.

**Design and performance optimization of a cascaded magnetocaloric heat pipe with enhanced cooling power and temperature difference**

Journal of Physics: Energy 7, 045007 (2025)

Schmid-Schirling, T.

**Präzise Prüfung im freien Fall**

Kunststoffe 9, 68 (2025)

Schmid-Schirling, T.

**Prüfsysteme für Stanz- und Gussteile**

Inspect 26(2), 62-63 (2025)

Schmieder, L.

**Fortschritte der magnetometrischen Durchflussmessung: Grundsatznachweis der Fließgeschwindigkeitsmessung und Einfluss des Strömungsprofils auf die RF-Pulseffizienz**

tm – Technisches Messen 92, 83-90 (2025)

Schmieder, L.; Koss, P.

**Advances in Magnetic Flow Metering: A Clamp-on Device**

SMSI 2025: Conference on Sensor and Measurement Science International, Nürnberg, 2025, 131-133, doi:10.5162/SMSI2025/C1.4

Schöner, J.; Lindner, C.; Herr, S.; Kühnemann, F.; Breunig, I.

**Towards Integrated on-Chip Liquid Sensing Based on Correlated Photons**

CLEO/Europe-EQEC 2025: Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, München, 2025, 1 S., doi:10.1109/CLEO/Europe-EQEC65582.2025.11109933

Schütze, R.; Strauss, M.; Baulig, C.; Olshausen, P. v.; Reiterer, A.

**Bird protection at wind turbines using 3D tracking**

Conference on Real-Time Processing of Image, Depth, and Video Information. Proceedings of SPIE 13526, 135260B (2025)

Seiler, J.; Gerberding, K.; Schmitt, A.; Kattenborn, T.; Reiterer, A.

**A UAV-mounted dual-wavelength LiDAR for leaf water content retrieval**

Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIV. Proceedings of SPIE 13567, 1356718 (2025)

Stiefvater, G.; Brunner, R.

**Entwicklung eines Sensors für die Messung von N2O-Bodenemissionen: Sachbericht zu den Arbeiten von Fraunhofer IPM**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.10.2023 - 30.09.2025 Freiburg/Brsg., 2025, 11 S.

Strauss, M.; Schmitt, A.; Olshausen, P. v.; Reiterer, A.

**A handheld multisensory scanner system with real-time mapping and data processing for building survey applications**

Conference on Real-time Processing of Image, Depth, and Video Information. Proceedings of SPIE 13526, 135260C (2025)

Unmüßig, S.; Bach, D.; Metzdorf, J.; Corhan, P.; Hirose, S.; Bartholome, K.

**Direct Thermal Method to Characterize the Material Efficiency of Electrocaloric Lead Scandium Tantalate Multilayer Ceramic Capacitors**

Materials 18, 1924 (2025)

Vierhub-Lorenz, V.; Werner, C.; Reiterer, A.

**Evaluation of a laser-based measurement system for the detection of subsurface anomalies**

WTC 2025: World Tunnel Congress. Proceedings: Tunnelling into a Sustainable Future - Methods and Technologies, 4116-4122 (2025)

Villinger, G.; Reiterer, A.

**Robotic Systems for Sewer Inspection and Monitoring Tasks: Overview and Novel Concepts**

IEEE Sensors Journal 25, 8786-8796 (2025)

Voßgrag, L.; Schiller, A.; Fratz, M.; Breunig, I.

**Multi-wavelength holography with flexible synthetic wavelengths**

Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIV. Proceedings of SPIE 13567, 1356705 (2025)

Voßgrag, L.; Schiller, A.; Seyler, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.; Breunig, I.

**Single-sideband modulation for dynamically reconfigurable multiwavelength interferometry**

Advanced Photonics Nexus 4, 046013 (2025)

Waidhas, A.-R.; Herr, S.; Kießling, J.; Kühnemann, F.

**Laser-written depressed cladding waveguides in the z-cut of birefringent nonlinear optical crystals for efficient frequency conversion**

Conference on Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XXIV. Proceedings of SPIE 13347, 1334702 (2025)

Waidhas, A.-R.; Herr, S.; Kießling, J.; Kühnemann, F.

**Laser-written β-BBO depressed cladding waveguides for TM and TE polarizations**

Conference on Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XXIV. Proceedings of SPIE 13347, 1334703 (2025)

Yaadav, R.; Trofymchuk, K.; Dass, M. et al.

