

Jahresbericht 2021/2022

Messen • Kontrollieren • Optimieren

Jahresbericht 2021/2022

Messen • Kontrollieren • Optimieren





**Wir machen
industrielle
Prozesse öko-
logischer und
gleichzeitig
ökonomischer.«**

Viel Raum für Innovation

Beispiel Forst- und Holzwirtschaft

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

Deutschland ist zu etwa einem Drittel mit Wald bedeckt – ein wertvoller Naturraum, aber auch ein wichtiger Wirtschaftsfaktor: Die deutsche Forst- und Holzwirtschaft setzt mit ihren über 70 000 Betrieben pro Jahr mehr als 120 Milliarden Euro um. Dennoch gingen bislang viele technische Innovationen an der Forstwirtschaft vorbei. Das ändert sich derzeit – und Fraunhofer IPM ist hier sehr aktiv. Denn Wälder können mithilfe von Messtechnik und Digitalisierung besser erhalten, besser geschützt und besser genutzt werden!

Mit integrierter und verteilter Sensorik kann der Zustand des Waldes erfasst werden; im Geschäftsfeld Gas- und Prozesstechnologie entwickeln wir die nötigen Sensoren. Aus den Messdaten lässt sich ableiten, welche Maßnahmen nötig sind, um das Ökosystem Wald trotz Klimawandels zu erhalten. Auf Drohnen montierte Laserscanner ermöglichen erstmals die präzise Erfassung des Waldes und des Untergrunds aus der Luft. Zur Auswertung der Scannerdaten setzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Geschäftsfeld Objekt- und Formerfassung auf Methoden der künstlichen Intelligenz. Das Ergebnis ist eine wertvolle Datengrundlage zur Planung der Waldbewirtschaftung.

Die Logistik der Holzwirtschaft profitiert von der markierungsfreien Rückverfolgung von Baumstämmen mithilfe der Track & Trace Fingerprint-Methode, die im Geschäftsfeld Produktionskontrolle entwickelt wurde. Und das Holz, das am Ende thermisch verwertet wird, erzeugt dank innovativer Feinstaubfilter deutlich weniger Emissionen als bisher. Solche Filter – elektrostatisch, selbstreinigend und mittels Abwärme betrieben – entwickeln wir im Geschäftsfeld Thermische Energiewandler. Das Thema »Forst« passt zudem zu unserem Standort Freiburg und zum Schwarzwald: An der Universität Freiburg steht die Forstwissenschaft seit den 1980er Jahren hoch im Kurs. So finden wir regional zahlreiche Anknüpfungspunkte in der Wissenschaft und auch in der Industrie.

Projektfelder dieser Art machen uns sehr viel Freude und harmonieren exzellent mit unserer Mission: *Fraunhofer IPM steht für angewandte Forschung. Wir entwickeln extrem schnelle, genaue und robuste Messtechnik und Systeme, um industrielle Prozesse effizienter zu gestalten. Wir versetzen unsere*

Kunden in die Lage, den Energie- und Ressourceneinsatz zu minimieren und gleichzeitig Qualität und Zuverlässigkeit zu maximieren – und machen Prozesse ökologischer und gleichzeitig ökonomischer.

Dieser Mission werden wir mit all unseren Projekten gerecht. Beispielhaft dafür stehen vier Projekte, die wir Ihnen in diesem Jahresbericht näher vorstellen: 100%-Kontrolle für die individualisierte Massenproduktion, 3D-Leitungsvermessung in Baugruben, Messtechnik für eine sichere Wasserstoff-Infrastruktur und schaltbare Heatpipes zur kontrollierten Kühlung – stets tragen wir zu Ressourceneffizienz, Qualitätssicherung und Nachhaltigkeit bei. Unser Industrieertragsanteil, der auch 2021 mit knapp 40 Prozent wieder vergleichsweise hoch ausfällt, ist ein Beleg dafür, dass Ökonomie und Ökologie sich nicht ausschließen!

Haben wir Ihr Interesse geweckt? Dann bleiben Sie doch gern mit uns in Kontakt! Mehr als 2500 Menschen verfolgen das, was wir tun, in den sozialen Netzwerken oder haben unseren Newsletter abonniert. Sind Sie schon mit dabei? Falls nein, freuen wir uns über Ihre Anmeldung. Und mehr als 1000 Menschen haben 2021 die Gelegenheit genutzt, sich in einem unserer zwölf Online-Foren zu einem ganz konkreten Thema mit unseren Expertinnen und Experten auszutauschen. Vielleicht ist hier auch für Sie etwas Spannendes zu finden? Schauen Sie einfach mal rein! Und natürlich lohnt auch immer ein Blick auf unsere Homepage.

Bis hoffentlich bald!

Ihr

Karsten Buse

Prof. Dr. Karsten Buse, Institutsleiter



Mehr zum
Online-Forum



Anmeldung
Newsletter

Inhalt

Editorial	3
Überblick	6
Zahlen	8
Organisation	10
Kuratorium	12
Investitionen	13
Professuren	14
Magazin	16
Kurz berichtet	16
Wir stellen vor: Softwareentwickler bei Fraunhofer IPM	20
Interview: HÜBNER Photonics	22
Geschäftsfelder	24
Produktionskontrolle	26
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	28
Fokus: Individuelle Massenfertigung	36
Objekt- und Formerfassung	38
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	40
Fokus: Digitale 3D-Modelle	46
Gas- und Prozesstechnologie	48
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	50
Fokus: Wasserstoff-Messtechnik	56
Thermische Energiewandler	58
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	60
Fokus: Effiziente Wärmeschalter	64
Index	66
Publikationen Berichte	68
Patente Doktorarbeiten	74
Großprojekte	76
Netzwerk	77
Fraunhofer-Gesellschaft	78
Impressum	80





 **Fraunhofer**
IBM

 **Fraunhofer**
IBM

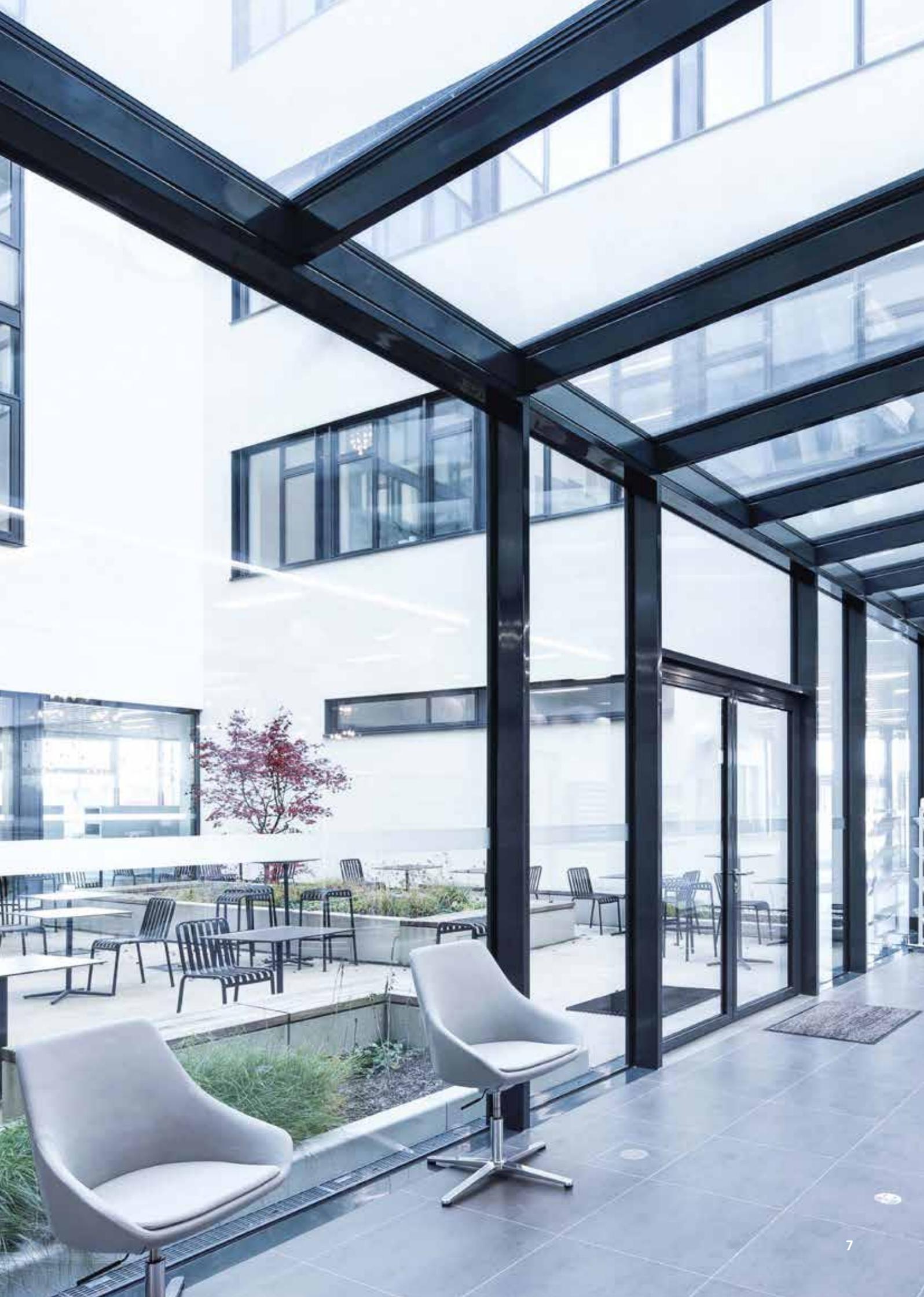
Haupteingang →

Busch →

Anlieferung →

Überblick Fraunhofer IPM

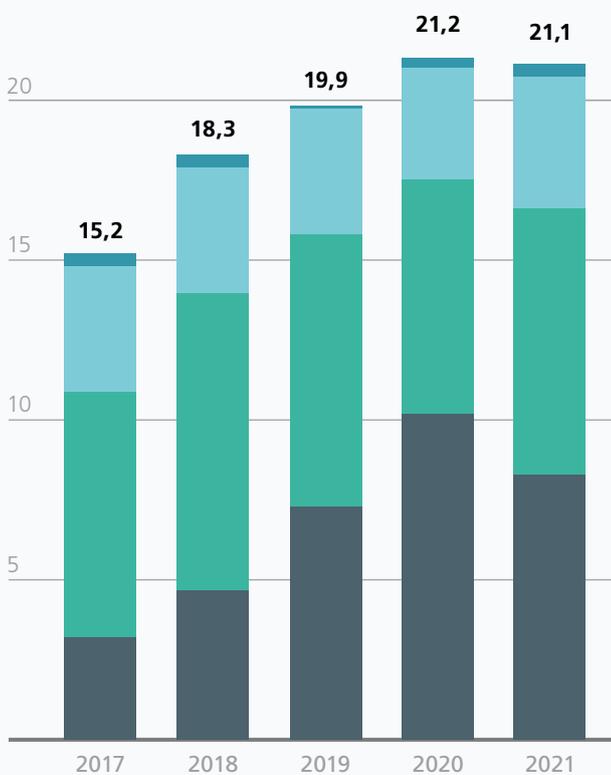




Zahlen Fraunhofer IPM

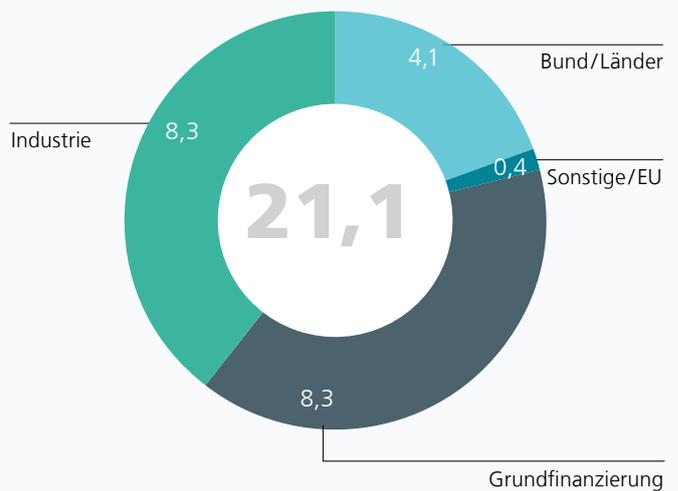


Entwicklung Betriebshaushalt in Mio. Euro

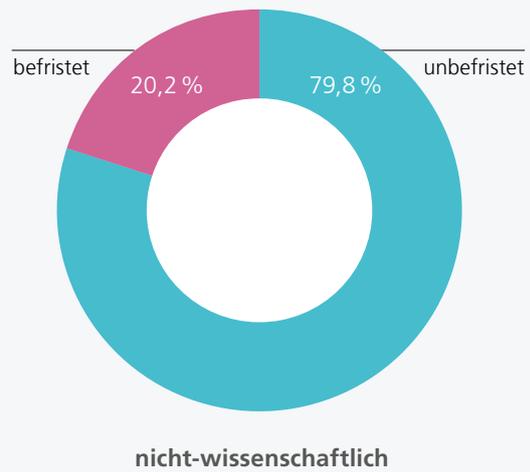
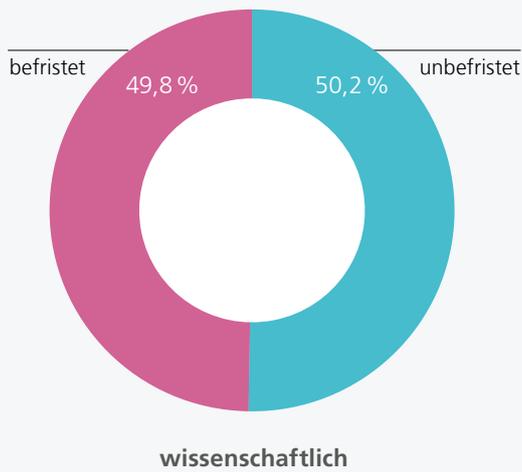


■ Grundfinanzierung ■ Bund/Länder
■ Industrie ■ Sonstige/EU

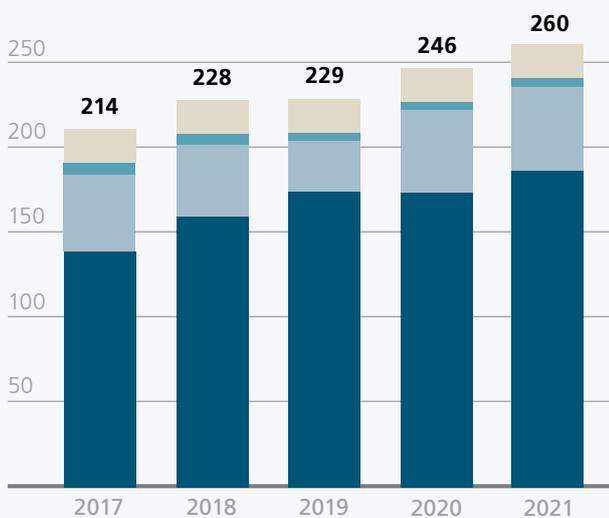
Betriebshaushalt 2021 in Mio. Euro



Beschäftigte nach TVÖD Anteil befristeter/unbefristeter Verträge 2021

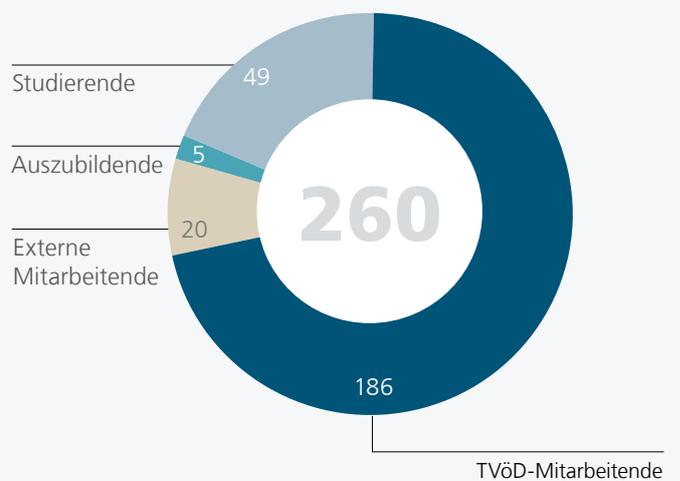


Entwicklung Anzahl der Mitarbeitenden



- TVÖD-Mitarbeitende
- Studierende
- Auszubildende
- Externe Mitarbeitende

Mitarbeitende 2021



INSTITUTSLEITUNG



Institutsleiter
Prof. Dr. Karsten Buse



Stellv. Institutsleiter
Dr. Daniel Carl

REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



Leiter Kommunikation und Medien
Holger Kock



Forschung
Dr. Rosita Sowade



Organisationsentwicklung
Dr. Heinrich Stülpnagel

VERWALTUNG UND IT



Verwaltungsleiter
Wolfgang Oesterling



Verwaltung
Sabine Gabele



Informations- und Telekommunikationstechnik
Gerd Kühner



Personal
Manuel Mak

TECHNISCHE DIENSTE



Technischer Leiter
Clemens Fallner



Mechanik und Konstruktion
Thomas Hinrichs



Gebäude und Technik
Clemens Fallner

PRODUKTIONSKONTROLLE ▶ Seite 26



Abteilungsleiter
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 38



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Alexander Reiterer



Mobiles terrestrisches
Scanning
Dr. Philipp von Olshausen



Airborne- und Unter-
wasser-Scanning
Dr. Christoph Werner



Smarte Daten-
prozessierung
und -visualisierung
Prof. Christoph Müller

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE ▶ Seite 48



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein



Integrierte
Sensorsysteme
Dr. Marie-Luise Bauersfeld



Spektroskopie und
Prozessanalytik
Dr. Raimund Brunner



Thermische Mess-
technik und Systeme
Martin Jäggle



Nichtlineare Optik
und Quantensensorik
PD Dr. Frank Kühnemann

THERMISCHE ENERGIEWANDLER ▶ Seite 58



Abteilungsleiter
Dr. Olaf Schäfer-Welsen



Kalorische Systeme
Dr. Kilian Bartholomé



Thermoelektrische
Systeme
Dr. Olaf Schäfer-Welsen

Kuratorium Gut beraten

Ein hochkarätig besetztes Team berät und unterstützt uns bei der strategischen Ausrichtung und Weichenstellungen für die Zukunft. Dr. Lutz Aschke übernahm 2021 den Vorsitz von Dr. Manfred Jagiella, der unserem Kuratorium sechs Jahre angehörte – fünf Jahre davon als Vorsitzender. Neu für das Kuratorium gewinnen konnten wir Sebastian Bannert und Dr. Mirko Lehmann.

Vorsitzender

Dr. Lutz Aschke
Carl Mahr GmbH & Co. KG

Dr. Mathias Jonas
Internationale Hydrographische
Organisation

Prof. Dr. Andreas Nüchter
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Mitglieder

Sebastian Bannert
Robert Bosch GmbH

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

Dr. Volker Nussbaumer
Volkswagen AG, Group Charging GmbH

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

Dr. Mirko Lehmann
Endress+Hauser Flowtec AG

Dr. Stefan Raible
ScioSense Germany GmbH

Stephanie Busse
DB Netz AG

Claus Mayer
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und
Wohnungsbau Baden-Württemberg

Prof. Dr. Michael Totzeck
Carl Zeiss AG

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



Die fachlichen High-
lights aus dem Institut
sind auch für das Kura-
torium eine Inspiration
im eigenen Alltag.«

Dr. Lutz Aschke
Vorsitzender des Kuratoriums

Investitionen 2021

Auch 2021 haben wir wieder kräftig investiert. Eine moderne technische Infrastruktur bildet die Basis, um unsere Kundinnen und Kunden mit exzellenter Forschung noch besser unterstützen zu können.

Koordinatenmessmaschine

Wie genau messen unsere 3D-Holographiesysteme? In der Industrie werden Topographie-Referenzmessungen in der Regel mithilfe taktiler Koordinatenmessmaschinen (KMM) durchgeführt. Sie messen hochgenau und gelten daher als der Goldstandard in der dimensionellen Messtechnik. Um die Messmittelfähigkeit unserer Holographie-Systeme nachzuweisen, steht uns im Institut die derzeit genaueste am Markt erhältliche KMM zur Verfügung: die Leitz Infinity 12.01.6. Das System wurde 2021 in einem temperierten, vibrationsarmen Raum installiert und in Betrieb genommen.

Magnetfeldabgeschirmter Raum

Seit 2021 laufen die Arbeiten am »Technikum Quanten-Magnetometrie«, einem magnetisch abgeschirmten Raum, der ab Herbst 2022 genutzt werden kann. In dem begehbaren, rund 30 m³ großen Kubus werden Quantenmagnetometer weiterentwickelt und zugehörige Anwendungen erprobt.

Dauerstrich-Laserlichtquelle

Mit einer spektral weit durchstimmbaren Dauerstrich-Laserlichtquelle sind wir ab sofort in der Lage, die Dispersionseigenschaften der am Institut gefertigten Lithiumniobat-Wellenleiter über einen weiten Spektralbereich, vom Sichtbaren bis ins mittlere Infrarot, zu charakterisieren.

System zur Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen (Eigenbau)

Ein am Institut aufgebautes System ermöglicht uns das »Schreiben« optischer Wellenleiter mithilfe ultrakurzer Laserpulse. Pulsenergie, Pulswiederholrate und Polarisation sind manuell einstellbar und die Laserpulse können durch verschiedenartige Optiken fokussiert werden. Die Werkstücke werden auf mehreren Zentimetern Verfahrweg submikrometergenau positioniert.

Halbautomatisches Bondsystem

Zum Bonden von Lithiumniobat auf SiO₂-Wafer hat das Institut einen neuen Waferbonder zur Verfügung. Die Bondwerkzeuge ermöglichen es, die Wafer kontaminationsfrei zusammenzufügen. Die gebondeten Waferstacks dienen als Ausgangsmaterial für die am Institut entwickelte, rein mechanische Lithiumniobat-Dünnschicht-Herstellung.

Testumgebung für Fluoreszenz-Laserscanner (Eigenbau)

Die Inline-Fähigkeit und Performance unserer Fluoreszenz-Laserscanner für die Beölungsmessung können wir unseren Kunden ab sofort in einer realistischen Umgebung demonstrieren, die einer Produktionsanlage nachempfunden wurde. Am Demonstrationsaufbau testen wir neue Entwicklungen sowie fertige Systeme und kalibrieren die Geräte auf neue Bleche oder Ölsorten.

Wind-LiDAR

Für die Entwicklung eines Wind-LiDAR-Systems zur berührungslosen Messung von Windgeschwindigkeiten haben wir ein 3-Kanal-LiDAR-Modul angeschafft. Es verfügt über drei Teleskope für 3D-Windmessungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und misst über bis zu 50 m Distanz.

Retrofit-Aufdampfanlage

Unsere Aufdampfanlage (BAK640) wurde durch den Austausch sämtlicher Steuerungskomponenten, der Hochspannungseinrichtung sowie der Vakuum-Messeinrichtungen umfänglich erneuert. Nachgerüstet oder ausgetauscht wurden zudem das Schichtdickenmonitoring, die Gasflussregelung sowie die Medienversorgung. Metalle und auch optische Schichten können nun als Schichtpakete schwingquartzeregelt aufgedampft werden. Zudem können Prozesse mit Reaktivgas gefahren werden und die Anlage wurde für die Beschichtung von 8"-Substraten erweitert.

Professuren Universität & Hochschule

Fraunhofer IPM ist mit drei Professuren und einer Privatdozentur an der Universität Freiburg vertreten. Durch die enge Universitätsanbindung können wir in unserer Projektarbeit auf neueste Ergebnisse aus der Grundlagenforschung aufbauen. Seit 2019 kooperiert das Institut im Rahmen des Fraunhofer-Hochschul-Kooperationsprogramms zudem mit der Hochschule Furtwangen.

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG



Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Professur für Optische Systeme

Prof. Dr. Karsten Buse

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



Forschungsschwerpunkte

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

Professur für Gassensoren

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

[www.imtek.de/
professuren/gassensoren](http://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

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



Forschungsschwerpunkte

- Inspektion und Überwachung von Objekten und 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
- Integrierte Optik



HOCHSCHULE FURTWANGEN

HOCHSCHULE
FURTWANGEN
UNIVERSITY



*In direkter Nachbarschaft:
Die Technische Fakultät der
Universität Freiburg mit dem
Institut für Mikrosystemtechnik*

Fakultät Digitale Medien

Professur für Computergrafik

Prof. Christoph Müller

[www.hs-furtwangen.de/
fakultaeten/digitale-medien](http://www.hs-furtwangen.de/fakultaeten/digitale-medien)

Forschungsschwerpunkte

- Echtzeit 3D-Visualisierung in Industrie und Medizin
- Interaktive Visualisierungslösungen in der Messtechnik
- Fotorealismus in der Echtzeit-Computergrafik
- Software-Engineering in der 3D-Computergrafik
- Synthetische Trainingsdaten für KI-basierte Bildklassifikation

Magazin Kurz berichtet



Online-Forum

Gekommen, um zu bleiben

Mehr als 15 Veranstaltungen in weniger als zwei Jahren: Das ist die bisherige Bilanz unserer virtuellen Veranstaltungsreihe »Fraunhofer IPM Online-Forum«.

