

Jahresbericht 2024/2025

Messen • Kontrollieren • Optimieren

Shrink it!

»Sprunginnovation: Photonische Integrierte Schaltkreise für die Messtechnik!«

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

kleiner gleich günstiger, flexibler und energieeffizienter. Diese Gleichung gilt seit Langem in der Elektronik. Und immer stärker auch in der Messtechnik. Schauen wir dazu auf die optische Messtechnik: Bis heute sind oft 19“-Geräte im Einsatz oder Module im Schuhkartonformat. Schraubt man diese auseinander, so findet man Linsen, Spiegel, Prismen, Halter, Aktoren und vieles mehr – oft noch von Hand gefertigt.

Geht das nicht kleiner? Manchmal setzt uns hier die Physik Grenzen, wenn es z. B. um die Detektion schwacher verteilter Signale geht; ohne große Sammellinse geht das nicht, auch nicht in tausend Jahren. Sehr oft setzt uns aber bisher die Technik Grenzen, optische Messgeräte zu verkleinern. Damit ist nun Schluss: In den vergangenen Jahren kam eine Revolution ins Rollen, die auf den Namen »**Photonische Integrierte Schaltkreise**« (Photonic Integrated Circuits, PICs) hört.

Die moderne Halbleitertechnik mit ihren integrierten Schaltkreisen (ICs) hat hier der Photonik einen starken Impuls gegeben: Das betrifft zum einen die Fertigungsverfahren. Das betrifft aber auch Volumen Anwendungen erster hochintegrierter photonischer Schaltkreise, vorwiegend für Rechenzentren. Nun gibt es erste Foundries, bei denen Kundinnen und Kunden photonische Chips selbst designen und dann fertigen lassen können. Aus dem Strahlteilerwürfel wird z. B. der 3-dB-Koppler usw. Module klassischer optischer Systeme oder sogar ganze Geräte werden durch PICs ersetzt. Das früher ein 19“-Gerät füllende System passt nun in eine Streichholzschachtel.

Heute sind es PICs, die die Photonik-Industrie ähnlich tiefgreifend verändern werden wie seinerzeit die ICs die Halbleiterindustrie. Fraunhofer IPM nutzt die neuen Möglichkeiten zur Miniaturisierung und ist selbst auch Treiber der Revolution. Dazu Beispiele aus unserer Praxis: Für die digitale Mehrwellenlängen-Holographie benötigen wir stets mehrere schmalbandige Laserlichtquellen mit exakt bekannten Frequenzabständen. Stand der Technik ist, mehrere unabhängige Laser einzusetzen. Bald kommen alle Laserstrahlen von einem Chip, dank eines einzigen Masterlasers sowie Seitenbandmodulation und Frequenzkonversion. Die von uns designte Lichtquelle auf dem Chip ist nicht nur viel kleiner, sondern auch robuster und günstiger! Der Chip ist von uns entwickelt, unter dem Einsatz vorhandener Technologien. Für die optische Frequenzkonversion auf den Chips treiben wir zudem die Herstellungsmethoden voran, indem wir auch Maschinen für die nötige Mikrostrukturierung der PICs entwickeln.

Maßgeschneiderte photonische Systeme zu realisieren – klassisch oder integriert – ist eine Kernkompetenz von Fraunhofer IPM, die alle Abteilungen auszeichnet. In fast jedem Projektbeispiel dieses Jahresberichts finden Sie ein optisches System: Bei dem neuen Verfahren des Teams »Produktionskontrolle« zur Rauheitsmessung mittels Mehrfarben-Speckle-Bildkorrelation und ebenso bei der hochaufgelösten Messung der Geschwindigkeitsverteilung von Aerosolen in Wolken: In der Abteilung »Objekt- und Formerkennung« wurde dafür ein leichtgewichtiges Hochleistungs-Laser-Doppler-Radar-System geschaffen. Besondere Erfolge ergeben sich auch durch die kompakten und hochsensitiven photoakustischen Gasmesssysteme, die in unserer Abteilung »Gas- und Prozesstechnologie« entwickelt werden.

Wir freuen uns sehr, dass diese drei erfolgreichen Abteilungen seit dem 1. Januar 2025 durch unsere neue Abteilung »Photonische Systeme« verstärkt werden. Damit tragen wir der Erfolgsgeschichte der bei uns entwickelten und immer stärker nachgefragten Dauerstrichlaserlichtquellen Rechnung. Für unsere eigenen Messsysteme wie auch für unsere Kundschaft aus der Industrie entwickeln wir spezielle PICs mit dem Fokus auf Lichtquellen und Lichthandling. Die neue Abteilung wird in diesem Jahresbericht erstmals vorgestellt – mit spannenden Projekten von der Forschung zu nichtlinear-optischen Wellenleitern bis zum Transfer durchstimmbarer UV-Laserstrahlquellen für Anwendungen in der Raumfahrtindustrie.

Es bewegt sich enorm viel beim Fraunhofer IPM. Zögern Sie nicht, unseren [monatlichen Newsletter](#) zu abonnieren und uns in den sozialen Medien zu folgen, insbesondere auf LinkedIn. Und sprechen Sie uns an, wenn wir etwas für Sie tun können!

Herzlichst, Ihr



Karsten Buse, Institutsleiter



**Die Photonik-Industrie
steht am Anfang
einer tiefgreifenden
Transformation.«**

Prof. Karsten Buse, Institutsleiter

Inhalt

Editorial	2
Überblick	4
Zahlen	5
Organisation	7
Kuratorium	8
Investitionen	9
Professuren	10
Magazin	11
Kurz berichtet	12
Kundeninterview: Hafencity University Hamburg	15
Geschäftsfelder	17
Produktionskontrolle	18
Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen	19
Fokus: Bergbau und Rohstoffe	23
Objekt- und Formerfassung	25
Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen	26
Fokus: Smart City	32

Gas- und Prozesstechnologie	34
Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen	35
Fokus: Quantum Flow	40
Photonische Systeme	42
Highlights: Projekte • Innovationen • Veranstaltungen	43
Fokus: Laserlicht nach Maß	45
Index	47
Publikationen	48
Patente	52
Doktorarbeiten	53
Großprojekte	54
Netzwerk	55
Fraunhofer-Gesellschaft	56
Impressum	57

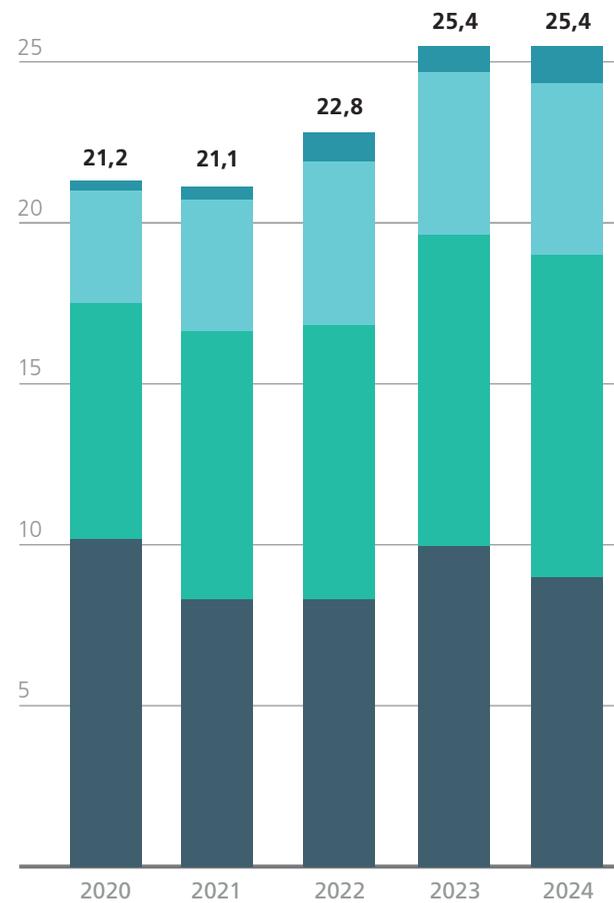
Überblick Fraunhofer IPM



*Panorama auf dem Dach
unseres Institutsgebäudes*

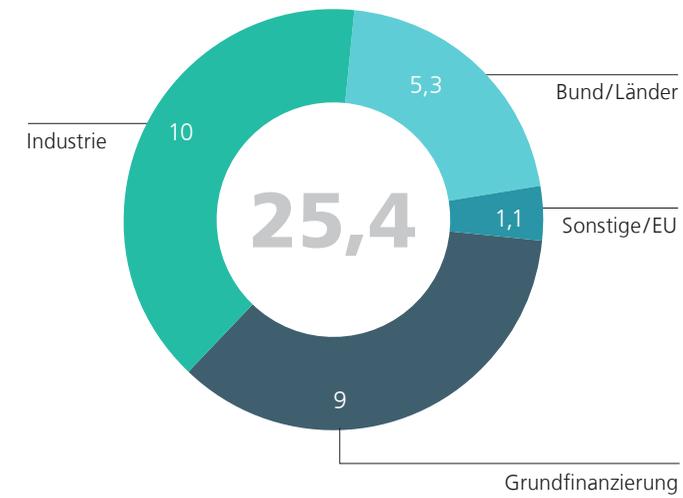
Zahlen Fraunhofer IPM

Entwicklung Betriebshaushalt in Mio. Euro

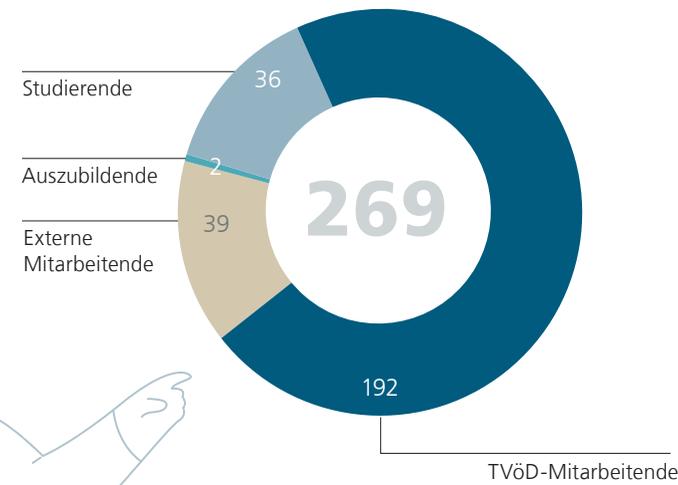


■ Grundfinanzierung ■ Bund/Länder
■ Industrie ■ Sonstige/EU

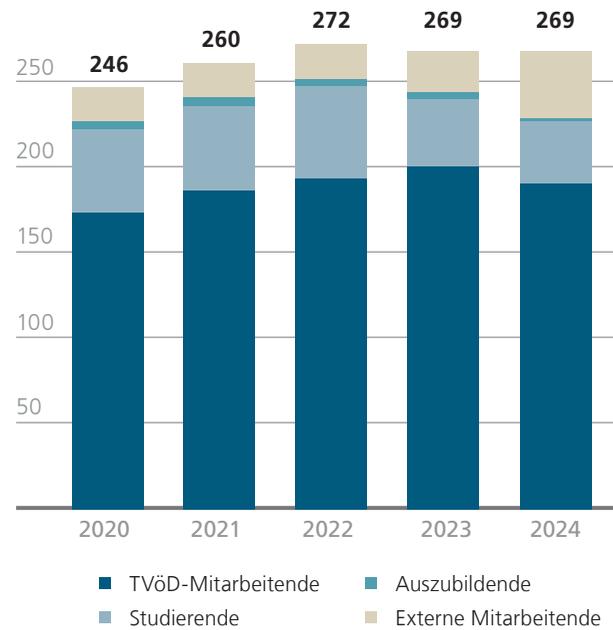
Betriebshaushalt 2024 in Mio. Euro



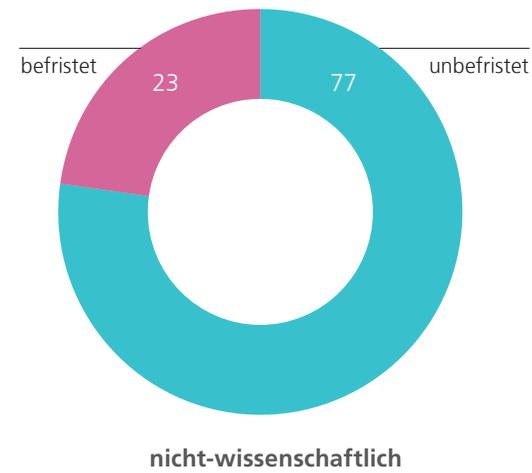
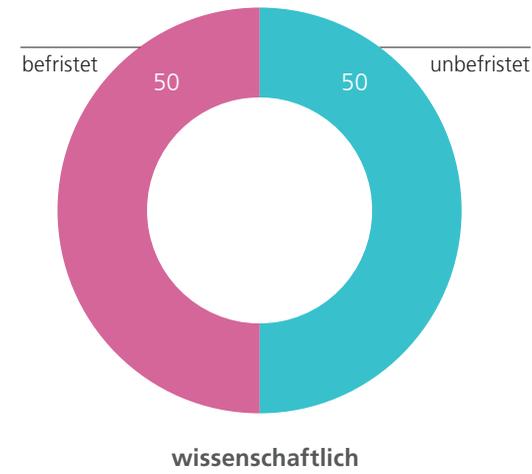
Mitarbeitende 2024



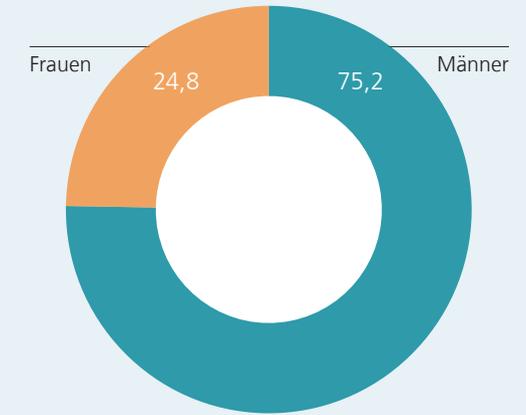
Entwicklung Anzahl der Mitarbeitenden



Beschäftigte nach TVöD Anteil befristeter/unbefristeter Verträge 2024



Wissenschaftliche Mitarbeitende 2024 in %



Nationalitäten unserer Mitarbeitenden 2024



Organisation

INSTITUTSLEITUNG



Institutsleiter
Prof. Dr. Karsten Buse



Stellv.
Institutsleiter
Prof. Dr. Daniel Carl

KOMMUNIKATION UND MEDIEN



**Leiter
Kommunikation
und Medien**
Holger Kock



Forschung und
Strategie
Dr. Milena Hugenschmidt



Organisations-
entwicklung
Dr. Heinrich Stülpnagel

VERWALTUNG UND IT



Verwaltungsleiter
Wolfgang Oesterling



Verwaltung
Sabine Gabele



Informations- und
Telekommuni-
kationstechnik
Gerd Kühner



Recruiting und
Personalentwicklung
Saskia Sailer

TECHNISCHE DIENSTE



Technischer Leiter
Clemens Fallner



Mechanik
und Konstruktion
Thomas Hinrichs



Betriebstechnik
Benjamin Schlegel

PRODUKTIONSKONTROLLE ▶ Seite 18



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 25



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 34



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Jürgen
Wöllenstein



Integrierte Sensor-
systeme
Dr. Benedikt Bierer



Spektroskopie
und Prozessanalytik
Dr. Raimund Brunner



Thermische
Messtechnik
und Systeme
Dr. Katrin Schmitt



Kalorische
Systeme
Dr. Kilian Bartholomé

PHOTONISCHE SYSTEME ▶ Seite 42



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.

Vorsitzender

Dr. Mirko Lehmann
Endress+Hauser Flowtec AG

Mitglieder

Sebastian Bannert
Robert Bosch GmbH

Hanna Böhme
FWTM Freiburg Wirtschaft Touristik
und Messe GmbH & Co. KG

Stephanie Busse
DB InfraGO AG

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



Investitionen 2024

Auch 2024 haben wir wieder kräftig in unsere Infrastruktur und Geräte investiert. Eine exzellente technische Infrastruktur ist neben hochqualifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern eine entscheidende Voraussetzung, Kundinnen und Kunden mit exzellenter Forschung bestmöglich zu unterstützen.

Plasma Focused Ion Beam-Anlage – mit Elektronenmikroskop und Lithographie-Modul

Für die Herstellung äußerst verlustarmer optischer Wellenleiter in Lithiumniobat-Dünnschichten steht uns nun ein Zweistrahl-Mikroskop zur Verfügung – eine Kombination aus Rasterelektronenmikroskop (SEM) und Xenon-Ionenstrahlanlage (PFIB). Mit der Beschaffung der Anlage erweitern wir die am Institut bestehende Prozesskette zur Herstellung von Lithiumniobat-Wellenleitern, die beispielsweise beim Quantencomputing zum Einsatz kommen können. Durch das Lithographie-Modul kann die Anlage als Elektronenstrahlbelichter eingesetzt werden, während der Ionenstrahl eine nanometergenaue Nachbearbeitung der Wellenleiter ermöglicht.

Neben den nun erweiterten Möglichkeiten zur Herstellung von Wellenleitern ergänzt diese Anlage unser Portfolio zur 3D-Materialuntersuchung auf der Nanometerskala – etwa durch ionengesechnittene, nanometergenaue Querschnitte.

Upgrade für unser Koordinatenmessgerät: neue Universalschnittstelle

Um die Messmittelfähigkeit unserer Holographie-Systeme nachzuweisen, nutzen wir als Referenz eine der genauesten am Markt erhältlichen 3D-Koordinatenmessgeräte (KMG), die Leitz Infinity 12.10.7. Die Anlage wurde nun auf die »SENIMATION«-Schnittstelle umgerüstet. Das SENIMATION-Sensorwechselsystem bietet die Flexibilität, für schwer zugängliche Bauteile oder empfindliche Oberflächen die bestmöglichen Sensoren zu wählen. Künftig können dank der neuen Schnittstelle eigene Sensoren wie unser holographischer Sensor HoloTop NX vollautomatisiert eingewechselt und für schnelle, hochgenaue, flächige 3D-Messungen genutzt werden.

Erneuerung des Network Attached Storage-Systems

Das Messdatenvolumen und die Anforderungen an die Speicherung dieser Daten steigen stetig. Wir verfügen seit 2024 über ein neues Network Attached Storage (NAS)-System von NetApp. Es ersetzt das System des Herstellers HUAWEI und ermöglicht eine deutlich bessere Skalierbarkeit im Hinblick auf zukünftige Datenvolumina. Die neue Lösung ermöglicht eine Erweiterung der Bruttokapazität von 7,2 Petabyte in der bisherigen Ausbaustufe. Durch Hinzufügen weiterer Cluster-Nodes ist perspektivisch eine Erweiterung auf insgesamt 88 Petabyte möglich. Neben der verbesserten technischen Leistungsfähigkeit verspricht sich die IT auch langfristige Investitionssicherheit durch den Einsatz einer weit etablierten Technologie.

HoloTop NX im Koordinatenmessgerät: Dank einer neuen Schnittstelle können Sensoren automatisch gewechselt werden.



Professuren Universität & Hochschule

Fraunhofer IPM ist mit vier Professuren und einer Privatdozentur an der Universität Freiburg vertreten. Durch die enge Anbindung an eine der forschungstärksten ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten Deutschlands sind wir an Spitzenforschung und Ausbildung exzellenter Nachwuchskräfte beteiligt.

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG

universität freiburg

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



Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Professur für Optische Systeme

Prof. Dr. Karsten Buse

PD Dr. Ingo Breunig

[imtek.de/professuren/optische-systeme](https://www.imtek.de/professuren/optische-systeme)



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](https://www.imtek.de/professuren/gassensoren)



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

[inatech.de/alexander-reiterer](https://www.inatech.de/alexander-reiterer)



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

[ipm.fraunhofer.de](https://www.ipm.fraunhofer.de)



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





Neue Professur »Produktionskontrolle« an der Universität Freiburg

Professor Daniel Carl, stellvertretender Institutsleiter am Fraunhofer IPM, hat am 1. Oktober 2024 die Professur »Produktionskontrolle« an der Technischen Fakultät der Universität Freiburg angetreten. Die neue Freiburger Professur ist am Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH angesiedelt.

Der Schwerpunkt liegt auf der Sicherung der Qualität und Erhöhung der Ressourceneffizienz von Produktionsprozessen. Die wissenschaftlichen Arbeiten sollen zur Sicherung des Wirtschaftsstandorts Deutschland und gleichzeitig zur Erreichung europaweiter Umweltziele beitragen.

Mit der neuen W3-Professur ist Fraunhofer IPM nun noch stärker am Wissenschaftsstandort Freiburg vernetzt. Durch die Zusammenarbeit ergeben sich sowohl für unser Institut als auch für die Universität Freiburg Vorteile. Das Institut ist bereits mit drei weiteren Professuren an der Universität Freiburg vertreten.



Ich werde die produzierende Wirtschaft durch meine Forschung und meine Lehrtätigkeit dabei unterstützen, Prozesse und Produkte in der Produktionslinie automatisiert zu kontrollieren.«

Prof. Dr. Daniel Carl



MoLaS Workshop: Erneut großes Interesse an technologischen Trends

Der MoLaS-Workshop fand bereits zum fünften Mal statt.

Mit einem vielfältigen Programm beim MoLaS Mobile Laser Scanning Technology Workshop begeisterten wir auch 2024 mehr als 80 Teilnehmende aus Industrie und Forschung.

Seit zehn Jahren lockt der MoLaS Workshop alle zwei Jahre Expertinnen und Experten auf dem Gebiet des »Mobile Mapping« nach Freiburg: Hier gibt es interessante Vorträge, eine Industrieausstellung und die Möglichkeit sich auszutauschen. Im Fokus stehen technologische

Trends bei der Entwicklung neuartiger LiDAR-Systeme und ihrer Anwendungen.

Die diesjährigen Vorträge deckten ein breites Themenspektrum ab, von der laserbasierten Erkennung von Anomalien in Tunnelwänden über multispektrales Laserscanning mit unbemannten Luftfahrzeugen bis hin zu Anwendungen für Echtzeit-KI auf Mobile-Mapping-Systemen. In seinem Keynote-Vortrag gab Dr. Bernd Walser von Hexagon / Leica Geosystems einen Überblick über

industrielle Entwicklungsprozesse für den Transfer der Ergebnisse aus dem Labor bis zum marktreifen Produkt.

Der internationale MoLaS Mobile Laser Scanning Technology Workshop findet alle zwei Jahre statt. Der nächste Workshop ist für November 2026 geplant.

molas.fraunhofer.de

Summer School Fraunhofer Photonica 2024: Die Reise geht weiter

Bereits zum zweiten Mal begeisterte die Summer School Fraunhofer Photonica zwanzig internationale junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Eine Woche lang bekamen sie Einblick in fünf Fraunhofer-Institute und deren Forschung im Bereich Photonik, Laser und Oberflächen; dabei reisten sie von Braunschweig über Jena und Dresden nach Berlin. Veranstalter der Fraunhofer Photonica ist der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces unter der Leitung des Fraunhofer IPM. Dr. Milena Hugenschmidt, wissenschaftliche Referentin der Institutsleitung des Fraunhofer IPM, begleitete die Teilnehmenden auf ihrer Reise.

Ein vielfältiges Programm gab den Teilnehmenden die Chance, die unterschiedlichen Forschungsbereiche kennenzulernen und sich über Karrieremöglichkeiten bei Fraunhofer zu informieren. Sie lernten verschiedenste Anwendungsbereiche kennen, bekamen Einblick in Labore, konnten eigene Experimente durchführen und Mitarbeitenden und den Institutsleitungen Fragen stellen. Die Teilnehmenden zeigten sich begeistert von der Vielfalt des Programms und empfehlen die Fraunhofer Photonica allen Photonik-Enthusiasten und -Enthusiastinnen.

Das erfolgreiche Format findet 2025 erneut statt und führt die Teilnehmenden an weitere Fraunhofer-Standorte, diesmal im Westen und Süden Deutschlands.



Dr. Milena Hugenschmidt (2.v.r.) und die Teilnehmenden der Fraunhofer Photonica, hier am Fraunhofer IOF



Ich bin mir sicher, dass alle Teilnehmenden eine erfolgreiche Karriere vor sich haben – natürlich auch gerne bei Fraunhofer.«

Dr. Milena Hugenschmidt, Wissenschaftliche Referentin Institutsleitung



Fraunhofer Photonica

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

photonica.fraunhofer.de

Fünf Fragen an ... Jannik Willms

Unser IT-Auszubildender Jannik Willms verbrachte im Rahmen des Programms AusbildungWeltweit, gefördert vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt, drei Monate am Fraunhofer CAP in Glasgow. Wir haben ihn gefragt, was er in Schottland erlebt hat.

Wie bist du auf die Idee gekommen, mit AusbildungWeltweit ins Ausland zu gehen?

Die ursprüngliche Idee kam über Klassenkameraden, die mich auf das Programm AusbildungWeltweit aufmerksam gemacht haben. Ich bin der erste Auszubildende in der Fraunhofer-Gesellschaft, der einen solchen Auslandsaufenthalt gemacht hat. Intern unterstützt wurde ich von Gerd Kühner als Projektleiter und von Milena Hugenschmidt, die mir bei den Anträgen sehr geholfen hat.

Wie wurdest du am Fraunhofer CAP aufgenommen?

Sehr familiär! Ich habe mich dort gleich sehr wohl gefühlt; die Atmosphäre ist ähnlich angenehm wie hier am Fraunhofer IPM. Allerdings arbeiten in Glasgow insgesamt »nur« rund 50 Personen, die einzelnen Gruppen sind daher deutlich kleiner als bei uns. Es ist wie ein Dorf, in dem jeder jeden kennt. Im IT-Department waren wir nur zu dritt. Da konnten wir effizient zusammenarbeiten und voneinander lernen.

Was waren deine fachlichen und persönlichen Highlights während des Aufenthalts?

Das fachlich Spannendste war, als wir zehn Terabyte DNA-Genomdaten von einem britischen Server herunterladen mussten. Die Sicherheitsanforderungen waren sehr hoch und das ganze Vorgehen hat viel Geduld erfordert. Aber wir haben es geschafft und das war ein großartiges Gefühl. Weil ich mich so viel mit der Dokumentation des Projekts beschäftigt habe, wurde ich inoffiziell als Hauptverantwortlicher adressiert.