**Bringing Attomolar Detection to the Point-of-Care with Nanopatterned DNA Origami Nanoantennas**

Advanced Materials 37, e07407 (2025)

Yassine, H.; Weber, C.; El-Safoury, M.; Brugger, N.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Design of a Refrigerant Leak Sensor based on the Photoacoustic Dual-Chamber Detection Method**

SMSI 2025: Conference on Sensor and Measurement Science International, Nürnberg, 2025, 175-178, doi:10.5162/SMSI2025/C7.2

Zelenina, I.; Böttner, H.; Schmidt, M.; Grin, Y.; Simon, P.

**In Situ TEM Observation of Electric Field-Directed Self-Assembly of PbS and PbSe Nanoparticles**

Nanomaterials 15, 1275 (2025)

Zschiesche, K.; Reiterer, A.

**Baumvitalität effizienter überwachen**

AFZ, der Wald 4, 21-23 (2025)

Zschiesche, K.; Seiler, J.; Baulig, C.; Dambacher, M.; Galuska, B.; Jäger, L.; Pelz, J.; Rombach, J.; Sutorius, A.; Reiterer, A.

**Laser-based mobile railway measurement systems: an overview**

Conference on Multimodal Sensing and Artificial Intelligence for Sustainable Future. Proceedings of SPIE 13570, 135701L (2025)

# **Erteilte Patente** 2025

Beckmann, T.; Seyler, T.

**Verfahren zum Erzeugen einer Information aus mindestens einem Kamerabild**

JP7623144B2

Bartholomé, K.; Schäfer-Welsen, O.; Winkler, M.; Kluge, M.; Clade, J.; Eberl, C.; Wischerhoff, E.; Tutus, M.; Krus, M.; Teicht, C.

**Wärmerohr, System und Verfahren zum Schalten und/oder Programmieren eines Wärmetransports**

EP3926285B1

Bachmann, N.; Bartholomé, K.; Corhan, P.; Fitger, A.; Mahlke, A.; Maier, L. M.; Schäfer-Welsen, O

**Verfahren zur Stabilisierung und/oder Steuerung und/oder Regelung der Arbeitstemperatur, Wärmeübertragereinheit, Vorrichtung zum Transport von Energie, Kältemaschine sowie Wärmepumpe**

EP3862658B1

Kapp, J.; Schmitt, K; Weber, C.

**Verfahren zum Bestimmen einer Eigenschaft eines Probenfluids oder einer Resonanzfrequenz einer Resonatorzelle**

EP4006506B1

König, J.; Schäfer-Welsen, O.; Vetter, U.; Vergez, M.; Mahlke, A.; Maier, L. M.; Schäfer-Welsen, O.

**Verfahren zur Herstellung eines thermoelektrischen Moduls und thermoelektrisches Modul als Pressverband**

EP3933946B1

# **Doktorarbeiten** 2025

Bergau, M.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

**Entwicklung und Evaluation einer aktiven Gaskamera**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
Shaker Verlag. Gas Sensors 18 (2025)

Braun, L.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

**Magnetometrische Durchflussmessung mit optisch gepumpten Magnetometern und Spinmanipulation fließender Medien**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
Shaker Verlag. Gas Sensors 19 (2025)

Callies, A.; Buse, K. [Erstgutachter]

**Structured Interfaces in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
doi:10.6094/UNIFR/274897

Engel, L.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

**Druckbare kolorimetrische Sensorlabel zur Detektion von Gasen**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
Shaker Verlag. Gas Sensors 20 (2026)

Lyu, X.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

**Bimetallic Au-Pd catalyst on mesoporous $Co_3O_4$ for sensitive detection of combustible gases**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]

Poku-Agyemang, K. N.; Reiterer, A. [Erstgutachter]

**Multi-Data Fusion for 3D Reconstruction of Bridges**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
doi:10.6094/UNIFR/273642

Rathmann, L.; Reiterer, A. [Erstgutachter]

**UAV-borne Dual-Wavelength Laser Scanner for Concurrent Snow Grain Size and Snow Depth Mapping**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]
doi:10.6094/UNIFR/273398

Yassine, H.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

**Photoacoustic Sensors for the Detection of Sulfuryl Difluoride and Water Vapor**

[Freiburg, Univ., Diss., 2025]

# **Großprojekte** Öffentliche Forschungsvorhaben 2025

**Sieben öffentlich geförderte Forschungsprojekte mit einem finanziellen Volumen von mehr als einer Million Euro für Fraunhofer IPM haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über das Jahr 2025 bearbeitet.**

**ElKaWe** Elektrokalorische Wärmepumpe
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)
Laufzeit: 01.10.2019 – 28.02.2025