Das Format wurde 2020 ins Leben gerufen, um auch während der Pandemie den fachlichen Austausch zwischen Wissenschaft und Industrie aufrecht zu erhalten. Mit oft

über 100 Anmeldungen pro Termin war das Interesse von Anfang an groß – inzwischen ist das Online-Forum ein fester Bestandteil unseres Veranstaltungskalenders. In regelmäßigen Abständen diskutieren wir je ein klar umgrenztes Thema aus der Mess- und Prüftechnik. Direkt im Anschluss können die Teilnehmenden spezielle Fragen im kleinen Kreis diskutieren – an unseren virtuellen Kaffeetischen. Über neue Termine informieren wir auf unserer Webseite und per Newsletter.



Energy Efficiency Award

Preisgekröntes System liefert CO₂-freie Wärme

So nachhaltig wie möglich: Das war eines der Ziele bei der Planung unseres 2020 fertiggestellten Neubaus im Freiburger Norden. Ein zentrales Projekt war dabei die Teilnahme an einem intelligenten Abnahmesystem für Nahwärme eines benachbarten Industriebetriebs. Das Konzept für das Nahwärmenetz stammt von der Badenova Wärmeplus GmbH & Co. KG und ihrem Softwarepartner Mondas

GmbH und wurde nun mit dem renommierten Energy Efficiency Award ausgezeichnet.

Aus Effizienzgründen hatte sich Fraunhofer IPM bereits frühzeitig für ein Niedertemperatur-Heizsystem entschieden. Das zahlte sich schnell aus: Für den Anschluss an das Nahwärmenetz fehlte somit nur noch eine Schnittstelle, die den direkten Eingriff in die Gebäudetechnik erlaubt. Nun werden Büros, Labore und Konferenzräume mit CO₂-freier Wärme beheizt.



Über eine eigens geschaffene Schnittstelle bezieht Fraunhofer IPM CO₂-freie Wärme aus dem Nahwärmenetz.



badenovaWÄRMEPLUS



9. Gassensor-Workshop

Rekordteilnahme

Der Gassensor-Workshop am 18. März 2021 verzeichnete eine Rekordteilnahme: Mehr als 150 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Industrie und Forschung schalteten sich virtuell zu. Auf dem vierstündigen Programm standen sieben Fachvorträge über technologische Trends in der Gassensorik. Ein Themenschwerpunkt war die Wasserstoff-Messtechnik. Vertreter von Infineon und Dräger stellten darüber hinaus Sensoren zur CO₂-Messung vor. Ebenfalls präsentiert wurden Konzepte zur mobilen, selektiven Stickoxidmessung in Verbrennungsmotoren sowie ein Doppel-Frequenzkamm-Spektrometer. Im Anschluss an die Vorträge gab es Gelegenheit, mit den Referentinnen und Referenten an virtuellen Kaffeetischen zu diskutieren.

Der Workshop endete mit einem virtuellen Laborrundgang. Der nächste Gassensor-Workshop ist für den 16. März 2023 geplant. Dann wird die Gassensor-Community die 2020 bezogenen Labore von Fraunhofer IPM erstmals vor Ort besichtigen können.

www.gassensoren.fraunhofer.de

Oben rechts: Die Teilnehmerinnen erhielten für den Girls' Day vorab einen Bausatz für einen CO₂-Sensor.

Digitaler Girls' Day

MINT ist auch was für Mädchen

Wie lernen Maschinen? Und bei welchem CO₂-Wert muss ich lüften? Diese zwei Themen standen 2021 beim bundesweiten Girls' Day auf unserer Tagesordnung. In zwei Gruppen durften Mädchen aus den Klassenstufen 7 bis 10 einen CO₂-Sensor bauen und ihr eigenes neuronales Netz trainieren. Die Schülerinnen waren mit viel Spaß und Engagement bei der Sache und stellten zahlreiche Fragen zur Forschung bei Fraunhofer. Dass der Girls' Day erstmalig digital stattfand, war auch ein Vorteil: Wurde das Angebot bisher vorrangig von Mädchen aus der Region wahrgenommen, kamen die Anmeldungen diesmal aus der ganzen Republik – von Hamburg bis München.



Es hat großen Spaß gemacht und ich habe wirklich viel gelernt!«

Mia, 13 Jahre



Stellvertretend für das Team nahm Prof. Dr. Alexander Reiterer (m.) den KI-Preis von Baden-Württembergs Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut (r.) entgegen.

KI-Champions Baden-Württemberg

Infrastrukturplanung wird digital

Welcher Straßenbelag ist verbaut? Wo stehen Bäume, Laternen, Abfalleimer? Intelligente Karten für die Infrastrukturplanung enthalten solche Informationen und können dank eines KI-basierten Tools von Fraunhofer IPM nun deutlich effizienter erstellt werden. Das Tool wertet 3D-Messdaten von Bauarealen vollautomatisiert aus und integriert sie in digitale Karten. Für die Entwicklung der Software wurde Fraunhofer IPM im Juli 2021 von Wirtschaftsministerin Hoffmeister-Kraut als »KI-Champion Baden-Württemberg« ausgezeichnet. Digitale Karten sind heute Standard für eine BIM-konforme Infrastrukturplanung. Sie zu erstellen ist jedoch äußerst aufwändig: Informationen aus Messdaten werden von Hand eingepflegt. Das KI-basierte Tool erstellt die Karten in wenigen Tagen statt wie bisher Wochen.

Für die KI-basierte Objektklassifizierung kombinierte das Team von Fraunhofer IPM klassische geometrie- und merkmalsbasierte Objekterkennung mit Methoden des Deep Learning, einem Ansatz aus dem Bereich Machine Learning. Für das Training des zugrunde liegenden künstlichen neuronalen Netzes wurde ein weltweit einzigartiger Trainingsdatensatz speziell für den Kontext Infrastrukturplanung entwickelt. Er enthält mehr als 30 Objektklassen inklusive unterschiedlicher Tages- und Jahreszeiten, spezifischer Lichtverhältnisse bis hin zu regionalen Besonderheiten.



Prof. Dr. Alexander Reiterer

Bei der KI-basierten Dateninterpretation hilft uns ein tiefes Verständnis in Bezug auf die Qualität von 3D-Messdaten.«



Youtube Video Preisverleihung

Wir stellen vor Softwareentwickler bei Fraunhofer IPM

Drei Menschen, drei Abteilungen, ein Job – oder doch drei verschiedene? Dominik Störk, Dominic Pietz und Christian Lutz entwickeln Software für unsere Messsysteme, jeder in einer anderen Abteilung. Bedeutet Softwareentwicklung überall das Gleiche? Und woraus zieht man als Entwickler seine Motivation? Wir haben nachgefragt.



Dominik Störk

Objekt- und Formerfassung



Ich arbeite schon über zehn Jahre am Institut. Anfangs war ich eher hardwarenah unterwegs: bei der Entwicklung und Kalibration von Sensoren. Mit der Zeit kam dann die Softwareentwicklung dazu – das Thema Deep Learning spielt da eine zentrale Rolle. Unsere Kunden benötigen zum Beispiel Daten für die Bauplanung, aber sie wollen ja nicht die komplette Welt in 3D vermessen; sie wollen wissen: Wo stehen Leitungsmasten, wo sind Gullideckel, wo parken Autos?

Eines meiner größten Erfolgserlebnisse war ein Projekt mit der Deutschen Telekom: Es war das erste Industrieprojekt, in dem wir neben unseren Messfahrzeugen auch die gesamte Prozesskette von der Datenerfassung über die Auswertung bis hin zum Einsatz in der Cloud aufgebaut haben. Das war eine riesige Herausforderung. Jedes Projekt ist ein kreativer Prozess, in dem man immer viel Neues lernt – vor allem in der Zusammenarbeit mit Kunden.

Meine Arbeit ist sehr abwechslungsreich – von der Projektleitung bis zum Programmieren ist alles dabei. Die automatisierte Auswertung von Daten ist ein dynamisches Thema, da tut sich auch in der Forschung noch viel.«



Dominic Pietz

Gas- und Prozesstechnologie



Ich bin in der Abteilung Gas- und Prozesstechnologie verankert, arbeite aber auch viel abteilungsübergreifend. Mein Job ist das Co-Design von Hardware und Software: Ich schaffe den Brückenschlag zwischen dem physikalischen Messsystem und der Benutzeroberfläche.

Gleich in meinem ersten Projekt war ich voll eingespannt. Die Aufgabe war sehr speziell: Wir haben ein Messgerät entwickelt, das lichtempfindliche Proteine in Pflanzen untersucht. Dabei wurde alles abverlangt: Die Programmierung der Hardware, die Datenauswertung und -verarbeitung sowie die grafische Darstellung der Daten.

Im Moment arbeite ich unter anderem an einem System zur Gasdetektion, das auf einer Messe ausgestellt werden soll. Dafür programmiere ich eine Benutzeroberfläche. Die Kunden wünschen sich Einfachheit und intuitive Bedienbarkeit; dieser Aspekt rückt immer mehr in den Vordergrund. Die direkte Verbindung zum Kunden motiviert mich am meisten: Ein System zu schaffen, das man am Ende benutzt – nicht nur ein Programm, das man im Hintergrund ausführt.«



Christian Lutz

Produktionskontrolle



Wir entwickeln optische Sensoren und Systeme, die Bauteile und Funktionen prüfen – mein Job ist es, die passende Software zu entwickeln. Das Herzstück ist meist die Bildverarbeitung: Wir bekommen von unseren Kunden Kataloge mit Fehlerarten und Beispielbildern und schreiben Software, die Bauteile darauf prüft und entscheidet, was gut oder schlecht ist.

Mein Lieblingsthema ist aktuell die Inspektion von Bauteilen im freien Fall. Hier ist unser Ziel die Entwicklung einer projektübergreifenden Software, die man für den spezifischen Einsatz modularisieren und anpassen kann. Generell mag ich die Vielfalt von Projekten und Fragestellungen, an denen wir hier arbeiten. In jedem Projekt entsteht etwas Neues, maßgeschneiderte Lösungen – oft auch an der Grenze des Machbaren.

Die Nähe zur Anwendung ist dabei eine Bereicherung: Es macht mich stolz zu sehen, wie beim Kunden kleine Bauteile mit filigraner Mikrostruktur oder metergroße Bleche im Sekundentakt durch die Anlage rattern und mit unseren Systemen und unserer Software auf Maßhaltigkeit, Defekte und Verunreinigungen geprüft werden.«

Interview HÜBNER Photonics

»Gemeinsam mit Fraunhofer IPM sind wir in der Lage, unsere Produkte viel schneller zu entwickeln.«

Die Firma HÜBNER ist Weltmarktführer für Faltenbälge und Übergangssysteme bei Bussen, Bahnen und Flugzeugen. Wie kam es dazu, in die Photonik-Branche einzusteigen?

Korbinian Hens: Es ging hier ganz klar um Diversifizierung. HÜBNER hatte das Luxusproblem, in seinem Kerngeschäft Weltmarktführer zu sein. Das heißt, das Wachstum der Firma war durch den Markt begrenzt. Der Schritt in die Photonik war ganz klar strategisch: Wir wollten mehr in Richtung Hightech gehen, um – unabhängig vom Kerngeschäft – komplett neue



Der Physiker Korbinian Hens ist COO und R&D-Manager bei HÜBNER Photonics. Er ist verantwortlich für die Entwicklung, Produktion und den Servicebereich der Photonics-Produkte aus Kassel.

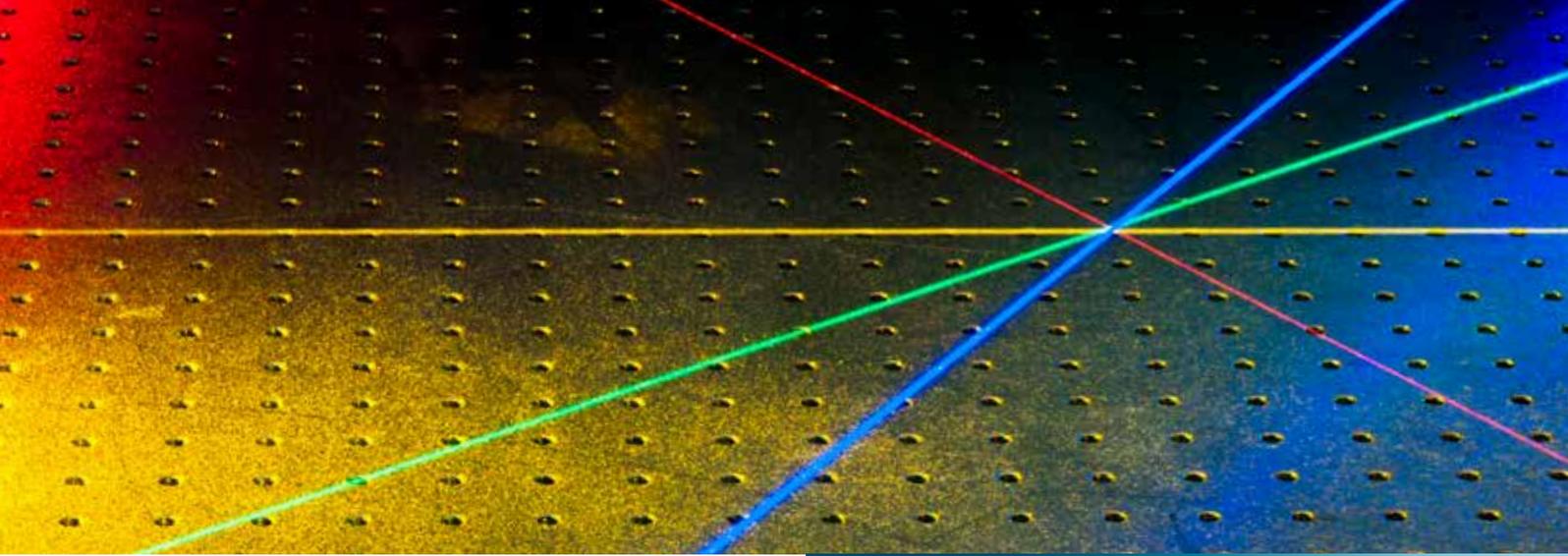
Marksegmente zu erschließen, in denen das Unternehmen wachsen kann. Allein was fehlte, war das notwendige technologische Know-how. HÜBNER hatte daher bereits seit 2006 mit Fraunhofer IPM gemeinsam Terahertz-Systeme entwickelt. Zusätzlich ging es ab 2012 dann mit Fraunhofer IPM um die Entwicklung eines neuartigen durchstimmbaren Lasersystems – den späteren C-WAVE. Als dann beide Prototypen 2014 auf der Photonics West mit einem Prism-Award ausgezeichnet wurden, hat das Thema bei HÜBNER Fahrt aufgenommen.

Das heißt, diese beiden Auszeichnungen waren so etwas wie die Geburtsstunde von HÜBNER Photonics?

Vielleicht ja. Denn mit dem Entwicklungserfolg stellte sich nun die Aufgabe der Vermarktung. Dazu haben wir einen stärkeren Partner gesucht und mit dem schwedischen Laserspezialisten COBOLT AB gefunden und Ende 2015 akquiriert. Die neue Sparte HÜBNER Photonics wurde daraufhin in 2016 gegründet.

Welche Rolle spielte dabei die enge Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

Die Art der Zusammenarbeit hat sich über die Jahre hinweg stark verändert und entwickelt. Wenn wir über das allererste C-WAVE-Projekt reden, da hatte bei Hübner überhaupt niemand Ahnung von Photonik. Trotzdem wollte man sich aber bestimmte Technologien zusammen mit Fraunhofer IPM näher anschauen. Von unserer Seite aus wurden damals Entwicklungsprojekte betreut, ohne auch nur einen einzigen Menschen im Haus zu haben, der sich mit Dingen wie z. B. Lasern auskannte. Mittlerweile haben wir natürlich ganze Teams aufgebaut, die sich um die Produkte kümmern – und auch um deren Weiterentwicklung. Fraunhofer IPM ist aber weiterhin mit dabei. Gerade wenn es um Grundlagen geht, ist das für uns eine enorme Hilfe. Gemeinsam mit Fraunhofer IPM sind wir in der Lage, neue Produkte viel schneller zu entwickeln. Wir kommen dabei mehr aus der Kundensicht: User Interfaces, Software-Entwicklung und Elektronik plus Anpassungen an



Durchstimmbar: Beim C-WAVE-Lasersystem (unten) lässt sich die gewünschte Laserwellenlänge über einen weiten Bereich gezielt und einfach einstellen.

kundenspezifische Anwendungen – das sind so die Schwerpunkte, um die wir uns bei HÜBNER kümmern. Und umgekehrt hat Fraunhofer IPM immer noch den Hut auf, wenn es um Grundlagenforschung, Materialien oder Optikdesigns geht. Aber das greift alles sehr eng ineinander – ohne harte Grenze. Auf diese Weise bleiben wir durch die externe Forschung und Entwicklung bei Fraunhofer IPM immer am Puls der Zeit und können neueste Technologien bewerten und ins Haus holen. Entscheidend ist dabei der offene Austausch auf Augenhöhe. Eine reine Kundenbeziehung wäre hier fehl am Platz.

Nach welchen Kriterien entscheiden Sie, ob Sie eine Neuentwicklung mit einem externen Partner machen?

Es geht bei uns oft um Geschwindigkeit. Wir haben natürlich eigene Entwicklungsressourcen im Haus. Und setzen diese so viel wie möglich ein, um die einzelnen Entwicklungsschritte selbst voranzutreiben. Zusätzlich ist es aber mindestens genauso wichtig, dass man die Systeme von Grund auf in ihrer Gesamtheit versteht – dafür brauchen wir externe Partner wie Fraunhofer IPM. Gemeinsam sind wir viel schneller darin, neue Technologien wirklich ins marktfähige Produkt zu bringen.



HÜBNER Photonics

HÜBNER Photonics entwickelt und produziert Hochleistungslaser und Terahertz-Systeme. Mit rund 100 Mitarbeitenden ist sie der kleinste von drei Geschäftsbereichen der HÜBNER GmbH & Co. KG. Die gesamte HÜBNER Group hat rund 3500 Mitarbeitende an weltweit 25 Standorten und erwirtschaftete im Jahr 2020 einen Umsatz von etwa 450 Mio. Euro.

Mehr Infos unter: <https://hubner-photonics.com>

Was musste alles zusammenkommen, um am Ende in einem neuen Markt tatsächlich Erfolg zu haben?

Das ist natürlich immer ein bisschen wie Rätseln: Man weiß es nie ganz genau. Aber ich glaube tatsächlich, dass Erfolg ganz stark mit Personen zusammenhängt. Allein die Offenheit und der Weitblick von Reinhard Hübner, der von seinem Vater eine über Jahrzehnte aufgebaute Firma übernommen hat, und dann plötzlich sagt: »Ich möchte mich diversifizieren, und zwar komplett anders: andere Märkte, andere Produkte, andere Technologien.« Und der dann auch dieses Vertrauen hat zu sagen: »Okay, wir probieren das jetzt aus!« Der Geld in die Hand nimmt und losmarschiert. Das ist schon etwas, was nicht jeder kann. – Tatsächlich glaube ich: Diese Entscheidung war die Initialzündung. Und manchmal braucht es natürlich auch ein bisschen Glück oder ein paar Zufälle, dass man die richtigen Leute zusammenbringt. Das haben wir gemeinsam geschafft.

Herr Hens, vielen Dank für das Gespräch!

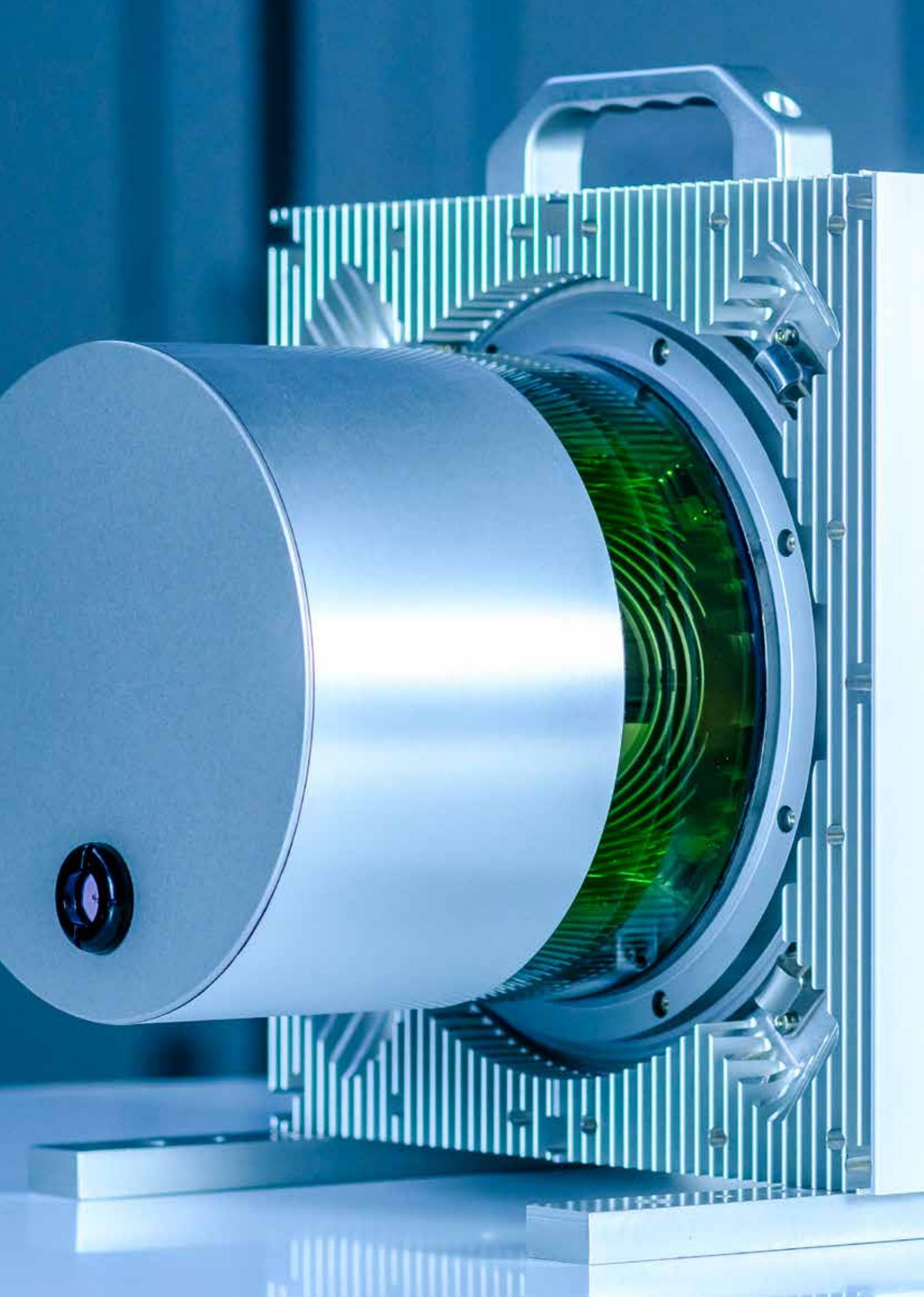


Der Schritt in die Photonik war ganz klar strategisch; wir wollten neue Marktsegmente erschließen.«

Korbinian Hens

Geschäftsfelder

Im Auftrag des Kunden



Überblick Produktionskontrolle

So schnell messen, wie Hersteller produzieren. Das ist unser Beitrag für eine effiziente, geregelte Produktion.

Im Geschäftsfeld »Produktionskontrolle« entwickeln wir 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 kleine Defekte oder Verunreinigungen 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 digitale Holographie, Infrarot-Reflexions-Spektroskopie und Fluoreszenzverfahren, kombiniert mit sehr schneller hardwarenaher Bild- und Datenverarbeitung. Die kundenspezifisch optimierten Systeme werden beispielsweise in der Umformtechnik im Automobilbereich und zur Qualitätssicherung bei Medizinprodukten bis hin zur Elektronikfertigung eingesetzt.