Mein persönliches Highlight war eine recht abenteuerliche Wanderung in Aviemore, bei der ich nette Leute kennengelernt habe. Die Zuverlässigkeit der Busse war oft ein Glücksspiel, aber auf die Menschen – unter anderem meine Arbeitskollegen und -kolleginnen – war immer Verlass.

Welche fachlichen Qualifikationen oder Inspirationen bringst du aus Schottland ins Fraunhofer IPM?

Die Menschen dort gehen Probleme intuitiver an. Ich habe diese Art ein Stück weit ins Institut und generell nach Deutschland mitgenommen. Die Lösungen waren oft pragmatisch und Probleme werden getreu dem Motto »It will be fine« als Aufgaben angenommen. Aus diesem kulturellen Unterschied habe ich viel gelernt.



Würdest du den Auslandsaufenthalt mit AusbildungWeltweit anderen Azubis weiterempfehlen? Wie beurteilst du deine Erfahrung alles in allem?

Definitiv. Für mich war es insbesondere eine private Umstellung, da ich mich zunächst an die Umgebung und die lokalen Gegebenheiten anpassen musste.

Das fachliche Grundkonzept der Netzwerktechnik blieb allerdings bestehen. Besonders hat mir die Einstellung »People first, safety and then some work« am Fraunhofer CAP gefallen. Die Menschen waren und sind immer das Wichtigste.



Einen Auslandsaufenthalt mit *AusbildungWeltweit* würde ich definitiv weiterempfehlen und jederzeit wiederholen.«

Jannik Willms

Neue Vorlesungsreihe für Promovierende und Masterstudierende

Mit der Vorlesungsreihe »Kompetenzen für die erfolgreiche Abschlussarbeit« gab Fraunhofer IPM in Kooperation mit der Universität Freiburg einen Überblick über die Themen und Werkzeuge, die Masterstudierende und Promovierende für einen erfolgreichen Abschluss brauchen.

Was braucht es, um Abschlussarbeiten zu verfassen? Neben dem Wissen, wie man Literatur findet und verwaltet, wie man Abbildungen erstellt oder wie man wissenschaftliche Texte verfasst, gilt es auch, sich mit Themen wie Zeit- und Selbstmanagement, guter wissenschaftlicher Praxis oder Patenten auseinanderzusetzen. Diese und andere Themen bot die Vorlesungsreihe »Kompetenzen für die erfolgreiche Abschlussarbeit« im Wintersemester 2024, organisiert von Fraunhofer IPM unter der Leitung von Dr. Milena Hugenschmidt in Kooperation

mit der Universität Freiburg. Expertinnen und Experten des Fraunhofer IPM hielten die Vorlesungen.

Eine Besonderheit war dabei neben den theoretischen Inhalten eine praktische Übung, integriert in jede Einheit. Eingeladen waren Promovierende des Fraunhofer IPM und Masterstudierende der Technischen Fakultät. Die Teilnehmenden waren begeistert von der Vielfalt der Themen und den inspirierenden Vorträgen. In einem eigenen Vortrag über herausragende naturwissenschaftliche Entdeckungen konnten sie das Gelernte direkt anwenden. Sie fühlten sich auf ihre Abschlussarbeiten bestens vorbereitet.

Die Vorlesungsreihe soll fortgeführt werden und so weiteren Promovierenden und Studierenden die Möglichkeit bieten, essenzielle Kompetenzen für das wissenschaftliche Arbeiten aufzubauen und zu erweitern.

universität freiburg



Kundeninterview

HafenCity Universität Hamburg

»Autonome Systeme werden die Hydrographie revolutionieren.«

Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg

An der Professur für Hydrographie und Geodäsie der HafenCity Universität Hamburg (HCU) forschen und arbeiten Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg und die Doktorandin Ellen Heffner an der Erfassung und Analyse der Oberflächengestalt von Gewässern. Sie setzen dabei auf innovative Technologien und Sensoren, unter anderem auch auf das Unterwasser-LiDAR-System ULi von Fraunhofer IPM. Im Interview sprechen sie über die Schwerpunkte ihrer Forschung und über zukünftige Entwicklungen in der Hydrographie.

Herr Sternberg, Sie haben eine Professur für Hydrographie und Geodäsie. Können Sie uns kurz erklären, was Hydrographie ist und welche Aufgaben sie umfasst?

Harald Sternberg: Die Hydrographie beschäftigt sich hauptsächlich mit der Erfassung und Analyse der Oberflächengestalt von Gewässern. Dazu gehören die Topographie unter Wasser (Bathymetrie), die Bodenschichten und die Vegetation im Gewässer. Zentrale Aufgabe dabei ist es, die benötigten Daten zu erfassen und zu analysieren, sowohl in der Tiefsee als auch in kritischen Flachwasserbereichen,

z. B. in Häfen. Dafür gibt es bei uns in Hamburg den einmaligen Studiengang Hydrographie. Hier geht es u. a. darum, die verschiedenen Erfassungssensoren kennenzulernen und so einzusetzen, dass die unterschiedlichsten Einflussgrößen berücksichtigt werden.

Frau Heffner, welchen speziellen Forschungsschwerpunkt verfolgen Sie?

Ellen Heffner: Meine Forschung konzentriert sich auf die Integration und Anwendung neuer Sensoren wie zum Beispiel den ULi-Sensor, der auf unserem Forschungsschiff DVocean erprobt wird.



Wir untersuchen, wie diese Sensoren in verschiedenen Umgebungen, insbesondere in Flachwasserzonen, eingesetzt und getestet werden können.

Wie kam der Kontakt zu Fraunhofer IPM zustande?

Harald Sternberg: Ich komme aus der Ingenieur-Geodäsie und habe mich viele Jahre mit Mobile-Mapping-Fahrzeugen beschäftigt. Zu dieser Zeit habe ich auf Veranstaltungen wie der Intergeo festgestellt, dass Fraunhofer IPM ähnliche Interessen hat, insbesondere im Bereich der optischen Systeme und der Bathymetrie,

also der topographischen Erfassung von Gewässerbetten und Meeresböden.

Der bereits erwähnte ULi-Sensor kann per LiDAR unter Wasser Strukturen im Zentimeterbereich erfassen. Wofür benötigt man diese hohe Genauigkeit?

Ellen Heffner: Gerade beim Thema Infrastruktur ist Genauigkeit wichtig. Hier geht es um Brüche, Risse, Löcher oder auch Deformationen in Bauwerken unter Wasser. Diese oft feinen Struktur-anomalien sind allein mit akustischen Sensoren in der benötigten Auflösung nicht erfassbar.

Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg und M.Sc. Ellen Heffner von der HCU



Das goldfarbene »Underwater LiDAR System ULi« erfasst Strukturen im Wasser per Laserdistanzmessung auf wenige Zentimeter genau.



Professur für Hydrographie und Geodäsie, HafenCity Universität Hamburg (HCU)

Die Professur für Hydrographie und Geodäsie beschäftigt sich mit der Erfassung und Analyse der Oberflächengestalt von Gewässern. Dies umfasst die Topographie unter Wasser, die Bodenschichten und die Vegetation im Gewässer. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Integration und Anwendung neuer Sensoren, die auf dem Forschungsschiff DVocean eingesetzt werden. Die Professur ist bekannt für ihre Forschung in Flachwasserzonen und die Entwicklung von Technologien zur Verbesserung der Datenerfassung und -analyse in verschiedenen Gewässerumgebungen.

Welche speziellen Anpassungen wurden für Ihre Forschung am ULi vorgenommen?

Ellen Heffner: Eine wichtige Anpassung war die Integration eines Drucksensors zur Augensicherheit, der sicherstellt, dass der Laser sich automatisch abschaltet, wenn das System auftaucht. Außerdem wurde das Gehäuse der Prozessoreinheit nach unseren Vorstellungen konzipiert.

Wie sehen Sie die zukünftige Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

Harald Sternberg: Wir planen, die Zusammenarbeit in der Datenauswertung und der Kombination mit anderen Geräten zu intensivieren. Und wir konzipieren bereits ein Forschungsprojekt, bei dem wir verschiedene Sensoren in einem Schwarmverbund einsetzen möchten.

Ellen Heffner: Das Besondere an der Zusammenarbeit ist, dass wir von Fraunhofer IPM nicht ein Black Box-System wie von einer Firma bekommen, an dem wir nichts mehr ändern können. Es ist eher ein gemeinsames Entwickeln und Weiterentwickeln, sodass wir unsere Ideen und

Wünsche im direkten Austausch umgesetzt bekommen.

Welche technologischen Fortschritte erwarten Sie in der Hydrographie?

Harald Sternberg: Das Nächste, was kommen wird, sind autonome Systeme, bei denen der Mensch nur am Rande gebraucht wird. Das wird die Hydrographie revolutionieren. Dabei sehe ich zwei Hauptentwicklungen: erstens die verstärkte Nutzung autonomer Systeme zur Überwachung von technischer Infrastruktur auf großen Flächen wie der

Ostsee. Zweitens das sogenannte Habitat Mapping, bei dem Vegetation und Tierwelt in Gewässern kartiert werden, um die Auswirkungen menschlicher Eingriffe besser zu verstehen. Dafür benötigt man aber auch noch neue Sensoren. Darüber hinaus wird es darum gehen, unterschiedliche Sensordaten zusammenzufassen und als Ganzes auszuwerten.

Ellen Heffner: Durch die aktuelle politische Lage in Europa sehen wir gerade ein immer stärkeres Interesse am Thema Überwachung kritischer Infrastrukturen unter Wasser. Aber es gibt auch »alte«

Themen, die an Bedeutung gewinnen: Z. B. müssen Minen und Munitionsreste aus dem Zweiten Weltkrieg detektiert und kartographiert werden, um sie irgendwann einmal räumen zu können.

Harald Sternberg: Da drängt die Zeit, die Dinge können nicht noch einmal fünfzig Jahre dort unten bleiben, ohne dass etwas kaputt geht.

Frau Heffner, Herr Sternberg, besten Dank für das Gespräch!

Geschäftsfelder

Im Auftrag des Kunden

*LED-Beleuchtung im
Inspektionssystem zur
Inline-Prüfung von Bandware*

Überblick Produktionskontrolle

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

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
- 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 messen dreidimensional an Mehrachssystemen – schnell und mikrometergenau.«

Prof. Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter

Highlights Produktionskontrolle

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Projekt HILaM

Microvias: geregeltes Bohren mit Qualitätssicherung

Ein optisches Verfahren soll in Zukunft den Ablationsprozess bei der Strukturierung von Leiterplatten analysieren und regeln.

Bei der Herstellung moderner Leiterplatten spielt das Laserbohren sogenannter Microvias eine zentrale Rolle. Diese Durchkontaktierungen mit Durchmessern von weniger als 200 Mikrometern werden in mehrlagige Leiterplatten gebohrt – mit hohem Durchsatz und einer Präzision von wenigen Mikrometern. Die Bohrungen bilden die Basis für die nachfolgende Metallisierung der elektrischen Kontakte zwischen den Schichten. Wird zu wenig Material abgetragen, kommt es zu Fehlern bei der elektrischen Verbindung. Eine Qualitätsprüfung der Microvias erfolgt heute

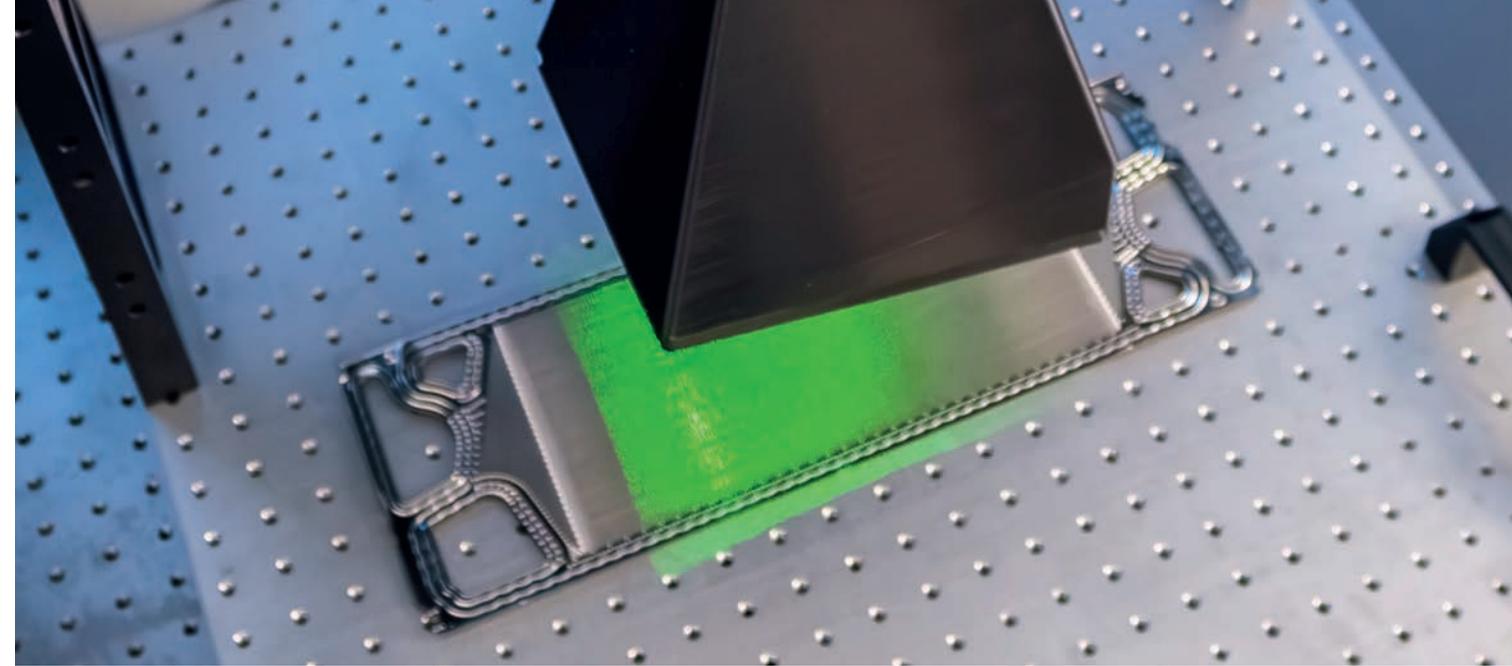
allerdings oftmals nachgelagert und nur stichprobenhaft, z. T. mit zerstörenden Verfahren wie Querschleifen oder elektrischer Funktionsprüfung.

Im Forschungsprojekt HILaM, das im Frühjahr 2024 startete, arbeiten wir gemeinsam mit den Firmen 3D-Micromac AG und Andus Elektronik GmbH an der Entwicklung eines optischen Verfahrens, das den Bohrprozess von Microvias automatisch regeln und somit die Qualität jedes einzelnen Bohrlochs inline prüfen soll. Die Forschenden setzen auf laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS), um den Ablationsprozess von Ultrakurzpuls-Lasern (UKP) pulsaufgelöst und selektiv innerhalb eines Lochs zu analysieren und zu regeln. UKP-Laser werden zunehmend für die Strukturierung von Leiterplatten genutzt, arbeiten jedoch nicht materialelektiv. Da Dicke und Homogenität der Isolationsschichten schwanken, ist eine Prozessregelung

Ein digital-holographischer Sensor misst große Flächen mikrometergenau. Je nach Bauteilgröße kann das System um mehrere Sensorköpfe erweitert werden.

notwendig. Der LIBS-Sensor wird koaxial zum Ablationslaser in das System eingebunden und erfasst die material-spezifische Plasmaemission. Zeigt das Plasmaspektrum Kupfer an, so ist die Isolationsschicht ausreichend abgetragen. Der Regelalgorithmus entscheidet dann, dass der Laser auf die nächste Position ausgerichtet wird.

Projekt HILaM (Hochdynamische Inline-Regelung des Laserbohrens von Microvias), gefördert vom BMFTR (Fördermaßnahme »Photonik für die digital vernetzte Welt – schnelle optische Kontrolle dynamischer Vorgänge«)



Projekt AKS-Bipolar

Digital-holographischer 3D-Sensor sichert Qualität von Bipolarplatten

Ein skalierbarer Sensor prüft metallische Bipolarplatten in der Produktion – vollflächig und mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Mikrometer.

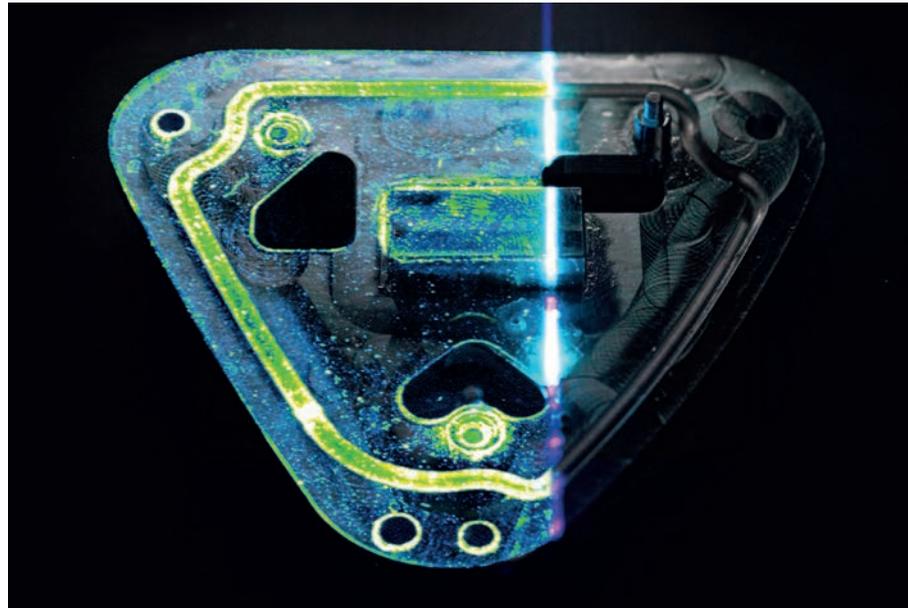
Bipolarplatten (BPP) sind Schlüsselkomponenten in Brennstoffzellen. In einer Brennstoffzelle werden bis zu sechshundert dieser Bauteile zu Stapeln geschichtet und sorgen für die elektrische Verbindung sowie die Verteilung und Ableitung von Reaktionsgasen und Wasser. Metallische BPP werden aus millimeterfeinen Metallfolien beidseitig geprägt. Leicht schwankende Prozessparameter bei der Umformung führen zu Fehlern, die die Funktion und Langlebigkeit der Brennstoffzelle beeinträchtigen.

Solche Fehler konnten bisher nur durch eine nachgelagerte Qualitätskontrolle stichprobenartig erkannt werden. Im Rahmen des Projekts AKS-Bipolar hat Fraunhofer IPM gemeinsam mit der Universität Stuttgart und Industriepartnern Sensortechnik und Simulationsverfahren für eine aktive Prozesskontrolle und Prozessoptimierung bei der Serienfertigung umgeformter BPP entwickelt.

Am Fraunhofer IPM entstand ein digital-holographischer Sensor, der hochgenaue 3D-Daten der Bauteiloberfläche in Echtzeit für die Prozesskontrolle zur Verfügung stellt. Für BPP unterschiedlicher Größe kann der Sensor flexibel angepasst werden, indem mehrere Sensorköpfe zu einem »Matrixsensor« kombiniert werden. Ein solcher Sensor nimmt das gesamte Flussfeld von BPP mit einer Größe von bis zu 400 mm × 150 mm in einem einzigen Messdurchgang auf – in weniger als einer Sekunde und ohne

Verfahren des Sensors. Ein Stitching-Algorithmus setzt die Messdaten der einzelnen Messfelder zu einem Gesamtbild zusammen. Die hochauflösenden Messbilder zeigen Umformfehler ab einer Größe von wenigen Mikrometern. Das System wird seit dem Frühjahr 2025 in einer seriennahen Umgebung am Institut für Umformtechnik IFU der Universität Stuttgart getestet.

Projekt AKS-Bipolar (Aktive Prozesskontrolle in der Serienfertigung), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Trilaterales Erkenntnistransferprojekt)



Organische Substanzen fluoreszieren im Laserlicht. Der F-Scanner rastert die gesamte Bauteiloberfläche in Sekundenschnelle ab und weist selbst geringste Verunreinigungen lückenlos nach.

Qualitätssicherung für die E-Mobilität **Prüfung der Bauteilsauberkeit für Klebe- und Schweißprozesse**

Der F-Scanner von Fraunhofer IPM nutzt Fluoreszenzmesstechnik, um die Sauberkeit von Oberflächen zu prüfen. Zum Einsatz kommt das Inspektionssystem aktuell bei drei Herstellern von E-Auto-Komponenten.

Moderne Fügeprozesse wie Schweißen oder Kleben können sehr belastbare und dauerhafte Verbindungen herstellen. Jedoch reagieren speziell moderne Schweiß-, Klebe- oder Dichtverfahren, die beispielsweise beim Bau von E-Autos genutzt werden, sehr empfindlich auf organische Verschmutzungen.

Bei leistungsfähigen Elektromotoren können enorme Kräfte auftreten.

Schweißstellen und Klebeverbindungen müssen daher hohen Ansprüchen genügen. Um diese zu garantieren, kommt der F-Scanner zum Einsatz und ermöglicht die 100-Prozent-Prüfung von Bauteilen vor dem Schweißen und Kleben. Das Inspektionssystem ist speziell für den Einsatz in Fertigungsumgebungen ausgelegt und verfügt jeweils über ein modulares staubdichtes und spritzwassergeschütztes Gehäuse mit aktiver Kühlung.



Wir können erstmals Barrierschichten unter 10 nm im Produktionstakt prüfen.«

Dr. Benedikt Hauer

Projekt O-KUBA

Optischer Sensor für 100-Prozent-Qualitätskontrolle ultradünner Barrierschichten

Ein neuartiger Inline-Sensor ermöglicht es erstmals, funktionale Beschichtungen auf Kunststoffprodukten schnell, genau und zerstörungsfrei zu prüfen.

Diffusionsdichte Plasma-Beschichtungen auf Verpackungen sorgen dafür, dass unser Kaffee aromatisch bleibt und Nüsse nicht ranzig werden. Ultradünne Schichten kommen zudem in Pharmaprodukten, Haushaltsgeräten, Brennstoffzellen oder auf Fahrzeugteilen zum Einsatz. Sie optimieren z. B. die Benetzbarkeit oder Haftungseigenschaften oder schützen vor Korrosion. Entscheidend für die Funktion der Barrierschichten ist ihre



Der Film-Inspect-Sensor prüft die Qualität ultradünner Schichten, z. B. auf Kunststoffverpackungen, während der Produktion.

Qualität. Bis heute gab es jedoch keine Möglichkeit, die Plasma-Beschichtungen zerstörungsfrei im Produktionsprozess zu prüfen. Aufgrund der Materialeigenschaften sowie der geringen Schichtdicke stoßen sowohl die konventionelle Bildverarbeitung als auch typische optische Messverfahren an ihre Grenzen. Das Prüfsystem Film-Inspect, das Fraunhofer IPM in Kooperation mit der Plasma Electronics GmbH entwickelt hat, ermöglicht nun erstmals eine 100-Prozent-Prüfung im Produktionstakt – auch für dreidimensional geformte Oberflächen.

Der Sensor nutzt die spezifischen und dickenabhängigen infrarot-optischen Eigenschaften der Beschichtung: Mit Infrarotlicht einer passenden Wellenlänge werden Moleküle resonant angeregt, was die Reflexionseigenschaften der Oberfläche beeinflusst. Aus der Intensität

des reflektierten Lichts lässt sich die Schichtdicke bestimmen. Dies funktioniert für Schichten mit einer Stärke von unter 10 nm bis 200 nm. Die Wahl der Wellenlänge ist abhängig vom Beschichtungsmaterial und materialspezifisch konfigurierbar. Der kompakte Film-Inspect-Sensor kann problemlos in die Produktionslinie integriert werden. Für höhere Messgeschwindigkeiten, z. B. in Rolle-zu-Rolle-Prozessen, können mehrere Sensoren gekoppelt werden. Das Team hat ein Array von acht Sensoren in einer Plasma-Beschichtungsanlage beim Projektpartner integriert und erfolgreich getestet.

Projekt O-KUBA (Optische Prozesskontrolle für ultradünne Barrierschichten), gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (Invest BW – Innovation II)

Projekt GUmProDig

Messtechnik schafft Voraussetzung für energiesparende Kaltumformung von Leichtbauteilen

Ein optisches Inline-Inspektionssystem prüft Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität kaltumgeformter Präzisionsbauteile während der Produktion.

Bauteile mit geringen Fertigungstoleranzen werden in der Regel durch Zerspanen hergestellt. Die Methode ist äußerst präzise, aber auch energieintensiv. Eine energiesparende Alternative sind Kaltumform-Verfahren, bei denen es jedoch häufig zu Formabweichungen und Oberflächenfehlern kommt. Eine leistungsfähige Inline-Qualitätskontrolle ist nötig, sollen Präzisionsbauteile per Umformung gefertigt werden. Die Voraussetzung dafür haben Forschende am Fraunhofer IPM im Projekt GUmProDig geschaffen, das 2024 abgeschlossen wurde. Gemeinsam mit der Universität Stuttgart und Industriefirmen entwickelten sie ein optisches Freifall-Prüfsystem, das Maßhaltigkeit und Oberflächentextur kaltumgeformter Bauteile am Ende von mehrstufigen Umformprozessen prüft – mit einer Genauigkeit im Bereich von einigen hundertstel Millimetern.

Ohne zusätzliches Handling werden die Bauteile mit einer Kantenlänge von 0,5 bis 6 cm über ein Förderband in eine Hohlkugel befördert und von 16 Kameras im freien Fall aufgenommen. Eine schnelle Datenauswertung ermöglicht die direkte Rückkopplung in den Produktionsprozess, um Prozessparameter anzupassen.

Zusätzlich zur Qualitätsprüfung wird die individuelle Oberflächenstruktur jedes Bauteils an einer definierten Stelle hochaufgelöst aufgenommen und als Fingerabdruck für die Bauteilrückverfolgung in einer Datenbank registriert ([Track & Trace Fingerprint Technologie](#)). So können die Bauteile später durch erneute Bildaufnahme an der Fingerprint-Stelle identifiziert und Prozessparameter oder Qualitätsmerkmale individuellen Bauteilen zugeordnet werden. Damit legt das System die Grundlage für eine selbstlernende Optimierung von Umformprozessen.