**FMD-QNC** Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) – Modul Quanten- und neuromorphes Computing (QNC)
Förderung: Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt BMFTR, Projektträger VDI/VDE-IT
Laufzeit: 01.12.2022 – 31.12.2025

**Bau-DNS** Ganzheitliches Verfahren für eine nachhaltige, modulare und zirkuläre Gebäudesanierung
Laufzeit: 01.01.2023 – 31.12.2026
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

**MultiLambdaChip** Integriert-optisches Mehrwellenlängen-Lasersystem für die holographische 3D-Oberflächenmesstechnik in der industriellen Qualitätssicherung
Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Projektträger VDI-Technologiezentrum GmbH
Laufzeit: 01.10.2023 – 30.09.2026

**SMArtCool** Elastokalorik für eine effiziente Klimatechnik
Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Projektträger Jülich (PtJ)
Laufzeit: 01.12.2024 – 30.11.2027

**FlexiScan** Flexibles System zur Kanalinspektion
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE-Projekt)
Laufzeit: 01.02.2025 – 31.01.2028

**ELCH** Elektrokalorisches Heizen und Kühlen
Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (EXIST-Forschungstransfer)
Laufzeit: 01.06.2025 – 30.11.2026

# **Netzwerk** Unsere Partner

Wir engagieren uns in Verbänden, Fachorganisationen und Netzwerken – innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft, deutschlandweit und international.

## Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces

Der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces bündelt die wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen der Fraunhofer-Gesellschaft in den Themenfeldern Optik, Photonik, Laser- und Oberflächentechnik. In den Instituten des Verbunds forschen an die 1900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf exzellentem wissenschaftlichem Niveau, um komplexe technologische Fragen aus Industrie und Wirtschaft mit Blick auf die konkrete Anwendung zu lösen. Für die Industrie sind die Institute nicht nur Innovationspartner, sondern in Kooperation mit Universitäten auch eine Quelle für den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs und damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

Vorsitzender des Verbunds ist Prof. Dr. Karsten Buse, die Geschäftsstelle leitet Dr. Heinrich Stülpnagel.

**light-and-surfaces.fraunhofer.de**

## Fraunhofer-Gesellschaft

- Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces
- Fraunhofer-Allianz BAU
- Fraunhofer-Allianz Ernährungswirtschaft
- Fraunhofer-Allianz Verkehr
- Fraunhofer AVIATION & SPACE
- Fraunhofer-Geschäftsbereich Reinigung
- Fraunhofer-Geschäftsbereich Vision

## Deutschland

- AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.
- Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA
- Cluster Brennstoffzelle BW
- CNA Center for Transportation & Logistics – Neuer Adler e. V., Cluster Bahntechnik
- Competence Center for Applied Security Technology e. V. (CAST)
- Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO)
- Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF)
- Deutsche Hydrographische Gesellschaft e. V. (DHyG)
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)
- Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e. V. (DTG)
- Deutscher Hochschulverband (DHV)
- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)
- Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.
- Forum Angewandte Informatik und Mikrosystemtechnik e. V. (FAIM)
- Forum Luft- und Raumfahrt Baden-Württemberg e.V. (LR BW)
- Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V. (GDCh)
- Green City Cluster Freiburg
- Innovationsnetzwerk Gesundheit (Bayern Innovativ)
- Innovationsplattform Magnetische Mikrosysteme INNOMAG e.V.
- microTEC Südwest e. V.
- Nano-Zentrum Euregio Bodensee e. V. (NEB)
- netzwerkdraht e.V.
- Photonics BW e. V. – Innovationsnetz Optische Technologien und Quantentechnologien
- Strategische Partner – Klimaschutz am Oberrhein e. V.
- VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)
- VDSI – Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e. V.
- Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT)

## International

- European Thermoelectric Society (ETS)
- International Thermoelectric Society (ITS)
- Optica (ehemals OSA)

# Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein. Mit mehr als 30 000 Mitarbeitenden betreibt Fraunhofer 74 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen in Deutschland. Im Innovationsprozess spielt Fraunhofer eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft.

Die zentrale Kundengruppe stellen große und mittelständische Unternehmen dar. Sie nutzen die Expertise von Fraunhofer, um mit neuen Technologien ihre Wettbewerbsfähigkeit auszubauen. Seit Jahren zählt Fraunhofer zu den aktivsten Patentanmeldern in Deutschland und Europa. Ein internationales Patentportfolio bildet die Grundlage für den Technologietransfer durch Forschungsprojekte, Ausgründungen und Lizenzierung. Darüber hinaus adressiert Fraunhofer gesamtgesellschaftliche Ziele in wichtigen Technologiebereichen durch interdisziplinäre und internationale Kooperationen im konkreten Marktumfeld. Beispiele sind Entwicklungen für die Sektoren Mikroelektronik, Künstliche Intelligenz und Quanten, Gesundheit, Kreislaufwirtschaft und neue Materialien sowie für Energie, die Sicherheit kritischer Infrastrukturen und den Verteidigungssektor.