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

Geometrische Inline-Messsysteme

- Präzise Vermessung von Funktionsflächen im Produktionstakt
- 3D-Vermessung von Werkstücken direkt in der Werkzeugmaschine
- Schnelle, dynamische Verformungsmessung

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



**Wir entwickeln maßgeschneiderte
Mess- und Prüfsysteme für eine
sich wandelnde Produktion.«**

Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter

Highlights Produktionskontrolle

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Track & Trace Fingerprint ist das erste markierungsfreie Verfahren zur Bauteil-Rückverfolgung.

Bauteil-Rückverfolgung

Teststand für Track & Trace Fingerprint

Unsere Track & Trace Fingerprint-Technologie wird in der Industrie bereits erfolgreich zur markierungsfreien Bauteilrückverfolgung in der Produktion eingesetzt. Statt einer eigens angebrachten Markierung nutzt das Verfahren die vorhandene Oberflächen-Mikrostruktur von Bauteilen als Marker: Kamerasysteme liefern die zur Identifikation der Bauteile notwendigen Bilder im Produktionsfluss und generieren daraus eine charakteristische Bitfolge. Bei der Platzierung der Kameras in der Linie sind viele Faktoren zu beachten: der Bauraum, die Handlingsysteme, der Produktionstakt, die Umgebungsbedingungen,

die Menge der sich im Umlauf befindenden Bauteile – und natürlich die Bauteiloberfläche selbst. Für eine optimale Wiedererkennung können zudem Parameter am Kamerasystem und an der Software variiert werden.

All diese Rahmenbedingungen lassen sich am neu entwickelten Track & Trace-Fingerprint-Teststand anhand weniger Dutzend realer Bauteile mit geringem Aufwand erproben. Industriekunden können den Teststand für Machbarkeitsstudien leihen oder kaufen. Das Team von Fraunhofer IPM unterstützt bei der Inbetriebnahme, bei der Anpassung von Track & Trace Fingerprint an die spezifischen Produktionsbedingungen und bei der späteren Integration in die Linie.



Track & Trace Fingerprint auf Youtube



Linienintegration sorgfältig vorbereiten: Am Teststand können alle Parameter getestet werden.



Projekt DiGeBaSt

Baumstämme markierungsfrei identifizieren

Holz ist ein wertvoller und nachhaltiger Rohstoff – vorausgesetzt, unsere Wälder werden ökologisch und ökonomisch effizient bewirtschaftet. Im Forschungsprojekt DiGeBaSt (Digitalisierung Gefällter Baumstämme) entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern ein markierungsfreies Identifizierungsverfahren für Baumstämme und Stammteile, das die digitale Datengrundlage für ein lückenloses Controlling in der Forstwirtschaft liefern soll.

Statt Nummerier-Plättchen zur Kennzeichnung gefällter Bäume soll künftig die individuelle Oberflächenstruktur an den Sägeflächen als Fingerabdruck dienen. So können einzelne Baumstämme von der Ernte bis zur Vermessung im Sägewerk rückverfolgt werden. Dazu werden Kameraaufnahmen der Sägeflächen auf eine individuelle Bitfolge reduziert; der spätere Abgleich erfolgt über eine erneute Bildaufnahme desselben Sägeflächen-Ausschnitts und die entsprechende Bitfolge. Die ID-Daten der Stämme werden mit geografischen Daten und weiteren Informationen verknüpft und in einer Cloud bereitgestellt. Trotz der Vermessung während des Ernteprozesses lässt sich das Holz somit in Zukunft fälschungssicher einzelnen Waldbesitzern zuordnen. Dies ermöglicht u. a. eine transparente Abrechnung bei einer gemeinschaftlichen Vermarktung der Ernte.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Programm Digital GreenTech)

Projekt GumProDig

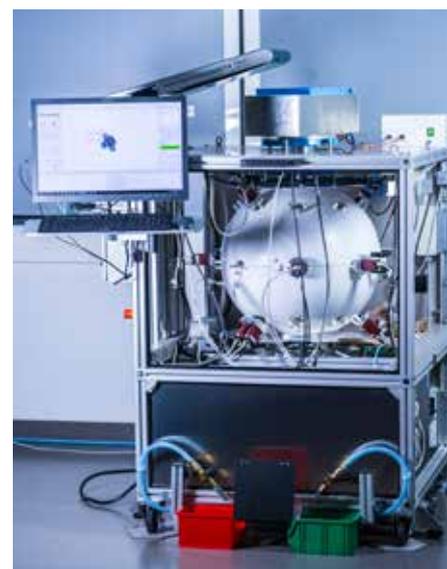
Leichtbau: Digitale Prozesse für eine energieeffizientere Produktion

Ein Messsystem zur Qualitätsüberwachung und Bauteil-Rückverfolgung soll in Zukunft eine energieeffizientere Produktion von Leichtbauteilen ermöglichen. Leichtbauteile werden heute überwiegend durch energieintensives Zerspanen hergestellt. Würden die Teile durch Umformen gefertigt, ließe sich über die Hälfte der CO₂-Emissionen einsparen. Voraussetzung dafür sind inline-fähige Messverfahren, die die hohen Standards für Fertigungstoleranzen auch bei der Kaltmassivumformung sicherstellen.

Ein solches System entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Forschungspartnern im Projekt GUmProDig (Ganzheitliche Umform-Prozess-Digitalisierung), das im Frühjahr 2021 startete: Ein Freifall-Inspektionssystem soll zukünftig jedes einzelne Bauteil mikrometergenau auf geometrische Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität prüfen. Zusätzlich wird die individuelle Oberflächenstruktur der Teile an einer definierten Stelle als Fingerabdruck für die spätere Bauteilrückverfolgung aufgenommen. So lassen sich Qualitätsmerkmale individuellen Bauteilen zuordnen. Die digitalen Messdaten sollen darüber hinaus für die selbstlernende Optimierung von Produktionsanlagen genutzt werden. Dazu setzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf Methoden des maschinellen Lernens.

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau

Die Struktur der Sägefläche dient als Fingerabdruck zur Identifizierung von Baumstämmen.



Umformung von Leichtbauteilen: Qualitätsprüfung und Rückverfolgung im freien Fall

Wir vermessen Bipolar-Platten während der Kaltumformung mikrometer- genau.

Projekt SPOT

Spotlight auf Oberflächendefekte und Verunreinigungen

Partikel oder kleinste Defekte auf Bauteiloberflächen können die Funktion von Bauteilen oder nachfolgende Verarbeitungsprozesse beeinträchtigen. Bisher werden Fehler oder Verunreinigungen durch Sichtkontrolle oder durch Abspülen des Bauteils und Analyse der Spülflüssigkeit erkannt – beides sehr aufwändige Formen der Qualitätskontrolle. Ein optisches Inline-Messsystem, das Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern entwickelt, soll Partikel und Defekte auf metallischen Bauteilen zukünftig während der Produktion erkennen und klassifizieren (Projekt SPOT, System zur adaptiven photonischen Oberflächentestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem).

Auf Basis der Messdaten kann der Produktionsablauf unmittelbar korrigiert werden, indem z. B. Parameter einer Reinigungsanlage angepasst werden. Für die optische Erkennung setzen die Forschenden auf Kameratechnik mit adaptiver Lichtfeldsteuerung. Die optimale Ausleuchtung der Prüflinge sorgt dafür, dass ähnliche Defekttypen auf Bauteilen unterschiedlicher Geometrie und Oberflächenrelektivität im Messbild auch ähnlich aussehen. Dies ist die Voraussetzung für eine lernfähige KI-basierte Bildauswertung, die für verschiedenartige Geometrien und Oberflächenbeschaffenheiten funktioniert.

Spotlight: Dank eines adaptiven Lichtfelds lassen sich Defekte bestimmten Klassen zuordnen.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Programm Computer-Aided Photonics)

Projekt AKS-Bipolar

Qualitätssicherung für Kern- komponenten von Brennstoffzellen

Bipolar-Platten (BPP) sind zentrale Komponenten in Brennstoffzellensystemen. In modernen Brennstoffzellenstacks sind bis zu 600 solcher BPP verbaut. Bislang dominieren BPP aus Graphit, da es bei der Fertigung der Bauteile aus dünnen Blechen oder Metallfolien häufig zu Oberflächendefekten oder Maßabweichungen kommt. Solche Mängel erschweren die Montage und beeinträchtigen die Funktion der Brennstoffzelle. Metallische BPP haben jedoch einige Vorteile: Sie sind kostengünstiger und lassen sich in geringeren Stärken verarbeiten – eine Voraussetzung beispielsweise für den Einsatz im Automobil.

Ein Prüfsystem, das wir gemeinsam mit Partnern der Universität Stuttgart, Thyssenkrupp System Engineering und den Chemischen Werken Kluthe entwickeln, soll die Voraussetzung dafür schaffen, dass die Bauteile standardmäßig aus Metall hergestellt werden können. Ein digital-holographischer 3D-Sensor soll die Bauteile während der Kaltumformung mikrometergenau und vollständig prüfen. Ziel des Projekts ist eine umfassende Simulations-Toolchain: Diese beinhaltet einen digitalen Zwilling des Umformprozesses, anhand dessen wiederkehrende Fertigungsprobleme numerisch erfasst und systematisch beseitigt werden können (Projekt AKS-Bipolar, Aktive Prozesskontrolle bei der Serienfertigung hochpräzise geprägter Bipolarplatten).

Gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft (Trilaterales Transferprojekt)





Projekt SiBoF

Multiresistente Bakterien vor Ort nachweisen

Bakterielle Infektionen werden idealerweise mit einem für das jeweilige Bakterium passenden Antibiotikum behandelt – dies gilt vor allem angesichts der wachsenden Zahl multi-resistenter Erreger. Welches Antibiotikum infrage kommt, lässt sich anhand des Bakterien-Genoms herausfinden. Die Bestimmung erfolgt bislang in medizinischen Laboren. Fraunhofer IPM hat im Projekt SiBoF gemeinsam mit der LMU München eine Testplattform entwickelt, die den Erregernachweis automatisiert innerhalb einer Stunde am Point-of-Care ermöglicht, z. B. in einer Arztpraxis (Projekt SiBoF, Signal-Booster für Fluoreszenz-Assays in der Molekularen Diagnostik).

Herzstück des patentierten Systems ist ein miniaturisiertes hochauflösendes Fluoreszenz-Mikroskop, das am Fraunhofer IPM entwickelt wurde. Es detektiert einzelne DNA-Moleküle, die an den für spezifische Erreger präparierten Bindungsstellen eines Mikrofluidik-Chips

anbinden. Für die Detektion werden Fluoreszenzmarker eingesetzt. Zur Verstärkung der optischen Signale setzen die Forscherinnen und Forscher auf eine neue Methode: An der LMU entwickelte winzige Antennen aus nanometergroßen Metallpartikeln bündeln das Licht und verstärken das optische Feld. Die aufwändige chemische Verstärkung über die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) wird damit überflüssig.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF

Auf der MEDICA 2021 präsentierte das Team einen Demonstrator der kompakten, portablen Testplattform.



Für den Nachweis genügt ein einziges DNA-Molekül.«



Dr. Benedikt Hauer, Projektleiter



Wir wollen erreichen, dass Elektronik länger lebt.«



Dr. Markus Fratz
Projektleiter



Zeitschriftenartikel:
Digital holography in production.
An overview.
Light. Adv. Manuf. 2, 15 (2021)

Projekt LongPower

Holographische Inspektion von Leistungselektronik

Elektroschrott ist ein großes Problem für Mensch und Umwelt. Häufig werden ganze Geräte entsorgt, nur weil eine einzelne Komponente nicht mehr funktioniert. Im Forschungsprojekt LongPower haben sich Forschende von Fraunhofer IPM und dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg zum Ziel gesetzt, fehlerhafte Elektronikkomponenten schon in der Produktion zu erkennen, damit diese erst gar nicht verbaut werden – so können vorzeitige Ausfälle vermieden werden (Projekt LongPower, Holographisches Inspektionssystem für die Entwicklung und Serienherstellung anspruchsvoller Leistungselektronik).

Dazu untersuchten die Projektpartner IGBT-Chips, die häufig in Leistungselektronik verbaut sind (IGBT, Insulated-Gate Bipolar Transistor). Bei thermischer Belastung verformen sich diese Chips oft im Mikrometerbereich, was zum Versagen der Elektronik führt. Um solche Deformationen zu erkennen, konzipierten die Forschenden ein Demonstratorsystem für die Qualitätsprüfung: Ein am IMTEK entwickeltes Heizsystem setzt die Chips thermischer Belastung aus. Anschließend werden sie in einem von Fraunhofer IPM entwickelten digital-holographischen Verfahren geprüft – schnell, zeitaufgelöst und bildgebend. Dabei werden auch kleinste Deformationen sichtbar. Im Folgeprojekt Longpower 4.0 soll ein industrietaugliches Inspektionssystem zur 100-Prozent-Qualitätssicherung aufgebaut werden.

Gefördert vom Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg (LZN)

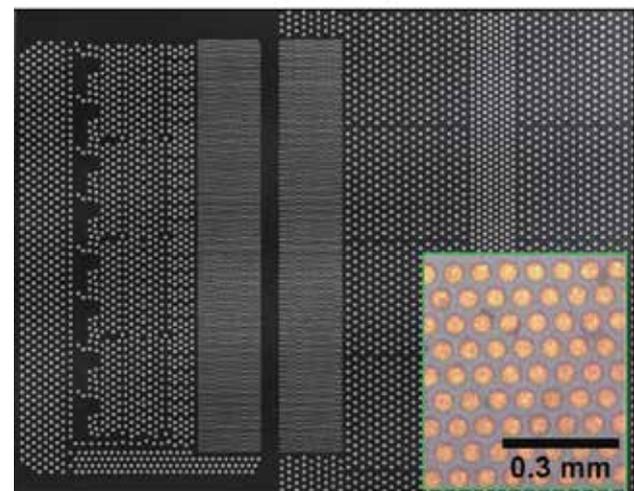
Höhenstruktur eines Ball Grid Arrays, aufgenommen mit dem 3D-Sensor: In der Kugeligitteranordnung befinden sich bis zu mehrere Hunderttausend Lötstellen für elektrische Kontakte. Das Inset zeigt einen Teil der Struktur in der Vergrößerung.

Qualitätskontrolle von Mikrostrukturen

3D-Messsystem für die Chip-Produktion

Auf Mikrochips der neuesten Generation befinden sich mehrere Hunderttausend elektrische Kontakte. Die einzelnen Chip-Baugruppen werden in einem Weichlötverfahren mit den Kontaktstellen einer Leiterplatte verbunden. Genauigkeiten bis weit in den Sub-Mikrometerbereich sind gefordert, damit die elektrischen Kontakte später zuverlässig funktionieren.

Das digital-holographische 3D-Inline-Messsystem HoloTop ermöglicht es nun erstmalig, die exakte Höhe jeder einzelnen Lötstelle in der Produktion zu messen. Das Team aus der Gruppe Geometrische Inline-Messsysteme hat ein solches System im Frühjahr 2021 beim weltweit größten Halbleiter-Hersteller, der Intel Corporation, linienbegleitend getestet. Die Anforderungen an die Messtechnik sind in der Chipbranche besonders hoch: Aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeiten muss die Messung im Bruchteil einer Sekunde erfolgen. Der große Dynamikbereich zwischen stark reflektierendem Lötmaterial einerseits und rauhen, dunklen Substraten andererseits ist eine weitere Herausforderung für die optische Messung. Um auch unter diesen Bedingungen eine sub-mikrometergenau 100-Prozent Qualitätskontrolle in der Chipproduktion zu ermöglichen, nutzt der digital-holographische 3D-Sensor Kameratechnik der neuesten Generation. Es ist das genaueste HoloTop-System, das bisher in die Anwendung gebracht wurde.





Projekt RE-USE

Ultradünne Beschichtung für eine höhere Recyclingquote

Verpackungen für empfindliche Produkte wie Lebensmittel oder Pharmazeutika bestehen aus Mehrschichtsystemen – einem Materialmix aus unterschiedlichen Polymeren und Funktionsschichten, an dem Recyclingprozesse scheitern. Vier Fraunhofer-Institute arbeiten im Projekt RE-USE gemeinsam an der Entwicklung nanometerdünner Barrierschichten, die es erlauben, Verpackungen zukünftig aus Monomaterialien herzustellen (Projekt RE-USE, Recyclingfähige Funktionsverpackungen für die Lebensmittel- und Pharmaindustrie durch ultradünne Barrierschichten). Die Menge des Fremdmaterials auf dem Trägerpolymer ist dabei so gering, dass ein sortenreines Recycling problemlos möglich ist.

Um die Qualität solcher »Superbarrieren« zu sichern, entwickelt Fraunhofer IPM eine inline-fähige Lösung, mit der sich Dicke und Elementzusammensetzung der Barrierschichten während der Herstellung vollständig prüfen und sogar regeln lassen. Dazu nutzen die Forschenden die charakteristischen spektralen Eigenschaften der Beschichtungen im Infrarotbereich. Bei schrägem Einfall des Lichts ist nicht nur die spektrale Signatur der Schicht, sondern auch die des Substrats zu erkennen. Aus diesen spektralen Merkmalen lassen sich Rückschlüsse auf die Dicke und chemische Zusammensetzung der Schicht ziehen.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE-Projekt)

Empfindliche Waren werden oft durch Verbundmaterialien geschützt. Gleichwertige Verpackungen aus Monomaterialien hätten Vorteile fürs Recycling.



F-Scanner optimiert Aluminium-Umformung

Geringeres Gewicht, höhere Korrosionsbeständigkeit – Karosserien aus Aluminium haben erhebliche Vorteile gegenüber Karosserien aus Stahl. Das Umformen von Aluminiumblechen ist allerdings schwieriger zu kontrollieren als bei Stahlblechen. Das Leichtmetall ist vergleichsweise spröde und die harte Oxidschicht führt zu stärkerer Werkzeugabnutzung. Für die Umformung werden daher Trockenschmierstoffe auf die Blechoberfläche aufgetragen. Deren Verteilung und Schichtdicke sind entscheidend für die Qualität der Umformung.

Zur Prüfung der Schmiermittelbelegung nutzt ein US-amerikanischer Automobilhersteller seit Neuestem unsere F-Scanner: Gleich vier der Fluoreszenz-Messsysteme wurden 2021 entwickelt und im Frühjahr 2022 in die Fertigungslinie integriert. Je zwei der vier baugleichen Systeme erfassen die Schmierstoffbelegung auf jeweils einer Blechseite über eine Breite von jeweils zwei Metern. Die Messungen erfolgen orts aufgelöst mit Millimeter-Auflösung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von bis zu 2,5 m/s. Mit 400 Zeilen pro Sekunde rastert jeder Scanner die Blechoberfläche mit einem Laserstrahl ab und detektiert das je nach Schmierstoffbelegung unterschiedlich starke Fluoreszenzsignal. Die dabei erzeugten 160 Mio. Datenpunkte pro Sekunde ergeben eine hochaufgelöste und vollständige Karte der Schmiermittelverteilung auf dem Blech.

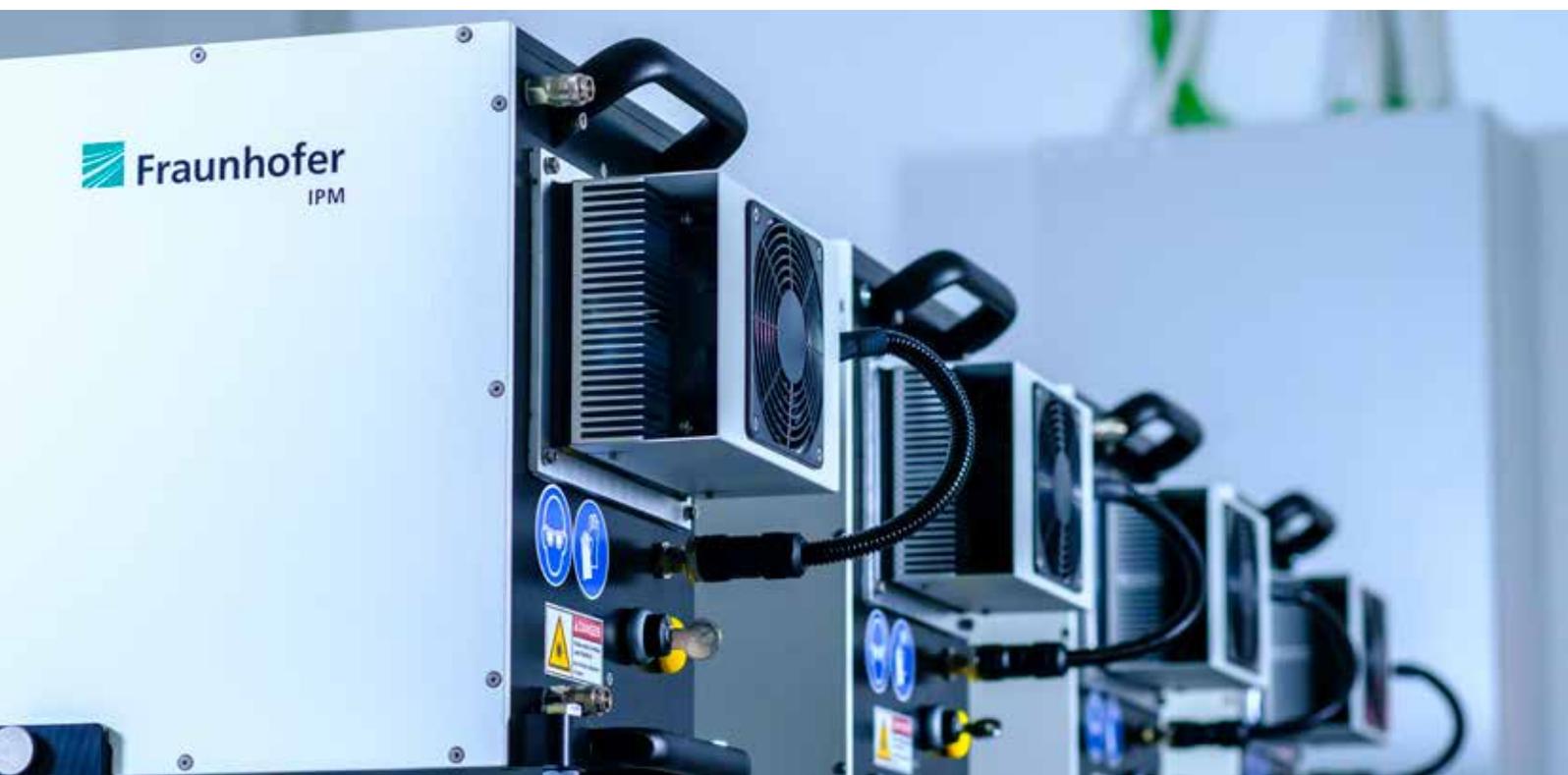
Vier F-Scanner prüfen bei einem US-amerikanischen Automobilhersteller die Belegung von Blechen mit Trockenschmierstoffen in Umformprozessen.



Als einziges System weltweit misst der F-Scanner die Dicke von Schmiermitteln in der Fertigung orts aufgelöst.«



*Dr. Alexander Blättermann
Gruppenleiter*



Produktionskontrolle | Messen & Veranstaltungen

parts2clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung
05.–7.10.2021

Messsysteme für die automatisierte 100-Prozent-Kontrolle von Oberflächen mit verschiedenen Bildgebungsverfahren zur Detektion und Quantifizierung partikulärer und filmischer Verunreinigungen (F-Scanner, F-Camera, F-Camera mini)

Forumsvortrag von Dr. Alexander Blättermann, Optische Oberflächenanalytik

Schnelle Fluoreszenzbildgebung – Filmische Verunreinigungen auf mm² bis m² Flächen detektieren

Medica

Weltforum der Medizin
15.–18.11.2021

Plattform für die Point-of-Care-Diagnostik: Erregernachweis anhand eines einzelnen DNA-Moleküls mithilfe eines hochauflösenden Fluoreszenzmikroskops und Signal-Verstärkung durch optische Antennen

Fraunhofer-Vision Seminare

Seminar mit Praktikum »3D-Messtechnik«
10.–11.11.2021

Expertenvortrag von Dr.-Ing. Tobias Seyler, Geometrische Inline-Messtechnik

Digital-holographische 3D-Messtechnik an Mehrachssystemen

Online-Forum Produktionskontrolle

Unsere virtuelle Veranstaltungsreihe – im Jahr 2021 fanden acht Online-Foren statt:

- Messtechnik für Präzisionsflächen, 27.01.2021
- Messtechnik für die Werkstoff- und Bauteilprüfung, 24.02.2021
- Markierungsfreie Bauteilrückverfolgung, 17.03.2021
- Bauteilprüfung im freien Fall, 21.04.2021
- Partikelmesstechnik, 12.05.2021
- Filmische Verunreinigungen erkennen und quantifizieren, 23.06.2021
- Dezentrales Track & Trace via Fingerprint, 21.07.2021
- Bauteil-Verformungen in Echtzeit messen, 29.09.2021

Geplant für 2022

Control 2022

Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung
03.–06.05.2022

parts2clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung
11.–13.10.2022

drinktec 2022

Weltleitmesse für die Getränke- und Liquid-Food-Industrie
12.–16.09.2022

Fraunhofer-Vision: Technologietag

19.–20.10.2022

Euroblech

Internationale Technologiemesse für Blechbearbeitung
25.–28.10.2022

Fokus Individuelle Massenfertigung

Produktion im Wandel: Für die 100-Prozent-Qualitätskontrolle von morgen sind flexible, innovative Lösungen gefragt.