Projekt GUmProDig (Ganzheitliche Digitalisierung von Umform-Prozessen zur Qualitätssteigerung von Leichtbauteilen und ressourceneffiziente Fertigung), gefördert vom BMW (Technologietransfer-Programm Leichtbau)



Dank einer hochgenauen optischen Inline-Qualitätskontrolle können solche Winkel energiesparend in Umformverfahren gefertigt werden.

Projekt FrInSt

Aus der Presse direkt ins Inspektionssystem

Ein optisches Freifall-Inspektionssystem prüft erstmals die Geometrie kleiner 3D-Präzisionsstanzteile in extrem schnellen Stanzprozessen.

Stanzteile sind unscheinbare Player in Hightech-Produkten der Automobil- und Elektronikindustrie, der Telekommunikation oder Medizintechnik. Sie werden aus dünnen Blechen gefertigt und fliegen als Steckverbindungen, Hülsen oder Pins im Sekundentakt aus der Stanzmaschine. Die Qualitätssicherung erfolgt stichprobenartig, z. T. mithilfe von CT-Scans. In Kooperation mit dem Stanzteilehersteller Quittenbaum GmbH hat Fraunhofer IPM erstmals ein System zur Inline-Prüfung im freien Fall realisiert, das die Maßhaltigkeit sämtlicher Teile im Produktionstakt mit einer Genauigkeit im Bereich von 100 Mikrometern prüft. Das System wurde über mehrere Wochen in der Produktion von Steckverbindungen aus Kupferblech getestet, von denen 330 Teile pro Minute gefertigt werden.

Während beim Kooperationspartner die Bauteilzufuhr entwickelt wurde, wurde am Fraunhofer IPM eine Prüfkugel konstruiert und aufgebaut. Mit einem Durchmesser von 40 cm, 16 Kameras mit jeweils 5 MP Auflösung und einer angepassten LED-Blitzbeleuchtung erreicht sie die optimale Auflösung für die Inspektion von Teilen mit einer Größe von bis zu 40 mm. Eine Herausforderung war es, Bildschärfe und Schärfentiefe so auszubalancieren, dass auch kleinste

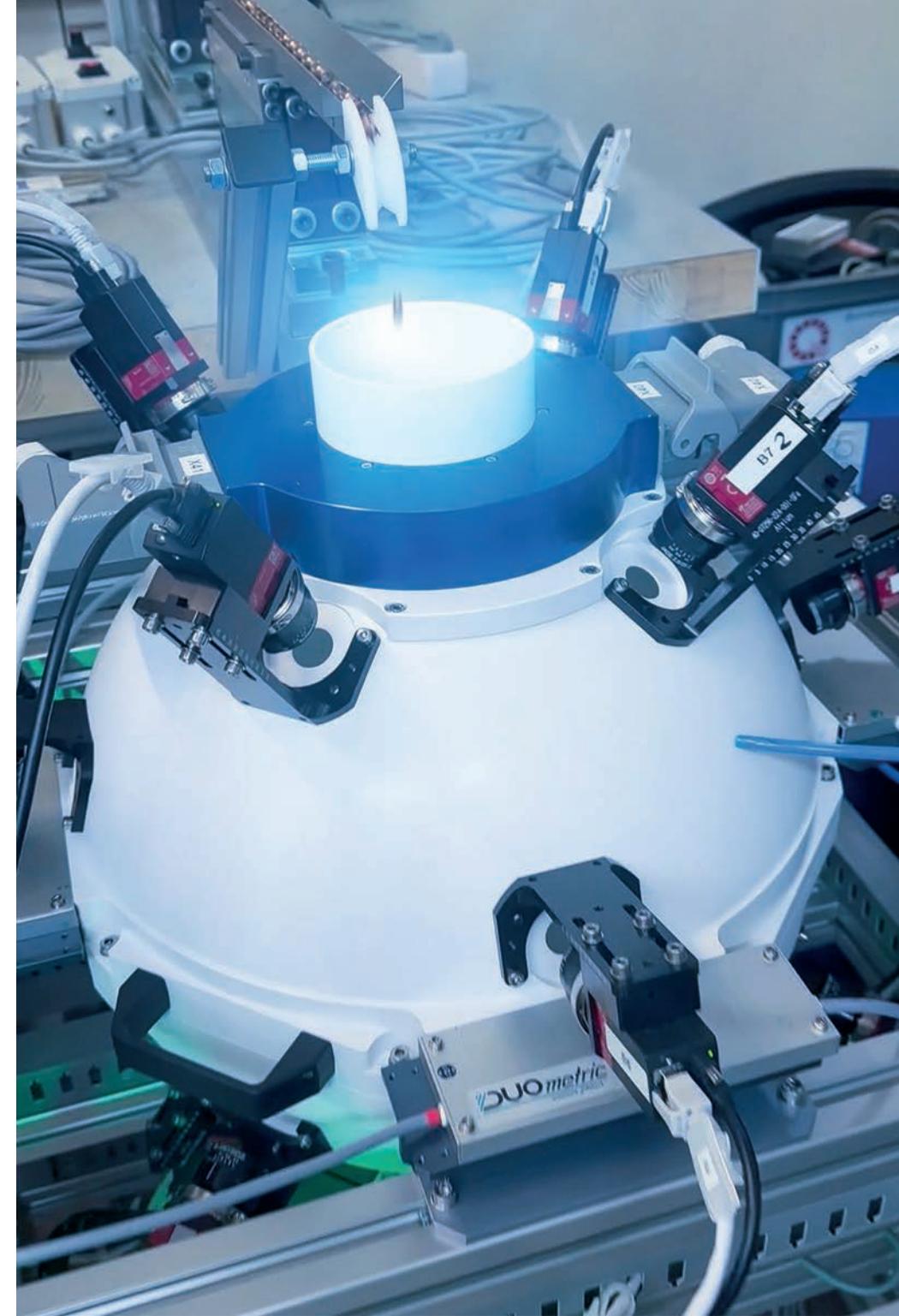
Maßhaltigkeitsfehler detektiert werden. Denn: Bei zunehmender Auflösung verringert sich die Schärfentiefe, ähnlich wie Bilder unter dem Mikroskop nur in einem begrenzten Bereich scharf dargestellt sind. Damit die Datenauswertung mit dem Prüftakt mithalten kann, wurden die Prüfalgorithmik optimiert, die Kameraansteuerung parallelisiert und die Rechenlast von einem Zentralrechner auf fünf zusätzliche Auswerterechner verteilt. In einem Folgeprojekt wollen die Partner gemeinsam untersuchen, wie sich die Oberfläche der Stanzteile effizient prüfen lässt.

FrInSt (Freifall-Inspektionssystem zur 100%-Inline-Kontrolle von komplexen 3D-Präzisionsstanzteilen), gefördert vom BMW (ZIM-Kooperationsprojekt)

Video

[100-Prozent-Qualitätsprüfung im freien Fall](#)

Steckerbauteile im freien Fall: 16 Kameras erkennen Abweichungen vom Sollprofil, die zum Beispiel durch Werkzeugverschleiß oder Stanzabfall in der Werkzeugmaschine verursacht werden.





Der R-Imager leitet die Oberflächenrauheit aus Speckle-Mustern ab, die von zwei kohärenten Lasern unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden.

Projekt SPECKLE-R

Speckle-Muster zeigen, wie rau es auf Oberflächen zugeht

Ein neuartiges optisches System ermöglicht erstmals großflächige Rauheitsmessungen in der Fertigungslinie. Der R-Imager nutzt dafür die Spektrale Speckle-Korrelation.

Oberflächenrauheit ist ein Schlüsselparameter in vielen industriellen Produktionsprozessen. Sie beeinflusst die Effizienz der Prozesse ebenso wie die Qualität von Produkten. Etablierte Methoden zur Rauheitsmessung wie das Tastschnittverfahren sind langsam, sodass lediglich Stichproben möglich sind. Optische

Messverfahren wie z. B. chromatisch-konfokale Abstandsmessung sind zwar schnell, haben jedoch typischerweise einen sehr kleinen Messbereich. Im Rahmen des Projekts SPECKLE-R hat Fraunhofer IPM eine optische Methode entwickelt, die die Rauheit von Oberflächen mithilfe der Spektralen Speckle-Korrelation (SSC) misst. Das auf dem SSC-Verfahren basierende Messsystem R-Imager misst so schnell und robust, dass Inline-Messungen unter realen Produktionsbedingungen möglich sind.

Bei der SSC werden zwei kohärente Laserstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen auf das Messfeld gerichtet, reflektiert und auf eine Kamera abgebildet. Durch die Streuung an der

Oberfläche entstehen zwei unterschiedliche Speckle-Muster. Aus den Unterschieden lassen sich die Oberflächenrauheit und die räumliche Rauheitsverteilung errechnen. Je rauer die Oberfläche und je weiter die Wellenlängen auseinanderliegen, desto unterschiedlicher sind die Speckle-Muster. Die Wahl der Wellenlängen bestimmt also den Messbereich. Dank des vergleichsweise großen Arbeitsabstands von 40 cm kann der Sensor sehr flexibel in unterschiedliche Produktionsumgebungen integriert werden.

Projekt SPECKLE-R (Schnelle, flächige Rauheitsmessung in Produktionslinien durch Ausnutzung des Speckle-Effekts), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)

Industrieprojekt

Es muss rund laufen: Optische Ringprüfung

Chromatisch-konfokale Abstandssensoren erfassen die Geometrie von Ringbauteilen mikrometerngenau in der Produktion.

Runde Bauteile wie Ringe, Zylinder oder Walzen stecken in fast allen mechanischen Systemen – beispielsweise in Verbrennungs- und Elektromotoren und deren Getrieben. Je nach Funktion gelten geometrische Toleranzen von wenigen Mikrometern mit Blick auf Durchmesser, Zylinderform, Konzentrität und Rundlauf der Bauteile. Läuft es nicht »rund«, kommt es zu Vibrationen, Fehlfunktionen oder vorzeitigem Verschleiß. Die Maßhaltigkeit industriell gefertigter Ringe wird heute zumeist taktil geprüft. Die Prüfmethode liefert sehr genaue Ergebnisse, ist aber mit Taktraten von über einer Minute häufig zu langsam für die Inline-Prüfung.

Fraunhofer IPM hat für einen Industriehersteller von Ringbauteilen ein schnelles optisches Prüfsystem entwickelt, das Edelstahlringe für Elektromotoren mit ca. 20 cm Durchmesser während der Produktion optisch auf geometrische Maßhaltigkeit prüft. Für die Inspektion werden die Prüflinge mithilfe eines Roboters im Produktionstakt auf einen luftgelagerten Drehtisch platziert und pneumatisch zentriert. Die Dauer für das Einlegen, Messen und Entnehmen eines Rings beträgt weniger als fünf Sekunden. Insgesamt sechs chromatisch-konfokale Abstandssensoren tasten die Metallringe auf je einer Messebene von außen, innen und oben ab,

während sich der Ring auf dem Drehtisch um 360° dreht. Dabei werden Messdaten in 0,1° Schritten erfasst. Aus den Daten werden Durchmesser, Rundheit, Zylinderform, Konzentrität und auch die Höhe des Bauteils berechnet. Um die geforderte Messgenauigkeit von weniger als 5 Mikrometern und eine Wiederholgenauigkeit von weniger als 1 Mikrometern zu erreichen, kommt es vor allem auf die exakte Positionierung des Prüflings auf dem Prüfteller an. Mechanisch ist dies mit der geforderten Genauigkeit von weniger als einem Mikrometer im Produktionstakt praktisch nicht möglich. Daher wird eine mögliche Dezentrierung rechnerisch kompensiert.

Das Prüfsystem läuft seit März 2024 in der Produktion des Herstellers und ist für den 24-Stunden-Betrieb ausgelegt. Es kann für spezifische Messaufgaben und Anforderungen bei der Ringprüfung individuell angepasst werden.

Fokus Bergbau und Rohstoffe

Optische Messsysteme machen Prozesse in der Rohstoffwirtschaft effizienter, sicherer und nachhaltiger.

Die Nachfrage nach Rohstoffen wie Lithium oder mineralischen Zuschlagstoffen für Beton wie beispielsweise Kies steigt weltweit – getrieben durch die Energiewende, den Ausbau der Elektromobilität und die Transformation der Bauwirtschaft. Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Prozesssicherheit. Fraunhofer IPM entwickelt innovative optische Messsysteme, die Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette bei der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung unterstützen – von der Gesteinsklassifikation im Steinbruch bis zur präzisen Lithiumkonzentrationsanalyse in Geothermie- und Recyclinganlagen.

Gesteinsklassifikation in Echtzeit

Ein am Institut entwickeltes kamerabasiertes System zur automatisierten Analyse von Gesteinsproben kann zum Beispiel auf Förderbändern eingesetzt werden. Das System erfasst Partikelgrößen und -formen und klassifiziert sie in Siebgrößenklassen – auf einer Messfläche von 780 × 890 mm² und mit einer Auflösung von 0,4 mm pro Pixel. Schüttgut ab 4 mm Größe wird zuverlässig erkannt.

Ein KI-gestützter Algorithmus segmentiert dabei die Steine im Bild und berechnet aus Länge, Breite und geschätzter Tiefe die Kubizität. So lassen sich nicht

nur Anzahl und Größe zu großer Steine erkennen (Überkornanteil), sondern auch Rückschlüsse auf die Effizienz von Brech- und Siebprozessen ziehen. Die Auswertung erfolgt in wenigen Sekunden – ein entscheidender Vorteil für den Einsatz in rauen, dynamischen Umgebungen wie Steinbrüchen oder Aufbereitungsanlagen.

Inline-Monitoring für die Lithiumextraktion

Ein weiteres Anwendungsfeld optischer Messtechnik ist die Lithiumgewinnung. Fraunhofer IPM hat ein Inline-Monitoring-Verfahren entwickelt, das den



Lithiumgehalt in Flüssigkeiten wie Thermalsole oder Recyclinglösungen in Echtzeit analysiert – ohne Probennahme, Verdünnung oder chemische Reagenzien.

Das System basiert auf Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS): Ein Kurzpuls-laser erzeugt ein Plasma in der Flüssigkeit, dessen Lichtspektrum Rückschlüsse auf die Elementzusammensetzung erlaubt. Neben der Lithiumkonzentration können auch Natrium-, Kalium-, Magnesium- und Calciumgehalt quantifiziert werden. Dies sind wichtige Parameter für die Prozessregelung bei der Direkten Lithiumextraktion (DLE) oder beim Batterierecycling. Ziel ist es, die Lithiumextraktion aus

Tiefengeothermie-Solen effizienter, ressourcenschonender und wirtschaftlicher zu gestalten. Erste Tests an einer Pilotanlage waren bereits erfolgreich.

Viele Anwendungen für optische Messtechnik

Die Einsatzmöglichkeiten optischer Messverfahren wie LIBS, bildgebenden Systemen oder anderen Lasermessverfahren in der Rohstoffwirtschaft reichen weit über die Lithiumanalyse und Gesteinsklassifikation hinaus. So lassen sich beispielsweise mineralische Zuschlagstoffe für Beton oder Asphalt hinsichtlich ihrer Kornform,

Fürs fachgerechte Recycling von Betonschutt muss die Materialzusammensetzung bekannt sein. Per Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS) gelingt die Analyse in Echtzeit – direkt auf dem Förderband.

Reinheit oder des Feuchtegehalts charakterisieren – wichtige Parameter für die Qualität und Verarbeitbarkeit der Materialien. Auch in der Fördertechnik leisten optische Systeme wertvolle Dienste: Sie erkennen Fremdmaterialien wie Holz, Metall oder Kunststoff in Echtzeit und ermöglichen so eine automatisierte Sortierung und Prozesssicherheit.

Bei der Aufbereitung von Erzen, Schlacken oder Recyclingmaterialien können Inline-Messsysteme die Qualität kontinuierlich überwachen und so Ausschuss reduzieren. Bei der geologischen Exploration wiederum lassen sich Bohrkern mit hochauflösender Bildverarbeitung analysieren, um Gesteinsarten, Schichtfolgen oder Einschlüsse zu identifizieren. Auch Sorptionsprozesse in der chemischen Rohstoffaufbereitung profitieren von optischer Messtechnik: Optische Sensoren liefern präzise Daten zur Konzentration von Ziel- und Störstoffen, auf deren Grundlage die Prozessführung geregelt werden kann.

Kreislaufwirtschaft mit Sekundärrohstoffen

Ein weiteres wachsendes Anwendungsfeld ist die Klassifikation von Sekundärrohstoffen in der Kreislaufwirtschaft. Ob Altglas, Bauschutt oder Batterierückstände – oft sind es optische Systeme, die eine materialspezifische Erkennung überhaupt erst möglich machen und so zur effizienten Rückgewinnung wertvoller Ressourcen beitragen. Fürs fachgerechte Recycling von Betonschutt muss z. B. die Materialzusammensetzung bekannt sein. Per Laserinduzierter Plasmaspektroskopie gelingt die Analyse in Echtzeit.

All diese Anwendungsbeispiele zeigen das Potenzial optischer Messtechnik, etablierte Prozesse effizienter, sicherer und nachhaltiger zu gestalten. Die maßgeschneiderten optischen Systeme von Fraunhofer IPM sind ein Schlüssel zur Digitalisierung, Automatisierung und für mehr Nachhaltigkeit in der Rohstoffwirtschaft.



Unsere optischen Messsysteme liefern präzise Daten in Echtzeit – so stärken wir die Wettbewerbsfähigkeit unserer Partner in Bergbau, Rohstoffgewinnung und -recycling.«

*Prof. Dr. Daniel Carl,
Abteilungsleiter Produktionskontrolle*

Produktionskontrolle | Messen & Veranstaltungen

Joining in Car Body Engineering
27.02.–28.02.2024
Rochester, USA

Gezeigt wurde der F-Scanner 2D zur lückenlosen Reinheitskontrolle von Oberflächen.

Hannover Messe
22.04.–26.04.2024
Stand BMW – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Ausgestellt wurde ein optisches Inspektionssystem, das Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität kaltumgeformter Bauteile während der Produktion prüft.

Control
23.04.–26.04.2024
Stand Fraunhofer-Geschäftsfeld Vision

Wir präsentierten Innovationen im Bereich der Fertigungskontrolle.

Surface Technology
04.06.–06.06.2024
Standbeteiligung beim Verlag WoTech

Wir stellten Innovationen zur flächigen Detektion von Verunreinigungen oder Beschichtungen auf 3D-Oberflächen und zur Inline- Vermessung sehr dünner Beschichtungen vor.

Quantum Effects
08.10.–09.10.2024
Gemeinschaftsstand
Baden-Württemberg

Gezeigt wurden quantensensorische Messverfahren inklusive erster Anwendungen für die Materialprüfung. Leonhard Schmieder hielt einen Vortrag zum Thema »Quantum Sensing for Industry by Fraunhofer IPM«.

EuroBLECH
22.10.–25.10.2024
Fraunhofer-Stand

Gezeigt wurden Systeme zur Inline-Prüfung und ein Konzept zur markierungsfreien Rückverfolgung.

Online-Forum Produktionskontrolle
06.03.2024
Veranstaltung am Fraunhofer IPM

Neue Lösungen für die Inline-Messtechnik

Geplant für 2025

all about automation
25.02.–26.02.2025

Control
06.05.–09.05.2025

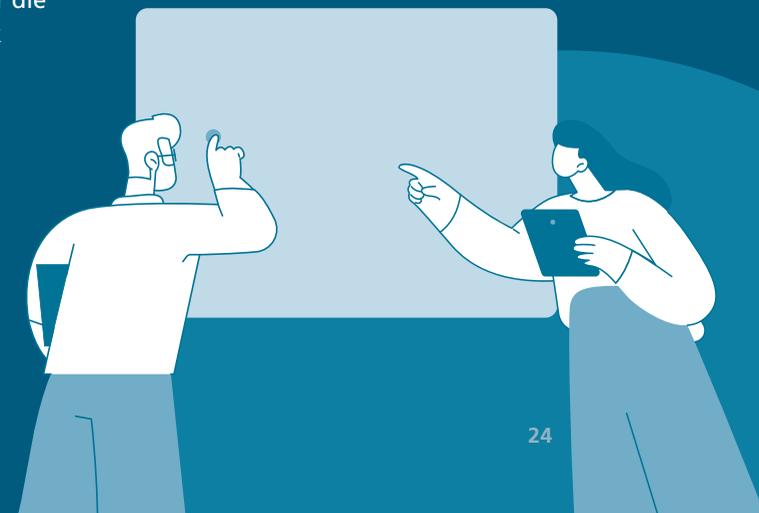
Technologietag Fraunhofer Vision
24.09.–25.09.2025

Industrie-Workshop Produktionskontrolle
25.09.–26.09.2025

Quantum Effects
07.10.–08.10.2025

parts2clean
07.10.–09.10.2025

Online-Forum Produktionskontrolle
Verschiedene Termine
Fortsetzung unserer Seminarreihe



Überblick Objekt- und Formerfassung

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

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, 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



**Wir messen an Land, unter
Wasser und aus der Luft.
Dafür entwickeln wir spezielle
LiDAR-Systeme.«**

Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter

Highlights Objekt- und Formerfassung

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Projekt FlexiSKan Flexibles System zur 3D-Kanalinspektion

Fraunhofer IPM und Fraunhofer IOSB entwickeln gemeinsam ein adaptives Echtzeit-Sensorsystem zur hochgenauen 3D-Vermessung von Kanälen, das auch bei kleinem Durchmesser einsetzbar ist.

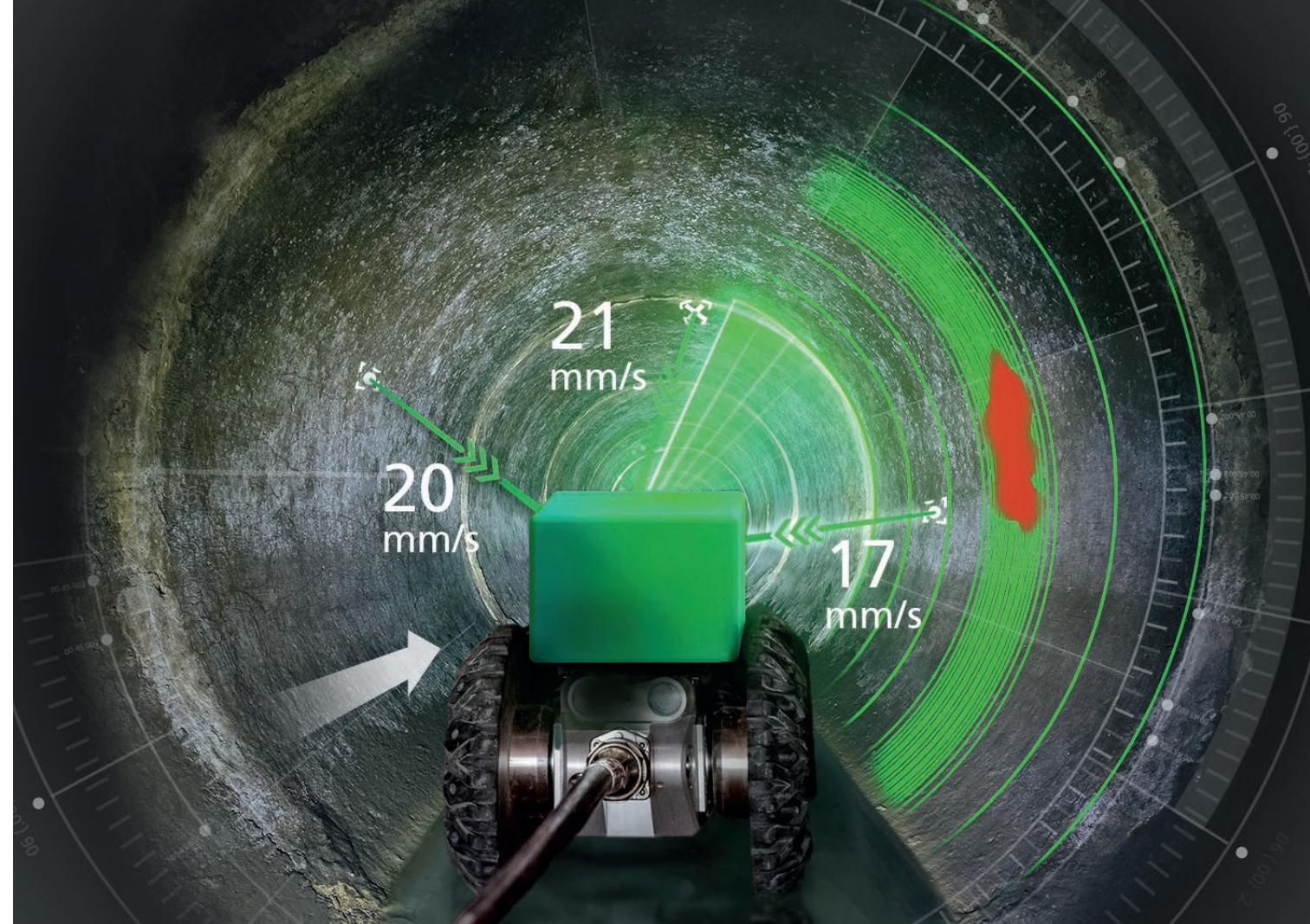
Mit einer Länge von mehr als 600.000 Kilometern gehört das Kanalnetz in Deutschland zur kritischen Infrastruktur. Teile der Entwässerungsanlagen sind über 100 Jahre alt und marode. Starkregen und langanhaltende Trockenperioden setzen das Kanalnetz in jüngster Zeit zusätzlich unter Stress. In welchem Zustand die Kanäle sind, wird aktuell mithilfe von Kameras und visueller Begutachtung in meist längeren Intervallen ermittelt. Im Projekt FlexiSKan,

das Anfang 2025 startete, entwickeln Fraunhofer IPM und Fraunhofer IOSB ein Messsystem, das erstmals eine hochgenaue 3D-Vermessung des Rohrinnein ermöglichen soll. Auf Grundlage der Daten werden Schäden in Zukunft nicht nur automatisiert erkannt, sondern auch quantifiziert. So lassen sich Sanierungsmaßnahmen optimal ableiten.