Im Bereich öffentlich geförderte Konsortialvorhaben mit Industriepartnern ist Fraunhofer ein attraktiver und etablierter Akteur. Darüber hinaus trägt die Fraunhofer-Gesellschaft maßgeblich zur Stärkung und Zukunftsfähigkeit des Innovations- und Wirtschaftsstandorts Deutschland bei. Durch ihre Aktivitäten entstehen Arbeitsplätze in Deutschland, Investitionseffekte in der Wirtschaft erhöhen sich, Unternehmen erlangen Wettbewerbsvorteile und es steigt die gesellschaftliche Akzeptanz moderner Technik. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Das jährliche Finanzvolumen der Fraunhofer-Gesellschaft beträgt 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,2 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Dabei bildet die institutionelle Förderung durch Bund und Länder mit maximal einem Drittel im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen lediglich das Fundament. Mindestens zwei Drittel der Vertragsforschung wirbt Fraunhofer im Wettbewerb ein, aus Aufträgen der freien Wirtschaft sowie bei öffentlichen Auftraggebern. Der daraus resultierende hohe Akquise-Anreiz, verglichen mit weitestgehend institutionell geförderten Organisationen, fördert unternehmerisches Denken und Handeln. So stellt die Fraunhofer-Gesellschaft sicher, dass sie kontinuierlich Lösungen für aktuelle und künftige wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedarfe entwickelt. Im Jahr 2025 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 966 Mio. €.

Hoch motivierte Mitarbeitende sind der wichtigste Erfolgsfaktor für Fraunhofer. Daher öffnet die Wissenschaftsorganisation Freiräume für eigenverantwortliches, gestaltendes und zielorientiertes Arbeiten. Durch gezielte Förderung der fachlichen und persönlichen Entwicklung unterstützt Fraunhofer Karrierechancen in der Wissenschaft wie auch in der Wirtschaft.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Durch seinen Forscherdrang und sein unternehmerisches Denken entwickelte sich Joseph von Fraunhofer vom Glasschleifer zum wissenschaftlichen Pionier, der als Erfinder und Unternehmer Ideen in verkaufsfertige Produkte umsetzte und vermarktete. Sein Innovationsgeist und seine Marktorientierung, die Haltung, dass Forschung und praktische Anwendung zusammengehören, prägen die Arbeit der Fraunhofer-Gesellschaft, die seiner Tradition verpflichtet ist.

**fraunhofer.de**




**Fraunhofer IPM**
Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Georges-Köhler-Allee 301
79110 Freiburg

Telefon +49 761 8857-0

info@ipm.fraunhofer.de

**ipm.fraunhofer.de**

# Impressum

**Anschrift der Redaktion**
Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Kommunikation und Medien
Georges-Köhler-Allee 301
79110 Freiburg

Telefon + 49 761 8857-0
info@ipm.fraunhofer.de

**Verantwortlicher Redakteur**
Holger Kock (holger.kock@ipm.fraunhofer.de)

**Redaktion**
Vivianne Hericks, Holger Kock, Anja Strobel

**Layout und Gestaltung**
Hanna Schweizer

eISSN 2943-680X

© Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, Institut der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

Erscheinungsdatum: 27.05.2026
Dieser Bericht wird ausschließlich digital veröffentlicht.

**Bildquellen**
S. 6, 7, 8, 28, 34, 40, 45: Grafiken von Visual Generation/Shutterstock
S. 14, 44: Kai-Uwe Wudtke
S. 25: SHUMAILNAYMAT/Shutterstock
S. 27: Bosch Secure Authentication GmbH
S. 31: Lars Rathmann
S. 32: constellr/Komposition Fraunhofer IPM
S. 38: Felix Thatenhorst
S. 54: Fraunhofer-Gesellschaft

Alle anderen Bilder und Grafiken: Fraunhofer IPM

*Making-of:*
*Fürs Titelbild ist unser Kollege Jannis Gangelhoff im Testbecken abgetaucht.*




Bleiben Sie in Kontakt – wir freuen uns auf Sie!

Besuchen Sie uns auf
**ipm.fraunhofer.de**

Melden Sie sich für unseren Newsletter an:
**ipm.fraunhofer.de/info**

**Folgen Sie uns auf:**




ipm.fraunhofer.de