Mikrometergenau vermessen: Unser digital-holographisches Messsystem prüft Präzisionsbauteile direkt in der Werkzeugmaschine.

In heutigen Produktionsumgebungen werden Güter in einer definierten Prozessreihenfolge gefertigt und montiert. Die industrielle Produktion von morgen sieht jedoch anders aus: Prozesse werden digitaler, Produkte individueller – Losgröße Eins ist keine Seltenheit mehr. Bei einem so hohen Grad an Individualisierung reicht die Qualitätsprüfung anhand von Stichproben nicht mehr aus.

Neue Herausforderungen – neue Ansätze

Sowohl für die Fertigung als auch für die Qualitätssicherung bedeutet das vor allem eines: Neue technologische Ansätze sind gefragt. Doch wie kann man flexible und autonome Produktionsumgebungen schaffen, ohne die Effizienz und Qualität der Fertigung zu beeinträchtigen? Diese Fragen machen wir zur

Grundlage unserer Arbeit im Geschäftsfeld Produktionskontrolle. Unsere Systeme liefern schon heute einen entscheidenden Mehrwert in Bezug auf Handling, Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung in der Produktion.

Individuelle Bauteile – individuelle Rückverfolgung

Für hochindividualisierte Produkte – zum Beispiel im Medizin- oder Automobilbereich – bestehen sehr hohe Ansprüche an die Dokumentation; die Fehlertoleranz ist gering. Hier ist eine vollständige und individuelle Rückverfolgbarkeit bis zum Beginn der Wertschöpfungskette unabdinglich. Das von Fraunhofer IPM entwickelte Track & Trace Fingerprint-Verfahren ermöglicht diese individuelle Rückverfolgung, und zwar ohne jegliche Markierung: Herzstück ist ein schnelles, kamerabasiertes Lesesystem. Es erzeugt eine hochaufgelöste Aufnahme der Mikrostruktur auf der Bauteiloberfläche. Aus den Bilddaten wird eine numerische Kennung erstellt; so entsteht eine individuelle digitale Signatur für jedes Bauteil. In einer zentralen Datenbank können daraufhin alle Daten aus Produktion und Qualitätssicherung dem digitalen Zwilling des Bauteils zugeordnet werden. Dieser »Fingerabdruck« lässt sich so schnell erzeugen, dass eine Zuordnung der Daten im Produktionstakt möglich ist – der Fertigungsablauf wird also nicht beeinträchtigt.

Flexible Qualitätssicherung direkt in der Linie

Eine weitere Herausforderung ist die Prüfung der Halbzeuge und Produkte: Wo alle Funktionsflächen vollständig geprüft werden müssen, sind inline-fähige Messsysteme eine Grundvoraussetzung. Die von Fraunhofer IPM entwickelten digital-holographischen Messverfahren ermöglichen es, auch in anspruchsvollen Umgebungen – z. B. in der Fertigungslinie oder in der Werkzeugmaschine – mit höchster Genauigkeit zu messen. Ein flächig messender Sensor vermisst beispielsweise Werkstücke in der Bearbeitungsmaschine – und zwar direkt an der Hohlschaftkegel-Schnittstelle, wo sie ohnehin zum Bearbeiten eingespannt werden. In wenigen Sekunden liefert er viele Millionen

Einzelpunkte mit einer Wiederholgenauigkeit im Sub-Mikrometerbereich. Der Vorteil: Fehler durch wiederholtes Spannen des Werkstücks entfallen und die Messzeit ist gegenüber der aufwändigen Vermessung in der Koordinatenmessmaschine deutlich kürzer. Das steigert Qualität und Effizienz.

Forschung mit weiteren Fraunhofer-Instituten

Unsere Expertise in der individuellen Rückverfolgung von Bauteilen und der 100-Prozent-Prüfung direkt in der Linie bringen wir unter anderem im Fraunhofer-Leitprojekt SWAP ein. Ziel des Projekts ist es, Fertigungsprozesse so zu optimieren, dass sie bestmöglich ausgelastet und hochflexibel sind, indem modulare Einheiten in verschiedenen Schwärmen von Werkzeugen, Maschinen, Mess- und Prüfeinrichtungen sowie Transportmitteln miteinander kollaborieren. Ein Teil des Projekts widmet sich der Kombination von Handling, Identifikation und Prüfung der Bauteile: Mobile Robotersysteme sollen die einzelnen Bauteile greifen, mittels Track & Trace Fingerprint automatisch identifizieren und mit auf der mobilen Plattform montierten Messsystemen vollständig prüfen. Anschließend werden die Bauteile zur nächsten Arbeitsstation weitertransportiert. So sollen die einzelnen Teile künftig ihren Weg durch die Produktion selbst »finden« – am Ende dieses Prozesses steht eine vollständig automatisierte 100-Prozent-Prüfung aller Teile direkt in der Fertigungslinie.

Fertigungsoptimierung mithilfe von KI

Zentral ist dabei der Einsatz von maschinellem Lernen: Die während der Qualitätsprüfung generierten Prüfergebnisse werden dem digitalen Zwilling jedes Bauteils zugeordnet und dienen als Datengrundlage für die Analyse und Optimierung des Fertigungsprozesses. Durch Transfer Learning (also das »Lernen aus dem Ähnlichen«) soll dieses Wissen auf andere Produktvarianten übertragen werden. Langfristig soll so ein prozessübergreifendes Modell des maschinellen Lernens entstehen, das nicht für jede Fertigungsanlage neu angelehrt werden muss.



Jedes Teil direkt in der Fertigung vollständig zu prüfen – das ist unser Anspruch.«



Dr. Daniel Carl,
Abteilungsleiter



Fraunhofer-Verbund Produktion
Leitprojekt SWAP

Überblick Objekt- und Formerfassung

Die Automatisierung der 3D-Datenerfassung und -prozessierung ist unser Beitrag zur Digitalisierung der Umwelt.

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« beschäftigen wir uns mit der gesamten Prozesskette zur automatisierten Erfassung, Referenzierung, Interpretation und Visualisierung der Form und Lage von Infrastruktur-Objekten. Wir entwickeln Messsysteme, vor allem Laserscanner, und maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamerasysteme. So erfassen wir Objekte und Formen in drei Dimensionen – extrem schnell, extrem präzise, meist von bewegten Plattformen aus. Typische Messbereiche erstrecken sich von wenigen Zentimetern bis in den 100-Meter-Bereich.

Speziell entwickelte Software wertet die gemessenen Daten vollautomatisiert aus und interpretiert sie. Dafür nutzen wir Techniken der künstlichen Intelligenz (KI) wie beispielsweise »Deep Learning«. Anwendungsspezifisch aufbereitete und visualisierte Daten liefern eine solide Planungsgrundlage – besonders wichtig ist das z. B. für Infrastrukturmaßnahmen.



**Schnelle, präzise
und robuste Sensoren**



**Miniaturisierte
Messsysteme**



**Software zur
Datenauswertung**

Unsere Gruppen und Themen

Mobiles terrestrisches Scanning

- Systeme für die Bahn
- Systeme für die Straße
- Systeme für meteorologische Anwendungen

Smarte Datenprozessierung und -visualisierung

- Echtzeit-Visualisierung räumlicher Daten
- Erstellung synthetischer Messdaten
- Flexible Funktionsbibliotheken
- Plattformunabhängige Systeme

Airborne- und Unterwasser-Scanning

- Systeme für autonome Flugplattformen
- Systeme für Anwendungen unter Wasser
- Systeme auf Basis von Low-Cost- und Consumer-Produkten



**Wir decken die gesamte Prozess-
kette der 3D-Datenerfassung ab.«**

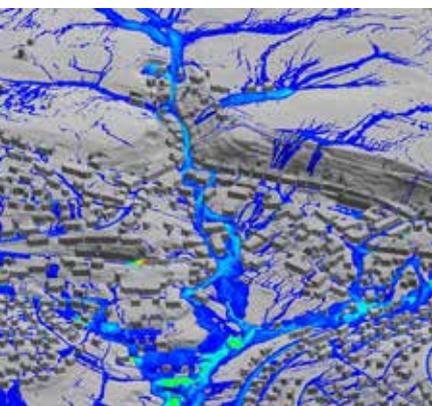
Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter



Highlights Objekt- und Formerfassung

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

KI hilft uns bei der Simulation von Starkregen.



Im 3D-Mikromodell können Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung von Starkregen simuliert werden.

Projekt 3D-HYDRA

Starkregen: 3D-Mikromodelle als Basis für Überflutungskarten

Welche Gefahr bedeuten Starkregen für eine bestimmte Region? Strömungssimulationen anhand von 3D-Modellen berechnen die Dynamik von Überflutungen und helfen, Gefahren im Voraus abzuschätzen und Schutzkonzepte zu entwickeln. Die Simulationen basieren heute in der Regel auf Bilddaten, die mithilfe von Kameras aus der Luft aufgenommen und in einem Halbmeteraster ausgewertet werden – zu grob, um die bauliche Feinstruktur eines Geländes in die Vorhersagen einzubeziehen. Laserscanner, montiert auf Drohnen, liefern eine bessere Datenbasis: Sie erkennen auch die Details typischer urbaner Objekte wie Mauern, Bordsteine, Fassaden oder Unterführungen. Die Auswertung der vom Scanner erzeugten 3D-Punktwolken ist jedoch äußerst aufwändig. Im Projekt 3D-Hydra entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Industriepartnern eine KI-basierte Objekterkennung, die aus den Befliegungsdaten automatisiert 3D-Mikromodelle inklusive Metainformationen erzeugt. Dazu werden die Daten mithilfe KI-basierter Algorithmen in ein schlankes 3D-Modell überführt, analysiert und semantisch angereichert. Die 3D-Modelle sollen die Erstellung von Gefahrenkarten genauer und gleichzeitig effizienter machen.

Gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (KI-Innovationswettbewerb)

Wintervortragsreihe des DVW e.V.

Keine Angst vor künstlicher Intelligenz

Immer mehr Bereiche des täglichen Lebens sind von künstlicher Intelligenz geprägt. Auch in der Geodäsie spielt KI inzwischen eine bedeutende Rolle. Welche Potenziale ihr Einsatz hier bietet, erläuterte unser Kollege Prof. Dr. Alexander Reiterer im Dezember in einem Online-Gastvortrag im Rahmen der Wintervortragsreihe der Gesellschaft für Geodäsie, Geo-information und Landmanagement (DVW e.V.).

Unter dem Titel »Die Vermessung der Welt mit Hilfe von künstlicher Intelligenz – Besser als der Mensch?« sprach er unter anderem über die Handhabung immenser Datenmengen, komplexe Lernalgorithmen und den Stand der Technik. Am Beispiel der KI-basierten Auswertung von Mobile-Mapping-Daten erläuterte er, wie Messdaten mithilfe von künstlicher Intelligenz schnell und zuverlässig analysiert werden können und wie in Zukunft Methoden des maschinellen Lernens ein vollkommen normales Entwicklungstool sein werden, das den Menschen in seiner Arbeit unterstützt.



KI-gestützte Modellierungen sollen helfen, Bevölkerung und Infrastruktur in Städten besser vor Extremwetterereignissen zu schützen.

Projekt I4C – Intelligence for Cities

KI-Toolbox soll Städten im Klimawandel helfen

Hitzewellen, Starkregen, Stürme – Extremwetterphänomene treffen Städte als soziale und wirtschaftliche Knotenpunkte besonders empfindlich. Im Projekt I4C forscht Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer ISE, der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und weiteren Partnern an KI-basierten Strategien für eine an den Klimawandel angepasste Bauplanung und Gefahrenprävention. Am Beispiel der Stadt Freiburg erarbeitet das Projektteam eine KI-gestützte Prozesskette für eine verbesserte Gefahrenvorhersage – von der Datenaufnahme und -analyse über eine Umweltprognose bis zu konkreten Maßnahmen. Ausgangspunkt ist ein 3D-Stadtmodell, das sich mit Wettervorhersagen und Klimasimulationen verknüpfen lässt. Anhand des Modells werden mithilfe von maschinellem Lernen Bevölkerungsgruppen, Bäume und Bauwerke identifiziert, die im Hinblick auf bestimmte Extremwetterlagen besonders anfällig sind. Die KI-Toolbox soll in Zukunft das Abschätzen lokaler Umweltrisiken bis hinunter auf die Bauwerksebene ermöglichen und darüber hinaus die Grundlage für eine risikoangepasste Bauplanung liefern.

Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV (Initiative »KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen«)

Projekt GOSAIFE

Mit KI sicher durch den Verkehr

Navigationssysteme führen Verkehrsteilnehmer zuverlässig ans Ziel; auch dynamische Ereignisse, z. B. Staus, werden in die Routenplanung mit einbezogen. Was bisher jedoch fehlt, sind Informationen zur Verkehrssicherheit. Risiken wie Straßenschäden oder gefährliche Kreuzungen werden nicht erkannt. Ziel des 2021 abgeschlossenen Projekts GOSAIFE war es, bisherige Navigationsapplikationen um diese Dimension zu erweitern, und zwar mithilfe von Künstlicher Intelligenz (Projekt GOSAIFE, KI-basierte dynamische Sicherheitsinformationen in Navigationssystemen).

Gemeinsam mit drei Projektpartnern entwickelten wir ein Demonstratorsystem, das Daten aus dem Straßenverkehr aufnimmt und auswertet. Die Aufnahme der Daten erfolgt durch unser Mobile-Mapping-System MUM mini. Ein künstliches neuronales Netz analysiert die GPS-referenzierten Daten anschließend und erkennt potenziell gefährliche Objekte oder Situationen automatisch. Der so ermittelte Risiko-Score kann anschließend in Navigationsapplikationen eingebunden oder in einer Karte dargestellt werden.

Gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg (KI-Innovationswettbewerb)



In Zukunft wird die KI ein Tool wie jedes andere sein.«



Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter

Fraunhofer-Leitprojekt COGNAC

Multispektrale Kamera erkennt Pflanzenzustand

In welchem Zustand sind Boden und Pflanzen? Drohen Schädlingsbefall oder Nährstoffmangel? Über Jahrhunderte verließ sich die Landwirtschaft auf Augenmaß und Erfahrung, wenn es um solche Fragen ging. Im Projekt COGNAC (Cognitive Agriculture) arbeiten acht Fraunhofer-Institute an Technologien zur Digitalisierung und Automatisierung der Landwirtschaft.

Fraunhofer IPM entwickelt im Rahmen des Projekts ein Messsystem, das den Zustand von Pflanzen und ihre Wuchshöhe aus der Luft erfasst. Drei auf einer UAV-Plattform montierte Kameras nehmen bis zu fünf Bilder pro Sekunde auf: Die RGB-Kamera mit 12 MP und die zwei monochromen Kameras mit jeweils 5,5 MP liefern deutlich detailliertere Aufnahmen als bisher am Markt verfügbare Systeme. Die Bilder geben Aufschluss über die Vitalität von Pflanzen; ein LiDAR-Sensor misst gleichzeitig deren Wuchshöhe. Anhand der Messdaten können Landwirte frühzeitig auf Wachstumsstörungen reagieren. Der Prototyp des 650 Gramm leichten Kamerasystems wurde 2021 getestet und lieferte vielversprechende Messergebnisse. Bis zum Projektabschluss im Herbst

Kameras und LiDAR erfassen Pflanzenzustand und -wachstum aus der Luft – mit bisher unerreichter Genauigkeit.

2022 steht vor allem die Optimierung des LiDAR-Moduls auf dem Plan, das auch bei Nebel und Niederschlag zuverlässig funktionieren muss. Zudem soll ein GNSS-Positionierungssystem integriert werden.

Im Geschäftsfeld Gas- und Prozessmesstechnik entsteht als Teil des COGNAC-Projekts ein Laserspektrometer zur hochgenauen Messung geringer N_2O -Konzentrationen am Boden.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

Projekt MuSe3D

Von oben herab: Monitoring von Vegetation aus der Luft

Wälder, Moore, landwirtschaftliche Flächen: Sie alle rücken mit dem Klimawandel in den Fokus. Zustand und Vegetation solcher großer Flächen können am besten aus der Luft überwacht werden – doch die Erfassung gestaltet sich aufgrund der meist schweren und großen Systeme schwierig. Im Projekt MuSe3D (Multispektral- und 3D-Monitoring der Vegetation durch UAVs) entwickelte Fraunhofer IPM zu diesem Zweck gemeinsam mit der Remote Sensing Solutions GmbH und weiteren Partnern ein



besonders leichtes und kompaktes Kamerasystem für Drohnen, das in kurzer Zeit multispektrale Bilder und 3D-Geometrien erfasst. Mit der integrierten Software können die Daten anschließend interpretiert und klassifiziert werden. Im Rahmen des Projekts entstand im letzten Jahr unter anderem eine interaktive 3D-Karte des Kochelsee-Moores bei Benediktbeuern – es zählt zu den bedeutendsten Mooregebieten Süddeutschlands.

Gefördert vom europäischen Netzwerk EUREKA (Eurostars-Programm)



Stausee-Vermessung

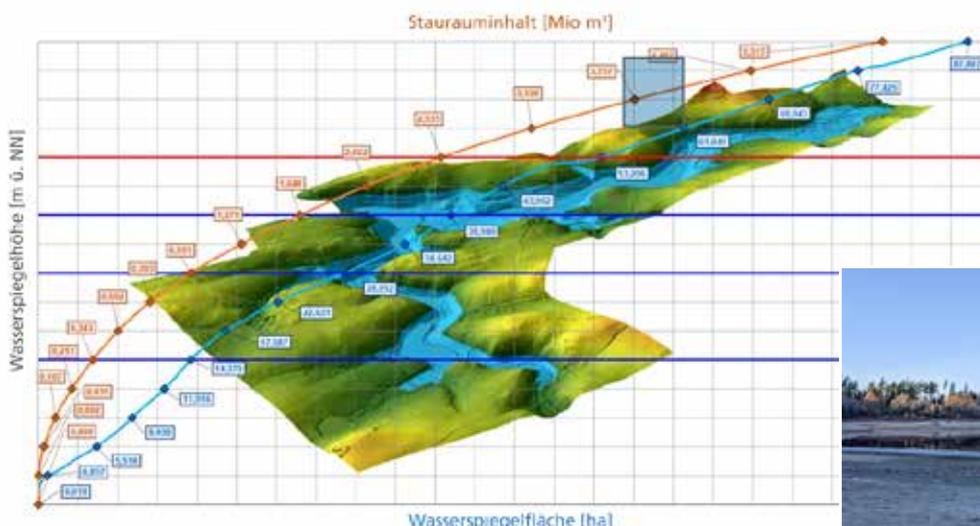
Hochpräzise 3D-Daten dank High-End-Messtechnik

Die Flutkatastrophe im Ahrtal hat die wichtige Funktion von Stauwerken, aber auch die mit ihnen verbundenen Gefahren in den Fokus gerückt. Insbesondere Talsperren gehörten bereits vorher zu den am strengsten überwachten Bauwerken Deutschlands. Die Stauraumerfassung jedoch ist aufwändig und die erhobenen Daten oft zu grob. Am bayerischen Liebensteinspeicher erprobte Fraunhofer IPM nun gemeinsam mit der GEO Group GmbH erfolgreich ein neues Konzept: Durch eine Kombination verschiedener High-End-Messtechniken gelang den Projektpartnern die Vollvermessung des Speichers mit bisher unerreichter Präzision.

Während GEO Group den See von einem Boot aus per Echolot vermaß, nutzten Forschende von Fraunhofer IPM den am Institut entwickelten Lightweight Airborne Profiler zur Befliegung des Sees: Die Messeinheit besteht aus einem Laserscanner, mehreren Kameras und Positionierungssensoren, die dank ihres geringen Gewichts auf eine Drohne montiert werden können. Die kombinierten Daten ermöglichten hochgenaue Berechnungen: Es entstanden ein 3D-Modell, eine Füllstandkurve sowie Pläne über die Wasserspiegelflächen und Tiefe des Speichers.

Eine interaktive 3D-Karte des Moores um Benediktbeuern gibt Aufschluss über den Zustand des Feuchtgebiets. Sie wurde von unserem Projektpartner Remote Sensing Solutions als Teil des gemeinsamen Forschungsprojekts MuSe3D erstellt.

Kombination von LiDAR und Echolot-Messtechnik



Hochpräzise Daten: Gemeinsam mit der GEO Group führte Fraunhofer IPM eine Vollvermessung des bayerischen Liebensteinspeichers durch.





Konkurrenzlos: Das Kamerasystem auf unserem Geomapping-Fahrzeug liefert georeferenzierte Panoramabilder mit einer Auflösung von 180 Megapixeln.



Wir setzen neue Maßstäbe bei der Auflösung.«



*Dr. Philipp von Olshausen,
Gruppenleiter*

Mobile Mapping-Fahrzeug

Sechs Kameras für ein hochauflöstes 360°-Panorama

Städte und Kommunen benötigen möglichst präzise Vermessungsdaten, um Verkehrswege und Gebäude zu analysieren, zu planen und instand zu halten. Ein Geomapping-Fahrzeug, entwickelt für die Geotechnik GmbH, setzt neue Standards bei der Auflösung georeferenzierter Panoramabilder. Das auf dem Dach eines kleinen Vans installierte Kamerasystem liefert Bilder mit einer Auflösung von 180 Megapixel – und übertrifft damit den Stand der Technik um das Sechsfache.

Sechs RGB-Kameras erzeugen Bilder der Umgebung mit Bildraten von bis zu 8 Hz bei einer Fahrgeschwindigkeit von bis zu 140 km/h. Hinzu kommen zwei Panoramakameras sowie ein Laserscanner, der zusätzlich Tiefeninformationen liefert. Um die einzelnen Bilder zu einem Panoramabild zu fusionieren, kommt es auf eine geeignete geometrische Kameraanordnung und die präzise Synchronisierung der Datenaufnahme an. Die hohen Datenraten von bis zu 4 GB pro Sekunde erfordern zudem hochoptimierte Software und Strategien für das Datenhandling. Das System ist so ausgelegt, dass es zukünftig um Wärmebild-Kameras erweitert werden kann. Thermographische Bilder liefern wichtige Informationen zur Energieeffizienz des Gebäudebestands.

Projekt OpOrTunty

Effiziente Tunnelinspektion mit multispektralem Laser

Kameras, statische Laserscanner, taktile Messinstrumente und Sichtkontrolle – beim Zustandsmonitoring von Tunnelbauwerken kommt ein Mix an Messmethoden zum Einsatz. Ein Multi-Sensorsystem, das Fraunhofer IPM im Projekt OpOrTunty (Operation Oriented Tunnel Inspection System) gemeinsam mit der Firma Amberg Technologies AG und Software-Partnern entwickelt hat, macht Tunnelinspektionen in Zukunft deutlich effizienter: Das Tunnel Inspection System TIS misst Geometrie, Oberflächenstruktur und Feuchtigkeit erstmals gleichzeitig in einem einzigen Messdurchgang – mit Millimeterpräzision.

Herzstück des Sensors ist ein Laserscanner, der die Tunnelwand mit einem Winkelbereich von nahezu 360° erfasst und bis zu 200 komplette Messprofile pro Sekunde erzeugt. Für die Messung werden mehrere Laser unterschiedlicher Wellenlängen überlagert und auf die Tunnelwand gerichtet. Aus den Abstandsdaten wird die 3D-Geometrie des Tunnels ermittelt; anhand der Intensität des rückgestreuten Lichts lassen sich Strukturmerkmale wie zum Beispiel Risse erkennen. Für die Feuchteerkennung wird Licht zweier Laser mit jeweils spezifischer Wellenlänge kombiniert, das auf charakteristische

Objekt- und Formerfassung | Messen & Veranstaltungen

Online-Forum LiDAR und Mobile Mapping

Unsere virtuelle Veranstaltungsreihe – im Jahr 2021 fanden drei Online-Foren statt.