Ein Großteil der Kanäle hat einen Durchmesser von unter 40 cm. Ziel des Teams ist deshalb ein kompaktes Demonstratorsystem, das auch Kanäle mit kleinem Durchmesser von einer autonomen Roboterplattform aus vermessen kann. Bestehen wird es aus einem zu entwickelnden Laserscanner, einem Kamerasystem und einer inertialen Messeinheit (IMU). Die Verortung des unterirdisch operierenden Systems wird mangels GNSS außerdem durch eine laserbasierte Geschwindigkeitsmessung gestützt. So wird selbst in

homogenen Abschnitten ohne Hilfsstrukturen eine exakte Verortung des Systems und damit eine korrekte 3D-Erfassung der Kanäle möglich. Der Clou: Dank Echtzeit-Datenverarbeitung können Scaneinheit und Fahrgeschwindigkeit nach Bedarf an die Umgebung angepasst werden, sodass optional nur kritische Stellen hochauflösend erfasst werden. Dadurch sind höhere Fahrgeschwindigkeiten und reduzierte Datenmengen möglich. Das detaillierte digitale 3D-Modell hilft nicht nur bei der Inspektion. Auf Basis der 3D-Daten lassen sich auch sogenannte Schlauchliner exakt vorkonfektionieren. Diese sind mit Kunstharz getränkte Glasfasergewebe, die als Innenverkleidung in schadhafte Kanäle eingezogen werden und eine teure Komplettsanierung überflüssig machen, was die Kosten senkt und CO₂ einspart.

Projekt FlexiSKan (Flexibles System zur Kanalinspektion), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Prepare-Projekt)



Automatisierte Schadensinspektion und Sanierungsplanung: FlexiSKan soll Kanäle hochgenau in 3D vermessen.



Unser Ziel ist ein kompaktes, robotergestütztes System, das auch Kanäle mit kleinem Durchmesser inspiziert.«

Dr. Dominik Merkle, Gruppenleiter



Noch leistungsfähiger als die Vorgängermodelle: Die Geotechnik GmbH nutzt das neueste Modell des Mobile Urban Mapping Systems.

Solide Planungsgrundlage für energetische Sanierungen: LiDAR-Sensor und Wärmebildkamera nehmen Messdaten zur Energieeffizienz von Gebäuden im Vorbeifahren auf.



Messfahrzeug für die Geotechnik GmbH Effizientere 3D-Datenerfassung dank Hard- und Software-Upgrade

Das Mobile Urban Mapping System MUM wurde rundum erneuert und ist seit dem Frühjahr 2024 für die Geotechnik GmbH zur 3D-Kartierung von Straßen und Straßenumgebungen im Einsatz.

Der Vermessungsdienstleister nutzt das Messfahrzeug, um 3D-Planungsdaten für die kommunale Infrastrukturplanung zu generieren, u. a. für die Planung des Glasfaserausbaus der Deutschen Telekom. Das Mapping-Fahrzeug misst bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 80 km/h und liefert konsistente, texturierte und georeferenzierte Punktwolken, in denen auch schmale Objekte wie z. B. Pfosten und Straßenschilder oder

Oberflächentexturen erkennbar sind. Das modular aufgebaute Messfahrzeug ist mit einem augensicheren Laserscanner, vier hochauflösenden Kameras und zwei Panoramakameras für die Erfassung der Umgebung ausgestattet. Für die neue Fahrzeugversion haben die Entwickler vor allem die Onboard-Software rundum erneuert und das Zusammenspiel von Hard- und Software weiter optimiert. Neu sind auch die Kameras: Sie werden über spezielle Netzwerkkarten ausgelesen; die Datenprozessierung erfolgt direkt auf den Karten statt wie bisher auf einem separaten Rechner. Dies macht das Gesamtsystem nicht nur leichter und energieeffizienter, sondern reduziert auch die Komplexität und führt zu einer insgesamt effizienteren und zuverlässigeren Datenerfassung. Auch die Nutzerfreundlichkeit und die »Remote Connectivity« für die Fernwartung und Fehleranalyse wurden optimiert.



Das Fahrzeug bringt uns mehr Stabilität in der Datenerfassung, höhere Datensicherheit und Verarbeitungsgeschwindigkeit.«

Norbert Kuck,
Geschäftsführer Geotechnik GmbH

Projekt LaSanGe Messdaten für mehr Tempo bei der energetischen Gebäudesanierung

Ein multispektraler LiDAR-Sensor nimmt Daten zu geometrischen und thermischen Eigenschaften von Gebäuden im Vorbeifahren auf.

Wie hoch der Sanierungsbedarf eines Gebäudes ist, schätzen Fachleute ab, indem sie Fassade, Dach, Fenster, Wände und Materialien vor Ort in Augenschein nehmen. Doch wie kann es gelingen, den energetischen Zustand von Gebäuden mit weniger Aufwand und vor allem objektiv zu ermitteln? Dieser Frage geht ein Forschungsteam im Rahmen des Projekts LaSanGe nach, das im Frühjahr 2024 startete. Im Rahmen des Projekts entwickeln die Forschenden ein optisches Mobile-Mapping-System, welches eine

umfassende Datengrundlage für die Planung energetischer Sanierungen liefern soll. Dies wird beispielsweise Bauträgern oder Kommunen helfen, Sanierungsbedarfe genauer abzuschätzen und Bauvorhaben effizienter zu planen.

Kernelement des Messsystems ist ein neuartiger multispektraler LiDAR-Sensor, der sowohl geometrische Maße als auch thermische Eigenschaften von Fenstern und Fassaden großflächig und effizient erfasst. Dazu nutzt der Sensor zwei Laser unterschiedlicher Wellenlänge. Da die optischen Eigenschaften von Fenstern stark wellenlängenabhängig sind, erwarten die Forschenden, dass sich aus dem Verhältnis der rückgestreuten Signale eindeutige Aussagen zu Beschichtungstyp, Anzahl der Glasscheiben usw. treffen lassen. Ergänzend sollen Wärmebildkameras zum Einsatz kommen. Das Messergebnis steht als

3D-Punktwolke zur Verfügung, die mit Daten zu den thermischen Eigenschaften des Gebäudes angereichert ist. Die räumlich referenzierten Messdaten können in Geoinformationssysteme einfließen und ermöglichen es, den Gebäudezustand über längere Zeiträume und Intervalle zu dokumentieren.

Projekt LaSanGe (Laserscanning für die beschleunigte Sanierung von Gebäuden), finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat. Gefördert im Rahmen des

»Strategiedialog bezahlbares Wohnen und innovatives Bauen«.



Mobile Mapping

Hohe Präzision bei extremen Temperaturen: Unsere Sensoren vermessen Straßen in Kuwait

Ein kuwaitischer Baudienstleister nutzt ein Multisensor-System von Fraunhofer IPM zur Straßenzustandserfassung.

Erstmals wird eines unserer Mobile-Mapping-Systeme zur Zustandserfassung von Straßen im Emirat Kuwait zum Einsatz kommen. Ein Pilotsystem bestehend aus unserem Pavement Profile Scanner PPS und einer inertialen Messeinheit wird ab Juni 2025 zunächst die Quer- und Längsebene von Straßen erfassen. Später sollen weitere Sensoren zur Erfassung der Oberflächenqualität und Umgebung der Straße integriert werden.

Der auf einem Messfahrzeug installierte Laserscanner PPS tastet die Straßenoberfläche mit einem augensicheren Laserstrahl über eine Breite von etwa vier Metern ab und bestimmt den Abstand zur Fahrbahn nach dem Prinzip der Phasenverschiebung. So entsteht ein hochauflösendes 3D-Bild der Straßenoberfläche, das bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 80 km/h Unebenheiten im Submillimeterbereich erkennt. Der PPS ist der einzige von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zugelassene Laserscanner. Durch die Kombination mit einer hochwertigen inertialen Messeinheit lässt sich auch die Längsebene der Straße vermessen.

Eine Kamera auf dem vorderen Fahrzeugdach dokumentiert die Messfahrten und erlaubt eine zusätzliche visuelle Begutachtung der Straße.

Eine besondere Herausforderung für die Messtechnik sind die klimatischen Bedingungen im Wüstenstaat Kuwait: Das System muss auch bei Temperaturen von bis zu 55 °C mit hoher Präzision messen. Alle Sensoren werden daher aktiv gekühlt. Die Integration der multimodalen Sensorik auf dem Messfahrzeug übernehmen unsere Entwickler vor Ort in enger Kooperation mit dem kuwaitischen Partner, der das Fahrzeug bereitstellt. In einem zweiten Schritt soll das System um zwei senkrecht nach unten gerichtete Kameras und eine Beleuchtung für die detaillierte Erfassung der Straßenoberfläche erweitert werden. Weiterhin sollen der Lichtraumprofil-Scanner CPS und zusätzliche Kameras montiert werden, um die Straßenumgebung zu erfassen und Daten für die Bauplanung bereitzustellen.



Bei uns haben sie das leistungsfähigste Messsystem gefunden.«

Dr. Philipp von Olshausen,
Gruppenleiter

Eine Software ermittelt Straßenbreiten auf Basis von 3D-Punktwolken mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern.



Projekt KI4Straßenbreite

Parkraum effizienter und genauer planen

Eine Software leitet Informationen zur Straßenbreite automatisiert aus digitalen Karten ab und optimiert so die Parkraumbewirtschaftung.

Parkraum ist in dicht besiedelten Städten hart umkämpft. Behörden möchten daher möglichst genau wissen, wie viele Parkplätze in einzelnen Straßen zur Verfügung stehen. Die Fahrbahnbreite ist dabei eine relevante Größe, denn sie bestimmt, ob Fahrzeuge in einer Straße ein- oder beidseitig parken können. Behördenmitarbeitende extrahieren die Werte in der Regel durch persönliche Begehungen oder manuelle Ableitung z. B. aus Luftbildern. Ein Softwareprototyp, den unsere Forschenden für

die Stadt Freiburg entwickelt haben, ermittelt die Straßenbreite automatisiert und flächendeckend. Die Daten können für eine schnellere und genauere Parkraumplanung und weitere Anwendungen genutzt werden.

Die digitalen Planungskarten basieren auf turnusmäßig erhobenen Vermessungsdaten aus Mobile-Mapping-Befahrungen. Dies sind georeferenzierte Bilddaten und 3D-Punktwolken. Bordsteine sind als seitliche Begrenzung der wichtigste Marker, d. h. die Grenze der Fahrbahn lässt sich in den Messdaten über die Variation der Höheninformation erschließen. Um die Position der Bordsteine zu erkennen, kombinieren die Forschenden geometrische Methoden mit KI-basierten Ansätzen: In der Punktwolke werden lokale Variationen im Höhenwert gesucht, um Kanten wie z. B. Bordsteine zu finden.

Zusätzlich wird aus der Punktwolke ein künstliches Vogelperspektivenbild (Orthofoto) berechnet. Bei diesem ist neben der Farbinformation zusätzlich für jedes Pixel die Höhe bekannt. Das virtuelle Fluten (Floodfilling) des so entstandenen Tiefenkartenabschnitts zeigt die tieferliegende Fahrbahn sowie deren Begrenzung an. Zusätzlich wird auf dem farbigen Orthofoto über ein neuronales Netz der Fahrbahnrand segmentiert. Durch smarte Auswahl und Kombination der Ergebnisse der Algorithmen ermittelt die Software die Straßenbreite in einem regelmäßigen Raster mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern.

[Digitalisierungsstrategie der Stadt Freiburg: FREIBURG. DIGITAL. GESTALTEN.](#)



Multispektrale Laserscans zeigen den Feuchtegehalt (hier rot) von Boden und Bäumen an und ermöglichen somit Aussagen über die Baumvitalität.

Projekt TreeVitaScan

Baumvitalität effizient überwachen – für mehr Sicherheit an Verkehrswegen

Ein umfassendes Datenmodell in Kombination mit KI-gestützter Datenauswertung soll das Baummonitoring für Kommunen und Verkehrswegebetreiber effizienter machen.

Umstürzende Bäume oder herunterfallende Äste sind eine Gefahr für den Menschen, ziehen aber auch enorme wirtschaftliche Schäden nach sich. Baumstürze sind nach Angaben der Deutschen Bahn schon heute der häufigste Grund für Streckensperrungen. Ein neuartiges laserbasiertes Messverfahren in Kombination mit KI-gestützter Datenauswertung soll das Baummonitoring in Zukunft effizienter und präziser machen. Im Rahmen von TreeVitaScan erproben wir gemeinsam mit der Universität Freiburg einen Prozess, mit dem sich engmaschig ein umfassendes Datenmodell des aktuellen Zustands einzelner Bäume automatisiert erstellen lässt.

Neben Wetter- und Umweltdaten sowie Baumkatasterdaten sollen die Feuchtewerte einzelner Bäume mit in das neue Datenmodell einfließen. Diese Feuchte-daten erfasst ein multispektraler 3D-LiDAR-Scanner von einem Straßen- oder Schienenfahrzeug aus. Die Scannerdaten sind einfacher zu interpretieren als Kamerabilder – ein entscheidender Vorteil, da so auch Echtzeit-Anwendungen möglich sind. Inwiefern sich der Vitalitätszustand aus den LiDAR-Daten automatisiert ableiten lässt, ist eine der Fragen, der wir im Projekt nachgehen. Gemeinsam mit dem Team der Universität Freiburg werden zudem Strategien entwickelt, um die unterschiedlichen Datenströme zu strukturieren sowie zeitlich und räumlich zu fusionieren – und so eine geeignete Basis für die Datenmodellierung zu schaffen.

Projekt TreeVitaScan (Erfassung der Baumvitalität durch multispektrale LiDAR-Daten zur Minimierung von Sturmschäden), gefördert vom BMV (Innovationsinitiative mFUND)

Projekt BAU-DNS

Mehr Tempo bei der Gebäudesanierung: mobiler Scanner erfasst Fassaden in 3D

Ein handgehaltenes Multisensorsystem erfasst Fassaden millimetergenau und liefert Daten für die industrielle Fertigung passgenauer Fassadenbauteile.

Der Bausektor ist für rund 40 Prozent aller CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Wie effizient und ressourcenschonend wir bauen und Gebäude sanieren, ist also entscheidend fürs Klima. Im Fraunhofer-Leitprojekt BAU-DNS arbeiten mehrere Fraunhofer-Institute daran, Produktivität und Kosteneffizienz im Bausektor zu steigern – durch konsequente Nutzung digitaler Daten, geschlossene Materialkreisläufe und einen erhöhten

Liegt gut in der Hand: Die Sensoreinheit wiegt lediglich 1800 Gramm. So können auch große Gebäude bequem und zügig erfasst werden.

Grad an industrieller Fertigung. Vor allem die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden soll dabei deutlich schneller vorankommen als bisher. Im Rahmen des bis Ende 2026 laufenden Projekts entwickeln wir ein 3D-Messsystem, das Gebäudefassaden mit Millimetergenauigkeit erfasst. Die Messdaten sollen in digitale Gebäudewillinge einfließen und beispielsweise eine passgenaue industrielle Vorfertigung von Wärmedämmmodulen ermöglichen.

Die Aufgabe für die Forschenden ist anspruchsvoll: Mehrere Kameras, LiDAR-Modul, inertielle Messeinheit, GNSS, Barometer, Recheneinheit und Funkmodul – all diese Komponenten müssen in ein kompaktes, leichtes System integriert werden. Das Scanner-System soll Fassaden millimetergenau aus einer Entfernung von einigen Metern erfassen und dabei unabhängig von den Lichtverhältnissen

zuverlässige Messergebnisse liefern. Ein Prototyp wurde bereits entwickelt und erste Daten wurden aufgenommen. Bis zum Projektabschluss arbeitet das Team vor allem an der Echtzeitdatenverarbeitung und -visualisierung: So soll beispielsweise eine Vollständigkeits- und Fehleranalyse durchgeführt werden, um zeitaufwändige Wiederholungsmessungen zu vermeiden. Ziel ist es, die Daten mithilfe von KI zu segmentieren und semantisch anzureichern, d. h. definierte Objektklassen wie Fenster, Türen oder Wände zu markieren. Der Datenstrom soll über WiFi oder einen 5G-Datenlink in eine Cloud übertragen werden und in BIM-Modelle einfließen.

Projekt Bau-DNS, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)





Projekt 3D-BIRD-WATCH
Vogelschutz an Windenergieanlagen durch 3D-Tracking

Ein Messsystem soll in Zukunft gleichzeitig Vögel schützen und Fehlabschaltungen von Windenergieanlagen verhindern: Es bestimmt die Art und 3D-Flugbahn von Vögeln in der Umgebung von Windrädern.

Der massive Ausbau von Windenergieanlagen ist wichtig für die Energiewende, birgt jedoch Risiken für Vögel, die mit den Rotorblättern kollidieren können. Für den Vogelschutz sind technische Vorrichtungen nötig, die die Anlagen abschalten, sobald sich ein Vogel nähert. Eine Vergrämung der Tiere, etwa durch Schall oder Licht, wird in Deutschland von Naturschützern oftmals kritisch gesehen.

Am Markt existierende Systeme zur Vogel-detektion sind entweder bodengebunden oder nicht ausreichend präzise, sodass Windkraftanlagen sehr häufig unnötig abgeschaltet werden – auf Kosten von Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

Ziel des 2024 gestarteten Projekts 3D-BIRD-WATCH ist ein Messsystem, das die 3D-Position von Vögeln über Distanzen von mehr als 500 Metern präzise im Raum bestimmt und gleichzeitig die Vogelart erkennt. Die Forschenden setzen dabei auf eine Kombination von Weitwinkel- und Telekameras sowie ein Laser-Abstandsmessmodul. Das System ist so kompakt, dass es sich leicht am Turm der Windenergieanlage montieren lässt. Die schwenkbare Telekamera und das LiDAR-Modul werden der Bewegung des Vogels nachgeführt. Anhand der Daten,

die während des Trackings aufgenommen werden, ist es möglich, die Trajektorie mit einer Präzision von 0,5 Metern zu messen. Aus den Kamerabildern soll zudem die Vogelart mittels künstlicher Intelligenz bestimmt werden, sodass die Anlage nur dann abgeschaltet wird, wenn eine geschützte Vogelart in die Rotorblätter zu geraten droht. Mit drei solcher Messmodule könnte eine Windenergieanlage in Zukunft vollständig überwacht werden.

Projekt 3D-BIRD-WATCH (Vogelschutz an Windenergieanlagen mittels 3D-Tracking), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)

Wann wird es gefährlich für den Vogel? Kameras und LiDAR-Technik sollen in Zukunft Vögel erkennen und ihre Flugbahn präzise bestimmen. So schaltet das Windrad nur dann ab, wenn tatsächlich eine Kollision droht.

Projekt TWISTER

Extremwetter präziser vorhersagen dank 3D-Wind-LiDAR

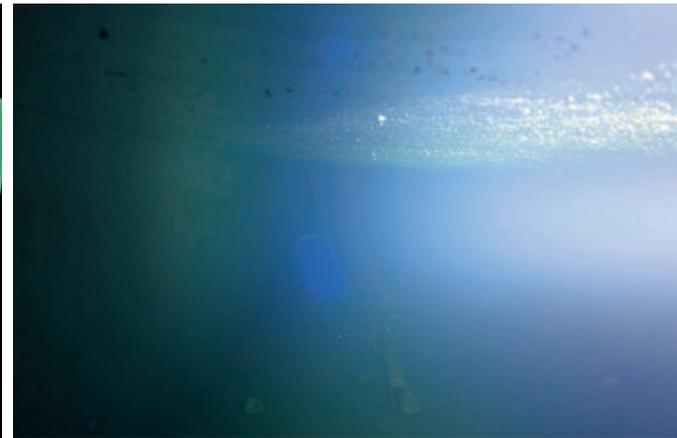
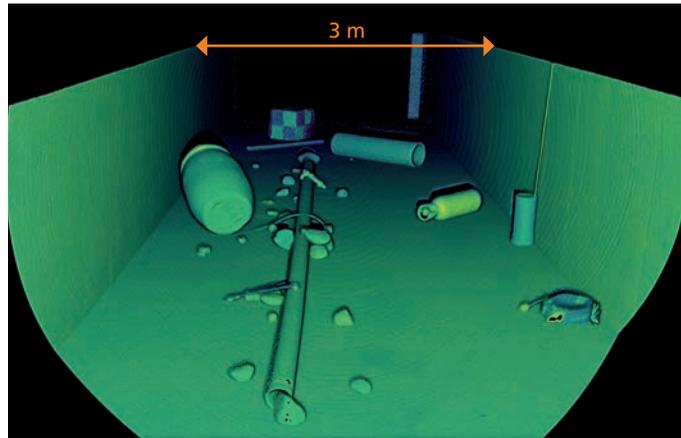
Ein neuartiges Wind-LiDAR-System misst dreidimensionale Windvektoren hochaufgelöst in direkter Wolkenumgebung. Dadurch lassen sich atmosphärische Turbulenzen und ihr Einfluss auf das lokale Wetter besser verstehen.

Woher der Wind weht und was sich in den Wolken abspielt, beeinflusst das Wetter auf der Erde. Forschende des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation (MPI-DS) untersuchen Turbulenzen in der Atmosphäre und die Mikrophysik von Wolken, um diesen Einfluss besser zu verstehen und so Extremwetter präziser vorhersagen zu können. Ein neuartiges 3D-Wind-LiDAR-System, das ein Team am Fraunhofer IPM im Rahmen des gemeinsamen Projekts TWISTER entwickelt hat, soll dabei helfen, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzen präziser zu messen.

Wind-LiDAR-Systeme nutzen den sogenannten Doppler-Effekt: Laserlicht wird ausgesendet und an sich bewegenden Aerosolen zurückgestreut. Aus der Frequenzverschiebung des reflektierten Signals lässt sich die Windgeschwindigkeit ableiten. Das Problem: Da nur ein Laserstrahl genutzt wird, messen die Systeme ausschließlich entlang der Strahlrichtung. So lässt sich eine Richtung vermessen, auch über sehr große Distanzen; die Messdaten geben jedoch keinen Aufschluss über die räumliche Dynamik des Windes und haben eine Auflösung von mehreren 10 Metern.

Um auch kleinskalige Turbulenzen messen zu können, welche für die Wolkenbildung wichtig sind, haben Forschende am Fraunhofer IPM ein leichtes, hochpräzises Wind-LiDAR entwickelt. Drei optische Messköpfe sind an einem dreieckigen Rahmen installiert und über eine Faseroptik mit dem zentralen Lasermodul verbunden. So können 3D-Windvektoren auf kurze Distanzen mit einer Auflösung von einem Meter gemessen werden. Der Aufbau ist an einem vom MPI-DS betriebenen Helikite installiert und kann somit Messdaten in direkter Umgebung der Wolken erfassen. In Höhen bis zu 1000 Metern misst das LiDAR-System in einer Entfernung von ca. 15 Metern, sodass der Ballon selbst die Messungen nicht beeinflusst.

Projekt TWISTER (Turbulent Weather in Structured TERRain), gefördert im Rahmen des Kooperationsprogramms von Fraunhofer-Gesellschaft und Max-Planck-Gesellschaft



Testmessungen in trübem Wasser zeigen eindrucksvoll, wie genau der Laserscanner misst. Zum Vergleich ein Bild derselben Szene, aufgenommen mit einer Unterwasserkamera bei aktiver Beleuchtung (r.).

Projekt CoLiBri
Neue Sensorplattform für maritimes Geomapping

Ein LiDAR-Sensor und ein einheitlicher Prozess für die Datenauswertung machen die Erfassung von Unterwasser-Infrastruktur und die Kartierung flacher Gewässer einfacher und effizienter.

Anschläge auf Tiefseekabel und Pipelines haben die Bedeutung von Unterwasser-Infrastruktur ins öffentliche Bewusstsein gerückt. Detaillierte Inspektionen von Unterwasser-Bauwerken, aber auch hochauflösende Kartierungen von Küstengewässern sind ebenso wichtig wie das Bauwerksmonitoring oder Geomapping an Land. Eine leichte und kompakte Sensorplattform in Kombination mit einer einheitlichen Prozesskette für die Datenanalyse macht maritime Messungen nun einfacher, kostengünstiger und effizienter. Sensorik und Analysesoftware wurden von Fraunhofer IPM gemeinsam mit dem

Finnish Geospatial Research Institute FGI und dem Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg LZN im Projekt CoLiBri entwickelt.

Zwei Sensorsysteme, basierend auf der gleichen LiDAR-Einheit, wurden aufgebaut und erfolgreich getestet: eines für die hochauflösende 3D-Vermessung von Unterwasser-Infrastruktur von einem Schiff oder Unterwasserfahrzeug aus; ein zweites für drohnenbasierte bathymetrische Messungen von Küstenstreifen oder Binnengewässern. Der Unterwasser-Laserscanner ermöglicht eine bisher unerreichte Kombination aus Messreichweite und Auflösung bis in den Millimeterbereich. Der Bathymetrie-Scanner misst mit infrarotem und grünem Licht. Die simultane Verwendung von zwei Lichtfarben in Kombination mit einem Laserstrahldurchmesser von lediglich wenigen Zentimetern ermöglicht besonders präzise bathymetrische Messungen. Auch Vegetation neben und im Wasser erfasst das System. Die Messdaten können direkt im Messmodul

in Echtzeit ausgewertet werden – ohne softwareseitige Nachbearbeitung. So erhalten Nutzende Live-Feedback zu den Messungen. Komplexere Analysen sind im Post-Processing auf Basis der vollständigen Wellenformdaten jederzeit nachträglich möglich. Die enge Partnerschaft mit dem FGI wird auch über das Projekt hinaus fortgesetzt werden, um gemeinsam Testmessungen zu evaluieren und die Sensorik weiter zu verbessern.