- Trends in der mobilen Datenerfassung, 14.10.2021
- Trends in der 2D- und 3D-Bildauswertung, 04.11.2021
- Spezielle Anwendungen, 25.11.2021

Geplant für 2022

Oceanology International

15.–17.03.2022

SMM

Internationale Fachmesse der maritimen Wirtschaft
06.–09.09.2022

InnoTrans

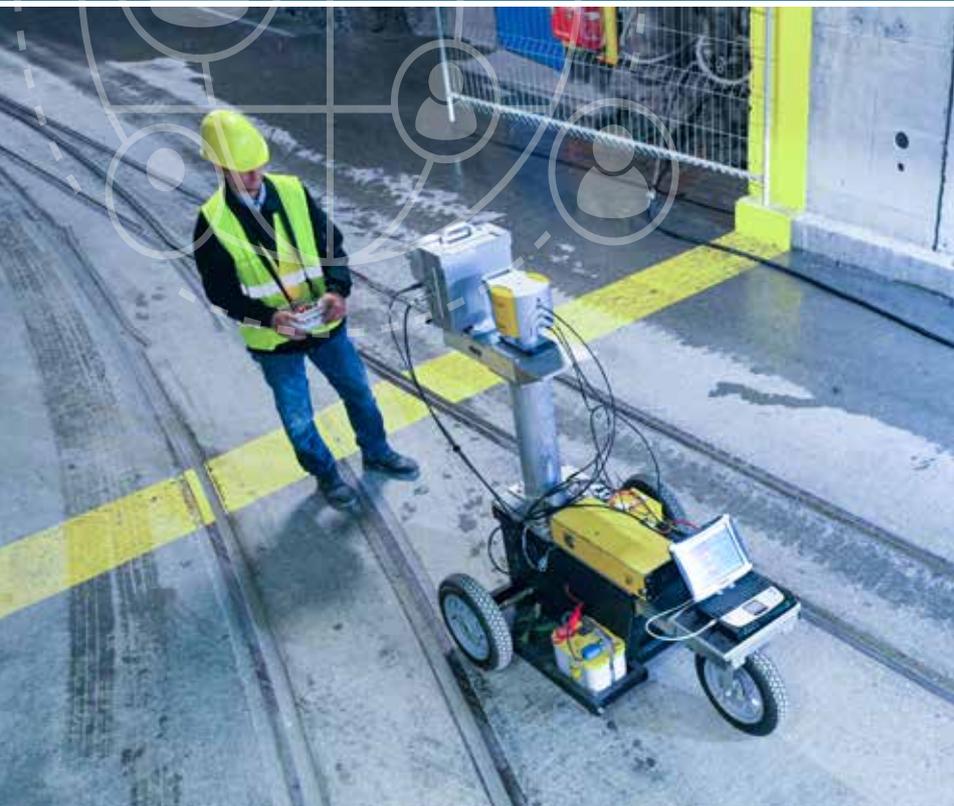
Internationale Leitmesse für Verkehrstechnik
20.–23.09.2022

Intergeo

Die Messtechnik-Messe
18.–22.10.2022

MoLaS – Mobile Laser Scanning Technology Workshop

Eigene Veranstaltung
23.–24.11.2022



Weise von Wasser absorbiert wird. Die Messdaten liegen digital vor und können somit für Building-Information-Modelling (BIM)-Prozesse genutzt werden.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und der EU (Eurostars-Programm)

*High-Tech auf dem Trolley:
Unser System misst Geometrie, Oberflächenstruktur und Feuchtigkeit gleichzeitig.*

Fokus Digitale 3D-Modelle

Offene Baustelle: Für die Dokumentation können unterirdisch verlegte Bauelemente jetzt digital erfasst werden.



Unser KI-basiertes System erzeugt georeferenzierte Daten für die Dokumentation erdgebundener Infrastruktur.

Es wird gebaggert in deutschen Städten: Vielerorts werden Straßen und Wege aufgedrückt, um Glasfaserkabel zu verlegen und Leitungen oder Rohre zu modernisieren. Ist die Baugrube erst einmal wieder zugeschüttet, weiß niemand mehr so genau, was an welcher Stelle und in welcher Tiefe verlegt wurde. Die Folge: Immer wieder kommt es zu Stromausfällen, gestörter Datenübertragung oder im schlimmsten Fall zu Gasexplosionen, weil Leitungen versehentlich von Baggern zerstört werden. Eine exakte Dokumentation erdgebundener Infrastruktur würde das verhindern. Bis heute wird die Lage unterirdischer Bauelemente in der Regel von Hand skizziert und manuell in ein Geoinformationssystem (GIS) übertragen. Dieser Prozess ist zeitaufwändig, die Daten oft unvollständig, denn vor allem Tiefenangaben werden nur lückenhaft erfasst.

Mobil erfasst mit Low-cost-Sensorik

In Kooperation mit dem Netzbetreiber Bayernwerk Netz GmbH hat Fraunhofer IPM ein Tool zur digitalen 3D-Erfassung von Baugruben entwickelt, das eine präzise, lückenlose und effiziente Dokumentation ermöglicht. Es besteht aus einem handelsüblichen Tablet-PC zur Datenaufnahme und der am Institut entwickelten Software »TrenchLog« zur automatisierten Datenauswertung. Die Erfassung ist unkompliziert und erfordert keine besonderen Vorkenntnisse: Mit dem Tablet-PC in der Hand bewegt sich der Vermesser längs der Baugrube und nimmt Bilder auf, aus denen später die 3D-Punktwolke errechnet wird. Das Aufnahmegerät ist mit einem kommerziell verfügbaren Stereokamera-System und einem Inertialsensor ausgerüstet und nimmt Daten mit einer Genauigkeit von 20 cm Abweichung auf einer Messstrecke von

50 Metern auf. Um alle Datenströme bestmöglich gemeinsam zu nutzen, wird ein Visual-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)-Algorithmus für die 3D-Rekonstruktion eingesetzt. In einer eigens auf dem Institutsgelände ausgehobenen Baugrube konnte das Team das System während der Entwicklung testen.

Passpunkte für die Georeferenzierung

Die Messdaten sind verknüpft mit dem globalen Referenzsystem GNSS (Global Navigation Satellite System). Bei der Georeferenzierung erschweren die weitgehend homogenen Oberflächen der Kabel und Rohre die eindeutige Identifikation von Bezugspunkten. Das Team setzt daher eigens kreierte wetterfeste Passpunkte ein, die temporär an Hauswänden oder Verteilerkästen angebracht werden. Diese Referenzpunkte werden im Zuge der Messung miterfasst und ermöglichen eine bis auf wenige Zentimeter genaue Positionsbestimmung. Und sie erfüllen einen weiteren Zweck: Leitungen werden oftmals über große Strecken verlegt. Viele Meter lange Baugruben in einem Durchgang zu vermessen, ist aber nicht immer praktikabel. Um Versatzfehler bei der Messung von Teilabschnitten zu vermeiden, werden zusätzliche Passpunkte angebracht und die Abschnitte jeweils überlappend aufgenommen. So lassen sich die Messdaten später zu einem durchgehenden Bild zusammenfügen.

Automatische Erkennung typischer Baelemente

Eine gute Baudokumentation erfasst nicht nur, an welcher Stelle Kabel, Rohre oder Verbinder unter der Erde vergraben sind, sondern auch Art und Anzahl der Baelemente. Das Softwaretool »TrenchLog« erkennt und quantifiziert diese Objekte in den Messdaten automatisch – unmittelbar nach der Erfassung. Dafür wurde ein Deep-Learning-Algorithmus mit zuvor definierten Objektklassen trainiert: Dazu gehören Leitungen, Kabel oder Rohre mit unterschiedlichen Durchmessern sowie verschiedenartige Verbindungselemente. Dem Algorithmus liegt ein künstliches neuronales Netz zugrunde, für das ein umfangreicher Trainingsdatensatz mit einschlägigen Bildern erstellt wurde. Dieser

Datensatz kann – je nach Dokumentationsaufgabe – um neue Elemente erweitert werden.

Ein Regelwerk von Heuristiken, das auf die Daten angewandt wird, reduziert Fehler bei der Bilderkennung. Wichtig für die reibungslose Erfassung und Auswertung ist zudem eine optimierte Datenspeicherung: So wird beispielsweise die Punktwolke auf einen festen Mindestpunktabstand reduziert, um die Datenmenge zu reduzieren. Überlappende Bildbereiche werden nicht ausgewertet, um die Auswertung zu beschleunigen.

Visualisierung und Bildkorrektur

Zur einfachen Bedienbarkeit des Tools gehört auch die komfortable Darstellung der Messergebnisse. Dazu hat das Team eine Visualisierungskomponente entwickelt, die eine verzerrungsfreie 3D-Rekonstruktion auf Basis der Punktwolke ermöglicht. Die nutzerfreundliche Bedienoberfläche erlaubt neben Plausibilitätschecks unter anderem auch manuelle Korrekturen oder Daten-Uploads in die Cloud. Das System ist für Erfassungslängen von bis zu 50 m spezifiziert – wichtige Meter auf dem Weg zu einer lückenlosen Dokumentation vieler Tausend Kilometer Rohrgräben, die Jahr für Jahr gegraben und wieder zugeschüttet werden.



Unkompliziert: Die Daten werden mit einem handelsüblichen Mobilgerät erfasst. Spezifische Vorkenntnisse sind dafür nicht notwendig.



Strom- und Glasfasernetze werden derzeit massiv ausgebaut. Unser Tool hilft dabei durch effiziente 3D-Kartierung.«



*Dr. Christoph Werner,
Gruppenleiter*

Überblick Gas- und Prozesstechnologie

Messsysteme und Verfahren nach Maß entwickeln – das ist unser Beitrag zur modernen Gas- und Prozessüberwachung.

Im Geschäftsfeld »Gas- und Prozesstechnologie« entwickeln und fertigen wir Mess- und Regelsysteme nach kundenspezifischen Anforderungen. Kurze Messzeiten bei gleichzeitig hoher Präzision und Zuverlässigkeit zeichnen unsere Systeme aus – auch unter extremen Bedingungen.

Zu unseren Kompetenzen gehören laserspektroskopische Verfahren, maßgeschneiderte Lichtquellen und Detektoren sowie energieeffiziente Sensorsysteme und Quantensensorik. Die Bandbreite der Anwendungen ist groß: Sie reicht von der Abgasanalyse über die Transportüberwachung von Lebensmitteln bis hin zu Sensoren und Systemen zur Messung kleinster Temperaturunterschiede.



Miniaturisierte Sensoren und Systeme



Spektroskopische Verfahren



Quantensensorische Verfahren

Unsere Gruppen und Themen

Integrierte Sensorsysteme

- Gassensitive Materialien
- Mikrooptische Infrarot-Komponenten
- Miniaturisierte Gassensorsysteme

Spektroskopie und Prozessanalytik

- Spektroskopische Analytik
- Optische Systeme
- Auswerteverfahren

Thermische Messtechnik und Systeme

- Maßgeschneiderte Mikrostrukturen
- Thermische Messsysteme
- Simulation physikalischer Prozesse

Nichtlineare Optik und Quantensensorik

- Nichtlineare Optik
- Neue spektroskopische Messverfahren
- Quantensensorik



Mit unserem Know-how schaffen wir neue Möglichkeiten für die Gas- und Prozessmesstechnik.«

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter

Highlights Gas- und Prozesstechnologie

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Projekt TransHyDE

Sensorkonzepte für eine sichere Wasserstoff-Infrastruktur

Ein Gas – zahlreiche Messkonzepte: Im Rahmen des Projekts TransHyDE forschen drei Fraunhofer-Institute gemeinsam mit Industrieunternehmen an Sensorkonzepten und Werkstoffen für eine sichere Wasserstoff (H₂)-Infrastruktur. Seit Frühjahr 2021 entwickeln und testen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler innovative messtechnische Lösungen zur Leckage-Detektion, zur Messung der H₂-Gasqualität und zur Analyse von Fremdgasen in Wasserstoff-Gasgemischen:

- Ein selbsttestfähiger Sensor soll H₂ auf Basis einer kombinierten Messung von spezifischer Wärmeleitfähigkeit und Schallgeschwindigkeit detektieren.
- Zur kontinuierlichen Messung des Gases entwickeln die Forschenden ein kompaktes System mit einer kostengünstigen, auf



Wasserstoff-Leitprojekt
TransHyDE

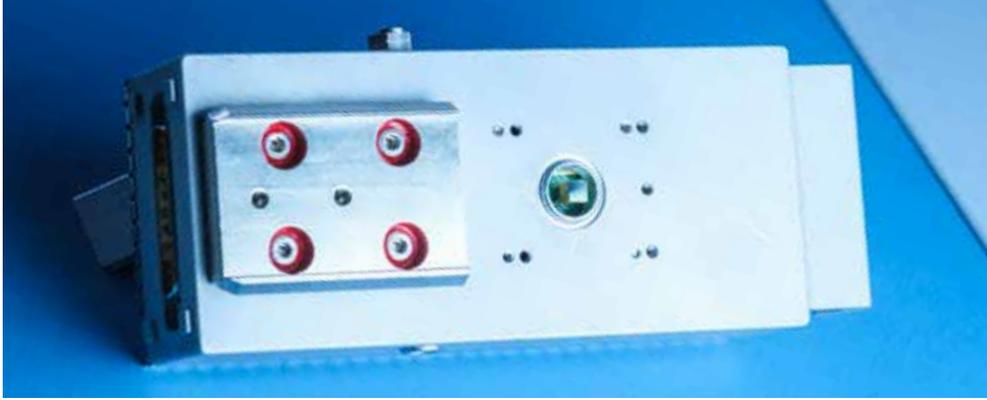
Raman-Streuung basierenden optischen Messtechnik.

- Infrarotbildaufnahmen plus laserspektroskopische Bildauswertung sollen die berührungslose, bildgebende Detektion von H₂ und NH₃ ermöglichen.
- Dank kolorimetrischer Sensoren wird Wasserstoff in Zukunft mit dem bloßen Auge zu erkennen sein: Möglich wird dies durch einen speziellen Anstrich, der in Kontakt mit den Gasen seine Farbe ändert.
- Ein photoakustisches Sensorsystem soll Spuren von Fremdgasen in Wasserstoff detektieren. Und um den Anteil von H₂ in Erdgasgemischen und damit den Brennwert des Gases zu ermitteln, wird ein Erdgasanalytator mit einem H₂-Wärmeleitfähigkeitssensor ausgestattet.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Wasserstoff-Leitprojekte), Projektträger Jülich (ptj)

Mehr zum Thema Wasserstoff-Messtechnik ab S. 56





Im Projekt PaSiC entsteht eine Technologie-Plattform zur Herstellung miniaturisierter IR-Komponenten.

Projekt PaSiC

Neue Herstellungsverfahren für miniaturisierte Gassensoren

Der Markt für Gassensoren im Arbeitsschutz, in der Umweltanalytik und Luftgüteüberwachung wächst – und damit der Bedarf für kostengünstige, energieeffiziente und langzeitstabile Sensoren. Im Rahmen des Projekts PaSiC entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie eine Technologieplattform, die erstmals den form- und stoffschlüssigen Verbund von Keramik und Silizium zur Herstellung miniaturisierter IR-Komponenten ermöglicht (Projekt PaSiC, Silizium-Keramik-Hybridsubstrat als Integrationsplattform für photoakustische und optische Anwendungen).

Auf dieser Basis lassen sich zukünftig hochintegrierte photoakustische und optische Gassensoren herstellen. Die Komponenten und Sensoren werden auf einem Silizium-Keramik-Verbundsubstrat (SiCer) in Waferform als Mikrosystem gefertigt. Unser Team entwickelt ein photoakustisches Detektorelement; dazu nutzen wir thermische und optische Simulationen. Mithilfe eines eigens adaptierten IR-Spektrometers prüfen wir die Langzeit-Dichtigkeit des Materialverbunds in den Detektorzellen. An unseren Gasmessständen nehmen wir die spektrale und gasabhängige Charakterisierung vor.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Fördermaßnahme HyMat, Hybride Materialien – Neue Möglichkeiten, Neue Marktpotentiale)

Projekt smartFire

Smart: Feuer an der Quelle erkennen

Wenn es brennt, sind oft elektrische Geräte die Ursache. Bevor Rauch entsteht, entwickeln sich Brandgase wie z. B. das giftige Kohlenmonoxid (CO). Brandsensoren sollten also möglichst nah an der Zündquelle platziert sein und – statt Rauch – idealerweise typische Brandgase detektieren. Im Projekt smartFire entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit europäischen

Sensorherstellern und Forschungspartnern einen kolorimetrischen CO-Sensor für die Integration in ein Smart-Home-Netzwerk. Der Sensor soll selektiv und über lange Zeit zuverlässig messen – und mit Blick auf die zahlreichen elektrischen Verbraucher in Privathaushalten vor allem kostengünstig sein. Für das Sensorelement entwickelt unser Team einen gassensitiven Farbstoff sowie ein Druckverfahren zur Aufbringung der gassensitiven Schicht auf den Detektorchip. Die Sensoren werden unter verschiedenen Umgebungsbedingungen wie z. B. unterschiedlichen Temperaturen, Luftfeuchten und Gaszusammensetzungen geprüft.

Gefördert von der EUREKA-Initiative (Eurostars-Programm)

Spurengasanalyse mit Photoakustik

Wie klingt eigentlich Methan?

Mit laserbasierter Photoakustik kann man Gase wie Methan sehr genau und selektiv nachweisen. In verschiedenen Forschungsprojekten haben unsere Forschenden im Jahr 2021 diese Technologie weiterentwickelt, und zwar im Hinblick auf die Sensitivität, Kosteneffizienz und Miniaturisierung photoakustischer Systeme. So entstanden neue Messgeräte und neue Möglichkeiten für die Gasetektion.

Im EU-Projekt RedFinch (Mid-Infrared Fully Integrated Chemical Sensors) entwickelte Fraunhofer IPM beispielsweise einen Demonstrator für einen mobilen Methanleck-Detektor auf Basis einer miniaturisierten photoakustischen Messzelle. Im Projekt PaMeSan der Universität Freiburg unterstützten wir die Entwicklung eines miniaturisierten Systems, das Methan in der Umgebungsluft sehr präzise nachweist. Herzstück ist ein MEMS-Mikrofon, wie es auch in Smartphones zum Einsatz kommt. Die miniaturisierten Sensoren sind in der Lage, Gase wie Methan im ppm- und ppb-Bereich selektiv zu messen und zu erkennen.

*RedFinch: Gefördert von der EU (Horizon 2020)
PaMeSan: Gefördert von der Vector-Stiftung*

CO-Sensoren können Leben retten.



Lecks auf der Spur: Tobias Kolleth mit dem mobilen, photoakustischen Methan-Detektor, der im Projekt RedFinch entwickelt wurde.

Fraunhofer-Leitprojekt QUILT

Quanten-FTIR: Quantenoptisches Pendant zum FTIR-Spektrometer

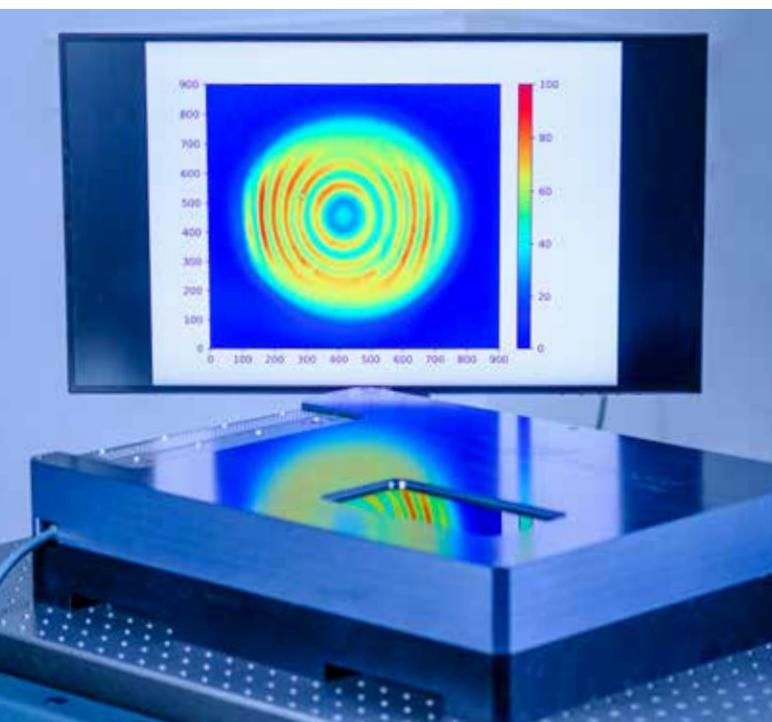
Wie gelingt es, schwer zugängliche Wellenlängenbereiche wie Infrarot, UV oder THz für das Auge und herkömmliche Kameras »sichtbar« zu machen? Diesen Fragen gingen Forschende von sechs Fraunhofer-Instituten im Rahmen des Projekts QUILT nach (Projekt QUILT, Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions).

Fraunhofer IPM entwickelte im Rahmen von QUILT das Quanten-FTIR – eine Weltneuheit: Als quantenoptisches Pendant zum klassischen Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR-Spektrometer) ermöglicht es u. a. hochgenaue Gasmessungen, zum Beispiel für die Prozessanalytik. Es basiert auf dem Phänomen verschränkter Photonen: Lichtteilchen lassen sich bei der Erzeugung miteinander koppeln und bleiben dann über weite Wellenlängenbereiche in ihren Eigenschaften miteinander verbunden. So ist es möglich, Informationen über ein Infrarot-Photon, das mit einer Probe wechselwirkt, mithilfe seines Partnerphotons im sichtbaren Spektrum zu detektieren. Dazu genügt ein Siliziumdetektor.

Das Team präsentiert die zum Patent angemeldete Technologie als Demonstrator-System auf der Laser 2022 »World of Quantum«. Ziel für die Zukunft ist es, die Nachweisempfindlichkeit weiter zu steigern und das System durch eine Bildgebung zu ergänzen.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

Das weltweit erste Quanten-Fourier-Transformations-spektrometer für die hochauflösende, sensitive Spektroskopie



Projekt AIMS³

CO₂-Sensor für Tiefseeanwendungen

Das Meer hat erstaunliche Fähigkeiten als Kohlenstoffspeicher. Im Kampf gegen den Klimawandel könnte das von großem Vorteil sein. Im Projekt AIMS³ gehen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Frage nach, wie CO₂ in basaltischen Ozeankrustengesteinen gespeichert werden kann. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten: Ein Wiederaustritt des abgeleiteten Kohlendioxids oder eine Veränderung des umgebenden marinen Systems müssen umgehend erkannt werden. Die Experimente werden darum von umfassenden Messungen begleitet.

Fraunhofer IPM entwickelt zu diesem Zweck einen CO₂-Sensor für Tiefseeanwendungen. Er basiert auf der ATR-Spektroskopie und nutzt den Effekt der abgeschwächten Totalreflexion (ATR, attenuated total reflection). Mithilfe dieser Methode detektiert der Sensor den gelösten CO₂-Gehalt in Meerwasser innerhalb weniger Sekunden – ein bedeutender Vorteil im Vergleich zu herkömmlichen Messsystemen, deren Ansprechzeit im Minutenbereich liegt. Selbst größere Gebiete kann das System ortsaufgelöst auf eventuelle Leckagen oder Änderungen der CO₂-Konzentration überprüfen. Dazu wird es auf Unterwasserfahrzeuge (Lander) oder an Schleppseilen montiert. Als Teil eines modularen Monitoring-Systems soll der Sensor auch über das Projekt hinaus für die Überwachung submariner Strukturen genutzt werden. Das Projekt AIMS³ (alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste) ist Teil der CDRmare-Mission der Deutschen Allianz Meerforschung (DAM).

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (Forschungsprogramm MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit)



Mit dem Q-FTIR haben wir einen wichtigen Meilenstein in der photonischen Quantensensorik gesetzt.«



Dr. Frank Kühnemann,
Gruppenleiter

Projekt RISK

Neue Ideen für die bildgebende Gasetektion

Für die Detektion von Gasleckagen werden üblicherweise absorptionspektroskopische Verfahren eingesetzt. Um die Empfindlichkeit der Gasetektion zu erhöhen, erprobten Forschende von Fraunhofer IPM nun im Rahmen des Forschungsprojekts RISK einen neuen Ansatz: Dazu entwickelten sie einen Aufbau, der das bildgebende Verfahren der klassischen Schlieren-Technik mit Lasertechnologie für den Infrarotbereich kombiniert.

In ersten Experimenten konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ausströmendes Methan mit deutlich erhöhter Sensitivität messen. Die Forschungsergebnisse wurden bereits in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht; eine weitere Publikation ist in Arbeit.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Discover-Projekt)

Projekt OCTOPUS

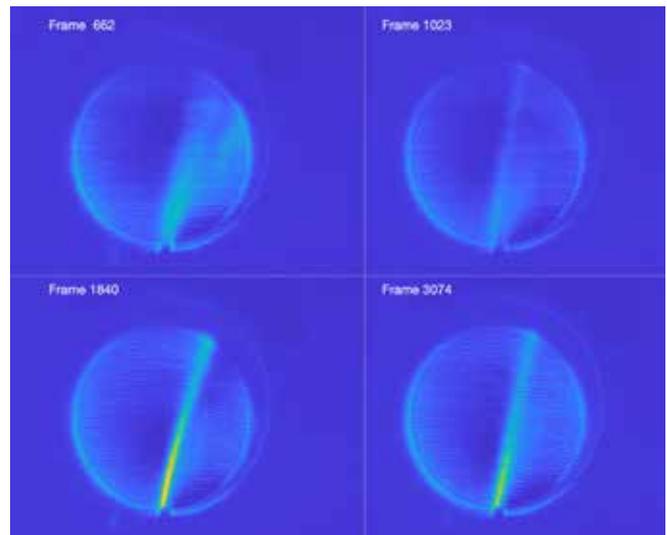
Ground control: Lichtquelle zur Kalibrierung von Satelliteninstrumenten

Satelliten zur Erdbeobachtung liefern wertvolle Daten für die Forschung. Mit an Bord sind jeweils optische Instrumente – diese müssen exakt kalibriert sein, damit die Messungen aus dem All korrekt ausgeführt werden. Im Auftrag der Europäischen Raumfahrtagentur ESA entwickelt Fraunhofer IPM ein Lasersystem, das die Kalibrierung optischer Messgeräte vor dem Start in den Orbit verbessern wird. Die laserbasierten Lichtquellen, die dazu bislang eingesetzt wurden, erwiesen sich als nicht ausreichend zuverlässig und unflexibel in der praktischen Anwendung.



Die Wissenschaftler setzen nun auf optisch-parametrische Oszillatoren (OPOs) als Lichtquellen: OPOs ermöglichen bisher unerreichte Spezifikationen vom sichtbaren bis in den infraroten Spektralbereich. Dies zeigen die OPO-Systeme C-WAVE und C-WAVE GTR, die in Zusammenarbeit mit HÜBNER Photonics

entwickelt wurden (s. Interview S. 22). Der OPO, den das Team im Rahmen des Projekts OCTOPUS entwickelt, soll darüber hinaus vom Ultravioletten bis ins kurzwellige Infrarot (300 bis 2400 nm) voll automatisiert durchstimmbare sein und schmalbandiges Laserlicht emittieren. Das kompakte, wartungsarme System wird modular aufgebaut und kann damit mobil eingesetzt und in unterschiedliche Testsettings integriert werden (Projekt OCTOPUS, Optical Calibration Tool: Optical Parametric Ultra-wide tunable Source).



Gutes Signal: Mit einer Kombination aus klassischer Schlieren-Technik und IR-Lasertechnologie lässt sich die Empfindlichkeit bildgebender Gasetektion erhöhen.

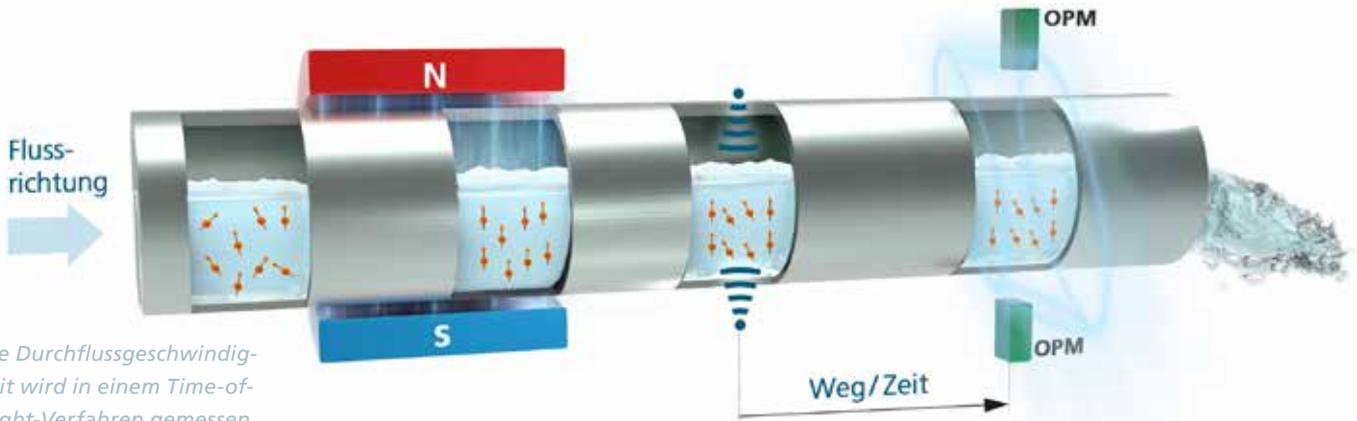
Spektrometer Ratiospect 2.0

Werkzeug für die molekulare Pflanzenphysiologie

Wie Pflanzen Licht wahrnehmen, lässt sich anhand ihrer lichtempfindlichen Proteine, der sogenannten Phytochrome, ermitteln. Um die Reaktion der Phytochrome bei Lichteinfall zu messen, braucht es hochempfindliche Messtechnik. Das optische Absorptionsspektrometer Ratiospect 2.0, das ein Team von Fraunhofer IPM im Auftrag der Universität Freiburg (Lehrstuhl für Molekulare Pflanzenphysiologie) entwickelt hat, ermöglicht eine sehr viel schnellere und genauere Bestimmung des Gehalts lichtempfindlicher Pflanzenproteine als bisher. Das Spektrometer »schaltet« Phytochrommoleküle per Laserbelichtung und vermisst die dadurch verursachten charakteristischen Transmissionsänderungen. Ratiospect 2.0 misst innerhalb weniger Sekunden Transmissionsänderungen von 100 % zu 99,999 % ebenso wie von 1,0 % zu 1,0001 %. Das Gerät arbeitet automatisiert – von der Handhabung der Pflanzenproben über die Messung bis zur Verarbeitung und Dokumentation der Messdaten.



OPO-Aufbau zur Kalibrierung optischer Satelliteninstrumente



Die Durchflussgeschwindigkeit wird in einem Time-of-Flight-Verfahren gemessen.

Projekt QMag

Durchflussmessungen mit optisch gepumpten Magnetometern

Wie schnell fließt eine Flüssigkeit durchs Rohr? Dies ist eine wichtige Frage in der Prozessmesstechnik. Im Projekt »QMag – Quantenmagnetometrie« erforschen wir eine neuartige Methode zur Durchflussmessung basierend auf kernmagnetischer Resonanz (Nuclear Magnetic Resonance, NMR). Gängige NMR-basierte Messgeräte arbeiten mit starken Magnetfeldern, die bei der Erzeugung große technische Herausforderungen mit sich bringen.

Das Team am Fraunhofer IPM setzt nun erstmals auf besonders schwache Magnetfelder für die nicht-invasive Durchflussmessung. Möglich wird dies durch hoch-sensitive optisch gepumpte Magnetometer (OPM), die als Detektoren eingesetzt werden. In dem Verfahren wird das Fluid – in einem ersten Aufbau Wasser – zunächst mithilfe eines Magnetfelds magnetisiert. Im weiteren Fluss wird die lokale Magnetisierung durch das Anlegen eines Hochfrequenz-Pulses lokal geändert und auf diese Weise mit einem »Zeitstempel« versehen. Das OPM detektiert diese Markierung in einer magnetisch abgeschirmten Umgebung. Aus der Zeitdifferenz zwischen Markierung und Detektion lässt sich die Flussgeschwindigkeit errechnen – berührungsfrei, kalibrierungsfrei, auch durch Stahlrohre hindurch. Zukünftig soll das Verfahren auch die Durchflussgeschwindigkeit mehrphasiger Strömungen messen.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt) und vom Land Baden-Württemberg



Zeitschriftenartikel:
Noninvasive Magnetic-Marking-Based Flow Metering with Optically Pumped Magnetometers. Appl. Sci. 12, 1275 (2022)

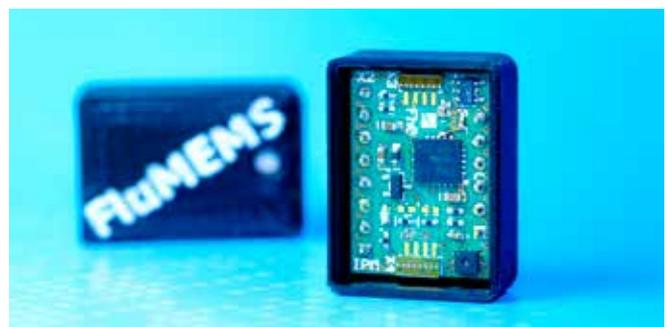
Messplätze

Sensorik unter Extrembelastung

Hohe Drücke, extreme Temperaturen oder chemisch aggressive Medien – in vielen Umgebungen, in denen Sensoren zum Einsatz kommen, herrscht alles andere als Wohlfühlumgebung. Bevor empfindliche Sensorik in der industriellen Produktion, in Kraftwerksturbinen oder Bohrlöchern zum Einsatz kommt, muss ihre Widerstandsfähigkeit angesichts der dort vorherrschenden rauen Bedingungen getestet werden. Für Sensorik-Stresstests

haben wir unser Harsh Environment Laboratory (HE-Lab) mit Blick auf die Messung größerer Bauteile erweitert: Ab sofort können Komponenten mit einer Länge von bis zu 13 cm und einem Durchmesser von 3 cm bei Temperaturen von 200 °C und einem Druck von bis zu 2500 bar getestet werden; für ganze Sensorsysteme gelten eine Länge von bis zu einem Meter und ein Durchmesser von 12 cm. An den Testständen führen wir hydraulisch und thermisch dynamische Testzyklen an Komponenten und kompletten Systemen durch. Es besteht außerdem die Möglichkeit, Komponenten und Systeme im Teststand zu bestromen und auszulesen; somit sind Fehler und ihre Entstehungsgeschichte schnell erkennbar. Das hydraulische Arbeitsmedium ist Wasser, sodass die korrosiven Bedingungen in Quellbohrungen oder der Tiefsee realistisch nachgestellt werden können. Messungen in alternativen Arbeitsmedien wie z. B. Ölen sind ebenfalls möglich.

Ein besonderer Stressfaktor für Sensoren und Bauteile ist Wasserstoff (H₂). Zahlreiche Materialien verspröden in Kontakt mit H₂. Für H₂-Sensoren und gasführende Bauteile bedeutet dies: Das Gas verringert ihre Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Unser Team hat einen H₂-Teststand entwickelt, an dem Komponenten und aufgebaute Systeme mit reinem Wasserstoff und nicht zündfähigen oder korrosiven Gasgemischen mit Drücken von bis zu 400 bar beaufschlagt und dynamisch oder statisch getestet werden können. Die Bauteile und Systeme können dabei zusätzlich bis zu 200 °C beheizt werden, um Alterungsprozesse beschleunigt darzustellen. Bei Bedarf können die Systeme auch in diesem Teststand online ausgelesen werden.



Kostengünstig herstellbar und energieeffizient: der FluMEMS-Mikropellistor (Demonstrator)

Projekt FluMEMS

Mikropellistoren zur Detektion brennbarer Gase

Katalytische Sensoren, sogenannte Pellistoren, überwachen die Konzentration brennbarer oder explosiver Gase wie Methan, Propan oder Wasserstoff – in Industrieanlagen, an Tankstellen oder auch in der häuslichen Gastherme. Im Rahmen des Projekts FluMEMS haben wir gemeinsam mit zwei weiteren Fraunhofer-Instituten einen intelligenten Mikropellistor als Demonstrator entwickelt, der bei deutlich geringeren Temperaturen als am Markt verfügbare Systeme arbeitet und mit sehr viel weniger Energie auskommt (Projekt FluMEMS, MEMS-basierte katalytische-thermische Sensoren für Gase und Flüssigkeiten).

Der Sensor kann kostengünstig in MEMS-Technologie hergestellt werden und soll noch 2022 in eine CMOS-Chipumgebung integriert werden. Fraunhofer IPM hat für den Pellistor neuartige katalytische Materialien entwickelt, die weniger Edelmetalle enthalten

und resistent gegen Katalysatorgifte wie Siloxane oder Schwefelverbindungen sind. Damit entfallen zusätzliche Filter, die bislang nötig waren, um eine Zerstörung der Katalysatorschicht zu vermeiden. Ohne solche Filter konnte die Baugröße beim Demonstrator auf $17 \times 10 \times 25 \text{ mm}^3$ reduziert werden; bei vollständiger monolithischer Integration sind zukünftig inklusive Auswertelektronik und Gehäuse Maße von $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$ möglich. Im Rahmen von FluMEMS und zwei weiteren Projekten hat das Team die Energieeffizienz der Pellistoren durch intelligente Ausleseprozeduren noch einmal deutlich verbessert, Querempfindlichkeiten und Störfaktoren reduziert. Dank eines zusätzlich integrierten Wärmeleitfähigkeitssensors etwa sind nun quantitative Wasserstoff-Messungen möglich, was mit klassischen Pellistoren nur begrenzt gelingt.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO, Marktorientierte Vorlaufforschung)

Gas- und Prozesstechnologie | Messen & Veranstaltungen

9. Gassensor-Workshop

Das Forum für die Gassensor-Community fand erstmalig im Online-Format statt (S.17).
18.03.2021

Sensor+Test »Digital Area«

Die Messtechnik-Messe
04.–06.05.2021

Präsentiert wurden Systeme zur Messung von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern sowie funktionale Materialien für die Gassensorik, Thermoelektrik und Optik.

Sensing with Quantum Light

WE-Heraeus-Seminar zur Quantensensorik
26.–29.09.2021

Co-Chairman war Frank Kühnemann, Vortrag und Poster kamen aus dem QUILT-Team.

eHarsh-Seminar

Abschluss-Seminar zum Fraunhofer-Leitprojekt eHarsh
29.11.–03.12.2021
Expertenvorträge von Martin Jäggle, Thermische Messtechnik und Systeme

- Thermal-electrical impedance spectroscopy
- Setup for high pressure tests at high temperature

Geplant für 2022

LASER World of PHOTONICS 2022
Messe für die Photonik-Branche
26.–29.04.2022

Sensor+Test
Die Messtechnik-Messe
10.–12.05.2022

Achema
Weltforum für die Prozessindustrie
22.–26.08.2022

Futuras in Res – The Quantum Breakthrough
28.–29.09.2022

Fokus Wasserstoff-Messtechnik

Explosionsgefahr: Wasserstoffführende Systeme müssen permanent sensorisch überwacht werden.



Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein in der Energiewende. Zur sicheren Nutzung ist zuverlässige, robuste und kostengünstige Sensorik gefragt.

Neue Sensoren für eine sichere Wasserstoff-Infrastruktur

Große Hoffnungen ruhen auf Wasserstoff (H₂) als Energieträger der Zukunft. Die Erzeugung des Gases ist vergleichsweise simpel – die breite Nutzung birgt jedoch Risiken: Wasserstoff ist leicht entzündlich. Gleichzeitig verspröden viele Metalle in direktem Kontakt mit dem Gas. Die Gefahr von Leckagen und damit von Explosionen ist also groß. Für den sicheren Betrieb von Wasserstoff-Leitungen, -Speichern oder -Anschlussstellen sind daher neue Sensor-konzepte gefragt. Heute verfügbare Wasserstoff-Sensoren scheitern dabei an den hohen Anforderungen an Messgenauigkeit, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit.

Im Geschäftsfeld Gas- und Prozesstechnologie sind wir in verschiedenen Forschungsprojekten zu innovativer Wasserstoff-Messtechnik

engagiert. Dabei entstehen stationäre und mobile Sensoren, die kritische Stellen in der Wasserstoff-Infrastruktur permanent oder gezielt überwachen. Die Sensoren müssen in der Lage sein, H₂ und auch das Transportgas Ammoniak (NH₃) in rauen Umgebungen über eine lange Zeit und mit sehr hoher Zuverlässigkeit zu detektieren und die absoluten Konzentrationen der Gase zu bestimmen.

Zusammenarbeit mit der Industrie

Neben Sensorkonzepten zur Leckage-Detektion entwickeln und adaptieren wir gemeinsam mit Partnern aus der Industrie Messtechnik zur Bestimmung der Gasqualität. In den Projekten verfolgen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedliche messtechnische Ansätze – jeweils mit dem Ziel, die hohen Sicherheitsnormen für den Betrieb von

H₂-Infrastruktur zu erfüllen und gleichzeitig wirtschaftliche Lösungen für ein flächen-deckendes Monitoring zu schaffen.

Plug-and-measure: Mini-H₂-Sensor als Demonstrator

Ein erster Wasserstoff-Sensor entstand im Rahmen des 2021 abgeschlossenen Fraunhofer-Projekts H2D. Der kompakte Sensor lässt sich über eine USB-Schnittstelle an einen PC anschließen und misst H₂-Konzentrationen von 0,4 Prozent in Luft in weniger als einer Minute. Der Sensor ist in MEMS-Technologie gefertigt und kommt mit wenig Energie aus, sodass er beispielsweise auch in akkubetriebenen Systemen eingesetzt werden kann.

Für den Gasnachweis macht sich der Sensor eine charakteristische Eigenschaft von Wasserstoff zunutze: H₂ gehört – neben Helium – zu den Gasen mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit und unterscheidet sich damit eindeutig von allen anderen Gasen, vor allem von Luft. Wasserstoff leitet Wärme sieben Mal schneller als Luft und lässt sich daher über eine Wärmeleitfähigkeitsmessung selbst in sehr geringen Konzentrationen in Luft oder anderen Gasen nachweisen.

Wärmeleitfähigkeitsdetektoren (WLD) sind in der Gasdetektion nicht neu. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Heizelement, das gleichzeitig als Temperatursensor dient. Die Heizleistung des Sensorelements ist aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von H₂ proportional zur Temperatur und damit zur Konzentration des Gases. So lässt sich anhand der Temperatur die Konzentration von Wasserstoff in einem H₂-Luftgemisch ermitteln. WLD Sensoren messen bei Arbeitstemperaturen von unter 100 °C, also in einem Temperaturbereich deutlich unter der Zündtemperatur von Wasserstoff, die bei 585 °C liegt. Und: WLD decken einen großen Messbereich ab – von unter 1 Prozent bis 100 Prozent Wasserstoff in Luft.

Kommerziell verfügbare WLD reagieren empfindlich auf Störeinflüsse wie z. B. hohe Luftfeuchtigkeit oder Zugluft – ein KO-Kriterium für den Einsatz in der Wasserstoff-Messtechnik. Das Forschungsteam kompensiert diese Quersensitivitäten durch eine smarte Signalauswertung.

Fraunhofer IPM beteiligt an größter Wasserstoff-Forschungsinitiative

Innovative messtechnische Lösungen zur Leckage-Detektion, zur Messung der H₂-Gasqualität und zur Analyse von Fremdgasen in Wasserstoff-Gasgemischen sind das Ziel im Verbundvorhaben TransHyDE_FP2: Sichere Infrastruktur. Damit beteiligt sich Fraunhofer IPM an den »Wasserstoff-Leitprojekten«, der bislang größten Forschungsinitiative des BMBF mit einem Förder-volumen von 740 Millionen Euro (S. 50).

Mobile Sensoren zur regelmäßigen Leckage-Prüfung

Wasserstoff ist bereits in sehr geringen Konzentrationen entzündlich, in höheren Konzentrationen sogar explosiv. Wasserstoffführende Anlagen müssen daher absolut dicht sein – und über lange Zeit bleiben. Im Projekt WALD entwickeln wir gemeinsam mit Industriepartnern seit 2022 ein mobiles H₂-Sensorsystem, das die Dichtigkeit von Transportnetzen und Anlagen beim Endverbraucher prüfen soll. Das handgehaltene Detektionsgerät zur turnusmäßigen Leckage-Prüfung wird auf Basis einer Kombination aus zwei Messprinzipien entwickelt. Der eigensichere Sensor wird einen großen Messbereich abdecken und auf hohe Messsicherheit ausgelegt.

H₂-Sensor für Brennstoffzellen-Antriebe

Emissionsfreie Brennstoffzellensysteme, betrieben mit »grünem« Wasserstoff, sollen zukünftig vor allem in leistungsstarken Nutzfahrzeugen zum Einsatz kommen. Besonders robuste und zuverlässige H₂-Sensoren sind hier erforderlich, um die hohen Sicherheitsstandards der Automobilindustrie einzuhalten. Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts HySABi entwickeln wir mit Industriepartnern seit 2021 ein neuartiges H₂-Sensorsystem für den Abgasstrang, das zwei sich ergänzende Messprinzipien nutzt. Dabei werden die Sensoren monolithisch auf einem Chip integriert und benötigen so besonders wenig Platz und Energie.



Klein und sparsam: Der nur 6×2 cm² große H₂-Sensor lässt sich an einen PC anschließen und misst die H₂-Konzentration ab 0,4 Prozent in Luft in weniger als einer Minute.



Ohne robuste, zuverlässige und kostengünstige Sensoren können wir Wasserstoff nicht auf breiter Basis nutzen.«



*Dr. Carolin Pannek,
Projektleiterin*

Erfahren Sie mehr über unsere Projekte zum Thema Wasserstoff.



Überblick Thermische Energiewandler

Wir können Wärme sehr effizient pumpen und wandeln. Das ist unser Beitrag zur Kühltechnologie von morgen.

Im Geschäftsfeld »Thermische Energiewandler« erforschen wir Technologien zum Pumpen, Wandeln, Leiten und Schalten von Wärme. Wir entwickeln, konzeptionieren und bauen effiziente Systeme zur thermischen Energiewandlung: zum einen kalorische Wärmepumpen und Kühlsysteme auf Basis magneto-, elektro- oder elastokalorischer Materialien und zum anderen thermoelektrische Module und Systeme zur Abwärmenutzung.

Darüber hinaus erforschen wir neuartige Konzepte für den effizienten Wärmetransport auf Basis von Heatpipes und Heatpipe-basierte Wärmeschalter für das gezielte Regulieren von Wärmeströmen.



**Abwärmeverstromung
mittels Thermoelektrik**



**Kühlen mit kalori-
schen Systemen**



**Wärmetransport
per Heatpipe**

Unsere Gruppen und Themen

Thermoelektrische Systeme

- Entwicklung thermoelektrischer Module und Systeme
- Abwärmeverstromung mit elektrischen Leistungen im Bereich von Milliwatt bis Kilowatt
- Innovative Peltier-Kühlung
- Strukturelle, thermische und elektrische Analyse von Bauteilen und Materialien

Kalorische Systeme

- Kühlen und Heizen ohne schädliche Kältemittel
- Entwicklung magnetokalorischer, elastokalorischer und elektrokolorischer Systeme
- Entwicklung und Charakterisierung von Heatpipes für das thermische Management



**Wir pumpen, wandeln, leiten
und schalten Wärme – maß-
geschneidert für neuartige
Anwendungen.«**

Dr. Olaf Schäfer-Welsen, Abteilungsleiter

Highlights Thermische Energiewandler

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

100-fach
schnellere
Wärmeabfuhr
für Aktoren

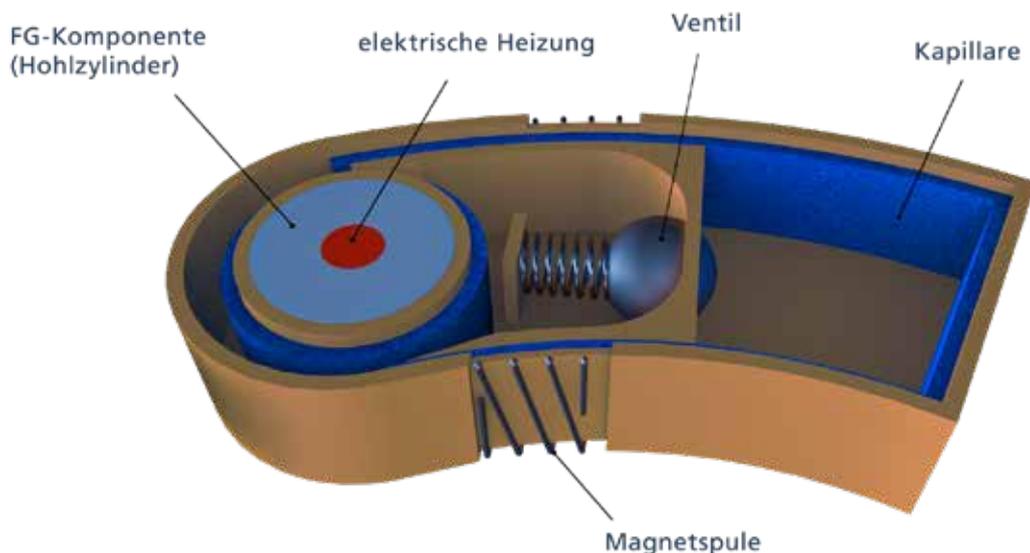
Projekt HochPerForm

Schaltbare Heatpipes zur effizienten Kühlung von Formgedächtnis-Aktoren

Hub, Kraft, Frequenz und Baugröße von Aktoren unterscheiden sich je nach Art des Aktors. High-Performer unter den Antriebsselementen sind Aktoren auf Basis thermischer Formgedächtnislegierungen (FGL): Im Vergleich zu Piezo-, Pneumatik- oder Hydraulik-Aktoren erzeugen sie deutlich höhere Kräfte auf kleinem Raum und kommen ohne aufwändige Peripherie aus. FGL-basierte Aktoren generieren den Hub durch eine Formveränderung, die durch Erwärmung des Materials induziert wird; mit der Abkühlung findet das Material in die Ursprungsform zurück. Aktoren aus dünnen Drähten, die nach diesem Prinzip arbeiten, finden breiten Einsatz in Kameras, Smartphones oder Haushaltsgeräten.