Projekt CoLiBri (Collaborative LiDAR to Monitor Infrastructure in the Water and at the Shoreline), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (IMPULS-Projekt)

Whitepaper
Technologien für die Zustandserfassung von Bahninfrastruktur

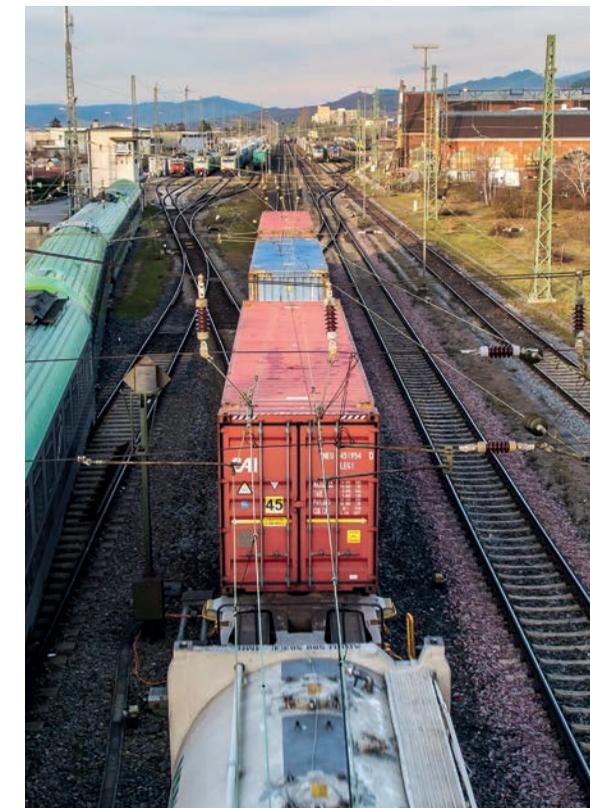
Ein Fachbeitrag gibt einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik beim Bahnzustandsmonitoring und zeigt auf, welche Innovationen in Zukunft eine Rolle spielen.

Immer mehr Passagiere und Güter, hohe Fahrgeschwindigkeiten, schwere Achsen und Waggons und nicht zuletzt Klimaextreme setzen der Bahninfrastruktur zu – in Deutschland und auch global. Engmaschige Zustandskontrollen sind wichtig, um Schäden an der Gleisinfrastruktur frühzeitig zu entdecken und Instandhaltungsmaßnahmen vorausschauend zu planen. Eine Vielzahl an optischen Messsystemen basierend auf Photogrammetrie, Laserscanning oder Faseroptiken ist für das Zustandsmonitoring im Einsatz: Sie messen berührungslos, schnell und präzise und müssen dabei mit harschen Umgebungsbedingungen, einem breiten Temperaturbereich, variierenden Lichtverhältnissen und unterschiedlichen Reflexionsgraden zurechtkommen.

In einem Whitepaper geben Kira Zschiesche und Alexander Reiterer einen detaillierten Überblick über etablierte optische Messverfahren für das Zustandsmonitoring und vergleichen am Markt verfügbare Systeme zur Vermessung von Bahninfrastruktur. Die Autoren beschreiben den klaren Trend zur Automatisierung der Bahnmesstechnik in den vergangenen Jahren und zeigen darüber hinaus auf, welche Innovationen den Bereich in

Zukunft prägen werden: KI-basierte Strategien für die Datenauswertung spielen eine wichtige Rolle, ebenso wie kollaborative Robotik und miniaturisierte Multi-sensorsysteme, die auf drohnenbasierten Plattformen oder auch auf Regelzügen unterwegs sind. Auch Technologien für die Detektion tieferliegender Materialschäden sind in der Entwicklung.

Fachbeitrag:
[Optical Measurement Systems for Monitoring Railway Infrastructure – A Review](#)



Fokus Smart City

Eine mobile Sensorbox, installiert auf öffentlichen Verkehrsmitteln oder Nutzfahrzeugen, stellt Geodaten für digitale urbane Zwillinge in Echtzeit bereit.

Urbane digitale Zwillinge werden zu einem immer wichtigeren Instrument der Stadtplanung. Der Bau von Gebäuden, Straßen und Versorgungsleitungen, die Abwehr von Gefahren durch Starkregen und Hitze oder die Routenplanung bei Baustellen und Veranstaltungen – all diese und noch viele weitere Szenarien lassen sich anhand von digitalen 3D-Stadtmodellen planen, visualisieren und simulieren. Davon profitieren auch die Bürgerinnen und Bürger: Digitale Modelle erleichtern die Teilhabe an kommunalen Entscheidungen, indem sie z. B. Bauvorhaben plastisch und interaktiv erfassbar machen.

Daten sind der Rohstoff für digitale Stadtmodelle: Wie gut das Modell ist, hängt von der Qualität und Aktualität der Daten ab, die in das virtuelle Abbild einfließen. Das Grundgerüst

eines Stadtzwillings bilden georeferenzierte Daten – Messdaten also, die im Raum verortet sind. Sie stammen aus unterschiedlichen Quellen wie z. B. aus digitalen Stadtplänen, Luftaufnahmen oder aus Befahrungen mit Messfahrzeugen, die das Stadtgebiet mithilfe von Laserscannern und Kameras vermessen. Die von Laserscannern erzeugten Punktwolken bilden ein dreidimensionales virtuelles Abbild der Umgebung, in dem jeder Messpunkt eindeutig im Raum verortet ist. Anhand der räumlichen Koordinaten kann eine Vielzahl weiterer Informationen – z. B. Klima- und Verkehrsdaten oder auch sozioökonomische Informationen – mit den Vermessungsdaten in Beziehung gebracht werden. So entsteht ein digitaler urbaner Zwilling, der für unterschiedliche Fragestellungen der Stadtplanung genutzt werden kann.

Digitale Daten: engmaschig erfasst und in Echtzeit bereitgestellt

Im Projekt MuSiS*, das im Rahmen des Förderprogramms Invest BW vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg gefördert wird, hat Fraunhofer IPM ein neues Konzept zur Datenerfassung und Datenanalyse für digitale urbane Zwillinge umgesetzt. Es schafft die Voraussetzung dafür, hochgenaue digitale Infrastrukturdaten engmaschig zu erfassen und instantan für digitale Stadtmodelle zur Verfügung zu stellen. Die Idee dahinter: Statt turnusmäßiger Vermessungen, die heute üblicherweise im Abstand von ein bis zwei Jahren stattfinden, erfassen Sensoren die Umgebung tagtäglich von Bussen, Müllfahrzeugen, Taxis oder Straßenbahnen aus, während diese durch die Stadt zirkulieren.



Inside the box: Robuste Messtechnik auf engstem Raum

Dem MuSiS-Forschungsteam ist es gelungen, die nötige komplexe Messtechnik in einer kompakten Box unterzubringen, die nicht viel größer ist als zwei Schuhkartons. Das »Mobile Urban Mapping System MUM mini« lässt sich mit Saugnapfen auf dem Dach von Fahrzeugen

befestigen. In der zirka 20 Kilogramm schweren, robusten Box sind zwei Laserscanner, mehrere Kameras, Positionierungseinheit, Rechen- und Speichermedien sowie die Stromversorgung untergebracht. Alle Komponenten sind sorgfältig kalibriert, sodass die Daten von Kamera und Laserscanner präzise fusioniert werden können.

»Plug & measure«: Die mobile Sensorbox MUM mini ist universell auf Fahrzeugen einsetzbar.

Echtzeit-Daten, ausgewertet mit Hilfe von KI

Urbane Räume kontinuierlich zu vermessen ist nur sinnvoll, wenn die Messdaten in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Damit dies gelingt, werden die Daten bereits auf dem Fahrzeug vorverarbeitet und reduziert – denn auf dem Weg durch die Stadt nehmen die Sensoren eines einzigen Messfahrzeugs jeden Kilometer mehrere Gigabyte an Daten auf. Sämtliche Messdaten werden vor dem lokalen Speichern automatisiert anonymisiert und umgehend über das 5G-Netz direkt an ein Geoinformationssystem übertragen. KI-basierte Algorithmen reichern die Datenströme semantisch an und erstellen die nötigen Datenmodelle für den digitalen Zwilling.

Nach zwei Jahren Entwicklungsarbeit ist MUM mini bereit für den Roadtrip: In mehreren Pilotprojekten sammelt das multimodale Messsystem Geodaten in unterschiedlichen Städten. In Heidelberg wurde die Sensorbox bereits auf Müllfahrzeugen getestet. Seit Frühjahr 2025 bis Ende 2026 ist sie für die

Stadt Wuppertal im Einsatz, um Daten für den Aufbau des **DigiTal Zwillings** zu sammeln. Auch die Stadt Freiburg plant Messfahrten für die digitale Stadtentwicklung.

Aufbereitet für spezifische Anwendungsfälle und Nutzergruppen werden die Daten in Zukunft über Apps oder Webportale zugänglich gemacht. Wie spezifisch die Fragestellungen sein können, zeigen zwei Smart-City-Projekte, an denen wir ebenfalls arbeiten: Gemeinsam mit der Stadt Freiburg entwickeln wir einen Softwareprototyp, der die Straßenbreite automatisiert aus Mobile-Mapping-Daten ableitet und so wertvolle Informationen für die Parkraumbewirtschaftung liefert (s. S. 28). Mit einem multispektralen Laserscanner erfassen wir in Zukunft die Vitalität von Bäumen im Vorbeifahren – für mehr Sicherheit an Verkehrswegen (s. S. 29).

**MuSiS (Multimodaler digitaler Zwilling für eine sichere und nachhaltige Stadt)*



Mit unserer Sensorbox nehmen wir permanent Daten der Umgebung auf. Fast wie eine Smart Watch, nur eben für die Stadt.«

Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter

Objekt- und Formerfassung | Messen & Veranstaltungen

OCEANOLOGY International

12.03.–14.03.2024

Eigener Stand

Gezeigt wurden Laserscanning-Technologien zur effizienten Inspektion von Unterwasser-Infrastruktur und zur Vermessung der Topografie küstennaher Gewässer.

INTERGEO

24.09.–26.09.2024

Eigener Stand

Wir präsentierten unsere Software 3D-AI zur KI-basierten, automatisierten Auswertung von Mobile-Mapping-Daten als interaktiven Live-Demonstrator.

InnoTrans

24.09.–27.09.2024

Gemeinschaftsstand Fraunhofer-Allianz Verkehr

Im Fokus standen unser System zur Vermessung von Fahrdrachtlage und Fahrdrachtabnutzung CIS-LS sowie das Software-Framework 3D-AI zur KI-basierten Analyse von Messdaten.

Hydro

05.11.–07.11.2024

Konferenzstand

Das Unterwasser LiDAR-System ULI war als Exponat auf der Konferenz zu sehen. Außerdem referierten Jannis Gangelhoff und Dr. Christoph Werner über ein kompaktes Messsystem für bathymetrische Messungen sowie über die laserbasierte Inspektion von Unterwasser-Bauwerken.

5. MoLaS Technology Workshop

27.11.–28.11.2024

Workshop am Fraunhofer IPM

Expertinnen und Experten auf dem Gebiet des mobilen Laserscannings informierten über den aktuellen Stand der Technik beim 3D-Mapping mit LiDAR und Monitoringsysteme für die Infrastruktur.

Geplant für 2025

BAU

13.01.–17.01.2025

22. Oldenburger 3D-Tage

04.–05.02.2025

Keynote-Vortrag zum Thema »Von anwendungsspezifischen 3D-Sensorsystemen zu nutzbaren Daten: Eine praxisnahe Perspektive« von Prof. Dr. Alexander Reiterer

INTERGEO

07.10.–09.10.2025



Überblick Gas- und Prozesstechnologie

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

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 mittels Heatpipes und Peltierelementen sowie an kalorischen Wärmepumpen.



Miniaturisierte Sensoren und Systeme



Spektroskopische Verfahren



Wärmetransport per Heatpipe



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

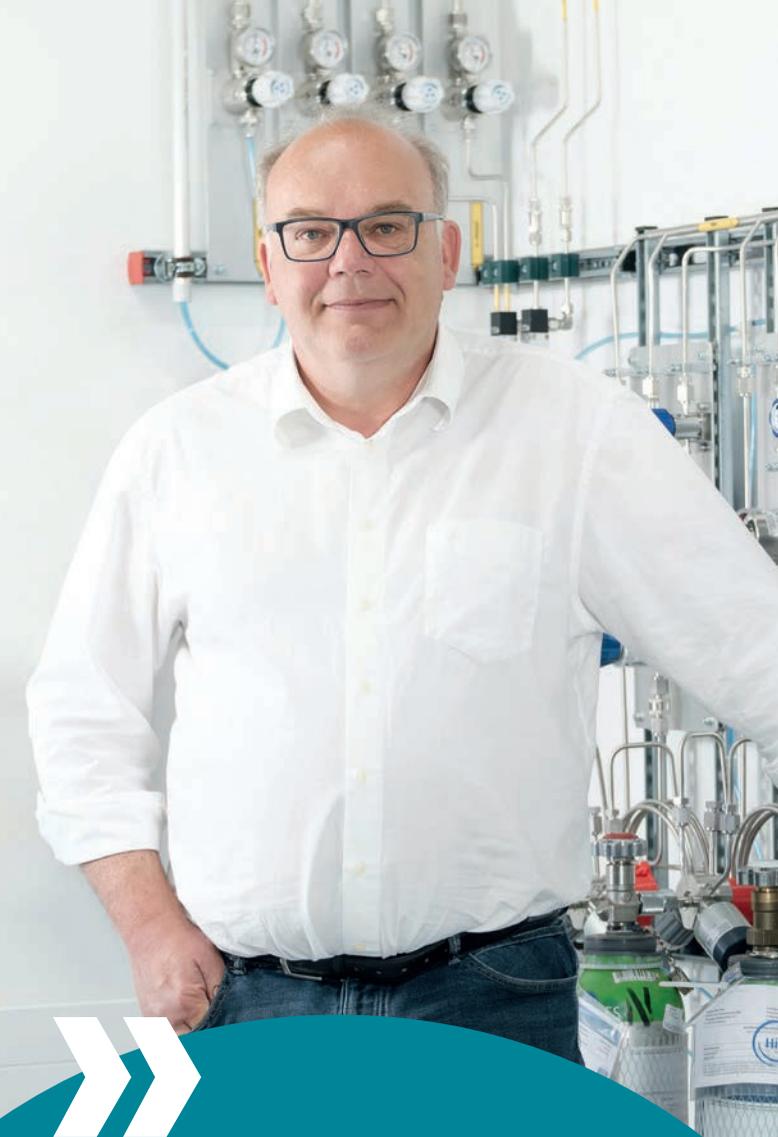
- Laserspektroskopische Gasdetektion
- Ferndetektion von Gasen
- Raman-Spektroskopie
- Auswerteverfahren

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 elektrokaloischer Systeme
- Simulation thermischer Prozesse
- Entwicklung und Charakterisierung von Heatpipes für das thermische Management
- Quantenmagnetometrie zur kontaktfreien Durchflussmessung



Wir entwickeln stationäre und mobile Wasserstoff-Sensoren. So machen wir die H₂-Infrastruktur sicher für die Zukunft.«

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter

Highlights Gas- und Prozesstechnologie

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Projekt KOGAST

Schadstoffdetektion durch neuartiges Sensorsystem

Ein wartungsarmes opto-chemisches Messsystem soll Schadstoffe in der Luft zuverlässiger als bisher detektieren.

Schadstoffe in der Luft, darunter Feinstaubpartikel, Stickoxide (NO_x) und Ozon (O₃), gefährden die menschliche Gesundheit und die Umwelt. In der EU wird die Luftqualität daher staatlich überwacht. Aktuelle Messgeräte nutzen meist elektrochemische Gassensoren,

die aufgrund von Querempfindlichkeiten und Umgebungsfaktoren jedoch nicht ausreichend genau messen. Zudem ist der Wartungsaufwand hoch.

Im Projekt KOGAST, das Ende 2024 abgeschlossen wurde, haben wir gemeinsam mit dem Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS) der Universität Bremen und der Adolf Thies GmbH ein opto-chemisches Sensorsystem zur Detektion von NO₂ und O₃ entwickelt, das durch kostengünstige Feinstaubsensoren ergänzt wird. Das System basiert auf LEDs, Photodetektoren und gassensitiven Schichten. Farbwechsel von speziellen

Farbstoffen, die mit dem Zielgas reagieren, werden zur Messung genutzt. Ein optischer Wellenleiter detektiert die Farbänderung. Eine steuerbare Kappe schützt die Sensoren vor Umwelteinflüssen, wenn sie nicht gerade messen. Das Sensorsystem umfasst mehrere Module, die sukzessive aktiviert werden, sobald der Farbstoff einer gassensitiven Schicht verbraucht ist. Dieses Konzept verlängert die Lebensdauer und reduziert den Wartungsaufwand. Die Integration eines Feinstaubsensors und weiterer Wettersensoren soll die Verfälschung der Messung verhindern und eine umfassende Luftqualitätsanalyse ermöglichen.

Projekt KOGAST (Wartungsarme Schadstoff-Detektion mit kolorimetrischen Gas- und adaptierten Streulicht-Feinstaubsensoren), gefördert vom BMW (ZIM-Projekt), Projektträger AiF GmbH

Schematische Darstellung des KOGAST-Sensorsystems mit verschiedenen Farbstoffschichten, steuerbarer Sensorkappe und LED sowie Photodetektoren zum Auslesen der gasabhängigen Farbumschlagsreaktion.

Das laserbasierte Gasmesssystem ist in einem tragbaren Koffer untergebracht. Die Gasflüsse in den Messkammern geben Aufschluss über Bodenaktivität und Düngewirkung.



Projekt ESKILA

Feldforschung: Robustes Spektrometer misst Lachgasemissionen

Ein mobiles Gasmesssystem überwacht Lachgaskonzentrationen auf dem Feld und ermöglicht so eine effiziente Dosierung von Stickstoffdünger.

Die Düngung mit Stickstoff sorgt für hohe Erträge in der Landwirtschaft. Der Erntesegen ist jedoch mit Nachteilen erkauft: Bei der Stickstoffdüngung entsteht gesundheits- und umweltschädliches Ammoniak (NH₃) sowie das Treibhausgas Distickstoffoxid (N₂O), auch bekannt als Lachgas. Zudem treiben steigende Energie- und Rohstoffpreise die Kosten für Düngemittel in die Höhe. Statt wie bisher mit der Gießkanne, soll Dünger daher in Zukunft gezielt in der Nähe der Wurzeln ausgebracht werden. Spezialfirmen wie die RAUCH Landmaschinenfabrik GmbH, unser Partner im Projekt ESKILA, arbeiten an Techniken für die sogenannte Depotdüngung, bei der

Langzeit-Stickstoffdünger punktuell oder über Bodenschlitze in tiefere Bodenschichten injiziert wird. Dabei werden deutlich weniger Treibhausgase freigesetzt als bei der flächigen Ausbringung. Ein mobiles photoakustisches Spektrometer, das wir im Rahmen von ESKILA entwickeln, misst insbesondere die Konzentration von Lachgas bei der Depotdüngung und ermöglicht so einen effizienten Düngereinsatz. In einer Reihe von Feldversuchen wurden verschiedene Düngestrategien auf unterschiedlichen Parzellen an typischen Pflanzensorten verglichen. Pro Düngeperiode werden noch bis zum Projektende im Herbst 2025 an bis zu 60 Messstellen Daten gesammelt und ausgewertet.

Das laserbasierte Gasmesssystem misst N₂O-Konzentration mittels photoakustischer Spektroskopie im ppb-Bereich direkt auf dem Feld ohne Probenaufbereitung – innerhalb weniger Sekunden. Aufbauend auf einem Demonstrator aus dem Fraunhofer-Leitprojekt »Cognitive Agriculture« entwickelte das Team ein kostengünstiges und robustes Messsystem, das

dank neuartiger Interbandkaskadenlaser mit sehr geringer Leistung auskommt und somit im Akkubetrieb mobil eingesetzt werden kann. Auf den Versuchsflächen befinden sich gezielt platzierte Messkammern, die mit dem mobilen Gasmesssystem nach einem bestimmten Schema mehrfach aufgesucht werden. Bei jeder Messung wird über wenige Minuten der Konzentrationsanstieg von N₂O mitgeschrieben und über den Verlauf anschließend der lokale Gasfluss ermittelt.

Projekt ESKILA (Effiziente Stickstoffdüngung mit minimalem Klima-Impact für eine moderne Landwirtschaft), Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (Invest BW)

Projekt Brennsorik

Photoakustischer Sensor misst, wieviel Wasserstoff im Erdgas steckt

Ein kompakter, kostengünstiger Sensor vereinfacht die Messung von Gaskonzentrationen in Erdgas-Wasserstoff-Gemischen.

Was genau ist drin im Erdgas, das noch immer einen Großteil unserer Häuser heizt? Diese Frage kann heute nur mit aufwändiger, teurer Messtechnik und stichprobenhaft beantwortet werden. Sie ist aber umso dringlicher, als zunehmend Wasserstoff und Biogas ins Erdgasnetz eingespeist werden. Dies verändert die Konzentrationen der einzelnen Gasbestandteile und damit den Brennwert des Gases, der Grundlage für den Gaspreis ist. So hat die Hauptkomponente von Erdgas, Methan, einen dreimal höheren Brennwert als Wasserstoff. Zudem beeinflusst die Gaszusammensetzung den Verbrennungsprozess. Damit dieser optimal läuft, muss die Sauerstoffzufuhr ans Gasgemisch angepasst werden. Im Projekt Brennsorik hat Fraunhofer IPM einen kompakten, kostengünstigen Sensor entwickelt, mit dem sich die Gaskonzentrationen in Erdgas-Wasserstoff-Gemischen analysieren lassen – ohne den hohen Aufwand für den Betrieb eines Prozess-Gaschromatographen.

Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der resonanten Photoakustik: Das Gas in einer Messzelle wird mit gepulstem IR-Licht bestrahlt. Bei der Absorption des Lichts werden die Gasmoleküle angeregt; die dabei entstehende Wärme erzeugt

gasspezifische akustische Wellen, die mithilfe eines MEMS-Mikrofons ausgelesen werden. Für die Bestimmung der im Gas enthaltenen Komponenten Methan, Wasserstoff, Ethan und CO₂ verwendet das Team IR-LEDs mit drei unterschiedlichen Wellenlängen sowie einen NIR-Laser. Da der Konzentrationsanteil von Wasserstoff nicht einfach optisch gemessen werden kann, wird die gasabhängige Resonanzfrequenz als Summenparameter gemessen. Ein Algorithmus, in den alle Messwerte einfließen, berechnet die einzelnen Konzentrationsanteile des Gasgemischs. Mit diesem Verfahren ist es möglich, sowohl Erdgaskonzentrationen als auch Wasserstoffkonzentrationen von 0 bis 100 Prozent zu messen. Anhand der Konzentrationsanteile kann der Brennwert berechnet werden.

Projekt Brennsorik (Brennwert-Sensorik für Erdgas-Wasserstoff-Gemische, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt))



Je mehr Wasserstoff wir ins Erdgas mischen, desto niedriger der Brennwert. Mit unserem photoakustischen Sensor können wir die Gaszusammensetzung mit deutlich weniger Aufwand als bisher analysieren.«

Dr. Johannes Herbst, Projektleiter



Ein laserbasiertes photoakustisches Messsystem im Messfahrzeug saugt Umgebungsluft an. So wird geprüft, ob Erdgas aus unterirdischen Leitungen entweicht.

Mobile Leckagedetektion

Laserbasiertes photoakustisches Messsystem spürt Leckagen im Erdgasnetz auf

Ein kompaktes Messsystem misst Methanemissionen empfindlich und schnell vom fahrenden Fahrzeug aus.

Das Treibhausgas Methan (CH₄) rückt zunehmend in den Fokus der Klimapolitik. Neben der Landwirtschaft emittiert auch der Energiesektor beträchtliche Mengen an Methan, denn CH₄ ist Hauptbestandteil von Erdgas. Mit einer neuen Verordnung hat die EU dem Methanausstoß im Energiesektor den Kampf angesagt. Gasnetzbetreiber müssen ihre Infrastruktur ab 2025 engmaschig auf Leckagen überprüfen. Für die Schütz GmbH Messtechnik hat Fraunhofer IPM ein Messsystem für die fahrzeugbasierte Lecksuche entwickelt. Die Leckageprüfung von Erdgasleitungen wird mit der mobilen Messtechnik effizienter, genauer und kostengünstiger.

Die Firma Schütz entwickelte das System zu einem marktfähigen Produkt weiter. Das Leak Detection and Emission Monitoring (LDEM 2000) ist kaum größer als ein Schuhkarton und kann dank seiner kompakten Abmessungen, des geringen Gewichts und der geringen elektrischen Leistungsaufnahme flexibel in ein Fahrzeug integriert werden.

Am Markt vorhandene Systeme messen zwar sehr empfindlich, die Messtechnik ist jedoch komplex in der Anwendung und teuer. Fraunhofer IPM setzt als Alternative auf resonante Photoakustik mithilfe von Interband-Kaskadenlasern im mittleren infraroten Wellenlängenbereich. Die Vorteile dieser Messtechnik sind hohe Robustheit und geringe Komplexität. Das Messsystem saugt Umgebungsluft in eine Messzelle. Das in der Luft vorhandene Methan absorbiert einen Teil des Laserlichts. Die Absorption erzeugt indirekt eine Druckwelle, die mithilfe des akustischen Resonators (Messzelle) verstärkt

und mit einem Mikrofon gemessen wird. Das sehr kleine Zellvolumen ermöglicht eine Reaktionszeit von weniger als 0,4 Sekunden. Potenziell störende Flussgeräusche wurden durch ein spezielles Hantel-Design verringert.

Um sicherzustellen, dass eine erhöhte Methankonzentration auch tatsächlich ein Erdgasleck anzeigt – und nicht etwa auf rülpsende Kühe am Wegesrand zurückgeht – wird neben Methan auch die Erdgaskomponente Ethan gemessen. Zusätzlich zur Gaskonzentration werden Windgeschwindigkeit und Richtung aufgezeichnet, denn durch windbedingte Luftbewegungen kann das Leckagegas auch aus mehreren Metern Entfernung gemessen werden. So können auch Netzbereiche, die nicht unmittelbar an der Fahrbahn liegen, z. B. Hausanschlüsse, im Vorbeifahren bei bis zu 50 km/h erfasst werden – mit einer Konzentrationsauflösung von 6ppb, also sechs Teilchen auf eine Milliarde Teilchen.

Projekt TransHyDE

Wasserstoff-Infrastruktur der Zukunft: Technologien, Maßnahmen und Forschungsbedarf

In einem Positionspapier erörtern Fraunhofer-Forschende Technologien, Maßnahmen und den Forschungsbedarf für den Aufbau einer sicheren Wasserstoff-Infrastruktur.

Die Publikation »Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft« entstand unter Federführung von Fraunhofer IPM. Sie gibt einen Überblick über die H₂-Tauglichkeit von Werkstoffen, Speicherkonzepte sowie Technologien für die Sicherheit und Qualitätsüberwachung bei der Produktion und Verteilung von Wasserstoff.

Um das Erdgasnetz und die lokale Infrastruktur am Verbrauchspunkt sicher zu machen, bedarf es standardisierter Verfahren, nach denen Rohrleitungswerkstoffe und Komponenten geprüft

werden, argumentieren die Forschenden. Dazu haben sie vorhandene Prüfverfahren evaluiert und den Rahmen für notwendige neue Prüfmethode und Richtlinien abgesteckt.

Ebenfalls untersucht wurden verschiedene Speichermethoden für Wasserstoff. Das Papier gibt einen umfassenden Überblick über die Vor- und Nachteile von Druckbehältern, Untertagespeichern sowie flüssiger und chemischer Speicherung des Gases. Das größte Speicherpotenzial sehen die Autorinnen und Autoren im geologischen Untergrund. Dazu müssen jedoch neben ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten auch zahlreiche technische Fragen geklärt werden.

Weitere Forschung wird auch nötig sein, um wasserstoffführende Systeme permanent auf Leckagen zu überwachen und die Qualität des Gases zu prüfen. Das Papier stellt erste technische Lösungen vor, die im Rahmen des

Wasserstoff-Leitprojekts TransHyDE entstanden sind – darunter ein am Institut entwickeltes Raman-Spektrometer für die selektive H₂-Detektion und einen photoakustischen Sensor zur Echtzeit-Messung der Wasserstoff-Reinheit.

Projekt TransHyDE (TransHyDE_FP2: Sichere Infrastruktur), gefördert vom BMFTR (Wasserstoff-Leitprojekte), Projektträger Jülich (PtJ)

Fachpublikation:
[TransHyDE. Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft](#)

Projekt HySEAT

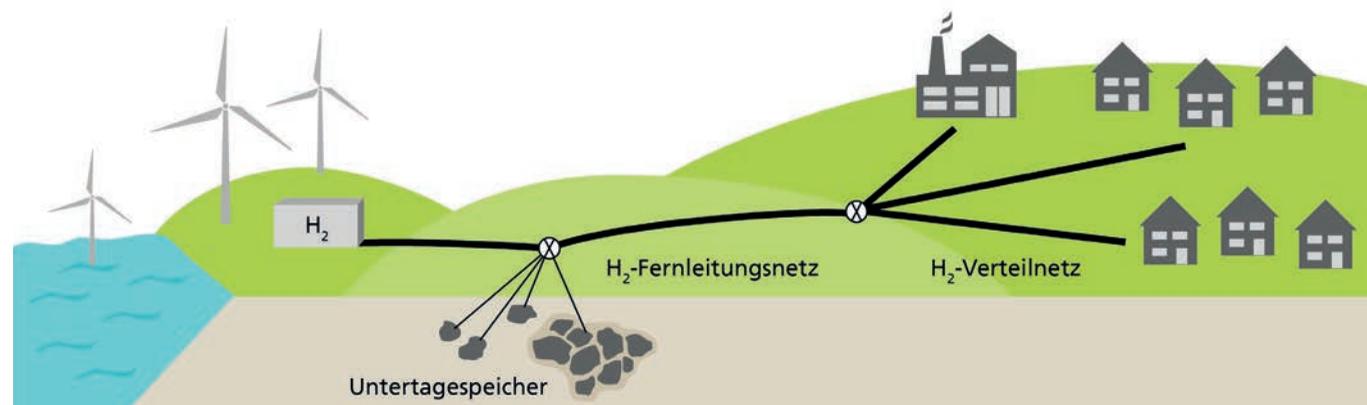
Wasserstoff-Sensorik für die sichere, emissionsfreie Luftfahrt

Wasserstoffsensoren sollen die Kabinensicherheit in mit Wasserstoff betriebenen Flugzeugen sicherstellen und zudem Leckagen am Tank und im Leitungssystem auch bei niedrigen Temperaturen zuverlässig detektieren.

Die internationale Luftfahrtorganisation ICAO hat sich 2016 erstmals Ziele zum Klimaschutz für die weltweite Luftfahrt gesetzt: Nach 2020 soll der Luftverkehr nur noch klimaneutral wachsen. Zudem sollen sich bis 2050 die CO₂-Emissionen der Luftfahrt im Vergleich zu 2005 halbieren. Dies wird sich nur durch den Einsatz von grünem Wasserstoff (H₂) als Treibstoff realisieren lassen. Für den sicheren Betrieb und die Akzeptanz von wasserstoffbetriebenen Flugzeugen muss die Dichtigkeit der gesamten H₂-Luftfahrt-Infrastruktur überwacht werden.

Im Ende 2024 gestarteten Verbundprojekt HySEAT entwickeln wir mit Partnern aus Forschung und Industrie Wasserstoffsensoren, die die strengen Anforderungen der Luftfahrt bezüglich Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllen. Das Sensorsystem wird antriebsunabhängig konzipiert und soll sowohl bei der Direktverbrennung als auch bei der Brennstoffzelle eingesetzt werden. Es umfasst zwei Sensorsysteme: ein optimiertes Sensorsystem für die Kabinensicherheit zur Überwachung der H₂-Konzentration in der Umgebung des Verteilsystems mit reduzierter Fehlalarmrate und ein Sensorsystem zur Permeation- bzw. Leckagedetektion am Tank und im Leitungssystem bei niedrigen Temperaturen im Bereich von 70K.

Projekt HySEAT (Wasserstoff-Sensorik für die Sichere Emissionslose Luftfahrt), gefördert vom BMWF (Fördermaßnahme: »Luftfahrtforschungsprogramm« VI, LuFo VI-3)



Wasserstoff sicher speichern, transportieren und verteilen: Dazu braucht es widerstandsfähige Werkstoffe und Sensorik für eine zuverlässige Leckagedetektion.

Projekt SMArtCool

Elastokalorische Klimatechnik fürs Automobil

Elastokalorische Kühlsysteme können für eine effiziente Klimatisierung sorgen – in Gebäuden, aber auch in mobilen Systemen. Nun sollen die Systeme für den Einsatz in Kraftfahrzeugen optimiert werden.

Ein erheblicher Anteil jeder Tank- oder Batterieladung im Automobil entfällt auf die Klimatisierung. Dabei gilt: Je effizienter die Klimatisierung, desto größer die Reichweite. Kalorische Kühlsysteme sind potenziell deutlich effizienter als heutige kompressorbasierte Kühlsysteme und kommen ohne schädliche oder brennbare Kältemittel aus. Im Ende 2024 gestarteten Projekt SMArtCool entwickeln wir gemeinsam mit der Volkswagen AG, der Ingpus GmbH und der ZeMA gGmbH mobile elastokalorische Kühlsysteme für den Einsatz im Automobil.

Elastokalorische Systeme basieren auf Formgedächtnislegierungen (FGL). Wirkt eine mechanische Kraft auf das Material ein, erwärmt es sich. Entfernt man das Kraftfeld, kühlt das Material auf einen Wert unterhalb der Ausgangstemperatur ab und kann so thermische Energie aus der Umgebung aufnehmen. Durch zyklische Be- und Entlastung lässt sich ein Kreislauf etablieren, der als Basis für Kühlsysteme und Wärmepumpen genutzt werden kann. Die Technologie ist grundsätzlich für stationäre Anwendungen im Gebäude, aber auch in der Mobilität

einsetzbar. Im Rahmen von SMArtCool werden FGL gezielt für den Einsatz in elastokalorischen Kühlsystemen für Kraftfahrzeuge optimiert. Ziel sind effiziente und gleichzeitig langzeitstabile Materialien, die sich industriell verarbeiten lassen.

Im Rahmen von SMArtCool testen die Forschenden zwei Systemansätze, bei denen das elastokalorische Material entweder durch Zug oder Druck verformt wird. Der Projektpartner ZeMa gGmbH setzt bei seinem zugbasierten Ansatz auf einen ebenen, translatorischen Aufbau für eine optimale Nutzung des Bauraums und bandförmiges elastokalorisches Material, das die Luft im Fahrzeuginnenraum direkt und ohne weitere Wärmeübertrager klimatisiert. Fraunhofer IPM wird sein patentiertes Konzept zum latenten Wärmeübertrag auf Basis von Heatpipes weiterentwickeln und in ein druckbasiertes System integrieren, um eine besonders hohe Leistungsdichte und eine hohe Zyklusfestigkeit zu erreichen.

Projekt SMArtCool (Elastokalorik für eine effiziente Klimatechnik), gefördert vom BMW, Projektträger Jülich

Projekt ElKaWe

Große wissenschaftliche Erfolge in der Elektrokalorik

Fraunhofer-Forschende unter der Leitung von Fraunhofer IPM erbrachten den Nachweis, dass elektrokalorische Systeme in Zukunft eine umweltfreundliche Alternative zu kompressorbasierten Wärmepumpen sein können.

Mehr als fünf Jahre lang forschten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von insgesamt sechs Fraunhofer-Instituten im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts ElKaWe an unterschiedlichen Aspekten elektrokalorischer Kühlsysteme. Das Projekt brachte entscheidende Fortschritte auf dem Weg zur Marktfähigkeit elektrokalorischer Wärmepumpen.

Das Konsortium entwickelte und testete verschiedene elektrokalorisch-aktive Polymer- und Keramikmaterialien. Dünne, durchschlagfeste elektrokalorische Polymerfolien wurden als Komponenten mit bis zu zehn Lagen realisiert. Mehrlagenkomponenten auf Basis von Blei-Magnesium-Niobat/Blei-Titanat (PMN-PT) zeigten sich in ersten Langzeittests als äußerst stabil: Auch nach 70 Millionen Zyklen war der elektrokalorische Effekt unverändert stark. Das im Projekt entwickelte bleifreie Barium-Strontium-Zinn-Titanat (BSSnT) erwies sich als vielversprechender keramischer Werkstoff, aus dem sich kostengünstig elektrokalorische Komponenten im Einklang mit den geltenden Rohstoff-Richtlinien herstellen lassen.



Erstmals wurde das von Fraunhofer IPM patentierte Konzept der aktiven kalorischen Heatpipe (AEH) in einem elektrokalorischen System umgesetzt. Der Wärmeübertrag erfolgt über latente Wärme: Das Verdampfen und Kondensieren eines Fluids – eingesetzt wurden Ethanol und Wasser – auf dem kalorischen Material sorgt für eine schnelle und effektive Wärmeabfuhr. Das ist wichtig für die Gesamteffizienz der Wärmepumpe und hat zudem den Vorteil, dass die Systeme auf schädliche Kältemittel verzichten können. Der Heatpipe-basierte Ansatz ermöglicht deutlich höhere Zyklusfrequenzen als bisherige Wärmeübertragungskonzepte, die auf aktives Pumpen von Flüssigkeit setzen. Im Projekt wurden eigens langzeitstabile superhydrophile Schichten entwickelt, die dafür sorgen, dass der Wechsel zwischen Verdampfen und Kondensieren auf dem EK-Material schnell erfolgt.

Um Schnelligkeit ging es auch bei der Ansteuerungselektronik. Sie ist ein weiterer wichtiger Baustein für die Gesamteffizienz elektrokalorischer Wärmepumpen. Eine am Fraunhofer IAF entwickelte Schaltungstopologie speziell für den Einsatz in elektrokalorischen Wärmepumpen erzielte einen elektrischen Wirkungsgrad von 99,74 Prozent – und setzt damit weltweit Maßstäbe.

Drei unterschiedliche Demonstratorsysteme haben die Forschenden aufgebaut. Fünf Patente, 26 Publikationen, 26 Vorträge, zwölf Abschlussarbeiten, zwei Auszeichnungen sowie elf Folgeprojekte sind Ausdruck der wissenschaftlichen Erfolge, die im Projekt erzielt wurden.

Projekt ElKaWe (Elektrokalorische Wärmepumpe), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

ipm.fraunhofer.de/elkawe

Gute Stimmung beim Abschluss-treffen Ende Januar 2025: Das ElKaWe-Team hat drei unterschiedliche elektrokalorische Demonstratorsysteme aufgebaut.



Mit ElKaWe haben wir enorme Fortschritte beim Material, bei der Elektronik und beim Wärmeübertrag gemacht.«

Dr. Kilian Bartholomé, Gruppenleiter



Projekt MagMed 2

Magnetokalorischer Kühltank für Medizin und Labor

Der neueste Demonstrator eines magnetokalorischen Kühlsystems ist ein weiterer Schritt auf dem Weg zur Marktfähigkeit kalorischer Systeme.

Die Magnetokalorik ist die am weitesten entwickelte unter den kalorischen Kühltechnologien. Im Rahmen des Projekts MagMed 2, das Anfang 2025 abgeschlossen wurde, haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein magnetokalorisches Demonstratorsystem mit optimierten Segmenten aufgebaut und getestet. Ziel war es, die Systemeffizienz im Vergleich zu Vorgängersystemen zu steigern. Bereits im Vorgängerprojekt MagMed 1 wurde mit 12,5 W pro Gramm des eingesetzten Materials ein Rekord mit Blick auf die spezifische Kühlleistung erzielt. Erreicht wurde dies durch zwei Dinge: zum einen durch ein patentiertes Konzept zur Wärmeabfuhr, das auf Heatpipes basiert, zum anderen durch eine optimierte Geometrie des magnetokalorischen Materials.

Auf der Fachmesse CHILLVENTA zeigten wir erstmals das magnetokalorische System der neuesten Generation mit 20 Segmenten.

Im Rahmen von MagMed 2 wurde dieser Systemansatz gemeinsam mit dem Kühltankhersteller Philipp Kirsch GmbH und weiteren Forschungspartnern für den Einsatz in medizinischen Kühltanks weiterentwickelt. So wurde das Design des Magnetsystems mit Blick auf Materialeinsatz und Produktionstauglichkeit optimiert und ein patentiertes Konzept für die thermische Stabilisierung implementiert, welches die Langzeitstabilität des magnetokalorischen Systems sicherstellt. Darüber hinaus wurde erstmals der auf Heatpipes basierende Ansatz zur Wärmeabfuhr in einem kaskadierenden magnetokalorischen System implementiert, um hohe Temperaturhübe zu realisieren. Ein 20-Segment-Demonstratorsystem mit einer Kühlleistung von 300 W, einem maximalen Temperaturhub von 30 K und einem COP von über 5 stand bei Projektabschluss kurz vor der Fertigstellung.

Projekt MagMed 2, gefördert vom BMWF, Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH

Doktorandenseminar

Interdisziplinärer Austausch zwischen Doktorandinnen und Doktoranden

Vom 11. bis 13. März 2024 fand am Fraunhofer IPM das 17. Interdisziplinäre Doktorandenseminar des Arbeitskreises Prozessanalytik (AK PAT) der Gesellschaft Deutscher Chemiker statt.

Das Seminar trug die Überschrift »Vom Sensor zum Prozess – Die neue Generation der PAT-Fachkräfte interdisziplinär und vernetzt«. Dieses Thema passt zu unserem Institut, sodass unsere Promovierenden die Möglichkeit hatten, sich über neueste Forschungsarbeiten zu informieren und Netzwerke auszubauen.

Das von den Teilnehmenden selbst erarbeitete Programm bestand aus Posterpräsentationen und Vorträgen ergänzt durch Laborführungen bei Fraunhofer IPM und Endress + Hauser. Die 30 Teilnehmenden konnten sich mit Forscherinnen und Forschern austauschen, Industriepartner kennenlernen und ihre eigenen Projekte vorstellen.

Arbeitskreis Prozessanalytik (AK PAT) der Gesellschaft Deutscher Chemiker

Der Arbeitskreis Prozessanalytik setzt sich ein für die Förderung der Prozessanalytik und gehört der Fachgruppe Analytische Chemie der Gesellschaft Deutscher Chemiker an. 390 Mitglieder zählen zurzeit zum AK PAT – im Fokus steht für sie die Vernetzung untereinander und mit der Industrie, die in selbst organisierten Veranstaltungen und Arbeitsgruppen stattfindet.

Fokus Quantum Flow

Eine patentierte Methode für die Durchflussmessung nutzt quantenbasierte optisch gepumpte Magnetometer, um die Fließgeschwindigkeit von Flüssigkeiten in Rohren nicht-invasiv zu messen.

Die Durchflussrate ist ein wichtiger Parameter in zahlreichen industriellen Prozessen – von der chemischen Produktion über den Energiesektor, die Pharmaindustrie bis zur Lebensmittelherstellung. Wie schnell eine Flüssigkeit durch ein Rohr fließt, ist entscheidend für die Prozessoptimierung, die Produktqualität, aber auch für Sicherheit und Umweltschutz. Für die Durchflussmessung verfolgt ein Team am Fraunhofer IPM einen völlig neuen Ansatz, bei dem die Durchflussrate anhand von schwachen Magnetfeldern mithilfe hochempfindlicher Quantensensoren durch die Rohrwand detektiert wird. Entwickelt wurde die Technologie im 2023 abgeschlossenen Fraunhofer-Leitprojekt QMAG, das zum Ziel hatte, Quantensensoren aus dem Labor in die Industrie zu bringen. Seit Projektabschluss arbeiten die

Forschenden an der Weiterentwicklung des inzwischen patentierten Verfahrens.

Das innovative Konzept basiert auf der magnetischen Markierung von Wasserstoffatomen in Kombination mit einer Laufzeitmessung. Und das geht so: Das Fluid wird zunächst mithilfe eines starken Magnetfelds magnetisiert. Im weiteren Fluss wird die lokale Hintergrundmagnetisierung durch das Anlegen eines Radiofrequenzpulses lokal gedreht und auf diese Weise mit einem »Zeitstempel« versehen. Stromabwärts erfasst ein hochempfindliches quantenbasiertes optisch gepumptes Magnetometer (OPM) diese magnetische Markierung in einer magnetisch abgeschirmten Umgebung. Aus der Zeitdifferenz zwischen Markierung und Detektion lässt sich die Flussgeschwindigkeit errechnen.

Von Öl bis Softdrinks: Durchfluss aller wasserstoffhaltigen Fluide messbar

Doch wie genau magnetisiert man eine Flüssigkeit? Die Forschenden nutzen dazu die magnetischen Eigenschaften von Wasserstoffatomen, genauer gesagt den »Spin« – eine fundamentale Eigenschaft von Atomkernen, aus der ein schwacher Magnetismus hervorgeht. Hochempfindliche optisch gepumpte Magnetometer können die sehr schwachen Magnetfelder der Medien messen. Das magnetische Messverfahren funktioniert folglich für alle Flüssigkeiten, die gebundenen Wasserstoff enthalten – von Kraftstoffen über Öle, Softdrinks bis zu flüssigen Waschmitteln.

Kalibrierungsfrei, nicht-invasiv und geeignet für Edelstahl- oder Kunststoffrohre

Die magnetfeldbasierte Durchflussmessung bietet gleich mehrere Vorteile: Das Verfahren ist kalibrierungsfrei. Die hochempfindlichen Quantensensoren ermöglichen eine nicht-invasive Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Dank der niedrigen Anregungsfrequenzen funktioniert das Verfahren auch an austenitischen Edelstahlrohren, die typischerweise in der Prozessindustrie verwendet werden. In Testmessungen wurden mit dieser laufzeitbasierten Methode Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern bis Metern pro Sekunde erfasst. Die Forschenden gehen davon aus, dass auch deutlich höhere Geschwindigkeiten messbar sind.

Strömungsprofil beeinflusst magnetisches Signal

Um das industrielle Potenzial und die Vielseitigkeit der Methode weiter zu erweitern, untersuchte das Team, inwiefern sich das Strömungsprofil von Flüssigkeiten auf das magnetische Signal auswirkt. Anhand eines Modells berechneten die Forschenden die Magnetisierungsverteilung im fließenden Fluid. Sie simulierten sowohl die effektive Flipwinkelverteilung – dies ist der Winkel, unter dem die Magnetisierung des Mediums lokal gedreht wird – als auch die zeitliche Entwicklung der Magnetisierung und erkannten, dass die Variation der Strömungsgeschwindigkeiten über den Rohrdurchmesser die Verteilung der Flipwinkel verbreitert und so das magnetische

Ein hochempfindlicher Quantensensor (Bildmitte) detektiert die magnetische Markierung einer Flüssigkeit im Rohr. Der Sensor ist nicht größer als ein Zuckerwürfel.

Poster Award

Die Forschungsarbeiten zur magnetischen Durchflussmessung mithilfe optisch gepumpter Magnetometer überzeugten auch das Fachpublikum auf der 22. GMA/ITG-Fachtagung »Sensoren und Messsysteme 2024« in Nürnberg: Leonhard Schmieder, Doktorand am Fraunhofer IPM, erhielt den Preis für das beste Poster.



Signal dämpft. Damit wurde erstmals ein Mapping-Ansatz in einem Null-zu-Ultra-Niedrigfeld-Magnetometrie-basierten Experiment mit Kernspinresonanz umgesetzt. Die Erkenntnisse helfen außerdem, die Messmethode weiter zu optimieren.

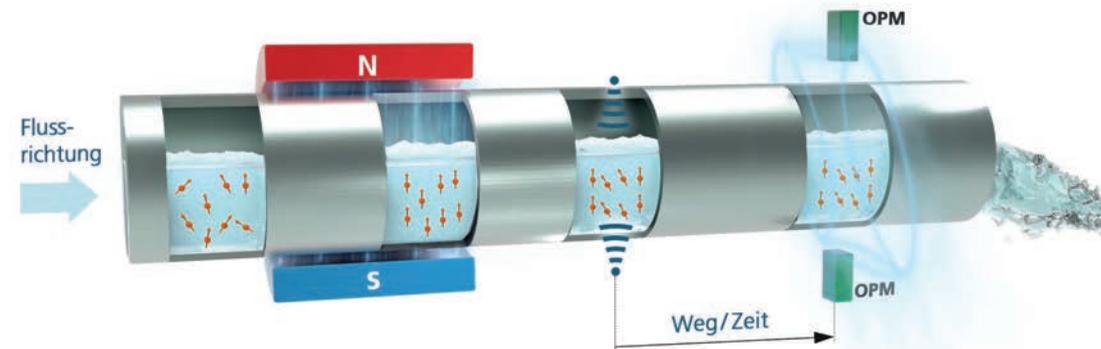
ohne dass das Rohr geöffnet werden muss. Somit ist eine Integration im laufenden Betrieb möglich.

Video:
[Wie wir Durchfluss messen](#)

Die Strömungsqualität lässt darüber hinaus Rückschlüsse auf den Zustand des Rohrinernen zu: Fließt die Flüssigkeit nicht so, wie es sein sollte, kann dies auf Ablagerungen hinweisen, die langfristig zu Verstopfungen führen können. So lässt sich der Sensor auch für die dauerhafte Überwachung der Rohrinfrastuktur nutzen. Die Forschenden sind überzeugt, dass die Technologie enormes Potenzial für die industrielle Durchflussmessung hat und entwickeln den Aufbau zu einem Clamp-on-Detektor weiter. Ein solcher Durchflussmesser kann unkompliziert an ein Rohr angeklemt werden,

Unser Ziel ist ein Clamp-on-Detektor, der für die Durchflussmessung in der Produktion einfach außen am Rohr befestigt werden kann.«

Leonhard Schmieder



Die Durchflussgeschwindigkeit wird in einem Time-of-Flight-Verfahren gemessen. Dazu wird die Flüssigkeit magnetisiert. Die Magnetisierung wird mit einem Hochfrequenzpuls markiert und im weiteren Fluss mithilfe eines optisch gepumpten Magnetometers ausgelesen.

Gas- und Prozesstechnologie | Messen & Veranstaltungen

ACHEMA

10.06.–14.06.2024
Eigener Stand

Vorge stellt wurden Innovationen für die Abgasanalyse, die Transportüberwachung von Lebensmitteln sowie Sensoren und Systeme zur Messung kleinster Temperaturunterschiede.

Sensor+Test

11.06.–13.06.2024
Eigener Stand

Wir stellten Laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Partikelmesstechnik sowie thermische Sensoren und Systeme vor.

Quantum Effects

08.10.–09.10.2024
Gemeinschaftsstand
Baden-Württemberg

Gezeigt wurden quantensensorische Messverfahren inklusive erster Anwendungen wie die Durchflussmessung. Leonhard Schmieder hielt einen Vortrag zum Thema »Quantum Sensing for Industry by Fraunhofer IPM«.

CHILLVENTA

08.10.–10.10.2024
Gemeinschaftsstand mit Fraunhofer ISE und Fraunhofer IKTS

Präsentiert wurden magnetokalorische und elektrokalorische Systeme der neuesten Generation.

Geplant für 2025

11. Gassensor Workshop

20.03.2025

Sensor+Test

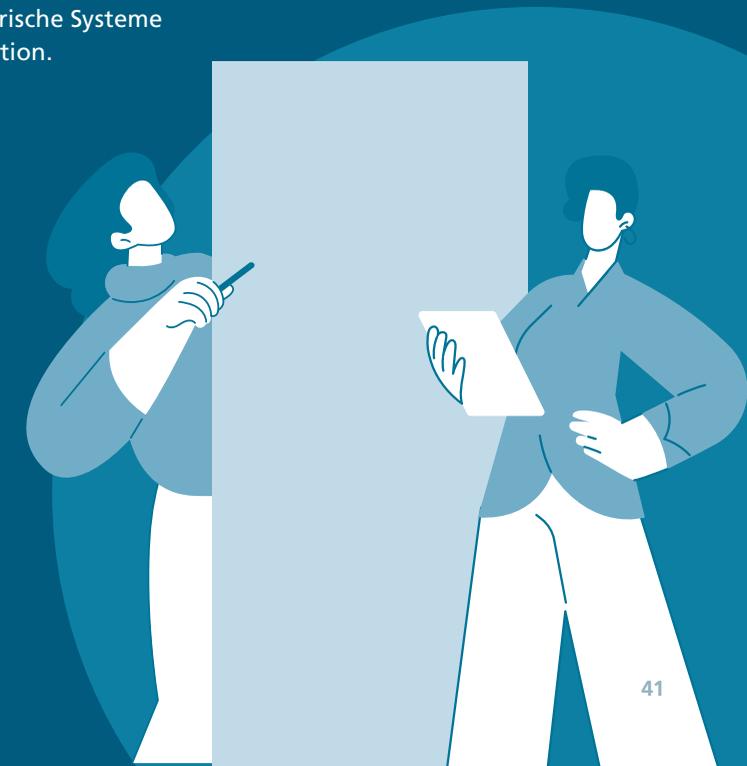
06.05.–08.05.2025

International Meeting on Chemical Sensors IMCS

22.06.–26.06.2025

Quantum Effects

07.10.–08.10.2025



Überblick Photonische Systeme

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

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 einfrequenitem 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.



Lichtquellen



Photonische
Quantensensorik



Optische
Komponenten

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



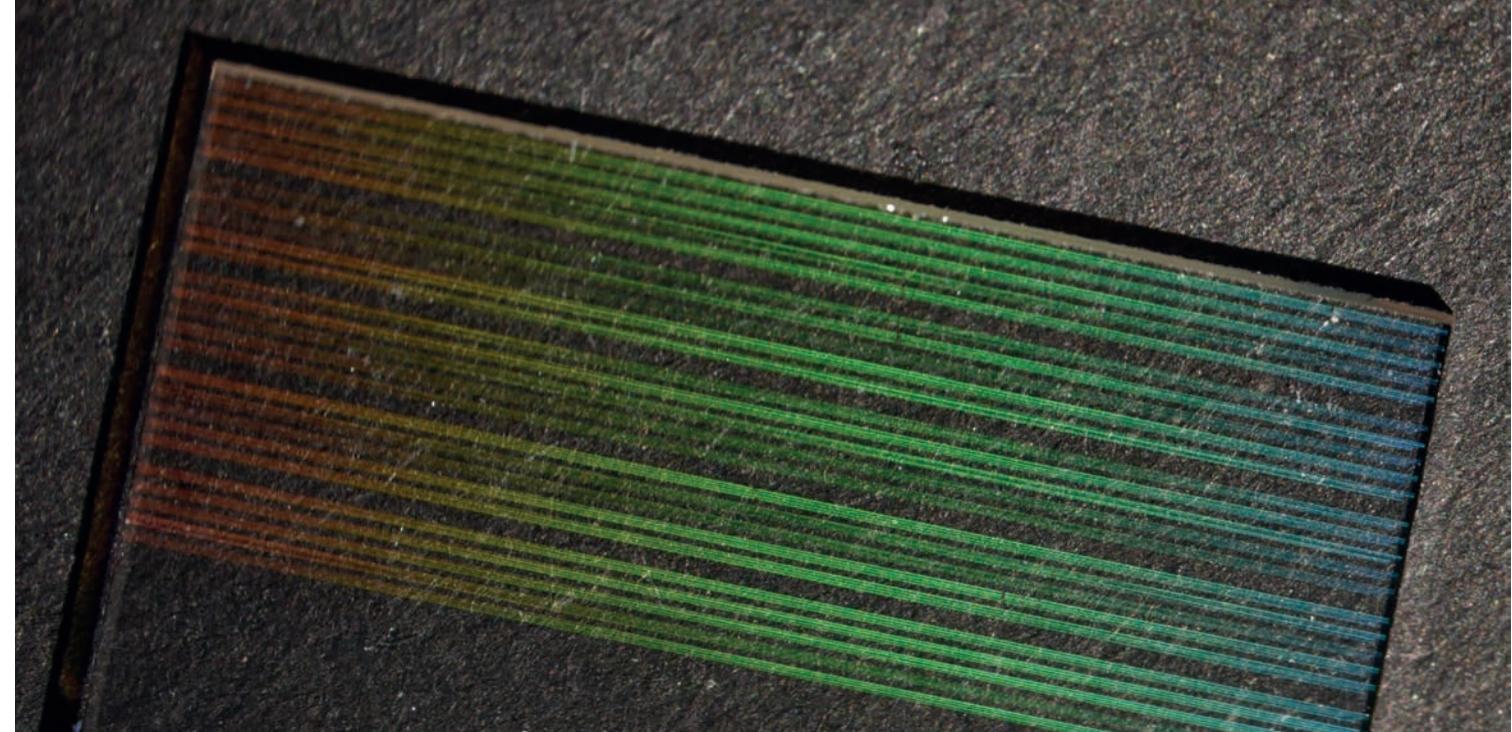
Wir entwickeln Lichtquellen und Frequenzkonverter für neuartige Lasermessverfahren – vom einzelnen Kristall bis zum System-Prototyp.«

PD Dr. Frank Kühnemann, Abteilungsleiter

Highlights Photonische Systeme

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

»Vergrabene« Wellenleiter sollen Farbwandler-Module für Laserlicht zuverlässiger, einfacher konfigurierbar und justierbar machen.



Projekt MultiLambdaChip

Neue Laser für Messtechnik von morgen

Ein Mehrwellenlängen-Lasersystem soll auf einem einzigen Chip verschiedene Wellenlängen erzeugen.

Laserlicht ist das Herzstück vieler moderner Messverfahren – ob in der Fertigung, der Medizintechnik oder der Umweltanalytik. Doch leistungsfähige Lichtquellen sind oft teuer, groß oder aufwändig in der Handhabung. Im Projekt Multi-LambdaChip entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung eine neue Generation integrierter Laserquellen: ein Mehrwellenlängen-Lasersystem, das on-Chip verschiedene Wellenlängen erzeugen kann – präzise, stabil und effizient. Herzstück sind photonische Schaltkreise auf

Lithiumniobat-Basis, die das Licht einer handelsüblichen 1550-nm-Laserdiode so manipulieren, dass es für anspruchsvolle Messaufgaben im sichtbaren Bereich genutzt werden kann. Dabei kommen elektrooptische Modulatoren, nichtlinear optische Frequenzkonversion und integrierte Filterstrukturen zum Einsatz.

Durch die Nutzung etablierter Komponenten aus dem Telekommunikationsbereich sinken die Kosten erheblich. Gleichzeitig erlaubt die Integration auf einem Chip eine Miniaturisierung der Systeme, was neue Einsatzmöglichkeiten in mobilen oder platzkritischen Anwendungen eröffnet. Die Entwicklung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit HÜBNER Photonics, Carl Zeiss AG, cyberTECHNOLOGIES GmbH und der Professur für Optische Systeme der Universität Freiburg.

Die Laserlichtquellen sollen künftig in Systemen für die Spektroskopie, die Interferometrie oder die digitale Holographie eingesetzt werden. Letztere dient als Referenzanwendung, die bei zwei industriellen Anwendungen zum Einsatz kommt. Beide Anwendungen zeigen, wie sich hochpräzise 3D-Messungen direkt in der Fertigungslinie realisieren lassen – ohne aufwändige Spezialräume oder teure Lichtquellen.

Doch das Potenzial dieser neuen Laserlichtquellen reicht weit über die Messtechnik hinaus: Auch in der Medizintechnik, der Umweltanalytik oder Quantensensorik könnten sie künftig eine Schlüsselrolle spielen. Überall dort, wo es auf präzise, flexible und wirtschaftliche Lichtquellen ankommt.

Projekt MultiLambdaChip (Integriert-optisches Mehrwellenlängen-Lasersystem für die holographische 3D-Oberflächenmesstechnik in der industriellen Qualitätssicherung), gefördert vom BMFTR

Projekt LASER-FARBEN

Farbwandler für Laserlicht: Trichter sollen Frequenzkonversion optimieren

Für eine effiziente Konversion von Laserlicht sollen optische Wellenleiter in Zukunft ins Volumen statt in die Oberfläche nichtlinear-optischer Kristalle eingeschrieben werden.

Laserlicht ist ein wichtiges Werkzeug in der Industrie, Medizin und der Wissenschaft. Hier können einige Aufgaben so spezifisch sein, dass die Laser in ihrer Wellenlänge genau eingestellt werden müssen. Oftmals lässt sich eine gesuchte Wellenlänge mit den verfügbaren Lasermaterialien nicht erzeugen. Dann werden mitunter nichtlinear-optische Kristalle wie z. B. Lithiumniobat genutzt, um Laserlicht einer verfügbaren Wellenlänge auf

die Wunschwellenlänge zu konvertieren. Die Konversion der Wellenlänge ist dabei abhängig von der Wechselwirkung zwischen Licht und Kristall. Für eine effiziente Konversion ist eine hohe Leistungsdichte wichtig. Wellenleiter werden genutzt, um die Leistungsdichte über eine längere Strecke hoch und konstant zu halten. Das Ein- und Auskoppeln von hohen Laserleistungen in Wellenleiter ist anspruchsvoll, da sowohl der Kristall als auch der Wellenleiter beschädigt werden können.

Mit einem neuen Ansatz wollen Forschende am Fraunhofer IPM im Rahmen des Projekts LASER-FARBEN die Frequenzkonversion optimieren: Mit ultrakurzen Laserpulsen schreiben sie die Wellenleiter Punkt für Punkt statt in die Kristall-Oberfläche in das Kristall-Volumen ein. Dazu werden die Kristalle am Ein- und Ausgang der Wellenleiter mit einem Lichttrichter

(tapered coupler) versehen. Dies erlaubt eine höhere Toleranz bei der Justage. Zudem bleibt die Lichtintensität an den empfindlichen Einkopplflächen unkritisch, denn die eigentliche Fokussierung und spätere Defokussierung erfolgt innerhalb des Materials.

Die Arbeiten in dem auf drei Jahre angelegten Projekt sollen die Grundlage für eine neue Generation robuster, kostengünstiger Konverter-Module für Dauerstrich-Laserlicht schaffen. Ziel sind Module mit bis zu 10 Watt Ausgangsleistung, die jede Wellenlänge im Bereich von 440 bis 3500 nm mit einer Konversionseffizienz von mindestens 50 Prozent erzeugen können.

Projekt LASER-FARBEN, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)

Projekt UV-KrisP

Neue VUV-Lichtquellen für Quantentechnologien

Neue Polungstechnologien für BaMgF₄-Kristalle schaffen die Voraussetzung für neuartige VUV-Lichtquellen.

Kohärente Dauerstrich-Laserstrahlung im Vakuum-Ultraviolett (VUV) ist ein entscheidender Baustein für viele zukunftsweisende Anwendungen – von ultrapräzisen Kernuhren über Quantencomputer bis hin zur Defektinspektion in der Halbleiterfertigung. Doch bislang fehlen geeignete Lichtquellen in diesem spektralen Bereich. Im Projekt UV-KrisP entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) eine neue Generation von VUV-Lichtquellen – auf Basis eines neuartigen Kristallmaterials und innovativer Polungstechnologien.

Zentrales Element ist der Kristall Barium-Magnesium-Fluorid (BaMgF₄), der sich durch eine außergewöhnlich breite Transparenz von 130 nm bis 13 µm Wellenlänge auszeichnet. In Kombination mit der Möglichkeit zur Quasi-Phasenanpassung durch periodische Polung des Kristalls bietet er ideale Voraussetzungen für die Frequenzverdopplung von Laserlicht in den VUV-Bereich. Das IKZ züchtet dafür hochreine, defektarme Kristalle, die am Fraunhofer IPM mit sub-Mikrometer-Präzision periodisch gepolt werden – eine Grundvoraussetzung für die effiziente Frequenzkonversion.

Im Fokus des Teilprojekts UV-KrisP-IPM steht die Entwicklung neuartiger

Polungstechnologien, um die Grenzen bisheriger Technologien zu überwinden und so erstmals sub-µm-Polungsperioden in BaMgF₄-Volumenkristallen zu realisieren. Dies ist nötig, um die Kristalle für die VUV-Konversion nutzbar zu machen.

Die Einsatzmöglichkeiten der neuen Lichtquellen sind vielfältig: In der Metrologie ermöglichen sie die Anregung von Übergängen in Aluminiumionen (167 nm) oder im Thorium-229-Kern (148,3 nm) – Grundlage für Kernuhren mit bisher unerreichter Präzision. In der Quanteninformationsverarbeitung werden sie für die Rydberg-Anregung ionischer Qubits und die Ionenkühlung bei der Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten benötigt. In der Halbleiterindustrie könnten sie die Defektinspektion auf Wafern revolutionieren und Excimer-Laser ablösen.

Die Ergebnisse des Teilprojekts liefern nicht nur die Grundlage für neue VUV-Lichtquellen, sondern auch wertvolles Feedback für die Kristallzüchtung.



Mit unserer Polungstechnologie schaffen wir die Grundlage für eine neue Generation von VUV-Lichtquellen – und damit für viele Anwendungen von morgen.«

Dr. Simon Herr, Projektleiter

Darüber hinaus eröffnen die entwickelten Polungstechnologien neue Perspektiven für etablierte Materialien wie Lithiumniobat oder Lithiumtantalat – mit dem Ziel, die Grenzen der realisierbaren Polungsperioden weiter zu verschieben.

Projekt UV-KrisP (Kohärente Dauerstrichstrahlung im Vakuum-UV (VUV): Hochtransparente BaMgF₄-Kristalle mit sub-µm periodischer Polung für die quasiphasenangepasste Frequenzverdopplung in den VUV-Spektralbereich), gefördert vom BMFTR

Einige Runden hat Joris mit dem Lastenrad gedreht, um die Folgeregelung zu testen. »Es ist ein tolles Gefühl, wenn es dann funktioniert!«



Projekt RINGO CARGO

Nützlicher Follower – optimal gesteuert

Sensoren und Steuerungselektronik sorgen dafür, dass motorisierte Lastenanhänger dem Zugfahrrad ruckelfrei folgen.

Die Fahrrad-Lastenanhänger der Firma Carla Cargo transportieren Lasten von bis zu 200 Kilogramm durch den dichten Verkehr der Innenstädte – in Freiburg ebenso wie in Dublin oder New York. Manche der Anhänger sind mit einem eigenen Elektromotor und einer Auflaufbremse ausgestattet. Wichtig für Sicherheit und Fahrkomfort ist es, dass der Anhänger dem Zugrad möglichst ruckelfrei folgt. Damit das reibungslos funktioniert, entwickelte Joris Enk, Student an der Universität

Freiburg, im Rahmen seiner Bachelorarbeit eine elektronische Folgeregelung, die das selbstständige Abbremsen und Beschleunigen des Hängers optimal steuert. Die relative Position des Hängers in Bezug auf das Zugfahrrad wird über Hall-Sensoren ermittelt: In der Deichsel sind Läufer mit Magneten angebracht. Die kontaktlos arbeitenden Sensoren ermitteln Positionsverschiebungen des Hängers in Bezug zum Rad auf Basis der Änderung des

Magnetfeldwinkels. Die Software nutzt die Sensordaten, um das Beschleunigen und Bremsen automatisch zu steuern – und regelt auch das Bremslicht gleich mit. Während die Anhänger von Carla Cargo in Zukunft mit neuer Steuerungselektronik unterwegs sind, steuert Joris auf neue Projekte am Fraunhofer IPM zu: Er wird zukünftig als wissenschaftliche Hilfskraft in der Gruppe Nichtlineare Optik und Quantensensorik arbeiten.

Fahrradforschung in der Gruppe Nichtlineare Optik und Quantensensorik? Wie kam es denn dazu? Gruppenleiter Dr. Jens Kießling, begeisterter Radfahrer, entwickelte auf privater Basis Steuerungstechnik für Carla Cargo. Daraus entstand bereits 2019 das Vorgängerprojekt CARGO CONTROL. »Es mag überraschend klingen, aber aus elektronischer Sicht unterscheidet sich die Steuerung eines Fahrradanhängers gar nicht so sehr von der Laserelektronik mit Temperatur- und Resonatorregelungen. Da gibt es durchaus Synergien«, sagt Kießling.

Fokus Laserlicht nach Maß

Maßgeschneiderte Lichtquellen auf Basis nichtlinearer Frequenzkonversion eröffnen neue Wellenlängenbereiche – für Anwendungen in Industrie und Wissenschaft.

Laserlicht ist aus modernen Anwendungen nicht mehr wegzudenken – ob in der Telekommunikation, der Medizintechnik, der Produktion oder der Quantensensorik. Doch viele dieser Anwendungen scheitern an einem scheinbar simplen Problem: Es gibt keine Laserquelle in der »richtigen Farbe«. Die Wellenlänge des Laserlichts ist durch das Lasermaterial vorgegeben – und leider fehlen für viele Wellenlängen genau diese Materialien.

Die Lösung: Statt auf neue Lasermaterialien zu warten, wandeln wir vorhandenes Laserlicht in die gewünschte Wellenlänge

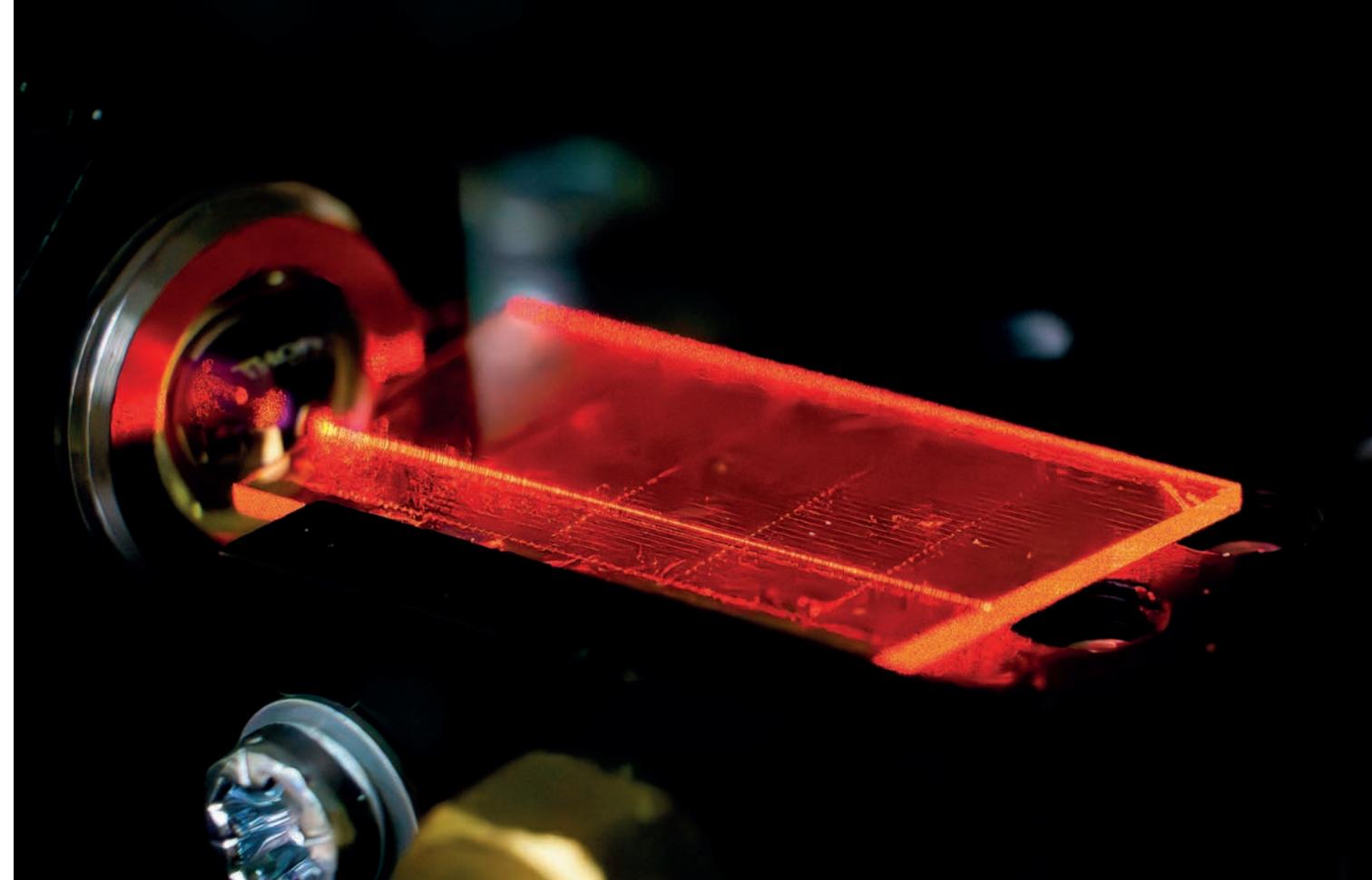
um. Möglich wird dies durch nichtlinear-optische Frequenzkonversion – ein physikalisches Prinzip, bei dem Licht durch spezielle Kristalle geleitet wird, die neue Frequenzen erzeugen. So entstehen maßgeschneiderte Lichtquellen, die exakt auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sind.

Vom Kristall zur Lichtquelle

Die Grundlage für diese Technologie bilden periodisch gepolte Lithiumniobat-Kristalle (PPLN). Durch gezielte

Mikrostrukturierung des Kristalls lassen sich Prozesse realisieren wie die Erzeugung der zweiten Harmonischen (SHG, second harmonic generation) oder Summenfrequenzen (SFG, sum frequency generation). Fraunhofer IPM hat ein Verfahren entwickelt, mit dem sich diese Strukturierung maskenlos und ohne Reinraumbedingungen erzeugen lassen – schnell, flexibel und kosteneffizient.

Ein weiterer Schlüssel zur Effizienz liegt in der Wellenleitertechnologie. Durch die Führung des Lichts in mikroskopisch kleinen Kanälen im Kristall wird die



Licht-Materie-Wechselwirkung maximiert. Das Ergebnis: hohe Konversionseffizienz bei gleichzeitig kompakter Bauweise.

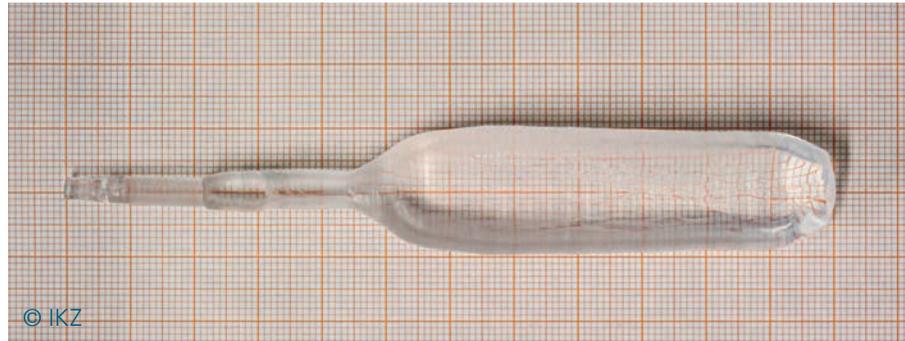
Neue Farben für neue Anwendungen

Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig. In der Quantentechnologie werden beispielsweise bestimmte Wellenlängen benötigt, um einzelne Ionen zu kühlen oder quantenmechanische Zustände zu manipulieren. Für die Entwicklung von Thorium-basierten Kernuhren ist

kohärentes Laserlicht mit einer Wellenlänge von 148,3 nm erforderlich – eine Herausforderung, die mit klassischen Lasern nicht zu lösen ist. Fraunhofer IPM arbeitet an einer Dauerstrich-VUV-Lichtquelle auf Basis des Kristalls BaMgF₄, der eine außergewöhnlich breite Transparenz von 130 nm bis 13 µm Wellenlänge bietet.

Auch in der Industrie wächst der Bedarf an maßgeschneidertem Licht. Anwendungen reichen von der hochsensiblen Wafer-Inspektion in der Halbleiterfertigung bis zur laserbasierten Vitalitätsmessung von Stadtbäumen im Vorbeifahren.

Wir entwickeln submikrometerfeine Stegwellenleiter aus Lithiumniobat, in denen Licht gezielt generiert und manipuliert werden kann.



Optimal für Dauerstrich-VUV-Lichtquellen: Ein am IKZ gezüchteter $BaMgF_4$ -Kristall mit außergewöhnlich breiter Transparenz im Wellenlängenbereich von 130 nm bis 13 μm .

In all diesen Fällen liefert Fraunhofer IPM die passende Lichtquelle – individuell abgestimmt, robust aufgebaut und bereit für den Einsatz.

Vom Prototyp zur Serienlösung

Von der Simulation über die Materialbearbeitung bis hin zur Systemintegration hat Fraunhofer IPM alle notwendigen Kompetenzen im Haus, um Komponenten zur Frequenzkonversion und Wellenleitung zu entwickeln und zu realisieren. Das ermöglicht kurze Entwicklungszyklen und maßgeschneiderte Lösungen. Mit dieser

breiten Technologieplattform erschließt Fraunhofer IPM neue Märkte. Erste Pilotprojekte mit Industriepartnern laufen bereits. Ziel ist es, die Technologie über Ausgründungen oder Lizenzmodelle in die Anwendung zu bringen – und so Laserlicht in jeder gewünschten Farbe verfügbar zu machen.



Mit unseren maßgeschneiderten Lichtquellen bringen wir Farbe ins Spiel – genau dort, wo sie gebraucht wird.«

PD Dr. Frank Kühnemann

Photonische Systeme | Messen & Veranstaltungen

Sensing with Quantum Light
27.10.–31.10.2024
Konferenz

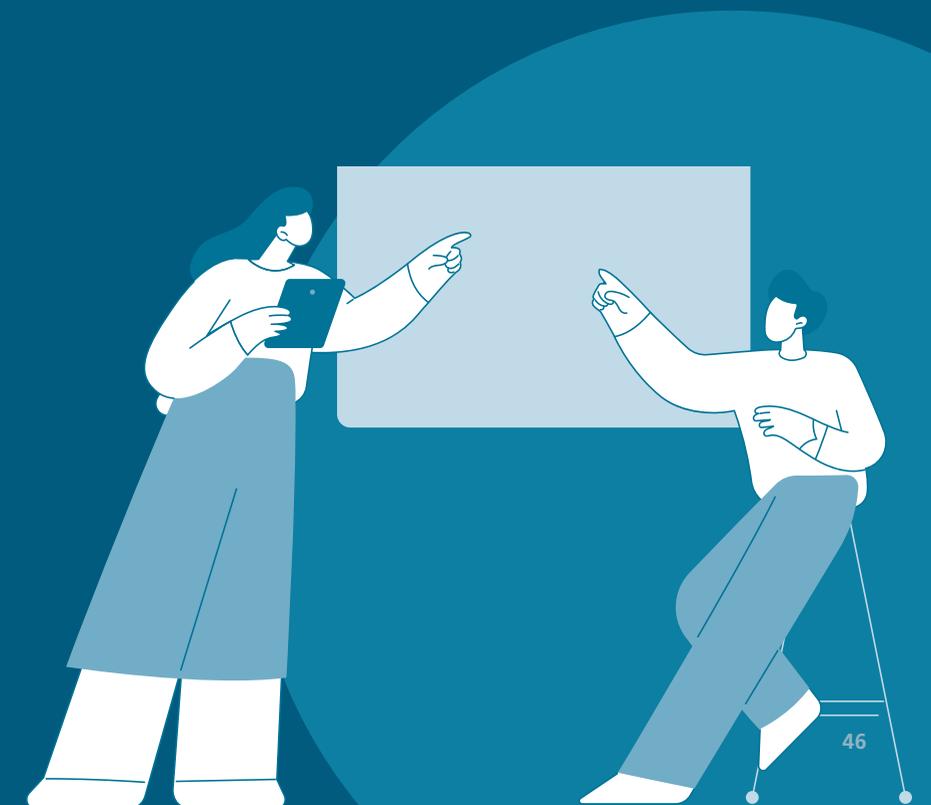
Fraunhofer IPM stellte neue Messverfahren zum Gasnachweis und zur hyperspektralen Mikroskopie im mittleren Infrarot vor.

Geplant für 2025

LASER World of Photonics
24.06.–27.06.2025

Photonics BW
Weiterbildung Quantensensorik
26.11.–27.11.2025

WE-Heraeus-Seminar
»Sensing with Quantum Light«
07.12.–09.12.2025



Index Fraunhofer IPM



*Kunst am Bau in unserem Foyer:
Lichtquellen in allen Farben*

Publikationen 2024

Amiri, P.; Casals, O.; Prades, J. D.; Hartmann, J.; Waag, A.; Pannek, C.; Engel, L.; Maur, M. auf der

Monolithic integrated light-emitting-diode/photodetector sensor for photoactive analyte monitoring: design and simulation

Applied Optics 63, 853 (2024)

Aslan, M. J.; Seyler, T.; Leclerc, D.; Bertz, A.; Carl, D.

On the influence of schlieren in large field-of-view applications of multiwavelength holography Practical Holography XXXVIII.

Displays, Materials, and Applications. Proceedings of SPIE 12910, 1291007 (2024)

Basler, C.; Hofmann, A.; Blättermann, A.; Carl, D.

Zusammensetzung von Elektrodenfolien inline überwachen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 64(3), 42-44 (2024)

Behrendt, V.; Blättermann, A.; Brandenburg, A.

Corrigendum to "A fiber-optical fluorescence sensor for in-line determination of cleanliness during CIP processes" [Food Bioprod. Process. 137, 56–63 (2023)]

Food and Bioprocesses Processing 144, 145 (2024)

Benito-Altamirano, I.; Engel, L.; Crueira, F.; Marchena, M.; Fàbrega, C.; Wöllenstein, J.; Prades, J. D.

Can QR Codes be used to readout Colorimetric Gas Sensors? A Back-Compatible Color QR Code with an Embedded CO₂ Sensor Dye

IEEE Sensors 2024. Proceedings. DOI: 10.1109/SEN-SORS60989.2024.10784782

Benito-Altamirano, I.; Engel, L.; Crueira, F.; Marchena, M.; Wöllenstein, J.; Prades, J. D.; Fabrega, C.

Reading Dye-Based Colorimetric Inks: Achieving Color Consistency Using Color QR Codes

Chemosensors 12, 260 (2024)

Benkendorf, M.; Pernau, H.-F.; Yurchenko, O.; Eberl, M.; Emperhoff, S.; Jost, F.; Wöllenstein, J.

Auf dem Weg zu einem funktional sicheren Sensorsystem für die Wasserstoff-Detektion im Automobilbereich

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, A5.2, 117 (2024)

Bergau, M.; Scherer, B.; Knoll, L.; Wöllenstein, J.

Active gas camera mass flow quantification (qOGI): Application in a biogas plant and comparison to state-of-the-art gas cams

Review of Scientific Instruments 95, 063702 (2024)

Bergau, M.; Strahl, T.; Ludlum, K.; Scherer, S.; Wöllenstein, J.

Flow rate quantification of small methane leaks using laser spectroscopy and deep learning

Process Safety and Environmental Protection 182, 752 (2024)

Bierer, B.; Engel, L.; Eberhardt, A.; Kürzinger, A.; Wöllenstein, J.

Hochtemperatur-Wärmeleitfähigkeitssensor für die Wasserstoff-überwachung in rauen Umgebungen

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, A5.1, 112 (2024)

Binninger, R.; Unmüßig, S.; Vergez, M.; Bartel, M.; Schäfer-Welsen, O.

Customized measuring station for Peltier modules

Heliyon 10, e25743 (2024)

Blättermann, A.; Buchta, D.; Behrendt, V.

Lückenlose Reinheitsprüfung mit Laserscannern

Adhäsion. Kleben und Dichten 68(1-2), 36 (2024)

Blug, A.; Zaiat, A.; Kontermann, C.; Laskin, G.; Bertz, A.; Carl, D.; Oechsner, M.

Study of different DIC approaches to measure crack opening/closing levels in a biaxial crack growth trial with combined HCF/LCF loads

PhotoMechanics iDICs Conference 2024. DOI: 10.24406/publica-3388

Boda, S.; Winkler, M.; Schießl, R.; Teicht, C.; Schwarz, D.; Schipper, J.; Bartholomé, K.; Schäfer-Welsen, O.; Pappert, S.

Improved Switchable Heat Pipe Based on Adsorption: Against-Gravity Operation and Enhanced Dynamics

Energies 17, 2088 (2024)

Breunig, I.

Mid infrared optical parametric oscillation and comb generation in whispering gallery resonators Mid-Infrared Coherent Sources

High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions Congress, MW3C.1 (2024)

Chmelina, K.; Olshausen, P. von, Gangelhoff, J.; Vierhub-Lorenz, V.; Steiger, D.; Traxler, C.; Reiterer, A.

Mobiles Laserscanning unter Tage – Neue Entwicklungen für Datenerfassung und -verarbeitung

Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN 131, 101 (2024)

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

Analysis of the hybrid light field reconstruction and comparison with Richardson-Lucy Light Field Deconvolution

Applied Optics 63, 3470 (2024)

El-Safoury, M.; Dold, M.; Bremer, H.; Weber, C.; Layer, N.; Wöllenstein, J.

Sensor zur Echtzeitüberwachung des Sauerstoffgehalts der Atemluft mittels Fluoreszenzlöschung

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, D3.1, 329 (2024)

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

Towards a Miniaturized Photoacoustic Sensor for Transcutaneous CO₂ Monitoring

Sensors. Online journal 24, 457 (2024)

Emperhoff, S.; Eberl, M.; Dwertmann, T.; Wöllenstein, J.

Humidity Impact on Thermal Conductivity Sensors

Eurosensors Conference 2023. MDPI Proceedings 97, 93 (2024)

Publikationen 2024

Emperhoff, S.; Eberl, M.; Dwertmann, T.; Wöllenstein, J.

On the Influence of Humidity on a Thermal Conductivity Sensor for the Detection of Hydrogen Sensors

Online journal 24, 2697 (2024)

Gassner, S.; Essing, S.; Tumpold, D.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Miniaturized two-chamber photoacoustic CO₂ sensor with a wafer-bonded MEMS (micro-electro-mechanical systems) detector

Journal of sensors and sensor systems: JSSS 13, 219 (2024)

Göbel, B.; Reiterer, A.; Möller, K.

Image-Based 3D Reconstruction in Laparoscopy: A Review Focusing on the Quantitative Evaluation by Applying the Reconstruction Error

Journal of Imaging 10, 180 (2024)

Goldschmidt, J.; Moser, E.; Nitzsche, L.; Bierl, R.; Wöllenstein, J.

Improving the performance of artificial neural networks trained on synthetic data in gas spectroscopy – A study on two sensing approaches

Technisches Messen. tm 91(1), 4 (2024)

Hamburger, M.; Herbst, J.; Strahl, T.; Brunner, R.; Weber, C.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.; Kondziella, R.

Photoakustische Detektion von BTEX-Komponenten im UV-Bereich

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, A4.1, 87 (2024)

Henninger, S.; Kellner, M.; Rombach, B.; Reiterer, A.

Reducing Training Data Using Pre-Trained Foundation Models

Journal of Imaging 10, 220 (2024)

Holl, P.; Basler, M.; Mrokon, A.; Minet, Y.; Breunig, I.; Seyler, T.; Bertz, A.; Rattunde, M.

Light source based on adiabatic frequency conversion in whispering gallery resonators tailored for holographic metrology

Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology III. Proceedings of SPIE 12997, 129970D (2024)

Hottong, M.; Sperling, M.; Müller, C.

Using Auto-ML on Synthetic Point Cloud Generation

Applied Sciences 14, 742 (2024)

Illner, M.; Thüsing, K.; Nioac de Salles, A. C.; Trettenhann, A.; Albrecht, S.; Winkler, M.

Switchable Heat Pipes for Eco-Friendly Battery Cooling in Electric Vehicles: A Life Cycle Assessment

Energies 17, 938 (2024)

Jung, J. T.; Merkle, D.; Reiterer, A.

Automated Camera Pose Generation for High-Resolution 3D Reconstruction of Bridges by Unmanned Aerial Vehicles

Remote Sensing 16, 1393 (2024)

Jung, J. T.; Reiterer, A.

Improving Sewer Damage Inspection: Development of a Deep Learning Integration Concept for a Multi-Sensor System

Sensors. Online journal 24, 7786 (2024)

Kammel, F.; Reiterer, A.

Conceptualization and First Realization Steps for a Multi-Camera System to Capture Tree Streamlining in Wind

Forests 15, 1846 (2024)

Kardamaki, E.; Basler, C.; Reich, R.; Wilhelms, A.; Breunig, I.; Eiche, E.; Kolb, J.; Carl, D.

Laser-induced breakdown spectroscopy for quantitative lithium monitoring in geothermal brines for lithium extraction

Optical Sensing and Detection VIII. Proceedings of SPIE 12999, 129991A (2024)

Kardamaki, E.; Buchta, D.; Blättermann, A.; Carl, D.

Erfassung und Klassifizierung von extrahierten Partikeln

JOT. Journal für Oberflächentechnik 64(5), 32 (2024)

Kellner, M.; Vassilev, H.; Busch, A.; Blaskow, R.; Ferrandon Cervantes, M.; Poku-Agyemang, K. N.; Schmitt, A.; Weisbrich, S.; Maas, H.-G.; Neitzel, F.; Reiterer, A.; Blankenbach, J.

Scan2BIM – A Review on the Automated Creation of Semantic-Aware Geometric as-is Models of Bridges

Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN 131, 159 (2024)

Klingenberg, P. C. A.; Schirmeister, C. G.; Kappeler, M.; Calean, A.; Biester, H.; Licht, E.; Rapp, B.

Quantification of regulated metals in recycled post-consumer polypropylene through comparative ICP-MS, AAS and LIBS analyses

Polymer Testing 136, 108480 (2024)

Knöller, W.; Bagheri, G.; Olshausen, P. von, Wilczek, M.

Analysis of the measurement uncertainty for a 3D wind lidar

Atmospheric Measurement Techniques: AMT 17, 6913 (2024)

Kolbe, S.; Kammel, F.; Schmitt, A.; Reiterer, A.; Schindler, D.

Mode coupling and signal energy distribution in an open-grown European beech tree

Forest Ecology and Management 560, 121845 (2024)

Kopf, A.; Bhattacharya, S.; Dunger, M.; Hinz, A.; Kamrad, M.; Kremin, I.; Lange, I.; Achterberg, E. P.; Bach, W.; Bachmayer, R.; Brunner, R.; Eickhoff, M.; Esposito, M.; Freudenthal, T.; Fuchs, N.; Meurer, C.; Rüpke, L.; Schelwat, H.; Seidel, G.; Zabel, M.

Initial results of a pilot project for sub-seabed basalt storage of carbon dioxide on the Reykjanes Ridge

Carbon Capture Science & Technology 13, 100265 (2024)

Koss, P.; Voigt, J.; Rasser, R.; Schnabel, A.

Fast Degaussing Procedure for a Magnetically Shielded Room

Materials 17, 5877 (2024)

Laux, P.

Spektrale Speckle-Korrelation

InVision 4, 56 (2024)

Publikationen 2024

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

Spectral speckle displacement in defocused and tilted imaging systems

Optics Express 32, 16831 (2024)

Leclerc, D.; Aslan, M. J.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Rupitsch, S. J.

Detection and Compensation of Periodic Vibrations on a Nanometer Scale using High-sensitivity Accelerometers in Digital Holography Sensors

IEEE Sensors Journal 24, 29477 (2024)

Lüttner, F.; Kracht, M.; Köpke, C.; Schmitt, A.; Fehling-Kaschek, M.; Stolz, A.; Reiterer, A.

Investigating a Toolchain from Trajectory Recording to Resimulation

Applied Sciences 14, 10682 (2024)

Merkle, D.; Vierhub-Lorenz, V.; Gangelhoff, J.; Jung, J.; Nasic, A.; Reiterer, A.

Neue Technologien für die Inspektion von Betonbauwerken – Ein Blick in die Zukunft

Brückenkolloquium 6, 177 (2024)

Merkle, D.; Villinger, G.; Gangelhoff, J.; Vierhub-Lorenz, V.; Olshausen, P. von, Rombach, B.; Reiterer, A.

Autonomous measurement robotics for advanced mapping and inspection tasks in complex environments

Optical Sensing and Detection VIII. Proceedings of SPIE 12999, 129991P (2024)

Metzdorf, J.; Corhan, P.; Bach, D.; Hirose, S.; Lellinger, D.; Mönch, S.; Kühnemann, F.; Schäfer-Welsen, O.; Bartholomé, K.

Electrocaloric cooling system utilizing latent heat transfer for high power density

Communications Engineering 3, 55 (2024)

Mönch, S.; Basler, M.; Grieshaber, D.; Reiner, R.; Söllner, A.; Ben Nour, I.; Quay, R.; Bartholomé, K.

From Two to Seven Level GaN π -Type Converter Operation for Increased Efficiency of Capacitive-Load Charging

WiPDA 2024, IEEE 11th Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications 2024, DOI: 10.1109/WiPDA62103.2024.10773264

Mönch, S.; Reiner, R.; Basler, M.; Bartholomé, K.; Waltereit, P.; Quay, R.
Over 99.7% Efficient GaN-based 6-Level Capacitive-Load Power Converter

PCIM Europe 2024, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Conference Proceedings, 167 (2024)

Mönch, S.; Reiner, R.; Basler, M.; Waltereit, P.; Quay, R.; Bartholomé, K.
Voltage-Sensorless Control and GaN Multilevel Converter for Charging Non-Linear and Lossy Electrocaloric Capacitors

CIPS 2024, 13th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. ETG-Fachbericht 173, 202 (2024)

Mrokon, A.; Oehler, J.; Breunig, I.

Adiabatic frequency conversion in a lithium niobate microresonator for FMCW-LiDAR

Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXVI. Proceedings of SPIE 12871, 1287104 (2024)

Mrokon, A.; Oehler, J.; Breunig, I.

Continuous adiabatic frequency conversion for FMCW-LiDAR

Scientific Reports 14, 4990 (2024)

Münch, F.; Eschbach, L.; Breunig, I.; Geng, J.; Carl, D.; Hauer, B.

Inline inspection of coating thickness on polymers using infrared reflection-absorption spectroscopy

Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology III. Proceedings of SPIE 12997, 129970Q (2024)

Pannek, C.; Wanzenberg, E.; Michler, T.; Schweizer, F.; Alms, K.; Hofer, U.; Bolwien, C.; König, J.; Wöllenstein, J.; Dues, S.; Weber, C.; Plocher, T.; Erb, T.; Wanke, E.; Gaßner, M.; Edenhofer, T.; Ziggeli, N.; Engelhaupt, S.

TransHyDE. Die Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland: Sicher in die Zukunft

DOI: 10.24406/publica-3126

Pernau, H.-F.; Benkendorf, M.; Jäggle, M.; Heinrich, S.; Knittel, T.; Wöllenstein, J.

Measuring the Thermal Conductivity of Humid Air over a Broad Temperature and Water Content Range

Eurosensors Conference 2023. MDPI Proceedings 97,167 (2024)

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

Mid-IR hyperspectral imaging with undetected photons

Quantum 2.0 2024. Conference Proceedings, QTu4C.4 (2024)

Ryan, C.; Haist, T.; Laskin, G.; Schröder, S.; Reichelt, S.

Technology Selection for Inline Topography Measurement with Rover-Borne Laser Spectrometers

Sensors. Online journal 24, 2872 (2024)

Schipper, J.; Melchin, S.; Metzendorf, J.; Bach, D.; Fehrenbach, M.; Löwe, K.; Vieyra Avilés, V. H.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

Introduction of novel method of cyclic self-heating for the experimental quantification of the efficiency of caloric materials shown for $\text{LaFe}_{11,4}\text{Mn}_{0,35}\text{Si}_{1,26}\text{H}_x$

Journal of Physics: Energy 6, 035006 (2024)

Schipper, J.; Wöllenstein, J.; Unmüßig, S.; Bartholomé, K.

Cooling with Magnets-Proving the Concept of Cascaded Caloric Heat Pipes

MCM 2024, 10th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering. Conference Proceedings, HTFF 210 (2024)

Publikationen 2024

Schmid, J.; Vierhub-Lorenz, V.; Reiterer, A.

An optical measurement system for monitoring of concrete curing

Optical Sensing and Detection VIII. Proceedings of SPIE 12999, 129991B (2024)

Schmieder, L.; Koss, P.

Magnetic Flow Metering with Optically Pumped Magnetometers

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, P03, 419 (2024)

Schmieder, L.; Koss, P.; Kühnemann, F.; Bock, M.

Radio frequency pulse marking of nuclear magnetization for magnetic flow metering: The impact of the flow profile

Journal of Applied Physics 135, 163902 (2024)

Störk, T.; Seyler, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Hensel, S.; Carl, D.

Detecting vibrations in digital holographic multiwavelength measurements using deep learning

Applied Optics 63, 832 (2024)

Strahl, T.; Bergau, M.; Maier, E.; Herbst, J.; Rademacher, S.; Wöllenstein, J.; Schmitt, K.

Experimental Study to Visualize a Methane Leak of 0.25 mL/min by Direct Absorption Spectroscopy and Mid-Infrared Imaging

Applied Sciences 14, 5988 (2024)

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

Signalverarbeitung in der direkten Absorptionsspektroskopie zur Gaskonzentrationsbestimmung

22. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, A4.2, 93 (2024)

Teicht, C.; Winkler, M.; Boda, S.; Schwarz, D.; Schipper, J.; Polyzoidis, A.; Pappert, S.; Bartholomé, K.

Calculation and Adjustment of the Activation Temperature of Switchable Heat Pipes Based on Adsorption

Energies 17, 4314 (2024)

Unmüßig, S.; Burghardt, A.; Schäfer-Welsen, O.; Bartholomé, K.

Highly Efficient Drive System for Elastocaloric Heat Pumps and Cooling Systems

Shape Memory and Superelasticity 10, 177 (2024)

Villinger, G.; Schmitt, A.; Reiterer, A.

Semantic segmentation of fused mobile mapping data

Optical Sensing and Detection VIII. Proceedings of SPIE 12999, 129991R (2024)

Voßrag, L.; Kießling, J.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Breunig, I.

Acousto-optic and electro-optic modulation for multi-wavelength holography

Practical Holography XXXVIII. Displays, Materials, and Applications. Proceedings of SPIE 12910, 1291006 (2024)

Werner, C.; Wallrabe, U.; Christen, A.; et al.

ECOSENSE – Multi-scale quantification and modelling of spatio-temporal dynamics of ecosystem processes by smart autonomous sensor networks

Research Ideas and Outcomes 10, e129357 (2024)

Wolf, S.; Kühnemann, K.

Hochpräzise Wellenlängenmessinstrumente für das mittlere Infrarot durch nichtlinear-optische Hochkonversion in Wellenleitern (E! 114926 NeW-VIEUW); Teilvorhaben: Simulation und Charakterisierung von Wellenleiter Strukturen / Entwicklung der Hochkonversions-Module

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.05.2021 – 30.10.2023
Freiburg/Brsg.; 2024, 9 S.

Wöllenstein, J.; Pernau, H.-F.; Lambrecht, A.

Projekt SF6DETECT: Studie zur Detektion von SF6 in Schallschutzfenstern

Abschlussbericht
Freiburg/Brsg.; 2024, 32 S.

Yassine, H.; Weber, C.; Eberhardt, A.; El-Safoury, M.; Wöllenstein, J.; Schmitt, K.

Detection of SO₂F₂ Using a Photoacoustic Two-Chamber Approach

Sensors. Online journal 24, 191 (2024)

Yurchenko, O.; Benkendorf, M.; Diehle, P.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Palladium-Functionalized Nanostructured Nickel–Cobalt Oxide as Alternative Catalyst for Hydrogen Sensing Using Pellistors

Nanomaterials 14, 1619 (2024)

Yurchenko, O.; Diehle, P.; Altmann, F.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Co₃O₄-Based Materials as Potential Catalysts for Methane Detection in Catalytic Gas Sensors

Sensors. Online journal 24, 2599 (2024)

Yurchenko, O.; Diehle, P.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Co₃O₄-Based Materials as Catalysts for Catalytic Gas Sensors

EuroSensors Conference 2023. MDPI Proceedings 97, 21 (2024)

Zschiesche, K.; Reiterer, A.

Optical Measurement System for Monitoring Railway Infrastructure – A Review

Applied Sciences 14, 8801 (2024)

Erteilte Patente 2024

Bartholomé, K.; König, J.

Klimatisierungseinrichtung mit zumindest einem Wärmerohr, insbesondere Thermosiphon

IN514888B

Beckmann, T.; Fratz, M.; Schiller, A.

Vorrichtung und Verfahren zur interferometrischen Vermessung einer Oberfläche eines bewegten Prüflings

DE102018113979B4

Basler, C.; Brandenburg, A.; Carl, D.

Verfahren zum Prüfen einer Oberfläche eines Prüfbjektivs

EP3640628B1

Holz, P.

Schichtdickenmessung durch Auswertung des Spektrums der Fluoreszenzemission

EP3872445B1

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

CN115315605B

Leidinger, M.; Reiterer, A.

System und Verfahren zur Inspektion zumindest einer Geometrie oder einer Oberfläche eines Objekts

EP4184113B1

Koss, P.; Kühnemann, F.; Schmieder, L.

Verfahren und Durchflussmessgeräet zum Erfassen einer Durchflusszeit eines Fluids

EP3855111B1

Doktorarbeiten 2024

Amiune, N.; Breunig, I. [Erstgutachter]

Generation of mid-infrared microresonator frequency combs based on parametric down-conversion

[Freiburg, Univ., Diss., 2024]

DOI: 10.6094/UNIFR/246838

Merkle, D.; Reiterer, A. [Erstgutachter]

Automated Inspection of Complex Engineering Structures Using Robotics

[Freiburg, Univ., Diss., 2024]

DOI: 10.6094/UNIFR/255668

Schmitt, A.; Schwieger, V. [Erstgutachter]

Untersuchungen zum geometrischen Verhalten von Holz mittels optischer Sensoren

[Stuttgart, Univ., Diss., 2024]

DOI: 10.18419/opus-15605

Weber, C.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

Miniaturized Photoacoustic Sensors for the Detection of Trace Gases in Ambient Air

[Freiburg, Univ., Diss., 2024]

Shaker Verlag. Gas Sensors 17 (2024)

Großprojekte Öffentliche Forschungsvorhaben 2024

Sechs öffentlich geförderte Forschungsprojekte mit einem finanziellen Volumen von mehr als einer Million Euro für Fraunhofer IPM haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über das Jahr 2024 bearbeitet.

EiKaWe Elektrokalarische 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: 01.11.2022 – 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)

CoLiBri Collaborative LiDAR to monitor infrastructure in the
water and at the shoreline
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (IMPULS)
Laufzeit: 01.06.2023 – 30.11.2024

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

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

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 über 1300 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-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. (DHG)
- 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
- 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 knapp 32 000 Mitarbeitenden betreibt Fraunhofer 75 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, KI 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 3,1 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen bildet die Grundfinanzierung durch Bund und Länder lediglich das Fundament des jährlichen Forschungshaushalts. Sie ist die Basis für wegweisende Vorlaufforschung, die in den kommenden Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft bedeutend

wird. Das entscheidende Alleinstellungsmerkmal ist der hohe Anteil an Wirtschaftserträgen, der Garant ist für die enge Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Industrie und die stetige Marktorientierung der Fraunhofer-Forschung: 2024 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 867 Mio. € des laufenden Haushalts. Ergänzt wird das Forschungsportfolio durch im Wettbewerb eingeworbene öffentliche Projektmittel, wobei eine ausgewogene Balance zwischen öffentlichen und wirtschaftlichen Erträgen angestrebt wird.

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). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich. Sein Erbe prägt den Innovationsgeist der Organisation bis heute.

[fraunhofer.de](https://www.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](https://www.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

Holger Kock, Dr. Miriam Laufer, 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: 16.06.2025
Dieser Bericht wird ausschließlich digital veröffentlicht.

Bildquellen

S. 2: Kai-Uwe Wudtke
S. 5 und 6: Visual Generation/Shutterstock
S. 13: Fraunhofer IOF
S. 16: Ellen Heffner/HCU (links), HCU (rechts)
S. 24 (rechts): Visual Generation/Shutterstock
S. 27: Pascal Kügler/Geotechnik GmbH (links)
S. 33: Visual Generation/Shutterstock
S. 36: Schütz GmbH Messtechnik
S. 41 (rechts): Visual Generation/Shutterstock
S. 46 (links): Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ)
S. 46 (rechts): Visual Generation/Shutterstock

Alle anderen Bilder und Grafiken: Fraunhofer IPM



Bleiben Sie in Kontakt – wir freuen uns auf Sie!

Besuchen Sie unsere Homepage:

ipm.fraunhofer.de

Melden Sie sich für unseren Newsletter an:

ipm.fraunhofer.de/info

Folgen Sie uns auf:

ipm.fraunhofer.de