Für Stellantriebe in der Produktion sind jedoch größere Kräfte und damit massivere Aktorkörper gefragt. Das Problem: Sie kühlen über freie Konvektion nur langsam ab und erreichen daher trotz hoher Energiedichte nur eine geringe Leistungsdichte. Um diese zu erhöhen, entwickelt Fraunhofer IPM im Projekt HochPerForm schaltbare Heatpipes, die die Wärmeabfuhr bis auf das 100-fache beschleunigen und damit Schaltfrequenzen von über 1 Hz ermöglichen sollen. Das Team, zu dem auch Forschende von Fraunhofer IWU und Fraunhofer IFAM gehören, wird die Technologie an einem adaptiven Lager einer Werkzeugmaschine demonstrieren – und damit die Voraussetzung für den Einsatz der kompakten, leistungsfähigen Aktoren in der industriellen Fertigung schaffen.

Gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE-Projekt)





Neuer Messplatz

Individuelle Prüfung und Charakterisierung von Heatpipes

Wo Konzepte zur effizienten Kühlung und Entwärmung gefragt sind, wie beispielsweise in der Elektronik, leisten Heatpipes einen wichtigen Beitrag: Die mit Fluid befüllten Rohre können auf kleiner Fläche große Wärmemengen transportieren. Oft ist eine kundenspezifische Anpassung der Wärmerohre notwendig – doch die Angaben zu ihren Eigenschaften (z. B. Wärmeleitfähigkeit, übertragbare Wärmeleistung) sind häufig unzureichend, nicht zuverlässig genug oder nur für bestimmte Rahmenbedingungen verfügbar. Fraunhofer IPM hat nun einen neuen Messplatz für Heatpipes entwickelt, der eine exakte Charakterisierung und Prüfung unter individuellen Rahmenbedingungen ermöglicht. Am Messplatz können Heatpipes mit unterschiedlichen Durchmessern, Biegungen und Längen untersucht werden; spezifische Merkmale wie der Kippwinkel und die räumliche Orientierung lassen sich individuell einstellen. Dank der optimalen Isolierung können die auftretenden Wärmeströme präzise bestimmt und bilanziert werden.

Projekt MagMed

Magnetokalorik: Meilenstein auf dem Weg zur Marktfähigkeit

Nach vier Jahren Forschungsarbeit hat Fraunhofer IPM im Projekt MagMed einen durchschlagenden Erfolg bei der Leistungsfähigkeit

magnetokalorischer Systeme erzielt: Ein magnetokalorisches Kühlsystem mit einer Leistungsdichte von 12,5 Watt pro eingesetztem Gramm des magnetokalorischen (MK) Materials – ein Weltrekord in puncto Leistungsdichte. Maßgeblich für den Erfolg war ein innovatives Konzept für die Entwärmung des magnetisierten Materials – eine Schwachstelle bisheriger Systeme.

In bislang bekannten magnetokalorischen Kühlsystemen wird Wärme durch das Pumpen von Flüssigkeit abgeführt, was nur bis zu einer bestimmten Zyklusfrequenz funktioniert. Zudem beeinträchtigen Druckverlust und der für das Pumpen benötigte Strom die Energiebilanz der Systeme. Das von unserem Team entwickelte Kühlkonzept setzt auf latenten Wärmeübertrag in einer Heatpipe: Ein Fluid, in diesem Fall Wasser, verdampft an der Warmseite eines hermetisch geschlossenen Rohrs und kondensiert an der Kaltseite. So wird Wärme passiv übertragen. Dabei sind deutlich höhere Zyklusfrequenzen und damit höhere Leistungsdichten möglich. Im Anschlussprojekt MagMed 2 wird auf Basis dieses Konzepts ein Laborkühlschrank als Demonstrator entwickelt (Projekt MagMed 1/2, Entwicklung einer kältemittelfreien und effizienten Kühltechnik).

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

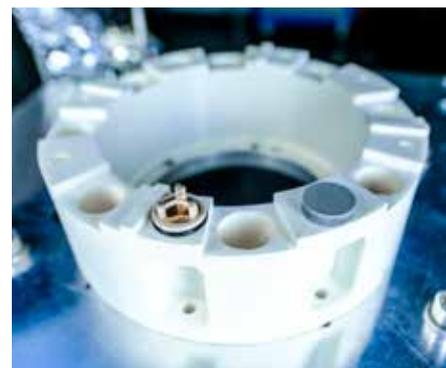
Weltrekord: Magnetokalorisches System mit bislang unerreichter Leistungsdichte

Individuelle Rahmenbedingungen: An einem eigens entwickelten Messplatz charakterisieren und prüfen wir Heatpipes.



Bei der Magnetokalorik sprechen wir von einer disruptiven Technologie.«

Dr. Jochen Kopitzke vom Projektpartner Philipp Kirsch GmbH, Hersteller von Kühltechnologie



6270 Watt
Kühlleistung
pro Kilogramm
Material über
10 Millionen
Zyklen



Zeitschriftenartikel:
Long-term stable compressive
elastocaloric cooling system with
latent heat transfer.
Commun. Phys. 4, 194 (2021)

Nature Communications Physics

Mit Druck: Langzeitstabiles elastokalorisches Kühlsystem

Die Langzeitstabilität ist eine der großen Herausforderungen elastokalorischer (EK) Systeme. In EK-Systemen wird ein Formgedächtnismaterial durch Zug oder Druck mechanisch belastet. Dabei erwärmt es sich. Wird die Wärme über eine Wärmesenke abgeführt und das Kraftfeld entfernt, kühlt das Material unter die Ausgangstemperatur ab. Auf Basis dieses reversiblen Effekts lässt sich nach dem Prinzip einer Wärmepumpe ein Kühlzyklus realisieren.

Zugbelastung, mit der EK-Systeme üblicherweise arbeiten, führt zu raschem Materialverschleiß. Wird der Temperatureffekt durch Druck erzeugt, hält das Material deutlich länger durch. Das ungünstigere Verhältnis von Oberfläche zu Volumen sorgt jedoch für einen schlechteren Wärmeübertrag. Mit einem innovativen Ansatz zum effizienten Wärmeübertrag ist es unserem Team gelungen, das Dilemma von Langzeitstabilität und Leistungsdichte zu lösen: Die Wärme wird latent über das Verdampfen und Kondensieren eines Fluids wie in einer Heatpipe abgeführt. Damit erreichte das Demonstratorsystem eine Langzeitstabilität von 10 Millionen Zyklen bei einer Kühlleistung von 6270 W pro Kilogramm des eingesetzten EK-Materials – und übertrifft damit die Werte vergleichbarer Systeme um ein Vielfaches. Die Forschungsergebnisse wurden im renommierten Fachjournal Communications Physics publiziert. (Projekt ElastoCool, Elastokalorik: Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel zum Heizen und Kühlen).

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF

Nachwuchsförderpreise

Wissenschaftlerinnen für Forschung zu Magnetokalorik ausgezeichnet

Dr. Lena Maria Maier und Alexandra Kaube sind für ihre herausragenden Forschungsleistungen auf dem Gebiet der Magnetokalorik mit Nachwuchsförderpreisen der Eva Mayr-Stihl Stiftung ausgezeichnet worden. Maier untersuchte in ihrer Doktorarbeit, wie die spezifische Leistung eines magnetokalorischen Kühlsystems gesteigert werden kann. Dazu

entwickelte sie ein innovatives Konzept für den effizienten Wärmeübertrag, das auf dem Kondensieren und Verdampfen eines Fluids basiert. Das von ihr aufgebaute magnetokalorische System übertrifft bisherige Systeme in Bezug auf Kühlleistung und Zyklusfrequenz um eine ganze Größenordnung.

Alexandra Kaube konzipierte in ihrer Masterarbeit eine Fluidrückführung für ein magnetokalorisches System. Diese verhindert die Austrocknung des magnetokalorischen Materials und ist eine wichtige Voraussetzung für die thermische Langzeitstabilität solcher Systeme. Dank ihrer Innovation konnte die thermische Stabilität von wenigen Minuten auf mehr als eineinhalb Stunden erhöht werden. Statt des üblicherweise verwendeten Methanols setzte Kaube auf Wasser und damit auf ein nicht-brennbares, unbedenkliches Arbeitsfluid.

InnoCool – Konsortialstudie Kalorik

Marktchancen kalorischer Systeme ausgelotet

Ist die Kalorik ein Game-Changer für die Klima- und Kältetechnik? Forschung und Industrie sehen disruptives Potenzial in der Technologie und wollen gemeinsam der Frage nachgehen: Könnten kalorische Systeme in Zukunft kompressorbasierte Kühlsysteme ersetzen? Für den Sprung in die breite Anwendung sind noch einige technologische Hürden zu überwinden. Dabei wollen wir möglichst frühzeitig die Perspektive der Industrie und die Erfordernisse des Marktes berücksichtigen. Mit unseren InnoCool-Workshops haben wir Hersteller, Technologieentwickler und Forschungseinrichtungen an einen Tisch gebracht, um technologische Konzepte und Marktchancen kalorischer Systeme zu diskutieren und langfristig voranzubringen. Erörtert wurde der Einsatz kalorischer Kühltechnik in verschiedenen Anwendungen wie z. B. Kühlschränken, Weinkühlern, mobilen Kühlboxen ebenso wie in Wärmepumpen für Privathaushalte. Die Ergebnisse erhalten die rund 40 Teilnehmenden exklusiv in einer Studie zusammengefasst.

Rechts: Im Rahmen der InnoCool-Workshops wurden die Marktchancen kalorischer Kühlsysteme erörtert.



Thermische Energiewandler | Messen & Veranstaltungen

InnoCool-Workshops

Im Rahmen der InnoCool-Konsortialstudie
16.03.2021, 22.04.2021, 07.07.2021, 26.–27.10.2021

Geplant für 2022

InnoCool-Workshop

Abschlussworkshop der InnoCool-Konsortialstudie
07.04.2022

Progetto Fuoco

Trade fair for biomass heating systems
04.–07.05.2022

Chillventa

Weltleitmesse der Kältetechnik
11.–13.10.2022



Fokus Effiziente Wärmeschalter

Heatpipe-basierte Wärmeschalter können Wärmeströme sehr effizient schalten und regeln.



Mithilfe wasserbindender Sorbentien entwickeln wir neue Konzepte für Heatpipe-basierte Wärmeschalter.

Temperaturkontrolle ohne Sensor- und Regeltechnik

Die Temperierung von Bauteilen in der Elektromobilität, der Batterietechnik oder im Maschinenbau gewinnt mit zunehmender Leistungsdichte an Bedeutung. Fraunhofer IPM entwickelt eine neue Generation thermischer Schalter auf der Basis schaltbarer Heatpipes, die für ein autonomes und effizientes Wärmemanagement sorgen sollen – ohne aufwändige Sensor- und Regeltechnik. Mit einer schaltbaren Heatpipe lässt sich der Temperieraufwand vieler Systeme deutlich verringern.

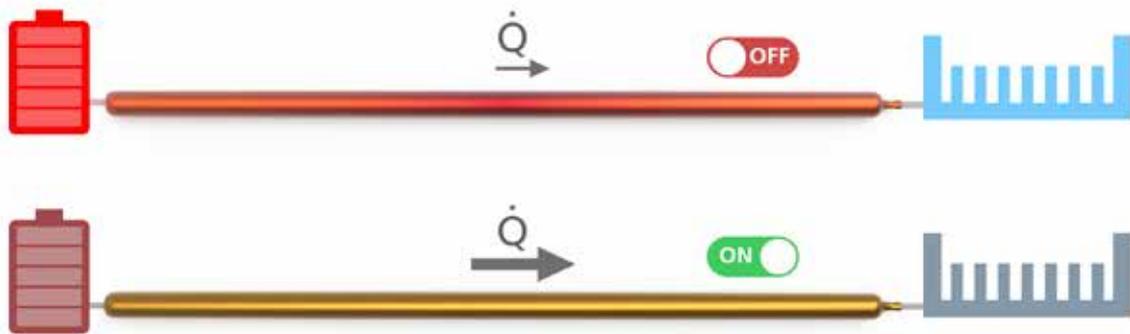
Wärmeströme effizienter schalten

Mithilfe von Wärmeschaltern lassen sich Wärmeströme ein- und ausschalten oder regeln – ganz ähnlich wie man es von elektrischen Schaltern kennt. Konventionelle Konzepte für

Wärmeschalter haben einige Nachteile: Der Wärmewiderstand im leitenden »Ein«-Zustand ist hoch, die Schalter sind groß, oft komplex aufgebaut und beinhalten bewegliche Teile. Für die breite Anwendung müssen thermische Schalter zudem effizienter und kostengünstiger werden.

Neuartiges Wärmeschalter-Konzept

Fraunhofer IPM arbeitet gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Instituten an einer neuen Generation thermischer Schalter, basierend auf schaltbaren Heatpipes. Eine Heatpipe besteht aus einem Metallrohr, in dem sich ein Fluid in flüssiger und gasförmiger Phase befindet. Wird eine Wärmequelle an die Heißeite der Heatpipe angelegt, steigt dort die Temperatur an, wodurch Fluid verdampft und an der Kaltseite des Rohrs, an der sich die Wärmesenke befindet, kondensiert. Der Wärmetransport in einer Heatpipe erfolgt also über den Transport latenter Wärme



– dieser Mechanismus des Wärmetransports ist sehr effektiv und verleiht Heatpipes eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Damit eignen sich Heatpipes grundlegend sehr gut als Basis für Wärmeschalter.

Wasserbindende Sorbentien

Für den Aufbau eines Heatpipe-basierten Wärmeschalters werden wasserbindende Sorbentien mit temperaturabhängigem Schalteffekt in die Heatpipe eingebracht. Die Sorbentien können einen wasserbindenden und einen nichtbindenden Zustand einnehmen. Die Umschaltung zwischen diesen beiden Zuständen erfolgt bei bestimmten Übergangstemperaturen. Diese sind durch die Zusammensetzung des Sorbens einstellbar. Im wasserbindenden Zustand wird das Fluid aufgenommen und steht für die Verdampfungs- und Kondensationsprozesse nicht mehr zur Verfügung. Der Wärmetransportmechanismus ist unterbunden und es wird so gut wie keine Wärme mehr transportiert (»Aus«-Zustand). Oberhalb der Übergangstemperatur wird das aufgenommene Wasser wieder freigegeben, der latente Wärmetransport über Verdampfungs- und Kondensationsprozesse kann wieder stattfinden und der Wärmeschalter gerät in den leitenden Zustand (»Ein«-Zustand). Das hier beschriebene Wärmeschalter-Konzept ist zum Patent angemeldet.

Reduzierter Temperieraufwand bei vielen Anwendungen

Schaltbare Heatpipes lassen sich vielseitig einsetzen. So funktionieren beispielsweise Batteriesysteme, Brennstoffzellen oder andere Systeme optimal bei einer jeweiligen »Wohlfühltemperatur«. Werden die Systeme nicht temperiert, leiden Kapazität, Leistung und Lebensdauer. Mit einer schaltbaren Heatpipe lässt sich der Temperieraufwand deutlich verringern. Bis zum Erreichen einer gewünschten Betriebstemperatur leiten die schaltbaren Heatpipes so gut wie keine Wärme; wird eine gewünschte Betriebstemperatur überschritten, schalten sie in den leitenden Zustand und führen überschüssige Wärme effektiv ab. Dies alles geschieht selbstständig, ohne Eingriffe von außen und aufwändige Sensor- und Regeltechnik. Die schaltbaren Heatpipes eignen sich damit auch als »thermische Notschalter«, die beim Überschreiten einer kritischen Temperatur Wärme abführen können.

Die vorgestellte Lösung für Heatpipe-basierte Wärmeschalter lässt sich für viele Anwendungsfelder adaptieren. Zur Entwicklung erster Systemdemonstratoren ist Fraunhofer IPM im Gespräch mit Firmen. Thematisch geht es hier um Elektromobilität, stationäre Energiespeicher (Batterien) sowie um die Luft- und Raumfahrt.

Schaltbare Heatpipes sind kompakt und kommen ohne bewegliche Teile aus. Sie sind einfach integrierbar und versprechen sehr hohe Wärmetransportfähigkeiten.



Wir forschen an schaltbaren Heatpipes, um thermische Schalter effizienter und kostengünstiger zu machen.«



*Dr. Markus Winkler,
Projektleiter*



Erfahren Sie mehr über unsere Forschung zu schaltbaren Heatpipes.

Index Fraunhofer IPM



Publikationen 2021

- Bernhardsgrütter, R. E.; Hepp, C. J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
3 ω method in combination with a meander shaped heater: Theoretical and experimental investigation
 Sensors and Actuators. A 332, 113175 (2021)
- Minet, Y.; Basler, M.; Zappe, H.; Buse, K.; Breunig, I.
Advances in Pockels-effect-based adiabatic frequency conversion in lithium niobate high-Q optical microresonators
 The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2021. Paper cd_3_4 (2021)
- Schmidtke, G.; Finsterle, W.; Thullier, G.; Zhu, P.; Ruymbeke, M.; Brunner, R.; Jacobi, C.
Annual Changes in the spectrally resolved global and local Earth Energy Imbalance using the Sun as a Reference Radiation Source
 EGU General Assembly. Paper EGU21-7263 (2021)
- Blättermann, A.; Brandenburg, A.; Buchta, D.; Carl, D.; Boinski, C.; Gehrke, J.
Auch komplexe Bauteile schnell ortsaufgelöst prüfen
 JOT. Journal für Oberflächentechnik 61 (12), 50-53 (2021)
- Basler, C.; Kappeler, M.; Brandenburg, A.
Beschichtungen ortsaufgelöst messen
 JOT. Journal für Oberflächentechnik 61, Suppl. 5, 44-47 (2021)
- Ersöz, B.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
CO₂ gas sensing with an electrolyte-gated transistor using impedance spectroscopy
 Sensors and Actuators. B 334, 129598 (2021)
- Blug, A.; Conrad, F.; Regina, D. J.; Bertz, A.; Kontermann, C.; Carl, D.; Oechsner, M.
Combining GPU-based full-field and strain-controlled 2D-DIC for simplified crack growth experiments
 Photomechanics IDICS Conference. 2 p. (2021)
- Strahl, T.; Herbst, J.; Maier, E.; Rademacher, S.; Weber, C.; Pernau, H.-F.; Lambrecht, A.; Wöllenstein, J.
Comparison of laser-based photoacoustic and optical detection of methane
 Journal of Sensors and Sensor Systems 10, 25-35 (2021)
- Rathmann, L.; Geissler, J.; Reiterer, A.
Concept for a novel airborne LiDAR system combining high-resolution snow height mapping with co-registered spatial information on the water content of the snowpack
 Stella, E. [Ed.]: Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II. Proceedings of SPIE 11785, Paper 1178513 (2021)
- Eckstein, V.; Schmid-Schirling, T.; Carl, D.; Wallrabe, U.
Depth-of-field comparison between the plenoptic camera 1.0 and 2.0
 Johnson, R. B. [Ed.]: Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XXII. Proceedings of SPIE, Paper 118140B (2021)
- Ayres, N. J.; Ban, G.; Bienstman, L. et al.
The design of the n2EDM experiment: nEDM Collaboration
 The European Physical Journal. C 81, 512 (2021)
- Huai, H.; Laskin, G.; Fratz, M.; Seyler, T.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Wilde, J.
Detecting Local Delamination of Power Electronic Devices through Thermal-Mechanical Analysis
 SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 312-313 (2021)
- Nitzsche, P.; Dinc, C.; Wöllenstein, J.; Schmitt, K.
Detection of Stable Isotopes of CO₂ using Quantum Cascade Laser based Absorption Spectroscopy
 SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 191-192 (2021)
- Stemmler, S.
Development of a high-speed, high-resolution multispectral camera system for airborne applications
 Stella, E. [Ed.]: Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications II. Proceedings of SPIE 11785, Paper 1178512 (2021)
- Arndt, N.; Bolwien, C.; Sulz, G.; Kühnemann, F.; Lambrecht, A.
Diamond-Coated Silicon ATR Elements for Process Analytics
 Sensors. Online Journal 21, 6442 (2021)
- Weber, C.; El-Safoury, M.; Pannek, C.; Engel, L.; Eberhardt, A.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.
Differential Channel Optical Readout System for Color Changes of Gas Sensitive Colorimetric Dyes
 SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 171-172 (2021)
- Stevanovic, J.; Seyler, T.; Aslan, J.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.
Digital holographic measurement system for use on multi-axis systems
 Lehmann, P. [Ed.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. Proceedings of SPIE 11782, Paper 117821R (2021)
- Fratz, M.; Beckmann, T.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.
Digital holography as a tool for high-speed high-precision 3D-measurements for industrial applications
 Lehmann, P. [Ed.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. Proceedings of SPIE 11782, Paper 1178209 (2021)

Fratz, M.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.

Digital holography in production: An overview

Light. Advanced Manufacturing 2, 15 (2021)

Carl, D.

Digitalholographische 3D-Messtechnik

Beckmann, T.; Berndt, D.; Bertz, A. et al.: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik (Vision Leitfaden 21), 48-51 (2021)

Reiterer, A.

Drohnengebundenes Mobile Mapping – Aktueller Stand und Rahmenbedingungen

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein [Ed.]: Digitaler Zwilling – Strategie für den Bestandserhalt. DBV-Heft 51, 27-29 (2021)

Nitzsche, L.; Goldschmidt, J.; Kießling, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.

A dual-comb spectrometer for trace gas analysis in the mid-infrared

Schunemann, P. G. [Ed.]: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XX. Proceedings of SPIE 11670, Paper 1167005 (2021)

Minet, Y.; Zappe, H.; Breunig, I.; Buse, K.

Electro-Optic Control of Lithium Niobate Bulk Whispering Gallery Resonators: Analysis of the Distribution of Externally Applied Electric Fields

Crystals 11, 298 (2021)

Huai, H.; Laskin, G.; Fratz, M.; Seyler, T.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Wilde, J.

Evaluating Local Delamination of Power Electronic Devices Through Thermal-Mechanical Analysis

22nd International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2021. Proceedings, Paper 9410840 (2021)

Merkle, D.; Reiterer, A.

Evaluation of thermography-based automated delamination and cavity detection in concrete bridges

Beyerer, J. [Ed.]: Automated Visual Inspection and Machine Vision IV. Proceedings of SPIE 11787, Paper 1178706 (2021)

Waldl, H.; Tkadletz, M.; Winkler, M.; Grossmann, B.; Czettel, C.; Pohler, M.; Schalk, N.

Evolution of the thermal conductivity of arc evaporated fcc-Ti_{1-x-y}Al_xTa_yN coatings with increasing Ta content

Surface and Coatings Technology 406, 126658 (2021)

Yurchenko, O.; Pernau, H.-F.; Engel, L.; Bierer, B.; Jägle, M.; Wöllenstein, J.

Examination of New Catalysts for Catalytic Combustible Gas Sensors by Thermal Analysis

SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 135-136 (2021)

Szabados, J.; Amiune, N.; Sturman, B.; Breunig, I.

Fine structure of second-harmonic resonances in $\chi^{(2)}$ optical microresonators

Optics Express 29, 13925-13936 (2021)

Schiller, A.; Fratz, M.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.

Flächige Zahnflankenprüfung mittels digitaler Holographie: Optisch, schnell, präzise

7. Fachtagung Verzahnungsmesstechnik 2021. VDI-Berichte 2393, 155-162 (2021)

Lindner, C.; Kunz, J.; Herr, S. J.; Kießling, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.

Fourier-Transform Infrared Spectroscopy with Near-Infrared Light

OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021: Fourier Transform Spectroscopy. Proceedings, Paper FM2F.4 (2021)

Amiune, N.; Buse, K.; Breunig, I.

Frequency comb generation based on optical parametric oscillation with second-order nonlinear materials

The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2021. Paper cd_p_10 (2021)

Amiune, N.; Zawilski, K. T.; Schunemann, P. G.; Buse, K.; Breunig, I.

From optical parametric oscillation to frequency-comb generation in whispering gallery resonators made of CdSiP₂

Schunemann, P. G. [Ed.]: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XX. Proceedings of SPIE 11670, Paper 1167004 (2021)

Merkle, D.; Frey, C.; Reiterer, A.

Fusion of ground penetrating radar and laser scanning for infrastructure mapping

Journal of Applied Geodesy 15, 31-45 (2021)

El Oualid, S.; Kogut, I. R.; Benyahia, M.; Gececi, E.; Kruck, U.; Kosior, F.; Masschelein, P.; Candolfi, C.; Dauscher, A.; König, J. D.; Jacquot, A.; Caillat, T.; Alleno, E.; Lenoir, B.

High Power Density Thermoelectric Generators with Skutterudites

Advanced Energy Materials 11, 2100580 (2021)

- Hens, K.; Sperling, J.; Schubert, M.; Kießling, J.
High-Power CW Optical Parametric Oscillator Design for gap-free Wavelength Tuning across the Visible
 CLEO: Science and Innovations 2021. Paper JTh3A.37 (2021)
- Laskin, G.; Huai, H.; Fratz, M.; Seyler, T.; Beckmann, T.; Schiffmacher, A.; Bertz, A.; Wilde, J.; Carl, D.
High-speed electronic speckle pattern interferometry for analysis of thermo-mechanical behavior of electronic components
 Lehmann, P. [Ed.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. Proceedings of SPIE 11782, Paper 117820A (2021)
- Bertz, A.
Hohe Messraten, hochgenaue Messergebnisse: Digitale Holographie in der Produktion
 Quality Engineering 4, 44-46 (2021)
- Yurchenko, O.; Pernau, H.-F.; Engel, L.; Bierer, B.; Jäggle, M.; Wöllenstein, J.
Impact of cobalt oxide morphology on the thermal response to methane examined by thermal analysis
 SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 123-124 (2021)
- Yurchenko, O.; Pernau, H.-F.; Engel, L.; Bierer, B.; Jäggle, M.; Wöllenstein, J.
Impact of particle size and morphology of cobalt oxide on the thermal response to methane examined by thermal analysis
 Journal of Sensors and Sensor Systems 10, 37-42 (2021)
- Bernhardsgrütter, R. E.; Hepp, C. J.; Jäggle, M.; Pernau, H.-F.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
Inline quality monitoring of diesel exhaust fluid (AdBlue) by using the 3 ω method
 Journal of Sensors and Sensor Systems 10, 5-12 (2021)
- Ganter, J.; Löffler, S.; Metzger, R.; Ußling, K.; Müller, C.
Investigating Semantic Augmentation in Virtual Environments for Image Segmentation Using Convolutional Neural Networks
 Journal of Imaging 7, 146 (2021)
- Stefani, A.; Götz, T.; Vieregge, J. M.; Wiedmann, M.; Tschekalinskij, W.; Holzer, N.; Peters, V.; Dold, M.; Bauersfeld, M.-L.; Junger, S.
Investigation of the influence of the number of spectral channels in colorimetric analysis
 The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2021. Paper ch_p_26 (2021)
- Ayres, N. J.; Ban, G.; Bison, G. et al.
Johnson-Nyquist noise effects in neutron electric-dipole-moment experiments
 Physical Review. A 103, 062801 (2021)
- Schmid-Schirling, T.; Kraft, L.; Carl, D.
Laser scanning-based straightness measurement of precision bright steel rods at one point
 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 116, 2511-2519 (2021)
- Schlager, D.; Schulte, A.; Schütz, J.; Brandenburg, A.; Schell, C.; Lamrini, S.; Vogel, M.; Teichmann, H.-O.; Miernik, A.
Laser-guided real-time automatic target identification for endoscopic stone lithotripsy: A two-arm in vivo porcine comparison study
 World Journal of Urology 39, 2719-2726 (2021)
- Bachmann, N.; Fitger, A.; Maier, L. M.; Mahlke, A.; Schäfer-Welsen, O.; Koch, T.; Bartholomé, K.
Long-term stable compressive elastocaloric cooling system with latent heat transfer
 Communications Physics 4, 194 (2021)
- Bierer, B.; Grgic, D.; Yurchenko, O.; Engel, L.; Pernau, H.-F.; Jäggle, M.; Reindl, L. M.; Wöllenstein, J.
Low-power sensor node for the detection of methane and propane
 Journal of Sensors and Sensor Systems 10, 185-191(2021)
- Szabados, J.; Buse, K.; Breunig, I.
Low-threshold frequency comb generation using second-order nonlinearities in lithium niobate whispering gallery resonators
 The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2021. Paper cd_3_2 (2021)
- Strahl, T.; Herbst, J.; Lambrecht, A.; Maier, E.; Steinebrunner, J.; Wöllenstein, J.
Methane leak detection by tunable laser spectroscopy and mid-infrared imaging
 Applied Optics 60, C68-C75 (2021)
- Schiller, A.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.
Microscopic height measurements on moving objects with digital holography
 Lehmann, P. [Ed.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. Proceedings of SPIE 11782, Paper 117821P (2021)
- Goldschmidt, J.; Nitzsche, L.; Kießling, J.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.
A Mid-Infrared Dual Comb Spectrometer for the Determination of Stable Isotope Ratios of Carbon Dioxide
 OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021: Applied Industrial Spectroscopy. Proceedings, Paper JTu4D.2 (2021)

Nitzsche, L.; Goldschmidt, J.; Kießling, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.

Mid-infrared Dual-comb Spectroscopy as Sensor: Fast and Precise Quantification of Multiple Gases

SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 189-190 (2021)

Reiterer, A.

Mobiles 3D-Laserscanning

Beckmann, T.; Berndt, D.; Bertz, A. et al.: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik (Vision Leitfaden 21), 92-95 (2021)

Jakob, P.; Madan, M.; Schmid-Schirling, T.; Valada, A.

Multi-Perspective Anomaly Detection

Sensors. Online Journal 21, 5311 (2021)

Stemmler, S.; Wiedenmann, D.

Multi-sensor data acquisition for assessing the condition of vegetation

Neale, C. M. U. [Ed.]: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXIII. Proceedings of SPIE 11856, Paper 118560L (2021)

Seyler, T.; Beckmann, T.; Stevanovic, J.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.

Multi-wavelength digital holography on a collaborative robot

OSA Imaging and Applied Optics Congress 2021: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging. Proceedings, Paper DM6C.1 (2021)

Olshausen, P. v.; Roetner, M.; Koch, C.; Reiterer, A.

Multimodal measurement system for road analysis and surveying of road surroundings

Beyerer, J. [Ed.]: Automated Visual Inspection and Machine Vision IV. Proceedings of SPIE 11787, Paper 1178709 (2021)

Bolwien, C.

Neues Messsystem für Erdgas und Wasserstoff – schnell und genau

Energie-, Wasser-Praxis 72(2), 22-27 (2021)

Lindner, C.; Kunz, J.; Herr, S. J.; Wolf, S.; Kießling, J.; Kühnemann, F.

Nonlinear interferometer for Fourier-transform mid-infrared gas spectroscopy using near-infrared detection

Optics Express 29, 4035-4047 (2021)

Lindner, C.; Kunz, J.; Wolf, S.; Kießling, J.; Kühnemann, F.

Nonlinear interferometers for Fourier-transform infrared spectroscopy with visible light

Schunemann, P. G. [Ed.]: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XX. Proceedings of SPIE 11670, Paper 1167010 (2021)

Ponciano, J.-J.; Roetner, M.; Reiterer, A.; Boochs, F.

Object Semantic Segmentation in Point Clouds – Comparison of a Deep Learning and a Knowledge-Based Method

ISPRS International Journal of Geo-Information 10, 256 (2021)

El-Safoury, M.; Dufner, M.; Weber, C.; Schmitt, K.; Pernau, H.-F.; Willing, B.; Wöllenstein, J.

On-Board Monitoring of SO₂ Ship Emissions Using Resonant Photoacoustic Gas Detection in the UV Range

Sensors. Online Journal 21, 4468 (2021)

Koss, P. A.; Dinani, R. T.; Bienstman, L.; Bison, G.; Severijns, N.

Optical-Magnetometry-Based Current Source

Physical Review Applied 16, 014011 (2021)

Amiune, N.; Puzyrev, D. N.; Pankratov, V. V.; Skryabin, D. V.; Buse, K.; Breunig, I.

Optical-parametric-oscillation-based $\chi^{(2)}$ frequency comb in a lithium niobate microresonator

Optics Express 29, 41378-41387 (2021)

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik [Ed.]

Partikelmesstechnik in der Produktionslinie

JOT. Journal für Oberflächentechnik 61(9), 14-15 (2021)

Engel, L.; Benito-Altamirano, I.; Tarantik, K.; Pannek, C.; Dold, M.; Prades, D.; Wöllenstein, J.

Printed sensor labels for colorimetric detection of ammonia, formaldehyde and hydrogen sulfide from the ambient air

Sensors and Actuators. B 330, 129281 (2021)

Blättermann, A.; Buchta, D.; Brandenburg, A.; Carl, D.; Knospe, A.

Qualitätssicherung bei der Reinigung von Metalloberflächen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 61, Suppl.1, 44-45 (2021)

Blättermann, A.; Buchta, D.; Brandenburg, A.; Carl, D.; Boinski, C.; Gehrke, J.

Quantifizierung geringster Verunreinigungen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 61(2), 28-31 (2021) und 61(5), 52-55 (2021)

Nitzsche, L.; Goldschmidt, J.; Kießling, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.

Real-Time Data Processing for an Electro-Optic Dual-Comb Spectrometer

OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021: Applied Industrial Spectroscopy. Proceedings, Paper JTU2E.2 (2021)

Bernhardsgrütter, R. E.; Hepp, C. J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
Robust and Sensitive Thermal Sensor Using the 3-Omega-Method to Measure the Concentration of Binary Mixtures

21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems: Transducers 2021. Proceedings, 1363-1366 (2021)

Schmid-Schirling, T.; Carl, D.

Schnelle Inline-Geradheitsmessung von Langprodukten mit Laserscanning-Ansatz

Beckmann, T.; Berndt, D.; Bertz, A. et al.: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik (Vision Leitfaden 21), 102-104 (2021)

Beckmann, T.

Schnelle optische Vermessung von Mikrostrukturen auf teller-großen Flächen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 61, Suppl. 2, 32-35 (2021)

Koschel, A.; Müller, C.; Reiterer, A.

Selection of Key Frames for 3D Reconstruction in Real Time

Algorithms 14, 303 (2021)

Bernhardsgrütter, R. E.; Hepp, C. J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Simultaneous Quality and Flow Rate Monitoring of Diesel Exhaust Fluid by Using a Platinum Thin Film Sensor

SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 133-134 (2021)

Kappert, H.; Schopferer, S.; Döring, R.; Ziesche, S.; Olowinsky, A.; Naumann, F.; Jäggle, M.; Ostmann, A.

Smart sensor systems for extremely harsh environments

SMSI 2021 – Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 81-82 (2021)

Smirnov, S.; Andryushkov, V.; Podivilov, E.; Sturman, B.; Breunig, I.

Soliton based $\chi^{(2)}$ combs in high-Q optical microresonators

Optics Express 29, 27434-27449 (2021)

Fratz, M.; Seyler, T.; Schiller, A.; Bertz, A.

Submikrometergenaue 3D-Oberflächenmessung in der Produktion

Beckmann, T.; Berndt, D.; Bertz, A. et al.: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik (Vision Leitfaden 21), 96-98 (2021)

Bassler, M.; Deilmann, M.; Ens, W. et al. [Eds.]

Technologie-Roadmap »Prozess-Sensoren 2027+«

NAMUR (2021)

Winkler, M.; Teicht, C.; Corhan, P.; Polyzoidis, A.; Bartholomé, K.; Schäfer-Welsen, O.; Pappert, S.

Thermal Switch Based on an Adsorption Material in a Heat Pipe

Energies 14, 5130 (2021)

Schiller, A.; Bertz, A.

Topographiemessung mittels digitaler Holographie auch an bewegten Objekten

Photonics Flashlight 1(1), 43-45 (2021)

Bernhardsgrütter, R. E.; Hepp, C. J.; Schmitt, K.; Jäggle, M.; Pernau, H.-F.; Wöllenstein, J.

Towards a robust thin film sensor for distinguishing fluids using the 3 ω -method

Sensors and Actuators. A 321, 112419 (2021)

Nitzsche, L.; Goldschmidt, J.; Kießling, J.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Wöllenstein, J.

Tunable dual-comb spectrometer for mid-infrared trace gas analysis from 3 to 4.7 μm

Optics Express 29, 25449-25461 (2021)

Chmelina, K.; Gaich, A.; Delleske, R.; Olshausen, P. v.

UAV-gestützte Vermessungsanwendungen in Geotechnik, Geologie, Glaziologie und Inspektion untertage

Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 128(1), 37-48 (2021)

Berichte 2021

Herbst, J.

Entwicklung eines tragbaren Methandetektors für die quantitative Leckferndetektion (E! 12547 LeakLoQu); Teilprojekt: Entwicklung des Laserspektrometers für die Gasferndetektion mit Kompensation der atmosphärischen Methankonzentration

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.11.2018–31.12.2020
Freiburg/Brsg., 2021, 13 S.

Kühnemann, F.; Trendle, T.

Entwicklung von Faraday-Rotatoren mit stark verbesserten Eigenschaften auf der Grundlage von Kalium-Terbium-Fluorid (KTb₃F₁₀) und anderen innovativen Materialien (IsoNova); Teilvorhaben: Absorptionsspektroskopie an magneto-optischen Materialien und Komponenten

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.09.2017–31.08.2020
Freiburg/Brsg., 2021, 16 S.

Bierer, B.; Grgic, D.

Fernabfragbares Warnsystem zur Detektion von Leckagen für eine resiliente Gasinfrastruktur (LeakAlert)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2019–30.06.2021
Freiburg/Brsg., 2021, 4 S.

Blättermann, A.; Boinski, C.

Fluoreszenzscanner für die orts aufgelöste und quantitative Inline-Detektion filmischer Verunreinigungen zur Qualitätssicherung in Beschichtungsprozessen (Scan4Coat)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.02.2019–31.01.2021
Freiburg/Brsg., 2021, 62 S.

Kopitzke, J.; Niebuhr, H.; Müller, G.; Wittig, D.; Bartholomé, K.; Maier, L. M.; Corhan, P.; Barzca, A.; Vieyra, H.; Katterer, M.; Vogel, C.

MagMed – Entwicklungen einer kältemittelfreien und effizienten Kühltechnik

Schlussbericht (Wissenschaftlich-technische Ergebnisse); Berichtszeitraum: 01.01.2021–31.05.2021
Willstätt-Sand, 2021, 79 S.

Baulig, C.; Klaas, B.

Mehrraumiges-LiDAR-System für genaue Messung der Windcharakteristik im komplexen Gelände (MerLiS); Teilvorhaben: Entwicklung und Integration der Hardware und Steuerung für das mehrraumige LiDAR-System

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2017–31.06.2020
Freiburg/Brsg., 2021, 21 S.

Klemt-Albert, K.; Marx, S.; Reiterer, A. [Eds.]

Multi-Source Data Fusion zur teilautomatisierten Generierung eines objektbasierten digitalen Bestandsmodells von Infrastrukturanlagen für den Eisenbahnbetrieb

Schlussbericht
Freiburg/Brsg., 2021, 32 S.

Werner, C.

Multi-Wellenlängen-Laser-Scannen von einer Flugplattform (UAV) für Bathymetrie (Hydrographie) und Umwelthanwendungen (E! 10784 Multi-Wave); Teilprojekt: Entwicklung eines leichtgewichtigen Multi-Wellenlängen Messsystems

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.09.2017–31.12.2020
Freiburg/Brsg., 2021, 11 S.

Stemmler, S.

Multispektral- und 3D-Monitoring der Vegetation durch UAVs (E! 11340 MuSe-3D); Teilprojekt: Entwicklung eines leichtgewichtigen Multispektral- und 3D-Messsystems

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.12.2017–31.03.2021
Freiburg/Brsg., 2021, 9 S.

Baulig, C.; Reiterer, A.

Selbstkalibrierendes 3D-Multisensorsystem zur vollautomatischen »intelligenten« Erkennung und Klassifizierung von Bahn-Peripherie-Objekten sowie Inspektion von Bahngleisen

Schlussbericht (Sachbericht); Berichtszeitraum: 01.04.2018–31.12.2020
Freiburg/Brsg., 2021, 9 S.

Erteilte Patente 2021

Reiterer, A.; Schwarzer, S.

Bildgebende Vorrichtung mit flugfähiger Tragevorrichtung

EP 3155448 B1

Brandenburg, A.

Verfahren und System zum Erfassen der Oberflächenbelegung einer Beschichtung auf einer Oberfläche eines bandförmigen Prüflings

EP 3566791 B1

Bartholome, K.; Horzella, J.; König, J.; Mahlke, A.; Vergez, M.

Verfahren und Vorrichtung zum Betrieb kreisprozessbasierter Systeme

JP 6902543

Blug, A.; Jetter, V.

Vorrichtung zum Aufnehmen von Bildern und Verfahren zur Belastungsanalyse eines Prüfkörpers

DE 102018110381 B4

Carl, D.; Jetter, V.; Schmid-Schirling, T.

Vorrichtung zum berührungsfreien Bestimmen der Geradheit wenigstens eines Langprodukts und Verfahren zum Kalibrieren einer derartigen Vorrichtung

JP 6993330

US 11163072 B2

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

Vorrichtung zum tiefenaufgelösten Bestimmen der stofflichen Zusammensetzung einer Probe

DE 102016107267 B4

Doktorarbeiten 2021

Baliozian, P.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

Development and characterization of bifacial p-type silicon shingle solar cells with edge passivation

[Freiburg, Univ., Diss., 2021]

Ersoez, B.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

Electrolyte-gated transistor for carbon dioxide sensing

[Freiburg, Univ., Diss., 2021]

Aachen, Shaker-Verlag. Gas Sensors 12 (2022)

Buchta, D.

Simulationsgestützte Scherografie zur Defekterkennung an Kunstwerken

[Stuttgart, Univ., Diss., 2021]

Stuttgart, Univ. Stuttgart, Institut für Technische Optik. Berichte aus dem Institut für Technische Optik 110 (2021)

Maier, L. M.

Zur Steigerung der spezifischen Leistung eines magnetokalorischen Kühlsystems

[Freiburg, Univ., Diss., 2021]

Aachen, Shaker-Verlag. Gas Sensors 11 (2021)

Großprojekte Öffentliche Forschungsvorhaben 2021

Vierzehn Forschungsprojekte mit einem finanziellen Volumen von jeweils mehr als einer Million Euro für Fraunhofer IPM haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über das Jahr 2021 bearbeitet. Die Liste enthält solche Projekte, die von der öffentlichen Hand oder der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert wurden.

HOLOMOTION Dynamisch-holographisches Messverfahren zur Erfassung metallischer Freiformflächen, Teilvorhaben: Erforschung eines Verfahrens zur interferometrischen Vermessung in Bewegung – Dynamische Holographie
 Laufzeit: 01.02.2017 – 31.03.2023
 Förderung: BMBF; Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH

MagMed Entwicklung einer kältemittelfreien und effizienten Kühltechnik (Systementwicklung und Messtechnik)
 Laufzeit: 01.06.2017 – 31.05.2021
 Förderung: BMWi / Forschungszentrum Jülich GmbH

eHarsh Sensorsysteme für extrem raue Umgebungen
 Laufzeit: 01.07.2017 – 31.12.2021
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

QUILT Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions
 Laufzeit: 01.09.2017 – 30.11.2021
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

FluMEMS MEMS-basierte katalytisch-thermische Sensoren für Gase und Flüssigkeiten
 Laufzeit: 01.04.2018 – 31.12.2021
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

MultiVIS Fachhochschulkooperation mit der Hochschule Furtwangen HFU
 Laufzeit: 01.07.2018 – 31.12.2023
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Kooperationsprogramm Fachhochschulen)

Elasto-Cool Elastokalorik: Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel zum Heizen und Kühlen
 Laufzeit: 01.08.2018 – 31.12.2021
 Förderung: BMBF / VDI/VDE Innovation und Technik GmbH

ISLAS Intracavity-Laserspektroskopie für den hochempfindlichen Nachweis von Spurengasen
 Laufzeit: 01.03.2019 – 30.06.2022
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

QMag Entwicklung zweier komplementärer Quantenmagnetometer, um kleinste Magnetfelder mit hoher Auflösung und hoher Empfindlichkeit bei Raumtemperatur zu messen
 Laufzeit: 21.03.2019 – 31.03.2024
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

LaserBeat Hammerschlagtest mit Licht – berührungslose und flächenhafte Inspektion von Tunneln auf Basis laser-induzierten Körperschalls
 Laufzeit: 01.04.2019 – 31.03.2022
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

EIKaWe Elektrokolorische Wärmepumpe
 Laufzeit: 01.10.2019 – 30.09.2023
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

HochPerForm Hochkompakte, schnelle Aktorik auf Basis von Formgedächtnislegierungen
 Laufzeit: 01.03.2020 – 28.02.2023
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE)

MIAME Mikrometer auf Meter: Laserlicht für sub-Mikrometergenaue 3D-Messung auf Meterskalen
 Laufzeit: 01.04.2020 – 31.03.2023
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE)

QTWP QT-Wellenleiter-Plus: Labor-Upgrade für LNOI-Technologie und Wellenleitercharakterisierung
 Laufzeit: 01.09.2021 – 31.08.2023
 Förderung: BMBF; Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH

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 1900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf exzellentem wissenschaftlichen 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.

www.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
- CNA Center für 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)
- Deutscher Hochschulverband (DHV)

- Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V. (DHvG)
- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)
- Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V. (DTG)
- Draht-Welt Südwestfalen – netzwerkdraht e.V.
- Forum Angew. Informatik und Mikrosystemtechnik e.V. (FAIM)
- Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh)
- Green City Cluster Freiburg
- microTEC Südwest e.V.
- Nano-Zentrum Euregio Bodensee e.V. (NEB)
- Photonics BW e.V. – Innovations-Cluster für Optische Technologien in Baden-Württemberg
- 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.

International

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

Forschen Im Auftrag der Zukunft

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiser und Impulsgeber für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit werteorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 30000 Mitarbeitende, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,9 Milliarden Euro. Davon fallen 2,5 Milliarden Euro auf den Bereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein

Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Hochmotivierte Mitarbeitende auf dem Stand der aktuellen Spitzenforschung stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestalten und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

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.

www.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
Fax + 49 761 8857-224
info@ipm.fraunhofer.de

Verantwortlicher Redakteur

Holger Kock (holger.kock@ipm.fraunhofer.de)

Redaktion

Mirja Eschermann, Holger Kock, Anja Strobel

Layout und Gestaltung

Adam Lipinski

Druck

STROHM DRUCK e. K., 78652 Deißlingen
Dieser Bericht wurde auf FSC®-Recyclingpapier
gedruckt.

ISSN 2570-1916

© 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.

Bildquellen

S. 7: Oliver Kern Fotografie
S. 8: Oliver Kern Fotografie
S. 12: Markus Steur Fotografie
S. 19 oben: Luka Ganter
S. 22: HÜBNER Photonics
S. 23 unten: HÜBNER Photonics
S. 33 oben: Aumm graphixphoto/Shutterstock
S. 40: BIT Ingenieure
S. 42: APIWATp/Shutterstock
S. 43 oben: RSS – Remote Sensing Solutions GmbH
S. 43 unten links und rechts: GEO Group GmbH
S. 45: Amberg Technologies AG
S. 46: Maksim Safaniuk/Shutterstock; Inset: Fraunhofer IPM
S. 47 oben: Uwe Moosburger/altfoto/Bayernwerk
S. 56: Audio und werbung/Shutterstock
S. 66: Oliver Kern Fotografie

Alle anderen Bilder und Grafiken: Fraunhofer IPM

—
Bleiben Sie in Kontakt – wir freuen uns auf Sie!

Besuchen Sie unsere Homepage:
www.ipm.fraunhofer.de

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

Folgen Sie uns auf:



