

Jahresbericht 2022/2023

Messen • Kontrollieren • Optimieren

Jahresbericht 2022/2023

Messen • Kontrollieren • Optimieren





Messtechnik wird einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung und Industrialisierung des Bausektors leisten.«

Prof. Dr. Karsten Buse, Instituttsleiter

Bauwirtschaft

Schlüsselbranche und Innovationsfeld

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

mehr als zehn Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts werden für Bauinvestitionen eingesetzt, und nahezu 40 Prozent der globalen CO₂-Emissionen gehen auf den Gebäude- und Bausektor zurück. Auch ist der Rohstoffeinsatz gewaltig: Allein in Deutschland werden jährlich 5000 Kilogramm mineralische Stoffe pro Kopf verbaut.

Angesichts dieser Dimensionen ist es erstaunlich, dass Digitalisierung und Industrialisierung in der Baubranche bisher allenfalls in Form von Insellösungen angekommen sind. Dabei ist die durchgehende Digitalisierung der Schlüssel zu massiven Einsparungen beim Ressourceneinsatz und zum Einstieg in die Kreislaufwirtschaft. Und sie ist die Voraussetzung für eine konsequente Industrialisierung: von der Vorfertigung in Fabriken über die automatisierte Be- und Entladung von Lkw, die Steuerung von Kränen auf der Baustelle bis hin zur Montage und zum Ausbau unterstützt durch Roboter. Später natürlich auch beim Recycling, insbesondere was das automatisierte Erkennen von Formen und Materialien betrifft.

Fraunhofer IPM engagiert sich immer stärker in der Forschung für die Bauwirtschaft, nun auch als Mitglied der Fraunhofer-Allianz Bau, deren stellvertretender Sprecher ich bin. Ein paar Beispiele: Unsere optischen Systeme sorgen für die 3D-Digitalisierung von baulicher Infrastruktur in allen Lebensphasen, und zwar weitgehend automatisiert – über Roboter und Drohnen, aber unterstützt vom Menschen. Mithilfe unserer Messtechnik lassen sich Bauteile und Materialien identifizieren oder der Zustand von Gebäuden überwachen, z. B. in Bezug auf Feuchtigkeit und Schimmel. Mit Laserstrahlen können wir feststellen, ob die Ablösung von Fassadenteilen droht, und mit Kohlenmonoxid-Gassensoren können wir vor Bränden in sehr frühen Phasen warnen.

Auch die Politik hat erkannt, dass nachhaltiges und bezahlbares Bauen trotz Inflation und steigender Standards nur mithilfe von Innovation möglich ist. Landtags- und Bundestagsabgeordnete haben uns im Jahr 2022 besucht, um sich über Technologien für innovatives Bauen zu informieren. Umgekehrt bringt sich Fraunhofer IPM aktiv in den politischen Diskurs ein, z. B. im Strategiedialog »Bezahlbares Wohnen und innovatives Bauen« der Landesregierung Baden-Württemberg.

Innovationen, die bei den Menschen ankommen – das treibt uns als Team zu immer neuen Höchstleistungen an. In diesem Jahresbericht finden Sie spannende Beispiele, wie wir dieses Ziel auch in anderen Branchen erreichen. Lassen Sie sich entführen in die bunte Welt der Messtechnik: Qualitätssicherung von Bipolarplatten in Brennstoffzellen durch ultraschnelle digitale Holographie, Messung von Wassertiefen im Meer mit Zwei-Farb-Scannern zur Unterstützung der Schifffahrt, verteilte Sensoren zur Erforschung der Reaktion des Walds auf den Klimawandel, die Feststellung des Düngezustands von Ackerböden durch den Nachweis von Lachgas und das effiziente Pumpen von Wärme ohne klimaschädliche Kältemittel durch die Weiterentwicklung der Elektrokalorik.

Das alles sind nur ausgewählte Beispiele aus den mehr als 100 Projekten, an denen wir parallel arbeiten. Über Highlights aus unserem Forschungsalltag berichten wir in unserem monatlichen Newsletter und in den sozialen Medien. Bleiben wir in Verbindung!

Ihnen viel Erfolg auf all Ihren Wegen, gern natürlich gemeinsam mit uns.

Herzlichst, Ihr

Karsten Buse

Prof. Dr. Karsten Buse, Institutsleiter



Fraunhofer-Allianz
BAU



Anmeldung
Newsletter



Strategiedialog »Bezahlbares
Wohnen und innovatives Bauen«

Inhalt

Editorial	3
Überblick	6
Zahlen	8
Organisation	10
Kuratorium	12
Investitionen	13
Professuren	14
Interviews	16
Wir stellen vor: Zwei, die auszogen, um auszugründen	18
Kundeninterview: Siemens Mobility GmbH	20
Geschäftsfelder	22
Produktionskontrolle	24
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	26
Fokus: Moderne Qualitätssicherung	34
Objekt- und Formerfassung	36
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	38
Fokus: Laserscanning unter Wasser	44
Gas- und Prozesstechnologie	46
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	48
Fokus: Reduktion von Treibhausgasen	56
Thermische Energiewandler	58
Highlights: Projekte · Innovationen · Veranstaltungen	60
Fokus: Elektrokalorische Wärmepumpen	64
Index	66
Publikationen Berichte	68
Patente Doktorarbeiten	74
Großprojekte	76
Netzwerk	77
Fraunhofer-Gesellschaft	78
Impressum	80



Überblick Fraunhofer IPM

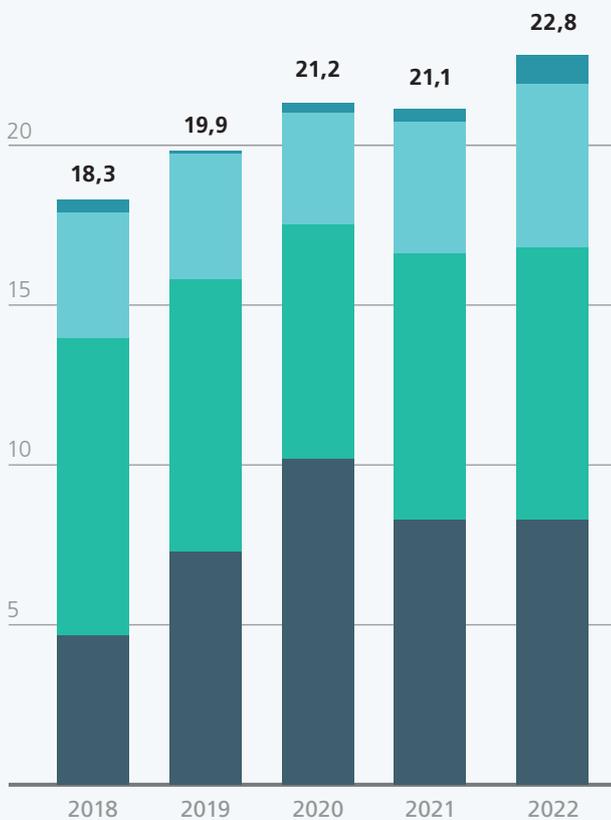




Zahlen Fraunhofer IPM

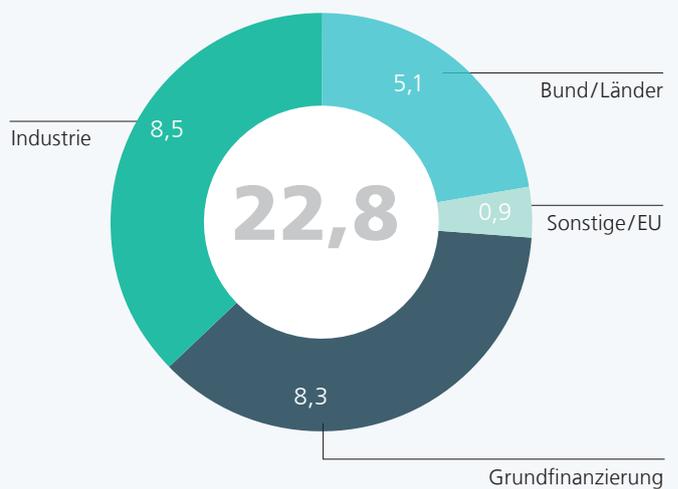


Entwicklung Betriebshaushalt in Mio. Euro

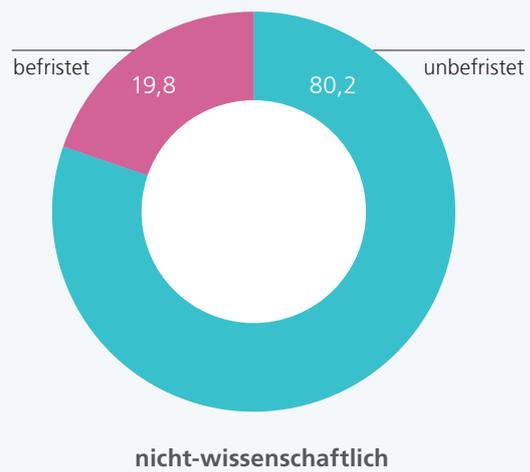
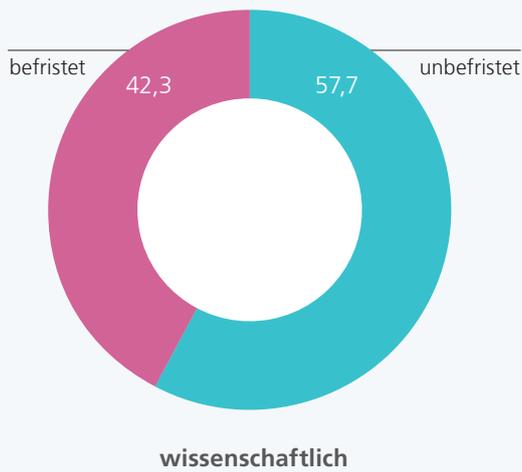


- Grundfinanzierung
- Industrie
- Bund/Länder
- Sonstige/EU

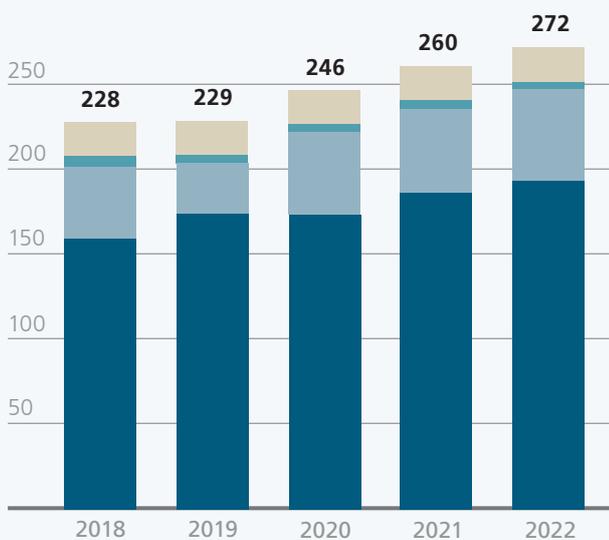
Betriebshaushalt 2022 in Mio. Euro



Beschäftigte nach TVÖD Anteil befristeter/unbefristeter Verträge 2022

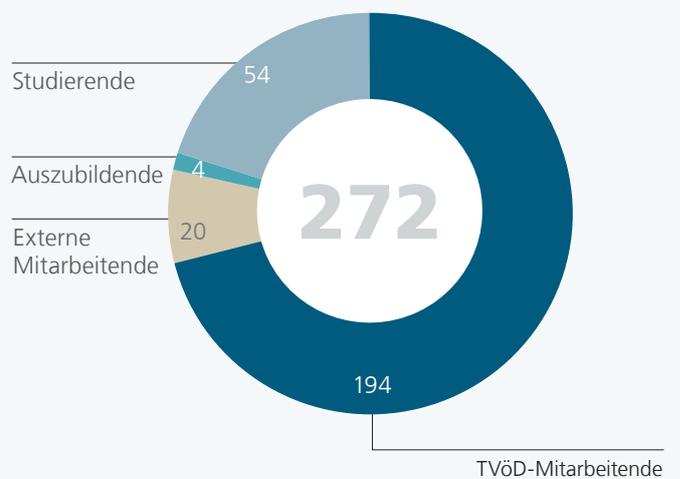


Entwicklung Anzahl der Mitarbeitenden



- TVÖD-Mitarbeitende
- Studierende
- Auszubildende
- Externe Mitarbeitende

Mitarbeitende 2022



Organisation

INSTITUTSLEITUNG



Institutsleiter
Prof. Dr. Karsten Buse



Stellv. Institutsleiter
Dr. Daniel Carl

REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



Leiter Kommunikation und Medien
Holger Kock



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



Betriebstechnik
Benjamin Schlegel

PRODUKTIONSKONTROLLE ▶ Seite 24



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 36



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 46



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein



Nichtlineare Optik
und Quantensensorik
PD Dr. Frank Kühnemann



Spektroskopie und
Prozessanalytik
Dr. Raimund Brunner



Thermische Mess-
technik und Systeme
Dr. Katrin Schmitt



Integrierte
Sensorsysteme
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

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. Nach zwei virtuellen Treffen trafen sich die Kuratorinnen und Kuratoren 2022 zum ersten Mal wieder vor Ort in Freiburg.

Vorsitzender

Dr. Lutz Aschke
Carl Mahr GmbH & Co. KG

Mitglieder

Sebastian Bannert
Robert Bosch GmbH

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

Stephanie Busse
DB Netz AG

Dr. Mathias Jonas
Internationale Hydrographische
Organisation

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

Dr. Fabian Lausen
Bundesministerium für Bildung und
Forschung

Dr. Mirko Lehmann
Endress+Hauser Flowtec AG

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

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

Dr. Volker Nussbaumer
Volkswagen AG, Group Charging GmbH

Dr. Stefan Raible
ScioSense Germany GmbH

Prof. Dr. Michael Totzeck
Carl Zeiss AG

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



Investitionen 2022

Auch 2022 haben wir wieder in unsere technische Infrastruktur investiert, um unsere Kundinnen und Kunden mit exzellenter Forschung noch besser unterstützen zu können.

Durchstimbare Dauerstrich-Laserlichtquelle

Für unsere Forschung zur digitalen Mehrwellenlängen-Holographie verfügen wir nun über eine durchstimbare Dauerstrich-Laserlichtquelle für die Wellenlängenbereiche 450–650 nm und 900–1300 nm. Der »C-Wave« ermöglicht Messungen mit beliebigen Wellenlängen, sodass Messbereich und Genauigkeit für unterschiedliche Anwendungen und Bauteile auf Knopfdruck angepasst werden können. So erschließen wir neue Anwendungsfelder für die digitale Holographie – wie z. B. die Qualitätssicherung in der Brennstoffzellenfertigung. Durch das feine Abstimmen der Wellenlänge in Kombination mit hoher Wellenlängenstabilität konnten dank des »C-Wave« erstmals holographische Messungen mit einem Messbereich von 1 m realisiert werden.

Anlage zur Plasmaaktivierung

Mit einer neuen Anlage zur Plasmaaktivierung können wir Wafer oberflächlich aktivieren, wodurch effizientes Niedrigtemperatur-Waferbonding ermöglicht wird, ohne Einbuße in der Bondstärke in Kauf nehmen zu müssen. Niedrigtemperatur-Waferbonding ermöglicht es, Materialkombinationen zu bonden, die keinen hohen Temperaturhub zulassen. Wir setzen die Technologie primär zum Bonden von Lithiumniobat-Wafern auf SiO₂-Wafer ein. Die gebondeten Waferstacks dienen dann als Ausgangsmaterial für die Fertigung von Lithiumniobat-Dünnschichtsubstraten.

Filament-Glasfaserprozessor

Faseroptische Komponenten sind Standardelemente unserer optischen Messsysteme. Ein neuer Filament-Faserprozessor ermöglicht uns die Bearbeitung und das Testen optischer Glasfasern. So können beispielsweise Faserverbindungen »gespliced«, d. h. einzelne Faserkomponenten ohne Steckverbinder direkt miteinander verschmolzen werden. Dies macht die Faserverbindungen robuster und minimiert optische Verluste. Bisher wurden Faserkomponenten mit Standard-Steckverbindern verwendet und mit kommerziell erhältlichen Kupplungen verbunden. Außerdem können wir nun Glasfasern verformen und dadurch die Ausbreitung von Licht in der und um die Faser gezielt beeinflussen. Dies erweitert unsere Forschungs- und Fertigungsmöglichkeiten, z. B. im Bereich nichtlineare Optik und bei multi-spektralen Systemen.

Magnetfeldabgeschirmter Raum (MSR)

In einem magnetisch abgeschirmten Raum (MSR) können wir Messungen ab sofort ohne den Einfluss externer Magnetfelder durchführen. Wir nutzen diese spezielle Umgebung z. B. für magnetische Durchflussmessungen, Materialprüfungen oder zur magnetischen Vermessung von Nanosatelliten. Der 30 m² große MSR schirmt magnetische Felder vom niederfrequenten (0,01 Hz) bis in den hochfrequenten (> 1 kHz) Bereich optimal ab.

Hochpermeable Materialien »absorbieren« vorhandene Magnetfelder und leiten sie durch die Wände des MSR. So entsteht eine magnetfeldfreie Umgebung im Inneren des Raums. Damit die Schirmwirkung reproduzierbar erhalten werden kann, werden die Wände regelmäßig entmagnetisiert. Das magnetische Restfeld im Zentrum nach Entmagnetisierung ist < 20 nT.



In einem 30 m² großen Raum können wir Messungen ohne den Einfluss externer Magnetfelder durchführen.

Deep Learning-Server

Der hochleistungsfähige Server sorgt dafür, dass wir künstliche neuronale Netze (KNN) deutlich schneller trainieren können als zuvor. KNN sind die Grundlage für die KI-basierte automatisierte Auswertung unserer Messdaten und die Erstellung digitaler 3D-Modelle. Mit dem neuen Server steht uns ein Vielfaches an Rechenleistung zur Verfügung: Acht Grafikkarten (Nvidia A100) mit jeweils 80 GB Speicher ermöglichen die Parallelisierung von Rechenprozessen und die Verarbeitung deutlich größerer neuronaler Netze. Die Grafikkarten verfügen über eine Speicherbandbreite von über zwei Terabyte pro Sekunde.

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

universität freiburg

Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Professur für Optische Systeme

Prof. Dr. Karsten Buse

PD Dr. Ingo Breunig

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

Dr. Katrin Schmitt

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

Annette Schmitt

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



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

HOCHSCHULE FURTWANGEN



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

Interviews





Wir stellen vor

Zwei, die auszogen, um auszugründen

»Wir wollen ansprechbar sein für unsere Kunden.«

2022 gründeten unsere Mitarbeiter Simon Stemmler und Bastian Stahl die bimeto GmbH. Stemmler leitete zuvor die Gruppe Airborne- und Unterwasser-Scanning. Stahl promovierte am Fraunhofer IPM zum Thema »Automatisierte Interpretation von 3D- und Bilddaten für die digitale Erfassung urbaner Infrastruktur«.

Ihr seid von Forschern zu Gründern geworden: Wie kam es dazu?

Stemmler: Das allererste Mal, dass das Thema aufkam, war in einer Kuratoriumssitzung. Ich hatte dort über ein Projekt berichtet, in dem es um Digitalisierung von Baugruben ging. Einer der Anwesenden, Steffen Auer, wurde bei dem Thema hellhörig. In seiner Firma, die Türen und Tore herstellt, gab es immer wieder Probleme auf der Baustelle, weil Maße im Rohbau fehlerhaft genommen wurden. Er fragte, ob man die Technik nicht auch für die Vermessung von Gebäuden nutzen könne. Herr Auer ist jetzt einer unserer Mitgesellschafter ...

Wie ging es dann weiter?

Stemmler: Wir haben erst einmal Beispielmessungen gemacht. Das hat so gut funktioniert, dass wir alle das Potenzial gesehen haben, nicht nur einfache Türmaße zu nehmen, sondern gleich ganze 2D-CAD-Grundrisse aus 3D-Scans zu erzeugen. Bis zur Gründung hat es dann nur ein Jahr gedauert.

Bastian, wie kamst Du dazu?

Stahl: Ich war einigermaßen überrascht, als mein Abteilungsleiter Alexander Reiterer mich gefragt hat, ob ich mir vorstellen könne, Gründer zu werden. Ich war mir dann aber schnell sicher, dass ich Lust dazu habe. Es war eine Bauchentscheidung.

Welche Risiken habt Ihr gesehen?

Stahl: Ich habe wenige Risiken und vor allem eine große Chance gesehen. Mit Fraunhofer und einem Industriepartner im Hintergrund gibt das natürlich zusätzliche Sicherheit. Ich

bin auch in einer Lebenssituation, wo es passt und man etwas ausprobieren kann.

Stemmler: Bei mir war es ähnlich. Die Gründung als GmbH war für mich ein wichtiger Punkt. Als Angestellter einer GmbH entfällt die Privathaftung. Viele gründen als Selbstständige und stehen dann persönlich in vollem Risiko. Das wollte ich nicht. Als das geregelt war und die Finanzierung stand, habe ich dann eigentlich nur noch die Chancen gesehen. Ein eigenes Unternehmen mit eigenem Team. Das schien mir sehr reizvoll.

Wie habt Ihr die Finanzierung gestemmt?

Stemmler: Das Startkapital kam über ein Gesellschafterdarlehen und ein Bankdarlehen. Eine weitere Quelle haben wir mehr oder weniger durch Zufall entdeckt! Das Bundesfinanzministerium bietet eine »Bundesforschungszulage« für Unternehmen, die eine Innovation finanzieren wollen. Da werden über eine Umsatzsteuersenkung bis zu 25 Prozent der Personalkosten rückwirkend gedeckt. Diese Förderung haben wir Ende des Jahres erfolgreich beantragt.

Wie war der Start und wie hat sich bimeto entwickelt?

Stemmler: Wir hatten eine komfortable Finanzierungssituation. Insofern konnten wir uns von Anfang an direkt auf die Akquise stürzen – ohne erst einmal viel Zeit darauf zu verwenden, Förderanträge zu stellen und Gelder reinzuholen. Wir haben inzwischen zwei Industriepartner, mit denen wir eng zusammenarbeiten und konnten schon im ersten Jahr Projekte bearbeiten und auch einen nennenswerten Umsatz erwirtschaften. Wir haben inzwischen einen Softwareentwickler und einen Architekten eingestellt. Das ist ein richtig klasse Team, wo die Arbeit wirklich Spaß macht.

Wie fühlt es sich an, plötzlich Arbeitgeber zu sein?

Stemmler: Wir legen beide Wert darauf, ohne große Hierarchien zu arbeiten. Solange wir ein so kleines Team sind, passt es so für uns am besten. Wir managen derzeit vieles selbst. Dinge wie zum Beispiel die Buchhaltung, Vorsteueranmeldung usw. geben wir natürlich an einen Steuerberater, den unsere



Haben vor allem die Chancen gesehen: Simon Stemmler (l.) und Bastian Stahl (r.) haben ihre Entscheidung noch nicht bereut. Gemeinsam mit ihrem vierköpfigen Team entwickeln sie Lösungen für die automatisierte 3D-Modellierung von Gebäuden.

Gesellschafter vermittelt haben. Was wirklich ganz anders ist, ist der Umgang mit Kunden. Da müssen Preise verhandelt werden und dazu sind dann auch mal Ellbogen notwendig. Das ist eine ganz neue Situation und verlangt mir von der Kommunikation her schon einiges ab.

Stahl: Mir ging es ähnlich, obwohl ich ja Projekte bearbeite und schwerpunktmäßig keine Verträge verhandle. Die zum Teil sehr direkte Art der Kommunikation von Seiten der Kundschaft hat mich schon überrascht. Wenn dann so eine harsche E-Mail kommt, muss man schon mal schlucken. Aber es gab auch schon sehr positives Feedback: Wir kümmern uns persönlich, wenn es irgendwo hakt. Unsere Software ist schneller als bisher verfügbare Lösungen im Bereich Gebäudedigitalisierung. Das gibt uns Raum, unsere Kunden individuell zu unterstützen.

Welche Rolle spielen die beiden anderen Geschäftsführer im täglichen Geschäft?

Stemmler: Eigentlich keine große aktive Rolle. Sie stehen aber als Sparringspartner zur Verfügung, wenn es Fragen gibt. Es gibt allerdings ein gutes Gefühl, die Verantwortung zu teilen, denn es sind ja viele, auch weitreichende Entscheidungen zu treffen.

Auf welche Erfahrungen konntet Ihr bauen?

Stahl: Ich habe mich vor der Gründung mit anderen Gründern aus dem Fraunhofer-Umfeld unterhalten. Das war wertvoll für mich. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat uns dann bei der Ausgestaltung des Lizenzvertrags unterstützt. Wir nutzen ja wissenschaftliche Erkenntnisse, die wir hier bei Fraunhofer erworben haben für unser Geschäft.

Arbeitet Ihr weiterhin mit Fraunhofer IPM zusammen?

Stahl: Ja. Derzeit haben wir zum Beispiel eine Entwicklung in

Auftrag gegeben – wie ein ganz normaler Kunde, obwohl wir natürlich kein gewöhnlicher Kunde sind. Wir kennen uns lange persönlich. Das bedeutet kurze Wege, gute Kommunikation. Und ich bin ja auch noch teilweise am Institut, um meine Promotion abzuschließen, bis ich dann danach voll bei bimeto einsteige. Davon profitieren beide Seiten.

Wo soll es mit bimeto hingehen?

Stemmler: Mittelfristig wollen wir uns als reiner Softwareanbieter für die Digitalisierung von Gebäuden etablieren. Dazu müssen wir die Software weiterentwickeln und dann auch einen Support aufbauen. Wir wollen organisch wachsen und in den kommenden fünf Jahren in die schwarzen Zahlen kommen. Was am Ende daraus wird, werden wir sehen. Als Mitgesellschafter bestimmen wir natürlich mit, ob wir bimeto irgendwann verkaufen werden oder selbstständig bleiben.

bimeto GmbH

Das Unternehmen bietet Lösungen für die intelligente Gebäudeerfassung. Mithilfe automatisierter 3D-Datenauswertung verkürzt bimeto den Prozess von der Gebäudevermessung bis zum digitalen Gebäudemodell. Die bimeto-Software überführt 3D-Punktwolken automatisiert in digitale 2D-CAD-Pläne oder 3D-Gebäudemodelle – und sorgt so für einen deutlichen Effizienzgewinn in der Bauplanung. Die bimeto GmbH hat ihren Sitz in Freiburg und beschäftigt derzeit vier Mitarbeiter.

www.bimeto.de

Kundeninterview

Siemens Mobility GmbH

»Wir wollen den Wunsch des Kunden erfüllen, bevor er weiß, dass er ihn hat.«

Im Auftrag der Siemens Mobility GmbH hat Fraunhofer IPM zusammen mit einem weiteren Industriepartner einen thermoelektrisch gekühlten Trolley für den Einsatz in Bordküchen von Zügen entwickelt. Was die Anforderungen an einen solchen Kühlrolley sind und worauf man beim Konzept achten muss, weiß Andreas Häußler, Head of Department Sanitary Modules and Galley bei Siemens Mobility.

Was sind die Hauptprodukte der Siemens Mobility GmbH? Womit verdienen Sie Ihr Geld?

Andreas Häußler: Siemens Mobility ist eine eigenständige GmbH im Siemens Konzern, in Deutschland beheimatet und weltweit unterwegs beim Thema Mobilität und allem, was dazugehört. Unsere Kernprodukte sind Schienenfahrzeuge, Bahnautomatisierungen, Elektrifizierungen, Software, schlüsselfertige Bahnsysteme und Services wie zum Beispiel Bahndepots.

Welche Stellung haben Sie bei Siemens Mobility?

Ich bin im Engineering beheimatet. Meine kleine Abteilung von zwanzig Leuten beschäftigt sich ausschließlich mit der

Entwicklung von zwei Komponenten: den Galleys, das sind die Bordküchen, und den Sanitär-Modulen. Da entwickeln wir die kompletten Systeme. Und das ist überraschend komplex, nicht unbedingt kompliziert – man kann leicht verstehen, wie so ein WC oder so eine Bordküche funktionieren. Aber trotzdem sind Bordküchen und Sanitär-Module sehr komplexe Systeme, wenn man diese in ein Schienenfahrzeug optimal einbinden will.

Was macht denn die Integration einer Küche in ein Schienenfahrzeug so herausfordernd?

Die Komplexität liegt in der Bahnwelt selbst. Zulassungstechnisch gibt es da sehr spezielle Vorgaben. Eigentlich sind Bordküchen und WC-Kabinen sehr durchschaubare Produkte, aber ein paar Sachen finden dann doch im Verborgenen statt. Wir machen die Dinge vielleicht auch ein bisschen anders als unsere Wettbewerber. Wir haben speziell entwickelte Zusatzelemente, die nicht jeder anbieten kann. Die haben wir in unseren eigenen Laboren validiert und manchmal auch erfunden.

Wer entscheidet bei Ihnen, welche Innovationen entwickelt werden und auf den Markt kommen sollen?

In der Regel erreichen uns übergeordnete Anforderungen vom Vertrieb. Oft gehen diese aber nicht wirklich ins Detail. Denn die Welt des Kunden ist meist auf einem höheren Level. Der Kunde möchte beispielsweise günstige, bequeme und hygienische Züge. – Die Idee, einen selbstkühlenden Trolley zu entwickeln, kam aber weder vom Kunden noch vom Vertrieb. Solche Themen denken wir uns als Fachabteilung auch gerne selbst aus und entwickeln sie dann weiter. In diesem Fall in guter Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPM. Wir versuchen, damit den Wunsch des Kunden zu erfüllen, bevor der Kunde selbst weiß, dass er ihn hat. Wir haben gesagt: Einen gekühlten Trolley, den müsste sich ein Kunde doch eigentlich wünschen. Die Entwicklung lief dann zusammen mit Fraunhofer IPM als externem Entwicklungspartner, der sich mit der entsprechenden Kühltechnik auskennt.



Andreas Häußler ist Head of Department Sanitary Modules and Galley bei der Siemens Mobility GmbH. Sein Team kümmert sich um die Entwicklung von Bordküchen (Galleys) und Sanitärmodulen für den Nah- und Fernverkehr auf der Schiene.



»Wir versuchen, die Wünsche des Kunden zu erfüllen. Aber manchmal stellen wir dem Kunden auch Innovationen vor, an die er selbst nicht gedacht hat – wie z. B. einen thermo-elektrisch gekühlten Trolley«, sagt Andreas Häußler.

Gibt es bei einem Kühlrolley heute noch Anforderungen, die nur innovativ zu lösen sind?

Natürlich – bedingt durch die notwendige Integrierbarkeit in ein Schienenfahrzeug: Ein gekühlter Trolley benötigt logischerweise eine zusätzliche Kühlanlage. Und die hat einen zusätzlichen Platz- und Energiebedarf. Baut man eine solche aktive Kühlung bei einem Trolley mit ein, muss man sich entscheiden: Lasse ich die Abmaße des Trolleys konstant, damit er in die vorhandene Infrastruktur passt und verringere dadurch den nutzbaren Innenraum? Oder versuche ich, den Innenraum nicht zu verkleinern und beschäftige mich damit, ein innovatives Kühlsystem zu finden, das sich durch geringsten Energieverbrauch und durch geringsten Platzbedarf auszeichnet? Hinzu kommt noch, dass wir Standard-Kühlmittel vermeiden wollten. Diese drei Kriterien waren letztendlich bei der Entwicklung des Kühlrolleys maßgeblich: innovatives Kühlmittel, geringer Platzbedarf, geringer Energiebedarf. Und das haben wir gemeinsam geschafft!

Zum Schluss: Wohin geht die Reise auf der Schiene?

Wegen der Klimaveränderung müssen wir aufhören so viel Auto zu fahren. Wir werden in Zukunft – trotz schnellerer

Andreas Häußler: »Die positive Kundenresonanz auf der Messe InnoTrans zeigte uns, dass wir mit dem gekühlten Trolley ein Thema adressieren, das wir auch verkaufen können.«

Siemens Mobility GmbH

Die Siemens Mobility GmbH ist seit über 175 Jahren ein führender Anbieter im Bereich intelligenter Transportlösungen und entwickelt sein Portfolio durch Innovationen ständig weiter. Zum Kerngeschäft gehören Schienenfahrzeuge, Bahnautomatisierungs- und Elektrifizierungslösungen, ein umfangreiches Softwareportfolio, schlüsselfertige Bahnsysteme sowie die dazugehörigen Serviceleistungen. Im Geschäftsjahr 2022, das am 30. September 2022 endete, hat Siemens Mobility einen Umsatz von 9,7 Milliarden Euro ausgewiesen und rund 38 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter weltweit beschäftigt.

Mehr Infos unter: www.siemens.de/mobility

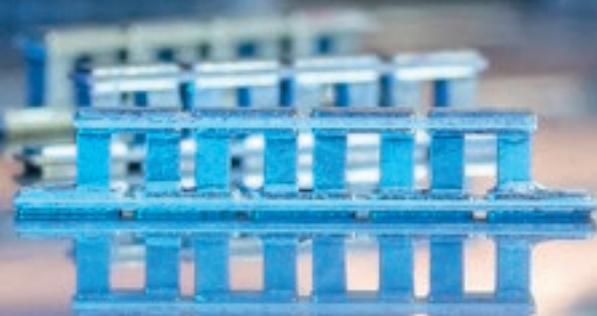
Verbindungen – mehr Zeit im Zug verbringen. Diese Zeit wollen wir zum Erlebnis machen, das ist die Herausforderung, der wir uns zu stellen haben – mit der Technologie des Zuges, aber auch mit allen Komponenten des Innenausbau.

Herr Häußler, vielen Dank für das Gespräch!



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

Inline Vision Systeme

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

Geometrische Inline-Messsysteme

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



**Moderne Produktionslinien brauchen
moderne Mess- und Prüfsysteme.
Wir entwickeln diese.«**

Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter

Highlights Produktionskontrolle

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Joseph-von-Fraunhofer-Preis

Fluoreszenzmesstechnik: vom Schätzeisen zur Präzisionsmethode

Fette, Korrosionsschutzmittel, Klebstoffe – Bauteile kommen im Verlauf der Produktion mit unterschiedlichen Substanzen in Kontakt. Reste dieser Stoffe bleiben nicht selten als Verunreinigungen auf Bauteiloberflächen zurück, mit negativen Folgen für den weiteren Verarbeitungsprozess. Aufspüren lassen sich unerwünschte Rückstände oft anhand ihrer Fluoreszenzaktivität: Kurzwelliges, violettes Laserlicht wird von organischen Substanzen in Teilen in langwelliges, sichtbares Licht umgewandelt. Dieses Leuchten lässt sich spektral filtern und sehr empfindlich detektieren, sodass bereits wenige Milligramm einer Substanz auf einer quadratmetergroßen

Oberfläche sichtbar werden. Umgekehrt lassen sich nach demselben Prinzip auch gezielt aufgebrauchte Funktionsschichten nachweisen.

Fraunhofer IPM hat die vergleichsweise ungenaue Fluoreszenzmesstechnik im Laufe der vergangenen Jahre zu einer hochgenauen, quantitativen Messmethode für die 100-Prozent-Prüfung von Bauteilen entwickelt. Dafür wurden unsere Kollegen Dr. Alexander Blättermann und Dr. Albrecht Brandenburg mit dem Joseph-von-Fraunhofer Preis 2022 ausgezeichnet. Die beiden Wissenschaftler und ihr Team haben die Technologie inzwischen zu einer Systemfamilie für die industrielle Bauteilprüfung ausgebaut: Die Systeme der F-Scanner-Reihe prüfen meterlange Bleche ebenso wie kleine Elektrobauteile im Produktionsprozess

F-Scanner im Kleinformat: Montiert an einem Roboterarm bewegt sich das Messgerät über das Bauteil – ein Vorteil, wenn es um komplex geformte 3D-Bauteile geht.



Mit dem Verfahren können wir geringste Verunreinigungen auf Oberflächen erkennen und die Qualität und damit die Sicherheit von Klebeverbindungen elektronischer Steuergeräte erhöhen.«

Dr. Heiko Elsinger, Automotive Electronics, Robert Bosch GmbH



Dr. Albrecht Brandenburg (2.v.l.) und Dr. Alexander Blättermann (2.v.r.) nahmen den Preis auf der Jahrestagung in Hamburg von Fraunhofer-Präsident Professor Neugebauer entgegen.

vollflächig auf Restverschmutzung oder kontrollieren deren Beschichtung. Ein einzelner Scanner misst bis zu 40 Millionen Punkte in der Sekunde und weist Restverschmutzungen ab zehn Milligramm quantitativ nach. Zahlreiche Industrieunternehmen weltweit nutzen die hochgenauen Inspektionssysteme bereits zur Reinheits- und Beschichtungskontrolle in der Produktion.



Video: Der F-Scanner im industriellen Einsatz

Projekt SensoRein

Faserbasierter Sensor für die bedarfsorientierte Reinigung von Produktionssystemen in der Lebensmittelindustrie

»Viel hilft viel« – das ist in der Regel die Devise, wenn es um die Reinigung geschlossener Behälter in der Lebensmittelproduktion geht. Reinigungsmittel, Wasser, Energie und auch die Reinigungszeit sind großzügig bemessen, um die hohen Hygienestandards einzuhalten. Der faserbasierte Fluoreszenz-Sensor F-Fiber sorgt dafür, dass solche Reinigungsprozesse nun an den tatsächlichen Grad der Verschmutzung angepasst werden können. Der Sensor wurde im Projekt SensoRein entwickelt.

Minimal-invasiv: Eine feine optische Sensorspitze detektiert organische Ablagerungen in geschlossenen Systemen für die Lebensmittelproduktion.

F-Fiber besteht aus einer feinen optischen Faser, eingebettet in eine Edelstahl-Hülse. Das Faserende wird in die Wand eines Lebensmittelbehälters integriert. Dort wird die Faserspitze vom Behälterinhalt umspült – mit der Zeit lagern sich Moleküle ab. Über die Sensorfaser werden diese unerwünschten organischen Ablagerungen auf der Sensorspitze mit UV-Licht angeregt. Die Fluoreszenzemission wird über dieselbe Faser zu einem Detektor rückgeführt und ausgewertet. Aus der Stärke des Fluoreszenzsignals lassen sich Rückschlüsse auf den Grad des sogenannten »Fouling« im Behälter ziehen, sodass ein Reinigungsprozess ausgelöst oder die laufende Reinigung angepasst werden kann.

Projekt SensoRein (Sensorbasierte Überwachung des Reinigungsbedarfs und des Reinigungsergebnisses in geschlossenen Systemen), gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Koordination Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA)



Projekt Q-LIB

Elektrodenfolie für Li-Ionen-Batterien: effizient produziert

Lithium-Ionen-Batterien stecken in unzähligen Produkten – vom Notebook bis zum E-Auto. Eigentlicher Energiespeicher solcher Batterien sind chemisch aktive Substanzen wie zum Beispiel Nickel-Mangan-Kobalt-Kügelchen plus Lithium. Diese Aktivmaterialien werden als Suspension auf eine Elektrodenfolie aufgebracht und zu einer etwa 100 µm dünnen Schicht eingetrocknet. Bei der Trocknung entmischen sich nicht selten die Bestandteile der Suspension, sodass der Binderanteil stellenweise zu gering ist. Die Folge: Die Beschichtung haftet nicht.

Ein optisches Messsystem, das Fraunhofer IPM im Projekt Q-LIB gemeinsam mit Fraunhofer ISIT und Industriepartnern entwickelt hat, bestimmt die elementspezifische Zusammensetzung der Folienbeschichtung mithilfe von laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIBS) im Produktionsprozess. Das System analysiert das korrekte Mischungsverhältnis ebenso wie die homogene Verteilung der Bestandteile tiefenaufgelöst innerhalb der gesamten Beschichtung bei Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/min. So lässt sich der Beschichtungsprozess kontrollieren und aktiv regeln.

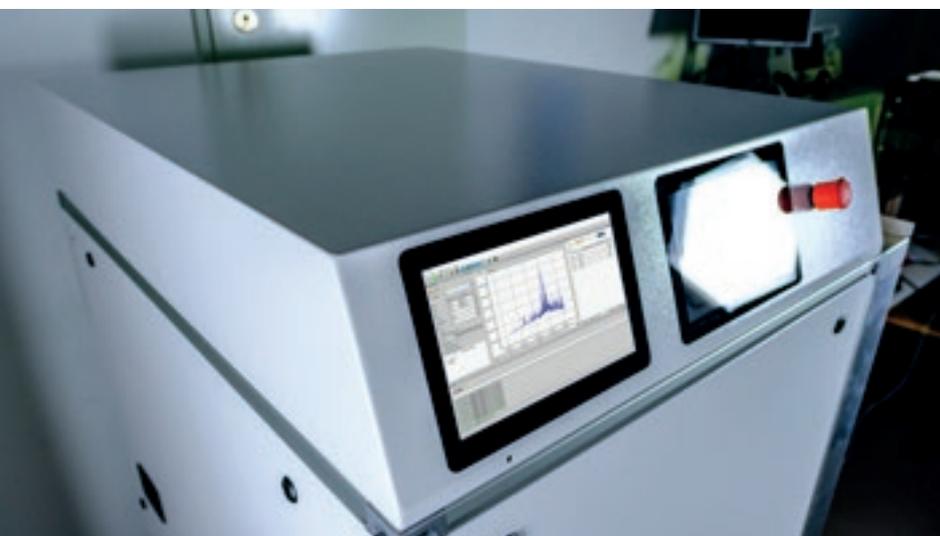
Projekt Q-LIB (Kostensenkung und Qualitätssteigerung bei der Lithium-Ionen-Batterie-Elektrodenfertigung durch quantitative, optische Inline-Messtechnik), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (Förderkennzeichen 03ETE013A)

Track & Trace Fingerprint

Rückverfolgung ohne Markierung: vom Präzisionsbauteil bis zum Baumstamm

Jederzeit zu wissen, wo ein einzelnes Bauteil produziert und verbaut wurde, ist für die Industrie enorm wichtig. Nur so lassen sich Produktionsprozesse kontinuierlich verbessern. Fraunhofer IPM bietet mit Track & Trace Fingerprint eine Technologie, die eine markierungsfreie Bauteil-Rückverfolgung ermöglicht. Statt einer Markierung wird die individuelle Oberflächen-Mikrostruktur von Objekten für die Wiedererkennung genutzt. Das Team hat das Verfahren auch 2022 in verschiedenen Anwendungen deutlich vorangebracht – und dabei sogar den Wald trotz lauter Bäumen gesehen.

Im Projekt ProIQ gelang es erstmals, auch rotationssymmetrische Bauteile sicher zu identifizieren. Die Schwierigkeit dabei: Der Fingerprint-Bereich muss zur Identifikation exakt positioniert sein, was bei unbekannter Rotationslage nicht gegeben ist. Die Forschenden haben den Track & Trace Fingerprint-Algorithmus daher so weiterentwickelt, dass die aus der Bildaufnahme abgeleitete Bauteil-ID, der Fingerprint, Informationen aus allen möglichen Rotationslagen beinhaltet. Dass dies auch bei Verwendung der Mantelfläche als Fingerprint-Bereich funktioniert, wurde am Beispiel einer nur wenige Millimeter großen Kopfswelle eines Dentalinstruments nachgewiesen. Eine weitere Herausforderung war, dass die Bauteile geschliffen und gehärtet



Das LIBS-Messsystem, hier in einer Laboranlage am Fraunhofer ISIT, gibt Aufschluss über die chemische Zusammensetzung von Elektrodenfolien.



Auch rotationssymmetrische Kleinbauteile ohne Stirnfläche wie diese Kopfwelle eines Dentalinstruments lassen sich mit dem Track & Trace Fingerprint-Verfahren anhand der Mantelfläche rückverfolgen.

werden, was die Mikrostruktur der Oberfläche verändert. Dennoch konnten die Bauteile sicher identifiziert werden. Aufbauend auf der Technologie werden in enger Zusammenarbeit mit DentsplySirona Ansätze zur langfristigen Prozessverbesserung erarbeitet.

Ähnlich beeindruckende Wiedererkennungsraten erzielte das Team in einer Pilot-Fertigungsanlage beim Industriepartner Bosch. Die Aufgabe: ein einzelnes Kleinbauteil eines Hochleistungsinjektors unter tausenden im Produktionsprozess sicher zu identifizieren. Den Forschenden gelang es, in über 30 000 Stichproben aus einer Menge von jeweils 100 000 Komponenten 99,95 Prozent der Bauteile sicher zu identifizieren. Auch dieses Teil war rotationssymmetrisch und stellte wegen der geschliffenen, spiegelnden Oberfläche besondere Herausforderungen an die Optik. Hinzu kamen der schnelle Produktionstakt, der eine ebenso schnelle Datenverarbeitung erfordert – und nicht zuletzt der begrenzte Bauraum und Arbeitsabstand in der Produktionsanlage.

Produktionstakt oder spiegelnde Oberflächen sind kein großes Problem bei einer ganz anderen Anwendung der Track & Trace Fingerprint-Technologie, der Identifizierung von Baumstämmen. Die Stämme sollen in Zukunft allein anhand ihrer individuell unterschiedlich strukturierten Schnittfläche erkannt werden.

Damit soll eine Rückverfolgung von der Ernte bis ins Sägewerk möglich werden, ohne dass die Hölzer mit den typischen Nummerierplättchen markiert werden müssen. Anders als industriell gefertigte Bauteile haben Baumstämme unterschiedliche Formen und Durchmesser, sodass es keinen standardisierten Referenzrahmen für den Fingerprint-Bereich gibt. Für eine eindeutige Positionierung wird daher ein deutlich größeres Bildfenster – mit dem Zentrum der Jahresringe als Orientierung – gewählt. Neben dieser Umstellung von Mikro- auf Makrostrukturen muss das System mit widrigen Umgebungsbedingungen fertig werden: Sägespäne auf der Schnittfläche, Pilz- oder Algenbewuchs beispielsweise dürfen die Wiedererkennung nicht beeinträchtigen. Das Team setzt daher u. a. bei der Bilderkennung auf die unveränderbare, ringförmige Jahresring-Maserung und Astansätze als Wiedererkennungsmerkmale. Diese Merkmale werden auch nach Alterung des Holzes, Transport oder mechanischer Beanspruchung noch erkannt.

Projekt ProIQ (Adaptive, prozessübergreifende Qualitätsregelkreise mittels photonischer Sensoren zur Identifikation und Qualitätsmessung von Hochpräzisionsbauteilen), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Projektkoordination VDI Technologiezentrum

Projekt DiGeBaST (Digitalisierung Gefällter Baumstämme), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Programm Digital GreenTech)

Optische Qualitätskontrolle

Tunnelblick: typunabhängiges Prüfen von Maßhaltigkeit und Oberfläche großer Bauteile in Bewegung

Wie sich hochauflösende Kameras, diffuse Blitzbeleuchtung und Echtzeit-Bildverarbeitung nutzen lassen, um Bauteile vollständig ohne zusätzliches Handling zu prüfen, hat Fraunhofer IPM mit dem Prüfsystem Inspect 360° eindrucksvoll gezeigt. Inspect 360° inspiziert Geometrie und Oberfläche von Bauteilen mit bis zu 20 cm Durchmesser im freien Fall durch eine Hohlkugel. Aufbauend auf dieser Technologie hat das Team im Auftrag eines Industrieunternehmens einen Inspektionstunnel entwickelt, in dem nun auch größere Bauteile mit einem Durchmesser von bis zu 100 cm in Bewegung auf Defekte geprüft werden können. Das System ist in der Lage, nahezu beliebige Typen zu prüfen, da jede Kamera individuell fokussiert werden kann. Dadurch können Oberflächen nahezu beliebig geformter Bauteile in beliebiger Orientierung scharf abgebildet werden.

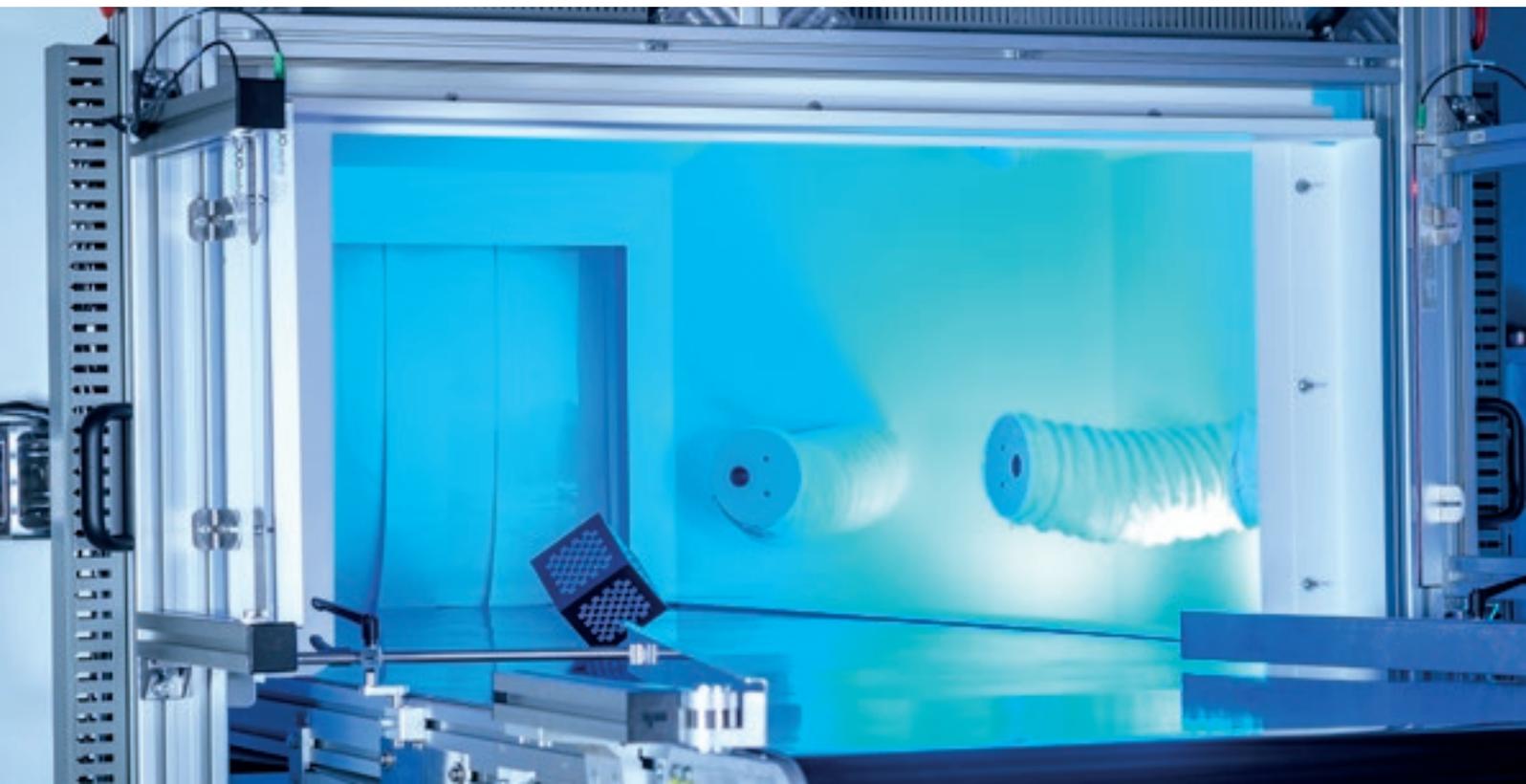
Die Bauteile durchlaufen den Inspektionstunnel für die optische Prüfung einfach auf einem Förderband.

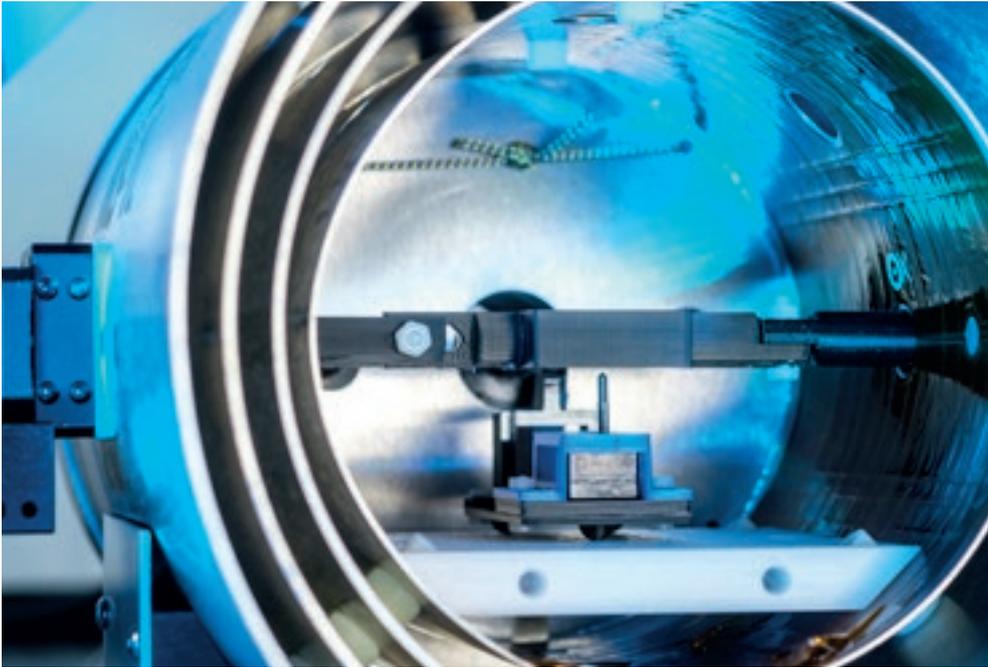
Für die Qualitätskontrolle werden die Bauteile auf einem Förderband durch den 50 cm hohen, einen Meter breiten und fünf Meter langen Inspektionstunnel geführt, homogen beleuchtet und mithilfe von 13 Kameras während des Durchfahrens mehrfach und aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Die Beleuchtungstechnik sorgt für eine schlagschatten- und reflexfreie Ausleuchtung der Bauteile. Die hochauflösten Bilder werden in Echtzeit verarbeitet und von einem auf Bildverarbeitung spezialisierten Dienstleister ausgewertet. KI-Algorithmen werden eingesetzt, um Defekte wie Risse, Löcher, Riefen oder Konturfehler auf Edelstahlteilen für die Automobilindustrie mit einer Genauigkeit im Bereich einiger Zehntel-Millimeter zu erkennen und zu klassifizieren.



Wir haben unsere Freifall-Kugel zu einem Inspektionstunnel umfunktioniert. So können wir auch auf dem Förderband typunabhängig prüfen.«

*Dr. Tobias Schmid-Schirling,
Gruppenleiter*





Ein Flussleiter, der auf ein optisch gepumptes Magnetometer (OPM) aufgesetzt wird, ermöglicht hochauflösende Messungen der lokalen Magnetisierung von Werkstoffen im Bereich weniger $\mu\text{T/mm}^2$.

Projekt QMAG

Quantenmagnetometer für die Materialprüfung

Quantensensoren wie zum Beispiel optisch gepumpte Magnetometer (OPM) eröffnen der Messtechnik neue Möglichkeiten. Ähnlich wie Atomuhren nutzen sie atomare Konstanten, sodass man sie nicht kalibrieren muss. Zudem verringern quantenmechanische Prinzipien wie das der Verschränkung die statistische Messunsicherheit gegenüber klassischen Ansätzen. Dies führt zu robusten und hochempfindlichen Sensoren mit außerordentlichem Dynamikbereich.

In miniaturisierten optisch gepumpten Magnetometern (OPM) misst ein Laser anhand der Larmor-Frequenz das Magnetfeld in 1 mm^3 Rubidium-Gas. Die Empfindlichkeit reicht aus, um in einem Probenvolumen von nur $0,1 \text{ mm}^3$ Schädigungen durch Materialermüdung anhand der Magnetisierung zu erkennen.

Fraunhofer IPM und Fraunhofer IWM arbeiten zusammen mit weiteren Partnern an der Entwicklung neuartiger magnetischer

Messsysteme für die Materialprüfung. Die extrem hohe Empfindlichkeit der OPM von nur einem Millionstel des Erdmagnetfeldes ermöglicht eine hochauflösende magnetische Prüfung von Schädigungen in ferromagnetischen Werkstoffen – etwa von Spannungskonzentrationen an nicht perfekten Schweißnähten in Stahl.

Um diese Empfindlichkeit in industriellen Anwendungen nutzbar zu machen, arbeitet unser Team an neuen Komponenten wie Flussleitern als »magnetischen Prismen« zur Steuerung von Empfindlichkeit und Ortsauflösung, geeigneter Aktorik und speziellen Schirmungen gegen störende Magnetfelder der Umgebung. So können kritische Komponenten mit höchsten Anforderungen an die funktionale Sicherheit frühzeitig in der Produktion geprüft werden, obwohl die Umgebungsbedingungen hier alles andere als optimal für OPM sind.

Projekt QMAG (Quantenmagnetometrie), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt) und dem Land Baden-Württemberg

Mit optisch gepumpten Magnetometern lassen sich Schäden in Werkstoffen hochempfindlich erkennen.



In der Farbe schnell, flexibel und präzise einstellbares Laserlicht sorgt für einen Paradigmenwechsel in der Messtechnik, der 3D-Sensorik und in der Analytik.«

*Prof. Dr. Karsten Buse,
Institutsleiter*

Kooperation mit der Universität Freiburg

Neueste Messtechnik braucht innovative Lichtquellen – und eine leistungsfähige Zusammenarbeit

Vollflächige 3D-Messungen mit Mikrometer-Präzision – und das in rauen Produktionsumgebungen oder gleich direkt in der Fertigungsmaschine: Die Digitale Holographie hat in den letzten Jahren gezeigt, welch enormes Anwendungspotenzial in ihr schlummert. Messsysteme von Fraunhofer IPM auf Basis dieser Technologie finden einen zunehmend breiten Absatz in der Industrie. Wellenlängenagile und gleichzeitig langzeitstabile Lichtquellen sind entscheidend, um diese Messtechnik weiterzuentwickeln und zu vermarkten. Kommerzielle Lasersystemlösungen, die die Anforderungen der Digitalen Holographie erfüllen, sind allerdings teuer.

Unsere Forschungsgruppen »Geometrische Inline-Messsysteme« und »Nichtlineare Optik und Quantensensorik« arbeiten eng mit der Professur für Optische Systeme der Universität Freiburg zusammen, um hier Abhilfe zu schaffen: Gemeinsam entwickeln die Forschenden speziell auf die Belange der Digitalen Holographie abgestimmte Laserquellen und verfolgen dabei unterschiedliche Konzepte. So wird etwa im Rahmen des Projekts MIAME (Mikrometer-auf-Meter) eine durchstimmbare

Lichtquelle entwickelt, die das nanosekunden-schnelle Verstimmen von Licht mithilfe eines elektro-optischen Flüstergalerie-Resonators erlaubt – ganz ähnlich wie der sich ändernde Ton einer schwingenden Gitarrensaite, wenn diese während der Schwingung verkürzt wird. Die Kompetenzen der Gruppen ergänzen sich dabei perfekt – von den physikalischen Grundlagen bis zum Wissen um die erfolgreiche Kommerzialisierung der Lichtquelle und deren Einsatz in der Messtechnik.

3D-Bildaufnahme und -verarbeitung

82. Heidelberger Bildverarbeitungsforum

Erstmalig war Fraunhofer IPM Gastgeber des Forums. Zwei der insgesamt sieben Fachvorträge zum Thema »3D-Bildaufnahme und -verarbeitung« hielten Mitarbeiter aus der Produktionskontrolle: Dr. Alexander Bertz berichtete zum Thema »Digitale Holographie – bildgebende Koordinatenmesstechnik der Zukunft«, Dr. Tobias Schmid-Schirling erläuterte die »Oberflächen- und Geometrieprüfung von Bauteilen im freien Fall«. Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter Objekt- und Formerfassung, berichtete über »Mobile Datenerfassung inkl. KI-basierter Auswertung für das Monitoring großflächiger Infrastruktur« (s. S. 43).



*Prof. Dr. Karsten Buse
begrüßte die Gäste
des Heidelberger
Bildverarbeitungsforums.*

Produktionskontrolle | Messen & Veranstaltungen

Control

Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung
03.–06.05.2022
Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft,
Geschäftsbereich Vision

Wir waren mit folgenden Themen vertreten: Oberflächeninspektion, mobile und markerfreie Rückverfolgung von Bauteilen, Inline-Prüfung von Oberflächenreinheit und Beschichtungen sowie Fluoreszenz-Laserscanner zur Kontrolle von Oberflächen in der Produktion

drinktec

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

Das Team Optische Oberflächenanalytik präsentierte den faser-optischen Sensor F-Fiber zur Qualifizierung von Cleaning-in-Place (CIP)-Prozessen: F-Fiber misst die Verschmutzung durch organisches Material in lebensmittel-führenden Behältern und schafft damit die Möglichkeit, CIP-Prozesse bedarfsgerecht zu steuern.

parts2clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und
Oberflächenreinigung
11.–13.10.2022
Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft,
Geschäftsbereich Reinigung

Vorgestellt wurden der F-Scanner 1Dmini und der F-Scanner 2D zur Reinheitskontrolle in der Linie: Die Systeme nutzen bildgebende Fluoreszenzanalyse, um partikuläre oder filmische Verunreinigungen auf Bauteiloberflächen quantitativ nachzuweisen.

EuroBLECH

Fachmesse für die Blechbearbeitung
25.–28.10.2022
Fraunhofer-Stand

Auf der Messe war Fraunhofer IPM mit dem F-Scanner 1D vertreten: Das scannende Fluoreszenz-Messsystem ermöglicht eine 100-Prozent-Prüfung von Oberflächenreinheit und Beschichtungen auf dreidimensional geformten Bauteilen.

Geplant für 2023

BAU
17.–22.04.2023

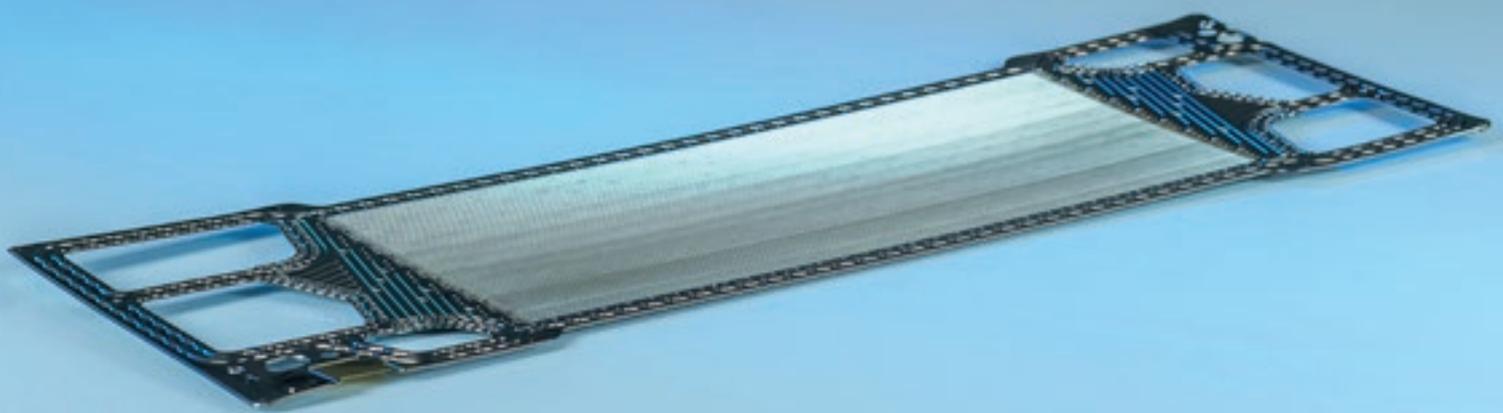
Control
09.–12.05.2023

parts2clean
26.–28.09.2023

Blechexpo
07.–10.11.2023

Fokus Moderne Qualitätssicherung

Hightech-Produktion: Neue Ansätze für eine zuverlässige Serienfertigung von Brennstoffzellen



In modernen Brennstoffzellen-Stacks werden – je nach Typ und Größe – rund 300 bis 600 solcher Bipolar-Platten im Wechsel mit Membran-Elektroden-Einheiten übereinandergestapelt. Standardmäßig sind die dünnen Platten etwa 400 mal 200 Millimeter groß. Typisch für Bipolar-Platten sind die per Kaltumformung hergestellten Rohrstrukturen.

Zur Energieversorgung elektrischer Serienfahrzeuge setzt die Automobilindustrie fast ausschließlich auf die Batterietechnologie. Dennoch sehen viele Fachleute in der Brennstoffzellentechnologie eine vielversprechende Alternative. Brennstoffzellen wandeln die in Wasserstoff gespeicherte chemische Energie in elektrischen Strom um. Der Vorteil: Der Energieträger Wasserstoff lässt sich ebenso schnell tanken wie Benzin. Zudem hat Wasserstoff eine hohe Energiedichte und erlaubt dadurch pro Tankfüllung eine Reichweite, wie man es vom Benzin- oder Dieselmotor gewohnt ist. Warum also sieht man bislang kaum E-Fahrzeuge, die zur Energieversorgung mit Brennstoffzellen ausgestattet sind?

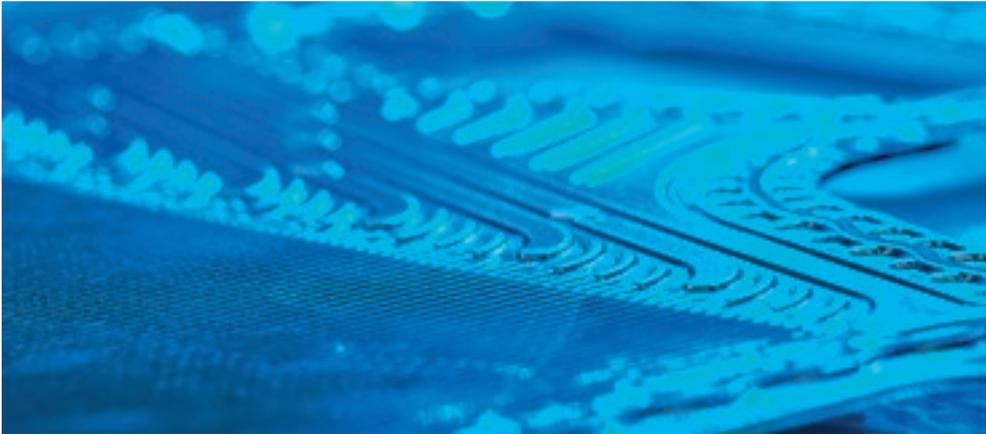
Spontan denkt man zunächst vielleicht eher an Technologiehürden wie ungelöste Sicherheitsfragen oder eine fehlende Tankstelleninfrastruktur. Eine viel größere Hürde ist allerdings die industrielle Fertigung von Brennstoffzellen, die heute vor allem vor drei Problemen steht: große verfahrenstechnische

Herausforderungen, viel Ausschuss, wenig Automatisierung. Das macht Brennstoffzellen teuer und verhindert den breiten Einsatz im Massenmarkt.

Warum ist die Fertigung von Brennstoffzellen so wenig automatisiert?

Jede einzelne Brennstoffzelle ist ein Hightech-Produkt, bei dem es auf viele Details ankommt, die in der Fertigung zu 100 Prozent geprüft werden müssen. Wegen fehlender Inline-Qualitätsprüfungsverfahren sind die Taktzeiten in der Fertigung aktuell so gering, dass nur wenige Brennstoffzellen pro Tag produziert werden können.

Wenn von Brennstoffzelle die Rede ist, sind meist ganze Brennstoffzellen-Stacks gemeint. Das sind komplizierte Sandwich-Systeme, die aus vielen übereinandergestapelten Membran-Elektroden-Einheiten bestehen, in denen die Umwandlung von chemischer zu elektrischer



Metallische Bipolar-Platten werden aus Feinstblechen bzw. Metallfolien mit Dicken unter 0,1 mm gefertigt. Bei der Umformung kommt es häufig zu Oberflächendefekten oder Maßabweichungen. Bisher erfolgte die Qualitätsprüfung meist nachgelagert in kosten- und zeitintensiven Stichprobentests.

Energie stattfindet. Zwischen diesen Einheiten wiederum liegen Bipolar-Platten, die die Reaktionsgase zu- und das entstehende Wasser ableiten können.

Je nach Typ sind in modernen Brennstoffzellen-Stacks rund 300 bis 600 Bipolar-Platten mit einer Größe von etwa 200 mal 400 Millimeter verbaut. Auf diesen Bipolar-Platten befinden sich feinste Rohrstrukturen, die per Kaltumformung hergestellt werden. Pro Stack kommt so eine Gesamtlänge an Dichtflächen von rund einem Kilometer zusammen, die so dicht sein müssen, dass Wasserstoff trotz seiner kleinen Molekülgröße und niedrigen Viskosität nicht entweicht. Darüber hinaus müssen Bipolar-Platten sehr gut elektrisch leiten und sowohl chemisch, thermisch als auch mechanisch äußerst stabil sein. Das alles macht das System Brennstoffzelle in der Produktion extrem komplex und fehleranfällig.

Qualitätssicherung für morgen – exakt, zuverlässig, inline

Mikrodefekte, die beim Umformen von Feinstblechen entstehen können, frühzeitig in der Fertigung zu erkennen, ist eine der schwierigsten Qualitätssicherungsaufgaben bei der Serienfertigung von Brennstoffzellen. Ein Team von Fraunhofer IPM geht diese Aufgabe derzeit mithilfe extrem schneller digital-holographischer 3D-Sensoren an. Diese können nicht nur die gesamte Oberfläche eines umgeformten Produkts prüfen; durch den Einsatz weiterer Sensoren kann man zusätzlich die Werkzeugabnutzung und eventuelle Späne im Werkzeug erkennen. Für die Detektion tieferliegender

Risse im Material experimentiert das Team mit hochempfindlichen Quantenmagnetometern (OPM). Mit diesen Magnetfeldsensoren lassen sich feinste Veränderung des Magnetfelds messen. Gelänge es, daraus exakte Aussagen über Risse abzuleiten, würde damit eine sehr exakte, inlinefähige Methode zur Dichtigkeitsprüfung von Schweißnähten zur Verfügung stehen. Erste Zwischenergebnisse sind sehr vielversprechend.

Neuartige Qualitätssicherungsaufgaben gibt es aber auch beim High-Speed-Stacking von Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolar-Platten; hier es geht um die exakte Kontrolle der Platten- bzw. Membran-Ausrichtung sowie um partikuläre Verunreinigungen, die es zu vermeiden gilt. Beide Aufgaben versuchen Forschende von Fraunhofer IPM mithilfe sehr schneller, hochspezialisierter Bildverarbeitungssysteme in den Griff zu bekommen.

Rückverfolgung im Detail – sicher und markierungsfrei

Ohne Rückverfolgung ist selbst die beste Qualitätssicherung nur die Hälfte wert. Man möchte Produktionsqualität zu Produktqualität langfristig eindeutig zuordnen können. Dies ist bei Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolar-Platten alles andere als trivial: Auf beiden lassen sich keine Markierungen anbringen. Die Lösung ist Track & Trace Fingerprint – ein von Fraunhofer IPM entwickeltes markierungsfreies Verfahren, das die einzelnen Teile eines Stacks anhand von Oberflächen-Mikrostrukturen eindeutig identifizieren kann – und das auch noch nach Jahren.



Wir entwickeln einen digital-holographischen 3D-Sensor für die Inline-Qualitätskontrolle metallischer Bipolar-Platten.«

*Dr. Daniel Carl,
Abteilungsleiter*

Überblick Objekt- und Formerfassung

Die Automatisierung der 3D-Datenerfassung und -prozessierung: Das 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



**Mit unserem Know-how machen wir
die Planung, den Bau und auch den
Betrieb von Bauwerken effizienter.«**

Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter

Highlights Objekt- und Formerfassung

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen



Digitalisierung
made in
Germany geht
ja doch!«

*Tim Höttges,
CEO Deutsche Telekom*

Viertes »T-Car« für die Deutsche Telekom

Die Deutsche Telekom arbeitet mit Hochdruck am Glasfaserausbau. Für die Vermessung der Ausbaubereiche und die Planung des Netzausbaus setzt das Unternehmen weiter auf High-End-Messtechnik von Fraunhofer IPM. Im Frühjahr 2022 ging das dritte und im Herbst dann das vierte von uns ausgestattete T-Car auf die Piste: Die magentafarbenen Fahrzeuge sind mit Laserscannern, Kamerasystemen, GNSS-Antennen und sehr leistungsfähigen Computern für die Datenverarbeitung ausgestattet und liefern 2D- und 3D-Messdaten ganzer Straßenzüge.

Insgesamt legten die vier T-Cars 2022 mehr als 60 000 Kilometer zurück. Ein paar davon gehen aufs Konto von Telekom-Chef Tim Höttges, der das T-Car persönlich getestet

hat. »Spannend ist es immer dann, wenn aus Daten Informationen werden. Dafür brauchen wir künstliche Intelligenz«, sagt Höttges im Testfahrt-Video. Die Daten werden mithilfe KI-basierter Algorithmen semantisch angereichert und in digitale Planungskarten überführt. Die Karten enthalten neben geometrischen Maßen auch Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit des Ausbaubereichs und zu typischen Objekten wie Bäumen oder Straßenlaternen. Anhand der Karten lässt sich automatisch der optimale Trassenverlauf ermitteln – ohne, dass die Planungsteams vor Ort sind.



Video:
Tim testet das T-Car

Vier T-Cars liefern der Deutschen Telekom inzwischen semantisch angereicherte Messdaten als digitale Planungskarten für den schnellen Glasfaserausbau.





Daten sammeln im Vorbeifahren: Müll- oder Lieferwagen, ausgerüstet mit Messtechnik, sollen zukünftig 3D-Daten städtischer Umgebungen liefern – als hochwertige Datengrundlage für effizientes Management und die Entwicklung von Städten.

Projekt MuSiS

Die Stadt als digitaler Zwilling

Müllfahrzeuge, Busse oder Lieferwagen, ausgerüstet mit kostengünstiger, hocheffizienter Messtechnik, generieren im rollenden Verkehr ganz nebenbei Planungsdaten für den städtischen Raum. Das ist die Vision im Forschungsprojekt MuSiS. Um diese zu verwirklichen, entwickeln wir gemeinsam mit der incontext technology GmbH einen Prozess, mit dem ein digitaler Zwilling urbaner Umgebungen in Zukunft schnell und engmaschig erstellt werden kann. Eine kompakte, universell einsetzbare Messbox soll die Umgebung mithilfe von Laserscannern, Kameras und Schallpegelmessern erfassen. Das robuste Multisensor-System, das ein Team am Fraunhofer IPM entwickelt, verfügt über eine Positionierungseinheit, sodass die Messdaten mit Standortinformationen verknüpft sind. Die Daten werden bereits bei der Erfassung anonymisiert und noch auf dem Fahrzeug vorverarbeitet, reduziert und von einem künstlichen neuronalen Netz prozessiert. So können sie in Echtzeit für unterschiedliche Anwendungen bereitgestellt werden. Projektpartner incontext.technology entwickelt KI-basierte Algorithmen für die automatisierte Nutzung und eine semantische Anreicherung der Datenströme und erstellt Datenmodelle für den digitalen Zwilling.

Projekt MuSiS (Multimodaler digitaler Zwilling für eine sichere und nachhaltige Stadt), gefördert vom Land Baden-Württemberg (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus) im Rahmen des Förderprogramms Invest BW

Projekt 3D-Path

Automatische 3D-Routenplanung für XXL-Transporte

Schafft es der Langtransport durch die enge Kurve? Kann der Schwerlast mit Überbreite die Brücke passieren? Solche Fragen müssen Logistikunternehmen bei der Routenplanung von Großraum- und Schwerguttransporten berücksichtigen. Basis für die Planung sind in der Regel herkömmliche Navigationskarten, in die fallspezifische Informationen zu kritischen Stellen manuell übertragen werden. Ein automatisierter Prozess, den Fraunhofer IPM gemeinsam mit Industriepartnern im Projekt 3D-Path entwickelt, soll die Routenplanung für XXL-Transporte in Zukunft deutlich vereinfachen.

Ein optisches Messsystem liefert 3D-Daten zur Infrastruktur, die automatisiert mit den Basiskarten verknüpft werden. Die auf diese Weise angereicherten Karten enthalten alle nötigen Informationen für eine virtuelle 3D-Trassenplanung von Groß- und Schwerguttransporten. Das Team von Fraunhofer IPM entwickelt im Rahmen von 3D-Path eine auf Deep-Learning-Algorithmen basierte semantische Objekterkennung, die typische Hindernisse wie z. B. Bäume, Masten oder Bordsteine in den Messdaten identifiziert. Für die Übertragung der Daten in ein CAD- bzw. BIM-fähiges Format wird ein Vektorisierungsmodul entwickelt, das die heute noch manuelle Vektorisierung von 3D-Punktwolken automatisieren soll.

Projekt 3D-Path (Automated 3D Route Planning for Overweight and Oversized Transportation), gefördert von der EU im Rahmen des Eurostars Programms

Eine KI reichert Messbilder von Straßenzügen mit semantischen Informationen an. Integriert in Navigationskarten helfen diese Daten bei der Routenplanung für Groß- und Schwertransporte.



Projekt DoTIS

Fliegender Tunnelscanner: noch leichter und schneller als geplant

Es ist dunkel, der Platz begrenzt, Satellitenempfang Fehlanzeige – wer den Zustand von Tunnelbauwerken inspizieren will, steht vor einer Reihe von Herausforderungen. Dass selbst unter diesen Bedingungen präzise Messungen möglich sind, hat unser Team im Projekt DoTIS gezeigt. Im Rahmen von DoTIS entstand ein Laserscanner für den Einsatz auf Drohnen, der Tunnelgeometrien im Flug erfasst – basierend auf gepulster Time-of-Flight (TOF) Abstandsmessung. Der nicht einmal schuhkartongroße Lightweight Tunnel Profiler (LTP) wurde am Ende mit 2,1 Kilogramm deutlich leichter als ursprünglich geplant. Übertroffen wurde auch die anvisierte Messgeschwindigkeit: Mit einer Scanrate von 120 Hz und einer Messrate von einer Million Messungen pro Sekunde erreicht der Scanner Auflösungen im unteren Millimeterbereich.

Für die Strahlableitung hat das Team sowohl die Optik als auch die Motor-Spiegeleinheit komplett neu entwickelt. Jetzt sind abschattungsfreie 360-Grad-Messungen möglich. Die Trajektorie, also die Flugbahn der Drohne und damit die Position des Laserscanners, wird mithilfe eines laserbasierten Sensors ermittelt – und somit ohne die sonst üblichen Satellitennavigationsdaten (GNSS). Aus den zeitlich synchronisierten Abstands- und Trajektorien Daten wird dann die 3D-Punktwolke der Tunnelgeometrie berechnet.

Projekt DoTIS (Drone-based Tunnel Inspection System), gefördert von der EU im Rahmen des Eurostars-2-Programms und mit Mitteln aus dem EU-Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020



Auf leicht getrimmt und abgehoben: Das Gehäuse des kaum mehr als zwei Kilogramm schweren Laserscanners für die Tunnelinspektion besteht aus Carbonfasern.



Die hochaufgelösten Aufnahmen werden mithilfe eines Voxel-Grids reduziert. Dennoch liegt die Auflösung im Millimeterbereich.

BIM – Building Information Modelling

Gebäude als digitaler Zwilling

KI-basierte Tools sollen Bestandsaufnahmen bestehender Gebäude in Zukunft effizienter machen und Planungsprozesse erleichtern. Wie sind die Raummaße? Wie viele Fenster, Türen, Treppen, Heizungen oder Lampen sind im Gebäude? Antworten auf solche Fragen sollen digitale Gebäudemodelle liefern – der Besuch vor Ort wird damit unnötig. Ein solcher digitaler Zwilling entsteht mithilfe eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN), das gelernt hat, gebäudetypische Objekte in Messdaten zu erkennen und zu klassifizieren.

Ein solches KNN baut unser Team im Rahmen einer Machbarkeitsstudie anhand umfangreicher Trainingsdaten in drei Schritten auf. Und das ist Fleißarbeit: Im ersten Schritt wurde ein 3D-Laserscanner 1600 Mal an verschiedenen Stellen in unserem Institutsgebäude platziert, um alle Räume, Flure und Treppen zu erfassen. Hinzu kommen Aufnahmen eines Rohbaus, einer Schule sowie einer Wohnung. Das ergibt deutlich umfangreichere Trainingsdaten für das KNN, als bisher am Markt verfügbare Gebäude-Datensätze liefern können. In einem zweiten Schritt werden sämtliche Messdaten annotiert, indem einzelne Objekte einer von 26 Objektklassen zugeordnet werden. Mithilfe dieser semantisch angereicherten Daten trainiert das Team dann im dritten, entscheidenden Schritt das KNN für die automatisierte Interpretation unbekannter Gebäudedaten.

Die Aufnahmen unseres Institutsgebäudes enthalten mehr als 23 Milliarden 3D-Messpunkte.

Ken Brodliè Prize für Veröffentlichung

Punktwolken in Echtzeit indizieren

LiDAR-Sensoren liefern immer detailliertere Daten. Schon bei der Erfassung eines kurzen Straßenabschnitts geht die Zahl der erfassten 3D-Punkte mitunter in die Milliarden. Diese riesige Datenmenge liegt zunächst völlig unstrukturiert als Punktwolke vor. Zur Auswertung oder Visualisierung müssen diese Punktwolken-Daten vorverarbeitet und indiziert werden. Dass dies in Echtzeit bereits während der Datenaufnahme möglich ist, haben unser Kollege Bastian Stahl und drei weitere Autoren in ihrem Paper »Real-time Indexing of Point Cloud Data During LiDAR Capture« gezeigt.

Eine von den Wissenschaftlern entwickelte Software speist die vom LiDAR-System generierten 3D-Daten direkt in eine hierarchische Datenstruktur ein, einen sogenannten »Octree«. An einem synthetischen Datensatz gelang dies mit einem Durchsatz von bis zu 1,8 Millionen Datenpunkten pro Sekunde. Und auch im Live-Test mit einem High-End-Laserscanner funktionierte die Echtzeit-Indexierung reibungslos. Für ihre Arbeiten wurde das Team vom Journal »Computer Graphics & Visual Computing« mit dem Ken Brodliè Prize ausgezeichnet.



Zeitschriftenartikel: »Real-time Indexing of Point Cloud Data During LiDAR Capture«

Projekt ACQUA-3D

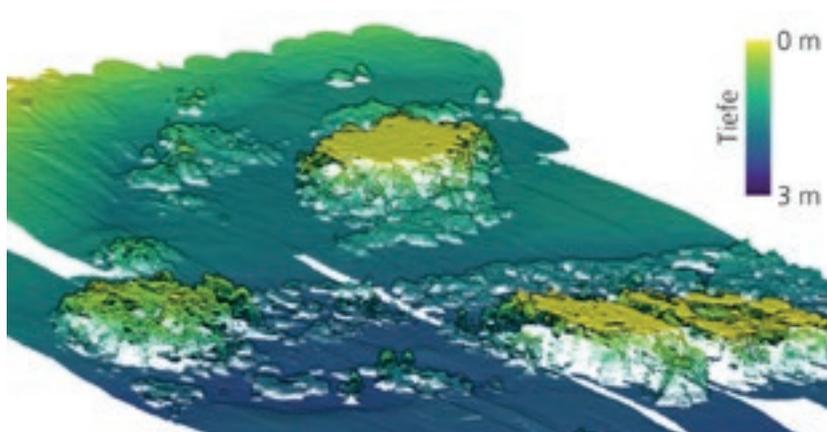
Kompaktes System zur topographischen Vermessung flacher Gewässer

Die Beschaffenheit des Gewässergrunds in Küsten- und Ufergebieten gibt Hinweise auf Hochwasserrisiken und kann ein Frühindikator für Veränderungen in der Umwelt sein. Laserbasierte Bathymetrie-Systeme vermessen die Unterwassertopographie flacher Gewässer aus der Luft basierend auf der Laufzeitmessung gepulster Laser. Im Projekt ACQUA-3D entwickeln wir seit November 2022 gemeinsam mit der Universität Stuttgart und den Anwendungspartnern EOMAP GmbH und Geo Group GmbH ein besonders kleines und leichtes bathymetrisches Messsystem für den Einsatz auf UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Es soll speziell bei der Vermessung flacher Gewässer zum Einsatz kommen.

Das gesamte System soll weniger als drei Kilogramm wiegen. Es besteht aus einem LiDAR-Modul und einer multispektralen Kamera. Die Lichtwellenlängen der beiden Laser sind so gewählt, dass sowohl die Wasseroberfläche als auch der Gewässergrund identifiziert werden können. Mit fünfzig Scans pro Sekunde sollen 100 000 Messpunkte generiert werden, sodass ein detailliertes Bild des Gewässergrunds entsteht. Mithilfe speziell entwickelter Auswertelgorithmen kann aus den Messdaten ein Geländemodell automatisiert erstellt werden – inklusive semantischer Klassifizierung von Gelände und Vegetation (mehr zum Thema Bathymetrie ab S. 44).

Projekt ACQUA-3D, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft (Trilaterales Transferprojekt)

Geländemodell mit semantischer Klassifizierung von Gelände und Vegetation



Probemessung an einem Baggersee: Das laserbathymetrische System liefert eine Punktwolke mit hoher Auflösung, in der Details wie beispielsweise Vegetation selbst in bis zu drei Metern Tiefe sehr gut erkennbar sind.

DFG-Sonderforschungsbereich ECOSENSE

LiDAR-System für das Monitoring des Ökosystems Wald

Wie verändert sich das Ökosystem Wald angesichts des Klimawandels? Dieser Frage gehen die Universität Freiburg und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im DFG-Sonderforschungsbereich (SFB) ECOSENSE nach. Ziel der Forschungsinitiative, die im Mai 2022 startete, ist ein autonomes, intelligentes Sensornetzwerk, mit dem sich Veränderungsprozesse im Ökosystem Wald besser modellieren lassen. Fraunhofer IPM ist gleich mit zwei Professuren am SFB beteiligt: einer am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) und einer am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK).

Im Rahmen des SFB entwickelt unser Team in enger Kooperation mit dem INATECH ein drohnengetragenes LiDAR-System zur Messung von Chlorophyllfluoreszenz (ChlF). Die ChlF gibt Aufschluss über die photosynthetische Aktivität von Pflanzen und damit über die Auswirkungen von Umweltveränderungen auf die Vegetation. Für das LiDAR-System wird eine neuartige Auswertekette und eine spezielle Laser-Ablenkvorrichtung entwickelt. Damit soll die Chlorophyllfluoreszenz flächenhaft bestimmt werden. Die Messdaten werden die Grundlage für detaillierte räumlich-zeitliche 4D-Fluoreszenzkarten des Waldbestands bilden – mit Auflösungen bis in den Bereich einzelner Blätter. Im Geschäftsfeld Gas- und Prozesstechnologie arbeiten wir im Rahmen des SFB an Sensorik zur Messung von Gasflüssen am Boden (mehr dazu ab S. 56).

Der Sonderforschungsbereich ECOSENSE (SFB 1537) wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Nach vier Jahren Pause endlich wieder live diskutieren: Beim MoLaS-Workshop stellte Valentin Vierhub-Lorenz seine Forschungsergebnisse zum multispektralen Laserscanning vor.

4. MoLaS Technology Workshop

Großes Interesse auch nach zwei Jahren Coronapause

Zwei Jahre in Folge mussten wir unseren Mobile Laser Scanning Technology Workshop aufgrund der Pandemie verschieben. Im Dezember 2022 war es dann aber wieder so weit: Wir durften mehr als 90 Teilnehmende beim Workshop begrüßen, erstmalig an unserem neuen Standort. Die Zwangspause hat der Veranstaltung offenkundig nicht geschadet – der MoLaS Technology Workshop hat sich seit 2014 zu einer festen Größe in der 3D-Mapping-Community entwickelt.

Die Vorträge deckten ein breites Themenspektrum ab, von multispektralem Laserscanning für die Feuchtedetektion über Indoor-Scanning basierend auf SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) bis zu neuen Strategien für die Interpretation von 3D-Punktwolken. In ihren Keynote-Vorträgen gaben Terje Noevig von der Blickfeld GmbH und Prof. Dr. Alexander Braun von der Hochschule Düsseldorf Einblicke in Strategien für die Massenproduktion kostengünstiger LiDAR-Systeme, zum Beispiel für das autonome Fahren.

Der internationale MoLaS Mobile Laser Scanning Technology Workshop findet alle zwei Jahre statt. Der nächste Workshop ist für den 27.–28. November 2024 geplant.



www.molas.fraunhofer.de



Objekt- und Formerfassung | Messen & Veranstaltungen

82. Heidelberger Bildverarbeitungsforum

08.11.2022

Erstmals war Fraunhofer IPM Gastgeber des Forums zum Thema »3D-Bildaufnahme und -verarbeitung«. Prof. Dr. Alexander Reiterer, Abteilungsleiter Objekt- und Formerfassung, berichtete zum Thema »Mobile Datenerfassung inkl. KI-basierter Auswertung für das Monitoring großflächiger Infrastruktur«. Weitere Vorträge hielten Mitarbeiter aus der Abteilung Produktionskontrolle (s. S. 32)

Oceanology International

12.–17.03.2022

Thema auf der Messe war die laserbasierte Vermessung großer Strukturen unter Wasser sowie die topographische Vermessung küstennaher Gewässer. Dazu präsentierten wir das »Underwater LiDAR System Uli und den »Airborne Bathymetric Laser Scanner ABS«.

SMM

Internationale Fachmesse der maritimen Wirtschaft
06.–09.09.2022

Auch auf dieser Messe stellten wir unsere Unterwasser-Messsysteme Uli und ABS vor.

InnoTrans

Internationale Leitmesse für Verkehrstechnik
20.–23.09.2022

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft, Geschäftsbereich Verkehr

Im Fokus standen die Themen Tunnelinspektion und Vegetationskontrolle. Wir präsentierten das Tunnel Inspection System TIS und das Weed Detection System WDS als Live-Demonstratoren.

INTERGEO

18.–22.10.2022

Wie man Mobile-Mapping-Daten möglichst effizient ausgewertet, zeigten wir auf der Fachmesse für Geodäsie. Wir präsentierten unsere KI-basierte Software zur Datenauswertung 3D-AI als Live-Demonstrator.

denkmal

Europäische Leitmesse für Denkmalpflege, Restaurierung und Altbausanierung
24.–26.10.2022

Auf der Messe zeigten wir unsere Technologien für die 3D-Erfassung von Gebäuden und zur automatisierten Dateninterpretation.

Geplant für 2023

BAU

17.–22.04.2023

INTERGEO

10.–12.10.2023

Fokus Laserscanning unter Wasser

Mehr Durchblick: 3D-Vermessung von Unterwasser-Infrastruktur und bathymetrische Messungen



Im Zuge des Klimawandels verändern sich Küstenverläufe dynamisch. Laserbasierte Systeme erleichtern die topographische Kartierung.

Was sich unter einer Wasseroberfläche verbirgt, ist mit Messtechnik nicht immer leicht zu erfassen. Unterwasser-Bauwerke werden heute in der Regel von Tauchern inspiziert. Solche Sichtprüfungen – unterstützt von Bild- und Videoaufnahmen – sind wenig objektiv, aufwändig und nicht zuletzt gefährlich. Auch weitere optische Methoden, wie z. B. die Lasertriangulation oder Photogrammetrie, haben begrenzte Reichweiten und sind empfindlich gegenüber trübem Wasser. Die bathymetrische Vermessung flacher Gewässer – speziell von Küstenbereichen und Wasserwegen – ist ebenso komplex und aufwändig. Es existiert bisher kein einheitlicher, automatischer Prozess, mit dem sowohl die Topographie des Umlands als auch die Topographie des Gewässergrunds erfasst werden kann, da diese Bereiche für Sonarsysteme oft nicht erreichbar sind. Als Mittel der Wahl bleibt deshalb vielfach nur die manuelle Vermessung mit einem GNSS-Lotstab. Die so erzielbare Auflösung ist jedoch begrenzt, die Messungen sehr zeitintensiv und kostspielig.

Die LiDAR-Technologie (Light detection and ranging) mit gepulsten Lasern bietet zahlreiche

Vorteile für 3D-Messungen unter Wasser oder bathymetrische Messungen. Diese LiDAR-Systeme messen genauer und detaillierter als etwa Kamera- oder Sonarsysteme und ermöglichen eine direkte, echte 3D-Erfassung – auch über vergleichsweise große Distanzen. Allerdings bringt das Medium Wasser einige grundsätzliche Schwierigkeiten mit sich, weshalb optische Systeme für Unterwasser-Messungen bislang kaum eingesetzt werden: Zum einen schwächt Wasser Licht stark ab; zusätzlich streuen Trübstoffe im Wasser das Licht und blenden die Sensoren. Den Forschenden am Fraunhofer IPM ist es in den vergangenen Jahren gelungen, diese Schwierigkeiten zu meistern. Zwei Systeme hat das Team inzwischen entwickelt: Das »Underwater LiDAR-System ULi« und das »Airborne Bathymetric System ABS«.

Bauwerke millimetergenau vermessen – in bis zu 300 Metern Tiefe

Der Unterwasser-Laserscanner ULi vermisst 3D-Strukturen unter Wasser – in Bewegung

von einem ferngesteuerten Unterwasserfahrzeug oder einem Schiff aus, kann aber auch statisch verwendet werden. So können Schäden an unter Wasser gelegener Infrastruktur wie Staumauern, Sockeln von Windkraftanlagen, Pipelines oder auch Datenkabeln rechtzeitig entdeckt werden. Aber auch Biofouling, das sich mitunter zentimeterdick an Schiffsrümpfen ablagert und den Kraftstoffverbrauch in die Höhe treibt, lässt sich mithilfe des Systems erfassen.

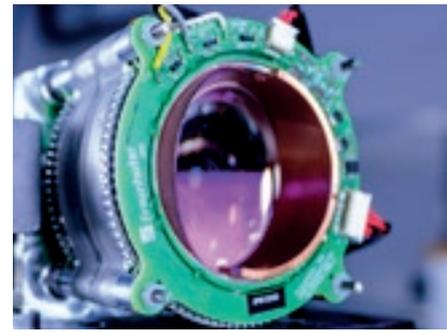
ULi taucht bis zu 300 Meter tief und erfasst Objekte mit Millimetergenauigkeit über Distanzen von mehreren zehn Metern. Dabei gilt: Je klarer das Wasser, desto besser das Messergebnis. Die Messdistanz liegt dabei etwa doppelt so weit wie die Sichtweite, wobei sich Strukturen deutlich unter einem Zentimeter auflösen lassen. Damit misst das System bis zu zehnmal genauer als zum Beispiel Sonar-Systeme und liefert ein präzises 3D-Modell des Objekts. ULi erfasst Unterwasser-Infrastruktur basierend auf dem Pulslaufzeit-Verfahren (Pulsed time-of-flight) mit Laserlicht von 532 nm Wellenlänge und nimmt bis zu 100 000 Messpunkte pro Sekunde auf. Der Messstrahl wird durch zwei rotierende Keilprismen abgelenkt. So erfasst der Scanner das volle Sichtfeld, ohne dass der Sensor bewegt werden muss.

Ultraleichter LiDAR-Scanner misst effizient aus der Luft

Laserbasierte Systeme sind geeignet, Gewässer effizient und mit einer vergleichsweise hohen Auflösung bathymetrisch zu kartographieren. Einzelne Laserbathymetrie-Systeme gibt es bereits. Sie sind allerdings groß und bis zu 200 Kilogramm schwer. Das nur

schuhkartongroße ABS ist mit einem Gewicht von etwa drei Kilogramm so leicht, dass es auf gängige Drohnen montiert werden kann. Durch das geringe Gewicht entfallen aufwändige und teure Fluggenehmigungen. Der LiDAR-Scanner erfasst die Topographie des Gewässerbodens sowie der Randbereiche nach dem Prinzip der Multiwellenlängenmessung mit zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge. Der Vorteil: Durch den Einsatz von zwei perfekt überlagerten Laserpulsen wird der unerwünschte Effekt der Lichtbrechung korrigiert, der die Wassertiefe optisch weniger tief erscheinen lässt, als sie tatsächlich ist. Das macht die Messungen wesentlich genauer als Messungen mit nur einem Laserstrahl. Der infrarote Messstrahl (1064 nm) dringt nicht ins Wasser ein und liefert somit Informationen über die Wasseroberfläche. Er kann aber auch zur Detektion von Vegetation speziell im Küstenbereich verwendet werden. So werden Messungen bis zu einer Tiefe von zwei Secchi – also zweimal die Sichttiefe des Wassers – möglich, mit einer Präzision von bis zu 10 cm.

Eine besondere Herausforderung bei Lasermessungen in Wasser ist die Signalauswertung: Das reflektierte Licht enthält unterschiedliche Echos – von der Wasseroberfläche, von im Wasser vorhandenen Partikeln und vom Gewässerboden. Diese Echofolge zu trennen, um die gesuchte Topographie zu extrahieren, gelingt nur mithilfe einer »Full-Waveform-Analyse« der Messdaten. Durch eigens entwickelte Algorithmen lassen sich so selbst kleinste Echos extrahieren und präzise erfassen. Durch Einbinden von GNSS-Daten kann die Flugtrajektorie bestimmt und mit den LiDAR-Daten zu einem kompletten, georeferenzierten 3D-Modell fusioniert werden.



*Blick unter das Gehäuse:
Der Unterwasser-Laserscanner
ULi taucht bis zu 300 Meter tief.*



**LiDAR-Systeme
messen präziser
als Kamera- oder
Sonarsysteme
und liefern
3D-Modelle.«**

*Dr. Christoph Werner,
Gruppenleiter*

Wasserbassin für Testmessungen

Seit 2022 testen wir unsere LiDAR-Systeme in einem Wasserbecken direkt vor Ort. Das Becken ist 40 Meter lang, 3 Meter breit und 2 Meter tief und bietet damit eine ausreichend lange Messstrecke für Testmessungen. Die Scanner können auf einer verfahrbaren Plattform über dem Wasserspiegel bewegt und auch ins Wasser getaucht werden. Über eine Filteranlage können Trübstoffe gezielt hinzugefügt oder abgesaugt werden. Das Becken für Forschungszwecke ist in seiner Größe einzigartig.



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 – auch unter extremen Bedingungen – zeichnen unsere Systeme aus.

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 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



Wir beschäftigen uns mit der Gas- und Prozessmesstechnik von morgen. Zum Beispiel, um die Wasserstoffwirtschaft sicher zu machen.«

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter

Highlights Gas- und Prozesstechnologie

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Projekt ISLAS

Photothermische Atemgas-Diagnostik

Bei jedem Atemzug setzt der Mensch flüchtige organische Verbindungen, Stickoxide, Methan oder Ammoniak frei, die Hinweise auf bestimmte Krankheitsbilder liefern können. Dennoch hat sich die Atemgas-Diagnostik im klinischen Alltag bisher nicht durchgesetzt: Es fehlen kostengünstige, unkomplizierte Messgeräte, die die heutigen probenehmenden Verfahren ersetzen. Gefragt sind besonders sensitive Sensoren, die die relevanten Substanzen trotz einer komplexen Gaszusammensetzung messen und mit einer geringen Probenmenge auskommen.

Im Projekt ISLAS hat Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer IAF einen photothermischen Atemgas-Analysator entwickelt, der

Spurengaskonzentrationen sensitiv und in Echtzeit misst. Bei der photothermischen Spektroskopie erfolgt der Nachweis einer Substanz anhand ihrer Wärmesignatur, die mit einem separaten Abfragelaser gemessen wird. Das von Fraunhofer IPM patentierte Verfahren liefert innerhalb einer Sekunde Konzentrationswerte bis in den einstelligen ppb-Bereich (parts-per-billion). Für den Nachweis reichen wenige Mikroliter Atemgas aus. Das optische Auslesen erlaubt es außerdem, eine Reihe von Störeinflüssen durch die Gasmatrix zu umgehen. Das System stellt Konzentrationsverläufe schon innerhalb einzelner Atemzüge dar und liefert damit wichtige Zusatzinformationen für die Diagnostik.

Projekt ISLAS (Intracavity-Laser-Spektroskopie für den hochempfindlichen Nachweis von Spurengasen), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Vorlaufforschungsprojekt)

Mehr als der Hauch einer Ahnung: Der photothermische Gasanalysator analysiert Spurengaskonzentrationen in der Atemluft in Echtzeit. Sie können Hinweise auf eine Erkrankung geben.





Milch auf der Oberfläche eines ATR-Sensors. Solche Sensoren sollen in Zukunft aufwändige Labormessungen überflüssig machen.

Projekt BREATH

Fluoreszenzbasierter Sensor zur Überwachung des Sauerstoffgehalts in der Atemluft

Fällt der Sauerstoffgehalt im menschlichen Blut ab, wird es schnell kritisch: Eine zu geringe Sauerstoffsättigung kann zu bleibenden körperlichen Schäden und letztlich zum Tod führen. In der Intensiv- und Unfallmedizin wird dieser Wert daher kontinuierlich überwacht. Genutzt werden hier einfache Pulsoxymeter, die z. B. per Fingerclip durch die Haut messen. Das ist jedoch nicht sehr zuverlässig und genau. Präzisere Werte bekommt man bisher nur per arterieller Blutentnahme – ein vergleichsweise aufwändiges, invasives Verfahren.

Im Projekt BREATH entwickelt Fraunhofer IPM einen nicht-invasiven Sensor, der den Sauerstoffgehalt im Blut direkt und in Echtzeit messen soll. Dazu wird die O_2 -Konzentration im Atemgas nach dem Prinzip der Fluoreszenzlöschung gemessen, was Rückschlüsse über die Sauerstoffsättigung im Blut erlaubt. Beim sogenannten »Quenching« schwächt sich die Emissivität einer Fluorophor-Schicht beim Kontakt mit dem Zielgas analog zur Gaskonzentration ab. Das Team hat ein Fluorophor für die Bestimmung der Sauerstoffkonzentration entwickelt, in ein Demonstratorsystem integriert und erste Messungen durchgeführt – mit vielversprechenden Ergebnissen. Nächstes Ziel ist es, ein miniaturisiertes Sensorsystem zu entwickeln, das über Standardkonnectoren direkt mit einer Atemmaske und einem Beatmungsschlauch verbunden und kostengünstig produziert werden kann.

Projekt BREATH, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)

Projekt MIRIMAU

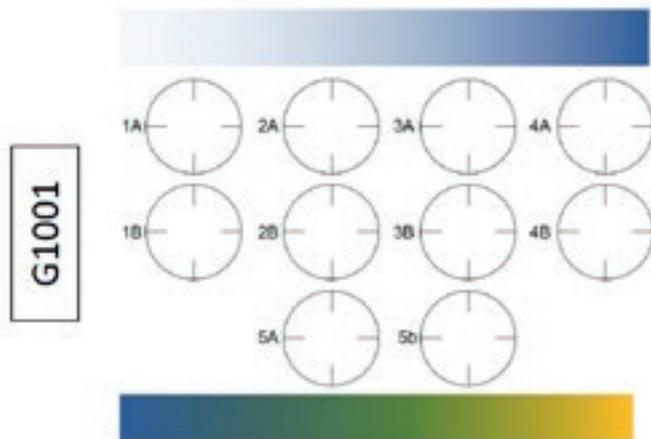
Qualitätskontrolle von Rohmilch: ATR-Spektroskopie plus Ultraschall

Milch ist nicht gleich Milch. Von Hof zu Hof fällt die Zusammensetzung des Naturprodukts anders aus. Fett- und Proteingehalt spielen eine wichtige Rolle bei der Weiterverarbeitung von Rohmilch und bestimmen auch den Erzeugerpreis. Um diese Werte zu ermitteln, werden Proben genommen und in spezialisierten Laboren ausgewertet.

Seit 2022 arbeitet Fraunhofer IPM gemeinsam mit Industriepartnern im Projekt MIRIMAU an einem kostengünstigen Sensor, der den Fett-, Protein- und Laktosegehalt von Milch zukünftig vor Ort messen soll – zum Beispiel bei der Milchlieferung in Molkereien. Ein ATR-Sensor (Attenuated Total Reflection) zur spektroskopischen Analyse der Milchbestandteile soll dazu mit einem Ultraschall-Transducer kombiniert werden. Die hochenergetischen Ultraschallwellen homogenisieren die Milch und ermöglichen damit eine repräsentative Verteilung im Probenvolumen. Gleichzeitig wird der Ultraschall genutzt, um die Oberfläche des ATR-Kristalls sauber zu halten und störende Anlagerungen (Fouling) zu verhindern. Abschließend wird untersucht, ob stehende Ultraschallwellen für eine selektive Anreicherung der Milchbestandteile zur Signalverbesserung genutzt werden können. Das Team von Fraunhofer IPM ist verantwortlich für die Auslegung und Optimierung des Messsystems.

Projekt MIRIMAU (Mid-Infrared Inline Milk Analysis through UltraSound), gefördert vom BMBF im Rahmen des Eurostars-Programms (Eurostars E!115483)

Milch ist nicht gleich Milch: Ein kostengünstiger Sensor soll wichtige Qualitätsparameter von Rohmilch in Zukunft vor Ort bestimmen.



So ähnlich soll das Sensoretikett später einmal aussehen: Wo hier Kreise zu sehen sind, werden gas-sensitive Farbstoffe aufgebracht – mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten gegenüber H₂O und CO₂.

Projekt Getreide

Farbumschlag-Sensoren gegen Nachernteverluste

Weizen, Hülsenfrüchte, Ölsaaten – im globalen Süden verdirbt bis zu einem Viertel der geernteten Feldfrüchte. Grund sind vor allem schlechte Lagerbedingungen. Hermetisch verschlossene Getreidesäcke könnten Abhilfe schaffen, setzen sich bisher jedoch nicht durch, da Zwischenhändler die Ware nicht prüfen können. Was wäre, wenn man die Qualität des Lagerguts beurteilen könnte, ohne die Getreidesäcke zu öffnen? Im Auftrag der Humboldt-Universität zu Berlin arbeiten wir an einem Sensorkonzept, das genau dies ermöglicht.

Gassensitive Einweg-Etiketten, aufgeklebt auf die Innenseite transparenter Getreidesäcke, sollen den Kohlenstoffdioxid-(CO₂) und Feuchtegehalt in den luftdicht verschlossenen Säcken überwachen. CO₂ entsteht durch den Stoffwechsel von Insekten, Feuchte weist auf Gärungsprozesse hin. Der Nachweis dieser beiden Parameter lässt somit Rückschlüsse auf die Qualität des Getreides zu. Unser Team entwickelt einen kolorimetrischen Sensor, der ab einer bestimmten Gas- oder Feuchtekonzentration einen mit bloßem Auge sichtbaren, reversiblen Farbumschlag auslöst. Dazu werden gas-sensitive Farbstoffe ausgewählt und zu druckfähigen Pasten verarbeitet, ein Beschichtungsprozess entwickelt und Etikettenmaterialien getestet. In umfangreichen Tests charakterisieren die Forschenden Ansprechverhalten, Querempfindlichkeit und Langzeitstabilität der Farbumschlag-Sensoren.

Projekt Mocca+

Gute Luft: Reinheit von Druckluft messen

Druckluft ist ein vielfältig einsetzbares, unverzichtbares Werkzeug. Beim Einsatz von Druckluft in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie oder der Medizin gelten hohe Hygieneanforderungen, zum Beispiel bei der Produktion von PET-Flaschen, in Abfüll- und Reinigungsprozessen medizinischer Geräte sowie bei der künstlichen Beatmung. Hier muss Druckluft nachweislich frei von Schadstoffen sein. Verunreinigte Ansaugluft oder technische Defekte an der Druckluftanlage können dazu führen, dass gasförmige toxische Substanzen – z. B. Abgas- oder Mineralölbestandteile – in die Druckluft gelangen. Sie muss daher stetig auf gesundheitsschädliche Öldämpfe oder Aerosole der sogenannten BTEX-Verbindungen (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol) und andere krebserregende Substanzen überwacht werden.

Im Projekt Mocca+ entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit der CS Instruments GmbH & Co. KG einen photoakustischen Sensor für die Reinheitskontrolle von Druckluft. Der Sensor soll Spuren der toxischen Substanzen im ppb-Bereich (parts per billion) in industrieller Umgebung nachweisen. Dazu nutzen die Forschenden den spezifischen Nachweis von Öldampfspuren als Frühindikator für potenziell vorhandene BTEX-Komponenten, um eine vorausschauende Wartung von Filteranlagen zu ermöglichen. Im Zusammenhang mit einer empfindlichen direkten Messung von BTEX im ultravioletten Spektralbereich wird eine hohe Messsicherheit für die Schwellwertüberwachung erreicht.

Projekt Mocca+ (Monitoring of BTEX compounds in compressed air supported by predictive analysis), gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg (Innovationswettbewerb »Klimaneutrale Produktion mittels Industrie 4.0-Lösungen«)

Herkömmliche Infrarot-Sensoren sind zu ungenau, um die Körpertemperatur aus der Ferne zu bestimmen. Neuartige Thermopiles sollen dies ändern.



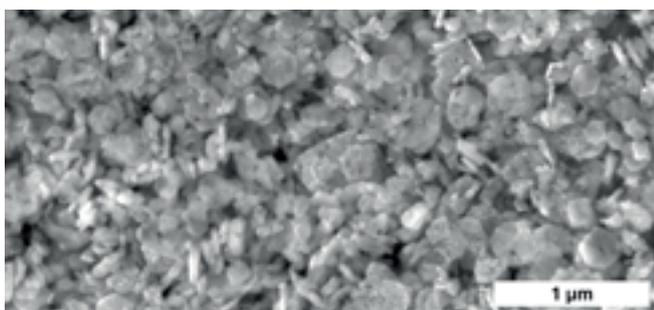
Projekt MEscal

Effektiver Katalysator für die Methandetektion

Treten brennbare Gase wie Methan oder Propan an Tankstellen, Pipelines oder Gasthermen aus, wird es schnell gefährlich. Millionen katalytischer Sensoren (Pellistoren) überwachen daher die Gasinfrastruktur auf Leckagen und sorgen so einerseits für Sicherheit und andererseits für die Vermeidung von Gasverlusten. Heutige Pellistoren arbeiten bei Temperaturen von um die 450 °C und benötigen dementsprechend viel Energie. Im Projekt MEscal hat Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus der Industrie einen besonders energieeffizienten katalytischen Sensor zur Methandetektion entwickelt. Dank der geringeren Arbeitstemperatur entfallen zudem aufwändige Maßnahmen zum Vergiftungs- und Explosionsschutz.

Kerninnovation am Fraunhofer IPM war die Entwicklung eines neuartigen, hocheffektiven Katalysatormaterials, das eine Oxidationsreaktion von Methan bereits bei Temperaturen unter 400 °C auslöst und gleichzeitig weniger Edelmetalle enthält als konventionelle Katalysatormaterialien. Das Team hat den Katalysator als druckbare Tinte zur Beschichtung der MEMS-basierten Sensorsubstrate realisiert. Mit den derart beschichteten Low-power-Sensoren konnten Methankonzentrationen von bis zu fünf Prozent der unteren Explosionsgrenze (UEG) nachgewiesen werden.

Projekt MEscal (MEMS-based catalytical sensors for flammable gases), gefördert von der EU im Rahmen des Eurostars-2-Programms (Eurostars E! 113779)



Der Metalloxid-basierte Methan-Katalysator – hier als REM-Aufnahme – wird als Tinte auf das Sensorsubstrat aufgedruckt.

Projekt TAPIR

Hochempfindliche Infrarotdetektoren: Thermopiles der neuen Generation

Wenn beim Betreten eines Raums das Licht wie von Geisterhand angeht, stecken meist sogenannte Thermopiles dahinter – Sensoren, die die vom Körper ausgestrahlte Wärme detektieren. In Bewegungsmeldern messen sie temperaturabhängige Spannungen, die an der Verbindungsstelle zweier thermoelektrischer Materialien entstehen, sofern diese eine andere Temperatur als die Umgebung aufweist.

Fraunhofer IPM entwickelt im Rahmen des Forschungsprojekts TAPIR neuartige Thermopiles, die deutlich empfindlicher messen als bisher verfügbare IR-Detektoren. Dazu nutzt das Team erstmals ein auf Bismuttellurid (Bi_2Te_3) basierendes Materialsystem. Bi_2Te_3 ist den in Thermopiles standardmäßig eingesetzten Materialien Silizium und Aluminium aufgrund seiner hohen thermoelektrischen Gütezahl um ein Vielfaches überlegen. Die miniaturisierten IR-Detektoren mit acht Mal acht Thermopile-Elementen auf einem Polymersubstrat sollen beispielsweise zur berührungslosen Fiebererkennung aus der Ferne eingesetzt werden – nicht nur in Zeiten einer Pandemie ein wichtiges Anwendungsszenario. Eine weitere Anwendung gibt es in technischen Anlagen: Dort können die hochempfindlichen Infrarot-Detektoren sogenannte »Hot-spots« erkennen und so vor Überhitzung warnen.

Projekt TAPIR (Thermopilearrays auf Polymersubstraten zur bildgebenden Infrarot-Detektion), gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (SME-Projekt)

Projekt TransHyDE

Akustischer Wasserstoff-Leckage-Detektor

Bei der Nutzung von Wasserstoff (H_2) gelten hohe Sicherheitsanforderungen. Leckagen an Leitungen oder Behältern zuverlässig zu erkennen, ist zentral für den sicheren Betrieb wasserstoffführender Systeme – zumal Materialversprödung durch H_2 die Gefahr von Lecks erhöht.

Im Verbundvorhaben TransHyDE_FP2 entwickelt Fraunhofer IPM eigensichere Sensorik zur Erkennung von Wasserstoff-Leckagen. Dabei setzen die Forschenden u. a. auf akustische Messtechnik auf Basis von Phasenlaufzeit- und Resonanzfrequenzverschiebungen: Bei Anwesenheit von Wasserstoff verändert sich die Ausbreitung von Schall. Die Schallgeschwindigkeit von Gasgemischen ist u. a. abhängig von der molaren Masse und dem Adiabatenexponenten der im Gemisch vorhandenen Gase. Hier unterscheidet sich Wasserstoff sehr stark von den in Luft vorkommenden Gasen, sodass sich H_2 sehr gut über die Messung der Schallgeschwindigkeit detektieren lässt.

Bei der Auswahl der Komponenten für den Detektor hat das Team neben der Zuverlässigkeit auch die Kosten im Blick, denn für die Überwachung der gesamten H_2 -Infrastruktur bedarf es einer hohen Anzahl an Leckage-Sensoren. Erste Systeme wurden im Labor aufgebaut und erfolgreich getestet. Selbst kleine Wasserstoffkonzentrationen deutlich unterhalb der Explosionsgrenze konnten detektiert werden. Im nächsten Schritt untersuchen die Forschenden, wie sich schwankende Umgebungsbedingungen wie Feuchte und Temperatur sowie Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen, wie z. B. CO_2 , auf die Messung auswirken – und wie sich diese Einflüsse minimieren oder durch intelligente Datenauswertung ausblenden lassen.

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE (TransHyDE_FP2 Sichere Infrastruktur), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Projekt WALD

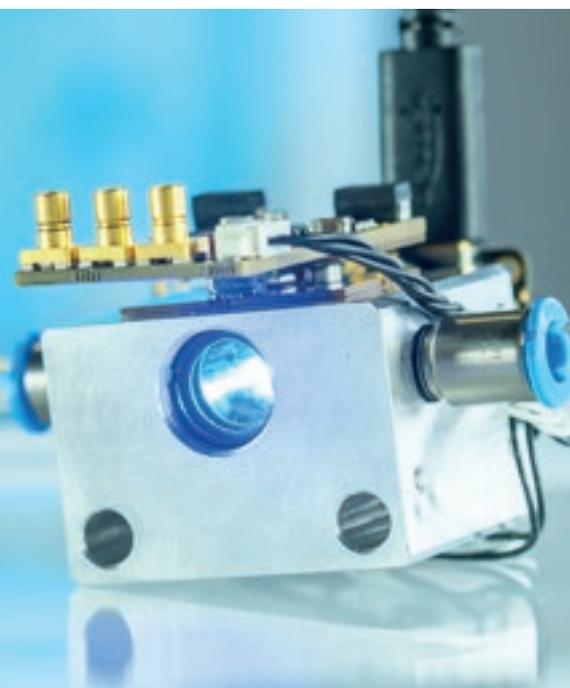
Sicherer Wasserstoff-Transport: Sensor soll Leckagen an Leitungen detektieren

»Grüner« Wasserstoff (H_2) wird in Zukunft vor allem dort hergestellt werden, wo viel Energie aus regenerativen Quellen zur Verfügung steht. Die wirtschaftlichste Lösung, um das Gas von dort über weite Strecken zum Verbrauchsort zu transportieren, sind Pipelines. Um die Sicherheit zu gewährleisten, müssen die Leitungen regelmäßig auf Leckagen untersucht werden. Im Projekt WALD entwickeln wir gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie einen kostengünstigen, handgehaltenen Sensor, der H_2 selektiv im Bereich von ppm (parts-per-million) bis 100 Volumenprozent detektiert – und damit kleinste Leckagen aufspüren und explosive Gasgemische vermeiden soll.

Die Forschenden kombinieren für den Sensor zwei Messprinzipien für unterschiedliche Erfassungsbereiche. Dies garantiert hohe Messsicherheit und Selektivität sowie einen großen Dynamikbereich. Das Team am Fraunhofer IPM entwickelte mithilfe thermischer Simulationen die ideale geometrische Form für eine Heizstruktur – eines der Kernelemente des Sensors. Für die Abscheidung der Struktur auf ein Substrat wurde ein eigener Siebdruckprozess entwickelt. Erste Labormessungen haben gezeigt, dass der Sensor H_2 an der unteren Explosionsgrenze des Gases nachweist. Im weiteren Projektverlauf steht die Entwicklung von Elektronik und Gehäuse bis hin zur kompletten Systemintegration an.

Projekt WALD (Wasserstoffleckdetektion), gefördert vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Rahmen des Zukunftsprogramms Wasserstoff BW

Ein akustischer Wasserstoffsensor detektiert im Labor H_2 -Konzentrationen deutlich unterhalb der Explosionsgrenze.





Wir können mit extrem kleinen Lichtmengen erstaunlich gute spektroskopische Ergebnisse erzielen. Das eröffnet spannende Anwendungsfelder.«

Dr. Chiara Lindner



Projekt HySABi

H₂-Sensoren für Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Batteriebetriebene E-Fahrzeuge werden den Pkw-Markt der Zukunft dominieren. Hersteller von Nutzfahrzeugen hingegen setzen als Alternative zum Verbrennungsmotor auch auf emissionsfreie Brennstoffzellen. In der Brennstoffzelle wird die chemische Energie von Wasserstoff (H₂) in elektrische Energie umgewandelt und treibt einen Elektromotor an. Betrieben mit »grünem« Wasserstoff sind solche brennstoffzellenbasierten E-Fahrzeuge emissionsfrei und klimafreundlich.

Allerdings: Wasserstoff und Sauerstoff können zu einem explosiven Gemisch werden. Um die hohen Sicherheitsanforderungen der Automobilindustrie zu erfüllen, sind Sensoren gefragt, welche die H₂-Konzentration in Brennstoffzellen zuverlässig überwachen. Im Rahmen des Projekts HySABi entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus der Industrie ein neuartiges H₂-Sensor-System für den Abgasstrang. Für besonders zuverlässige und funktionssichere Messungen werden zwei sich ergänzende Messprinzipien in einem Sensor kombiniert. Der miniaturisierte Sensor kommt mit wenig Energie aus und kann bei niedriger Temperatur betrieben werden. So wird sichergestellt, dass sich das Gasgemisch nicht durch den Sensor selbst entzündet. Mithilfe thermischer Simulationen und Probemessungen hat das Team die Grundlage für einen ersten Demonstrator geschaffen, der bis zum Projektende im Frühjahr 2024 im Labor und im Fahrzeug getestet wird.

Projekt HySABi (Miniaturisiertes H₂-Sensorik-System zur Sicherstellung der Akzeptanz von Brennstoffzellen-Antrieben), gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH

Auszeichnung für Dissertation

Quantum Futur Award für Chiara Lindner

Innovative Ansätze junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind gefragt, um Quantentechnologien in die Anwendung zu bringen. So sieht es das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und verleiht seit 2018 den »Quantum Futur Award« für herausragende wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet der Quantentechnologien. Platz 1 in der Kategorie Dissertationen belegte 2022 unsere Kollegin Dr. Chiara Lindner für ihre Arbeit auf dem Gebiet der Quantensensorik (»Nonlinear interferometers based on spontaneous parametric down-conversion for Fourier-transform mid-infrared spectroscopy«).

Die eingereichten Beiträge wurden von einer Fachjury aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft begutachtet. Bei der Preisverleihung in Berlin im November 2022 stellten zehn Finalistinnen und Finalisten ihr Thema in einer Kurzpräsentation vor. Chiara Lindner überzeugte mit ihrem Vortrag auch das Online-Publikum und belegte Platz 2 beim Publikumspreis. Im Rahmen ihrer Promotion entwickelte sie ein quantenoptisches Pendant zum FTIR-Spektrometer, das u. a. für die hochauflösende, sensitive Gasspektroskopie genutzt werden kann.

Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland

Lichtquellen für das Quantencomputing

Um die in Deutschland vorhandene mikroelektronische Forschung und Entwicklung in Bezug auf Quanten- und neuromorphes Computing zu bündeln und auszubauen, wird die für Mikro- und Nanoelektronikfertigung etablierte Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD), an der die Fraunhofer-Gesellschaft federführend beteiligt ist, um das »Modul Quanten- und neuromorphes Computing« (QNC) erweitert. Fraunhofer IPM bringt hier seine Kompetenzen zur Simulation, Fertigung und Charakterisierung integriert-optischer Lithiumniobat-Wellenleiter für das ionenbasierte Quantencomputing ein. Der dafür benötigte gerätetechnische und strukturelle Aufbau wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Beim ionenbasierten Quantencomputing werden Ionen-Qubits in einer sogenannten Ionenfalle mithilfe von Laserstrahlen gehalten, manipuliert und ausgelesen. Dies übernehmen bisher teure Laborlaser, die zukünftig durch kostengünstige, integriert-optische Lichtquellen wie z. B. Lithiumniobat-Wellenleiter ersetzt werden sollen. Fraunhofer IPM erhält Investitionsmittel für die Beschaffung und Inbetriebnahme einer »Focused Ion Beam«-Anlage, mit der bestehende Wellenleiter-Fertigungsprozesse optimiert werden sollen.

»FMD-QNC« (Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland – Modul Quanten- und neuromorphes Computing, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF))



*Workshop-Organisator
Dr. Peter Koss forscht auf dem
Gebiet optisch gepumpter
Magnetometer.*

Erster Workshop

Industrie-Workshop Quantenmagnetometrie

Quantenbasierte Methoden erweitern das Spektrum der Magnetfeldmesstechnik – und eröffnen neue Möglichkeiten für die industrielle Messtechnik. Im Rahmen eines Industrie-Workshops im Dezember 2022 gaben Expertinnen und Experten aus Forschung und Industrie einen Überblick über den Stand der Technik auf dem Gebiet der Quantenmagnetometrie. Rund 35 Gäste diskutierten über technologische Trends und das Potenzial für industrielle Anwendungen.

Thematischer Schwerpunkt des Workshops waren optisch gepumpte Magnetometer (OPM). Sie bilden einen Forschungsschwerpunkt am Fraunhofer IPM und gehören neben Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Diamond) zu den wichtigsten quantenbasierten Magnetometrieverfahren. Mithilfe von OPM lassen sich Magnetfelder sehr empfindlich nachweisen. Ihre Messgenauigkeit ist lediglich durch quantenphysikalische Gesetze limitiert. OPM ermöglichen es, magnetische Quellen im Inneren von Objekten kontaktlos und durch Materie hindurch zu vermessen. »Wir werden weiter intensiv an und mit OPM forschen«, sagt Dr. Peter Koss, der den Workshop organisiert hat. »In ungefähr zwei Jahren werden wir uns erneut treffen und sehen, welche Fortschritte in Richtung Anwendung wir erzielt haben.«



Optisch
gepumpte
Magnetometer
setzen neue
Standards beim
Nachweis von
Magnetfeldern.



Gas- und Prozesstechnologie | Messen & Veranstaltungen

LASER World of PHOTONICS

Weltleitmesse und Kongress für Komponenten, Systeme und Anwendungen der Photonik
26.–29.04.2022

Auf der Messe waren wir mit den Themen »Maßgeschneiderte Wellenlängen durch nichtlineare Frequenzkonversion« sowie mit der laserbasierten photothermischen Gasanalyse vertreten. Beim Kongress World of QUANTUM präsentierten wir ein Quanten-Fourier-Transform-Spektrometer für die Infrarot-Spektroskopie sowie die Technologie der Quantenmagnetometrie. Zusätzlich waren wir über den Verbund Light & Surfaces am Fraunhofer-Gemeinschaftsstand mit unseren Themen vertreten.

Sensor+Test

Messtechnik-Messe
10.–12.05.2022

Wir präsentierten unsere Innovationen zur Messung von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern sowie funktionale Materialien für die Gassensorik, Thermoelektrik und Optik.

ACHEMA

Weltforum der chemischen Technik und Prozessindustrie
22.–26.08.2022

Fraunhofer IPM präsentierte laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Technologien für die Partikelmesstechnik sowie thermische Sensoren und Systeme.

FUTURAS IN RES – The Quantum Breakthrough

28.–29.09.2022
Institutsleiter Prof. Dr. Karsten Buse war Co-Chair des Workshops; Dr. Frank Kühnemann hielt einen Impulsvortrag.

Geplant für 2023

10. Gassensor-Workshop
16.03.2023

Sensor+Test
09.–11.05.2023

LASER World of PHOTONICS
27.–30.06.2023



Fokus Reduktion von Treibhausgasen

Effiziente Landwirtschaft: Lachgassensorik für die optimale und klimaschonende Stickstoffdüngung



mobiler Lachgassensor: Die Probennahme erfolgt bodennah über eine Sammelglocke, das eigentliche Messsystem verbirgt sich im Koffer.

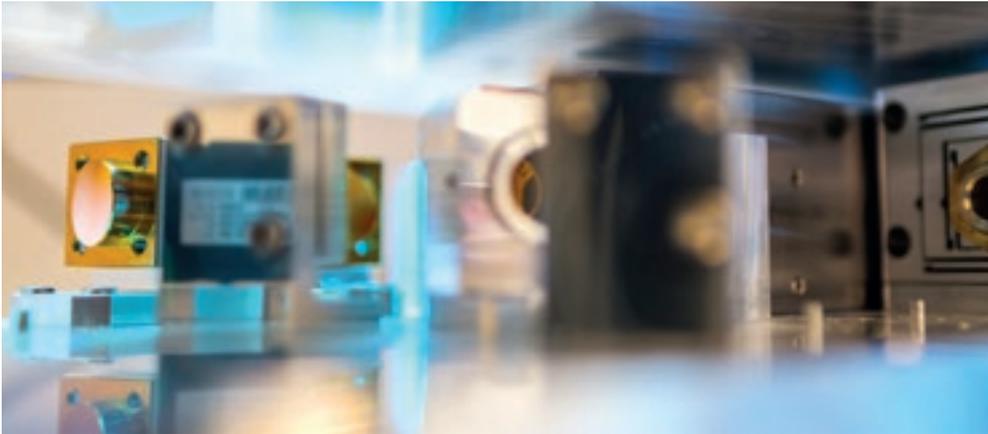
Wie kann ein Lachgassensor die Landwirtschaft effizienter machen? Und wie trägt eine nicht optimale Stickstoffdüngung zum globalen Klimawandel bei? Um diese Fragen beantworten zu können, muss man verstehen, was die Stickstoffdüngung mit der Lachgasentstehung im Boden und mit dem Vorkommen von Lachgas in der Atmosphäre zu tun hat.

Was viele nicht wissen: Lachgas (N_2O) ist neben Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) ein sehr relevantes Treibhausgas. Zwar kommt es in der Atmosphäre nur in Spuren vor, da es aber rund 300-mal klimaschädlicher ist als CO_2 , hat es trotzdem einen maßgeblichen Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt. Doch was hat die Stickstoffdüngung mit Lachgas zu tun? Ganz einfach: Lachgas gelangt vor allem über zwei Wege in die Atmosphäre: zum einen über stickstoffhaltigen Dünger und zum anderen über die Massentierhaltung; es

entsteht immer dann, wenn Mikroorganismen stickstoffhaltige Verbindungen abbauen. Nach Angaben des Umweltbundesamts verursacht die Landwirtschaft in Deutschland rund 80 Prozent der Lachgas-Emissionen. Die restlichen 20 Prozent stammen zum Großteil aus der chemischen Industrie; sowohl bei der Düngemittelproduktion als auch bei der Kunststoffherstellung wird Lachgas in die Atmosphäre freigesetzt.

Bedarfsgerechteres Düngen bedeutet geringere Lachgasemission

Stickstoffbasierter Dünger in der Landwirtschaft ist also eine der Hauptquellen für atmosphärisches Lachgas. Um diesen Anteil zu minimieren, muss man den Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft minimieren, ohne den Nährstoffgehalt und damit die



Dank eines neuartigen Messkonzepts mit Interbandkaskadenlasern (ICL) als Lichtquelle lässt sich Lachgas im mittleren Infrarot frei von Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen messen – und das äußerst schnell und mobil auf dem Feld.

landwirtschaftliche Qualität des Bodens zu verschlechtern. Um den Düngemiteleinsatz exakt regeln zu können, muss man die Ausgasung aus dem Boden besser verstehen.

Nährstoffgehalt und -verteilung im Boden sind wichtige Indikatoren, um effizient, umweltfreundlich und entsprechend den gesetzlichen Vorgaben zu düngen. Den Abbau stickstoffhaltiger Verbindungen durch Mikroben im Boden können Forschende von Fraunhofer IPM seit kurzem mit einem spektroskopischen Gassensor sehr exakt bestimmen: Das Messsystem detektiert die Lachgasmenge, die bei Überdüngung aus dem Ackerboden diffundiert, sensitiv und bodennah – und darüber hinaus auch schnell und ortsgenau. Diese Daten sollen zukünftig Grundlage für die optimale Düngung jedes einzelnen Felds sein. Ziel ist es, die fürs nächste Düngen benötigte Düngemittelmenge optimal abschätzen zu können – und so die Lachgasemission zu minimieren.

Mobiler Lachgassensor für schnelle, präzise und bodennahe Messungen

Den Lachgassensor hat das Team im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts »Cognitive Agriculture« entwickelt. Für die spezielle Anwendung kam nur ein sehr kompakter und vor allem hochauflösender Laserspektroskopischer Sensor infrage. Denn die Anforderungen an die Sensitivität sind enorm: Relevante Konzentrationsanstiege bewegen sich bei bodennahem Lachgas im Bereich weniger ppb pro Minute (ppb, parts per billion). Die Forschenden setzen auf ein

neuartiges Messkonzept mit Interbandkaskadenlasern (ICL) als Lichtquelle. Damit gelingt es, Lachgas im mittleren Infrarot frei von Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen eindeutig zu messen – mit einer drastischen Verkürzung der Messzeiten bei gleichzeitig verringerter Leistungsaufnahme. Ein solch kompaktes, batteriebetriebenes Messsystem erlaubt erstmals quasimobile Echtzeitmessungen von Lachgas – auch integriert in autonome Landmaschinen. Das Projekt »Cognitive Agriculture« wurde Ende 2022 erfolgreich abgeschlossen. Neben Fraunhofer IPM waren sieben weitere Fraunhofer-Institute daran beteiligt.

Sonderforschungsbereich ECOSENSE: Gassensoren für das Ökosystem Wald

Seit Ende 2022 erforscht Fraunhofer IPM nun im Rahmen des Sonderforschungsbereichs ECOSENSE der Universität Freiburg den negativen Einfluss des Klimawandels auf Waldökosysteme, die als Kohlenstoffsенke gleichzeitig eine wichtige regulatorische Funktion im Klimasystem ausüben. Das Team von Fraunhofer IPM befasst sich hier mit zwei Themen: Zum einen wollen die Forschenden mithilfe miniaturisierter Sensoren CO₂-Flüsse messen und deren Auswirkungen auf das Waldökosystem verstehen. Zum anderen befasst sich das Team mit der aufwändigen spektroskopischen Messung des CO₂-Isotopen-Verhältnisses in der Luft. Dieses Verhältnis lässt Rückschlüsse zu, aus welcher Quelle das CO₂ in die Atmosphäre gelangt ist.



Lachgas ist rund 300-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid.«

*Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein,
Abteilungsleiter*

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 spezielle, anwendungsspezifische thermoelektrische Module und Systeme zur effizienten Temperierung und 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.



Kundenspezifische thermoelektrische Systeme



Kühlen mit kalorischen Systemen



Wärmetransport per Heatpipe

Unsere Gruppen und Themen

Thermoelektrische Systeme

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

Kalorische Systeme

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



**Wir entwickeln neuartige
Technologien, um Kältetechnik
und Wärmepumpen effizienter
zu machen.«**

Dr. Olaf Schäfer-Welsen, Abteilungsleiter

Highlights Thermische Energiewandler

Projekte • Innovationen • Veranstaltungen

Peltier-Systeme

Mobile Cooling Trolley für die Bahn

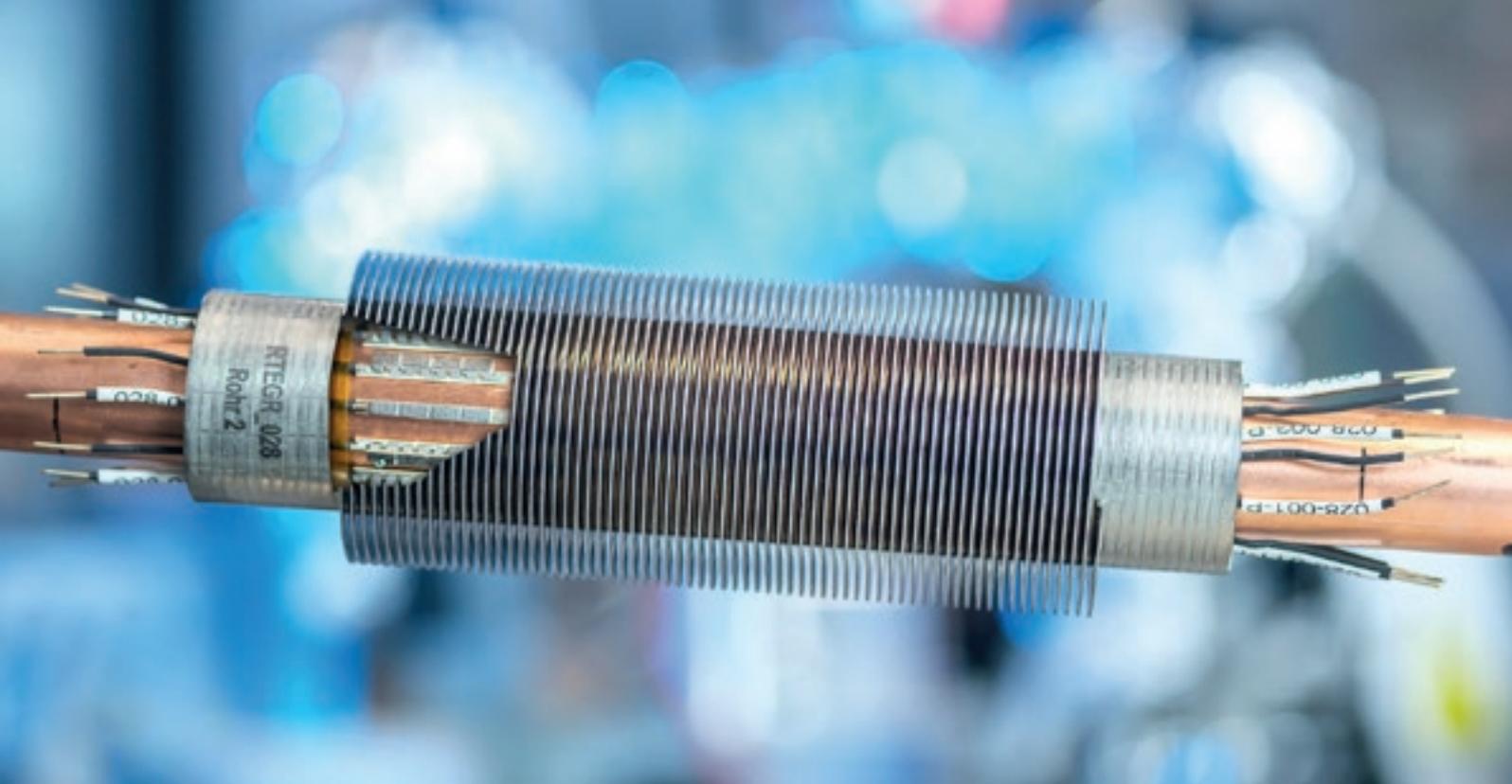
Gekühlte Speisen und Getränke im Bordbistro anzubieten, ist für die Bahn mit einigem Aufwand verbunden: Die Waren werden in Gastronorm (GN)-Trolleys ohne aktive Kühlung zum Zug transportiert und dort in einen Kühlraum geschoben. Bei Zugverspätungen stehen die unisolierten Trolleys dann manchmal so lange auf dem Bahnsteig, dass die Lebensmittel entsorgt werden müssen.

Gemeinsam mit den Industriepartnern Siemens Mobility und Zech + Waibel hat Fraunhofer IPM einen thermoelektrisch gekühlten GN-Trolley entwickelt, der mit 85 Prozent weniger Energie auskommt als die gängige kompressorbasierte Kühlraum-Lösung. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Trolley-Innerem und Umgebung von 10 K liegt der Gesamt-COP (Coefficient of Performance) bei bis zu 1,6 – ein hervorragender Wert, den die Wissenschaftler durch eine sorgfältige Auswahl und Abstimmung von Kühlkörper, Lüftern, Peltiermodulen und Isolierung erzielen konnte. Der energieeffiziente Trolley kühlt im Akkubetrieb bis zu zwölf Stunden und kann so auch lange Standzeiten auf dem Bahnsteig überbrücken. Bei geöffneter Tür wird die elektrische Leistung punktuell gesteigert: Die Peltier-Module erzeugen dann bis zu 200 W Kühlleistung. Das Team stellte den Mobile Cooling Trolley 2022 erstmals auf der Messe InnoTrans in Berlin vor. (Mehr zur Kooperation mit Siemens Mobility erfahren Sie im Kundeninterview, S. 20–21.)



Mit dem Mobile Cooling Trolley gehen wir einen wichtigen Schritt in Richtung neue gastronomische Konzepte im Zug.«

*Andreas Häußler,
Siemens Mobility*



Das Eckige muss ums Runde: Thermoelektrische Module, perfekt angepasst an die Rohrgeometrie, wandeln Abwärme in Strom um oder temperieren als Peltierkühler die in Rohren fließenden Medien (Bildmontage).

Projekt RoteP

Rund ums Rohr: Thermoelektrische Module neu gedacht

Thermoelektrische Module (TEM) sind vielseitig einsetzbar – für die Abwärmenutzung ebenso wie für die Kühlung. Traditionell sind die Module flach und quadratisch oder rechteckig. Die wärmetragenden oder zu temperierenden Fluide hingegen fließen in der Regel in runden Rohren. Dieser Formunterschied ist baulich und auch kostenmäßig nachteilig, da teure flache und wartungsintensive Wärmetauscher verwendet und die TEM mit einem massiven Aufbau angepresst werden müssen. Unser Team hat daher TEM mit runder Bauform entwickelt, die sich direkt um Rohre herum bauen lassen. Dabei wurde erstmals ein kostengünstiges Aufbauverfahren realisiert, das auf kommerziellen, quaderförmigen thermoelektrischen Bauelementen basiert.

Der thermoelektrische Generator RO-TEG ermöglicht die Abwärmeverstromung mit geringem Platzbedarf, flexibler Anpassung des

thermischen Widerstands an äußere Wärmeübertragungswiderstände und perspektivischen Investitionskosten von unter einem Euro pro Watt an erzeugbarer elektrischer Leistung.

RO-TEG eignet sich beispielsweise zur Verstromung von Abwärme in Gießereien, Härtereien, Schmieden, industriellen Verbrennungs- und Trocknungsanlagen. In Einzelfeuerungsanlagen, z. B. Holzöfen, kann die gewonnene elektrische Leistung zum energieautarken Betrieb einer Regelungstechnik, zur Feinstaubabscheidung oder zur Anbindung an ein Smarthome-Netzwerk genutzt werden. Eingesetzt als Peltier-Kühler (RO-Pelt) ist eine sehr präzise, schnelle und lokale Temperierung von in Rohren fließenden Medien möglich. Auch hier kommen dieselben Vorteile zum Tragen: kostengünstiger Aufbau, geringer Platzbedarf, kleine thermische Übergangswiderstände durch direkte Ankopplung an das Rohr und flexible Anpassung des Aufbaus.

Projekt RoteP, gefördert von der Fraunhofer-Gesellschaft (Discover-Projekt)

Module mit runder Bauform ermöglichen einen flexiblen Aufbau.



Neuer Messplatz für Peltier-Module: Hier charakterisieren wir Module unterschiedlicher Größe und Bauformen.

Messlabor für Peltier-Module

Peltier-Module sind als Wärmepumpen seit Jahrzehnten im Einsatz – zur Kühlung in Camping- und AutoKühlboxen oder Weinkühlern oder zur Temperierung von Prozessen, etwa bei der Vervielfältigung von DNA-Abschnitten. Besonders in der Biotechnologie und Medizintechnik müssen Peltier-Kühler hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit erfüllen. An einem neu eingerichteten Modul-Messplatz charakterisieren wir Peltier-Module bezüglich aller wesentlichen Charakteristika. Gemessen werden u. a. thermoelektrische und thermische Leistung sowie der temperaturabhängige Innenwiderstand der Module. Aus diesen Daten werden die für Peltier-Module typischen Datenblatt-Kurven wie z. B. temperatur- und stromabhängige Kühlleistung, COP und »waste heat« erstellt.

Der Messplatz ist für Module unterschiedlicher Größe und Bauform ausgelegt. Abhängig vom angelegten Strom und vorhandenem Temperaturunterschied werden die Wärmeströme gemessen. Hierzu werden die Module zusammen mit zwei Wärmestrommetern zwischen Wärmetauscher eingespannt und mit einem vorgegebenen Druck angepresst. Optional kann die Temperaturverteilung der äußersten Schenkelpaare in Richtung der

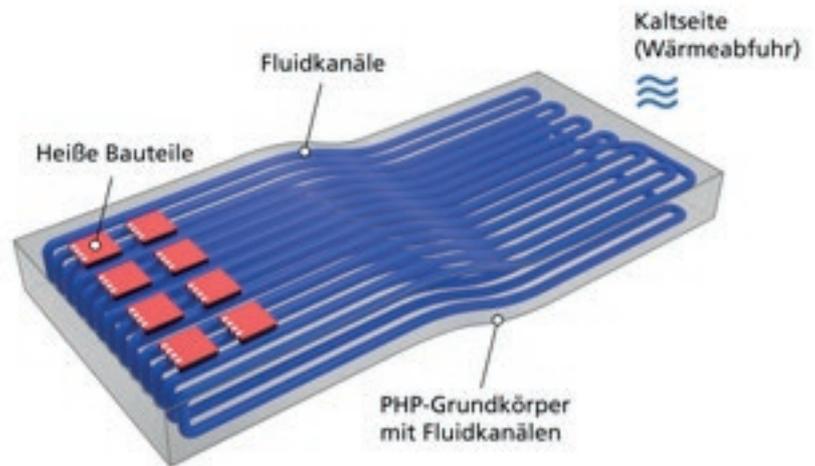
Z-Achse mit einer Infrarot-Kamera überwacht werden. In der Messkammer können mit Blick auf bestimmte Anwendungen unterschiedliche Atmosphären – von Vakuum bis Überdruck bei unterschiedlichen Gasen – erzeugt werden. Auch Langzeituntersuchungen sind möglich. Hierzu werden Temperatur-, Druck-, und Stromrampen nach einem definierten Testprotokoll angelegt, um etwaige Versagensmechanismen identifizieren und bewerten zu können.

Aus dem 3D-Drucker: pulsierende Heatpipes zur effektiven Entwärmung

Flach, kompakt und gleichzeitig sehr effektiv: Pulsierende Heatpipes (PHPs) haben einige Vorteile gegenüber konventionellen Wärmerohren und können auch mit Dicken von lediglich 2–3 mm hohe Wärmemengen abführen. Mit einer neuen Methode, die Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer IWU entwickelt hat, lassen sich die PHPs in Zukunft effizienter fertigen: Das Forschungsteam hat erstmals PHPs aus Edelstahl mit mehrlagigen Kanalstrukturen in einem additiven Fertigungsprozess hergestellt. Das 3D-Druckverfahren ermöglicht es sogar, die PHPs direkt mitsamt Kühlkörper in tragende

Bauteile oder Gehäuse zu integrieren und somit platzsparend und ohne störende Wärmewiderstände an den Materialübergängen einzusetzen.

Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung: Mehrlagige Fluidkanalstrukturen sind mit deutlich weniger Fertigungsaufwand realisierbar. Diese Strukturen sind nötig, um Bauteile mit hohen Wärmeleistungsdichten von bis zu mehreren 100 W/cm^2 effizient zu erwärmen. Bei der additiven Fertigung entfallen aufwändige und kostenintensive Herstellungsschritte wie das Fräsen der Fluidkanäle und das Vakuumlöten. Neben Edelstahl können auch leichtgewichtige Aluminiumlegierungen verwendet werden. Das Team hat die additiv gefertigten PHPs als Demonstrator aufgebaut und charakterisiert. Das Ergebnis überzeugt: Die gedruckten PHPs führten Wärme aus heißen Bauteilen effektiv ab.



Pulsierende Heatpipes (PHPs) mit mehrlagiger Fluidkanalstruktur führen Wärme in elektronischen Bauteilen sehr effektiv ab. Nun lassen sich die PHPs auch in einem additiven Verfahren herstellen.

Thermische Energiewandler | Messen & Veranstaltungen

InnoCool-Workshop

07.04.2022

Abschluss-Veranstaltung der Workshop-Reihe zum Thema kalorische Kälte- und Klimatechnik

Progetto Fuoco

Internationale Fachmesse für Wärme- und Energieerzeugungsanlagen und -geräte mit Holzverbrennung
04.–07.05.2022

Wir stellten einen innovativen elektrischen Abscheider für die Reduktion von Emissionen in Feuerungsanlagen vor.

InnoTrans

Internationale Leitmesse für Verkehrstechnik
20.–23.09.2022

Wir präsentierten erstmalig den »Mobile Cooling Trolley«, einen thermoelektrisch gekühlten Gastrom-Wagen für den Einsatz im Zug.

Chillventa

Weltleitmesse der Kältetechnik
11.–13.10.2022

Auf unserem Gemeinschaftsstand mit Fraunhofer ISE waren wir mit dem Thema kalorische Kühlsysteme und Wärmepumpen vertreten.

electronica

Weltleitmesse und Konferenz der Elektronik
15.–18.11.2022

Auf der electronica präsentierten wir Lösungen für das thermische Management auf Basis von Heatpipes und Peltier-Elementen sowie Techniken für die Materialanalyse mithilfe von 3D-Computertomographie.

Fokus Elektrokalorische Wärmepumpen

Kalorik statt Kompressor: Eine werkstoffbasierte Technologie soll Wärmepumpen effizienter machen.



Elektrokalorische Komponenten: Für eine besonders effiziente Wärmeabfuhr wurden keramische Mehrlagenkomponenten in eine Heatpipe integriert.

»Verdichten« lautet das Credo bei der Kälteerzeugung, seit Carl von Linde 1873 sein Patent für eine Kälteerzeugungsmaschine anmeldete. Kühlschränke, Klimaanlage und Wärmepumpen zum Heizen arbeiten bis heute nach dem Kompressor-Prinzip. Als Alternative zum Kompressor richtet sich das Augenmerk verschiedener Forschungsgruppen seit einigen Jahren auf kalorische Kühlsysteme. Hier wurden – auch am Fraunhofer IPM – in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte gemacht. Kompressoren erreichen in der Regel lediglich 40 bis 50 Prozent des sogenannten Carnot-Limits, also des maximal möglichen Wirkungsgrads. Bei kalorischen Wärmepumpen liegt die theoretisch erreichbare Leistungszahl deutlich höher. Zudem arbeiten die meisten Kompressoren noch immer mit brennbaren oder auch klimaschädlichen Kältemitteln.

Keine aufwändigen Materialien, kein Verschleiß

Fraunhofer IPM forscht seit mehr als sieben Jahren auf dem Gebiet der Kalorik und hat

bereits durchschlagende Erfolge bei der Entwicklung magneto- und elastokalorischer Wärmepumpen erzielt und in renommierten Fachzeitschriften publiziert. Auch das Thema elektrokalorische Wärmepumpen nimmt nun Fahrt auf: Im Fraunhofer-Leitprojekt ELKaWe arbeiten wir als Projektkoordinator seit 2019 gemeinsam mit fünf weiteren Fraunhofer-Instituten an der Entwicklung der Technologie. Unter den kalorischen Technologien ist die Elektrokalorik (EK) am wenigsten erforscht. Dabei hat sie einige spezifische Vorteile gegenüber den alternativen kalorischen Ansätzen: Elektrokalorische Systeme kommen ohne teure Materialien und aufwändige Mechanik aus – ein Plus in puncto Kosten, Baugröße und Langzeitstabilität.

Wie in allen kalorischen Systemen funktioniert das Pumpen von Wärme auch in EK-Systemen mithilfe kalorischer Materialien: In diesem Fall sind es Keramiken oder Polymere. Sie erwärmen sich beim Anlegen eines elektrischen Felds und kühlen ab, sobald das Feld entfernt wird. Die beim Anlegen des elektrischen



Aufbau einer elektrokalorischen (EK) Wärmepumpe: Die EK-Komponenten bestehen aus den EK-Materialien (1) inklusive Elektroden (2) und Beschichtung (3). Mehrere dieser Komponenten (4) sowie Rückschlagventile (5) und elektrische Zuleitung (6) werden in ein gasdichtes Gehäuse (7) integriert und zu einem EK-Segment zusammengefügt. Mehrere solcher EK-Segmente (8) in Reihe geschaltet ergeben das EK-System (9) und zusammen mit einer Drossel (10), dem Verdampfer (11) und dem Kondensator (12) eine EK-Wärmepumpe.

Felds entstehende Wärme wird über eine Wärmesenke abgeführt, sodass das Material wieder auf die Ausgangstemperatur abkühlt. Sobald das Feld entfernt wurde, kann das Material also thermische Energie aus einer Wärmequelle aufnehmen. Dieser zu einem sehr hohen Grad reversible Effekt lässt sich als elektrokalorischer Zyklus etablieren – und damit als Basis für sehr energieeffiziente Kühlsysteme und Wärmepumpen.

Hohe Zyklusfrequenz: schneller Wärmeübertrag für hohe Leistungsdichte

Trotz der technologischen Vorteile wird sich die Elektrokalorik am Markt nur dann etablieren können, wenn sie auch von den Kosten her konkurrenzfähig ist. Dies setzt Systeme mit hoher Leistungsdichte voraus, d. h.: Mit möglichst wenig EK-Material muss möglichst viel Wärme gepumpt werden. Wieviel Wärme ein solches System pumpen kann, hängt von der Zyklusfrequenz ab. Und diese wiederum hängt davon ab, wie schnell die Wärme vom kalorischen Material abgeführt werden kann. Ein am Fraunhofer IPM entwickeltes, patentiertes Konzept für den Wärmeübertrag funktioniert nach dem Prinzip einer Heatpipe durch Verdampfen und Kondensieren einer Flüssigkeit. So wird Wärme bis zu hundertfach schneller übertragen als bei üblichen Entwärmungskonzepten, die z. B. auf dem aktiven

Pumpen von Flüssigkeiten basieren. Das Konzept wurde bereits in am Institut entwickelten elektrokalorischen Systemen erprobt und erreicht Zyklusfrequenzen von bis zu 10 Hz.

Entscheidend: Material und Systemaufbau

Für die EK-Wärmepumpe der Zukunft müssen vor allem zwei Dinge optimiert werden: Die Güte des EK-Materials und der Systemaufbau, der optimal auf das Material abgestimmt sein muss. Im Rahmen des EIKaWe-Projekts arbeiten die Forschungspartner an der Realisierung von EK-Funktionsmaterialien mit hoher Gütezahl und entsprechenden Herstellungsprozessen. Weitere Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung der Elektronik, die Beschichtung der Komponenten sowie Zuverlässigkeitsprüfungen. Fraunhofer IPM ist verantwortlich für Auslegung, Bau und Charakterisierung des Systems mit Blick auf den optimierten Wärmeübertrag. Bislang erreichte das Team mit einem Laboraufbau eine Leistungsdichte von 1,8 W pro eingesetztem Gramm des elektrokalorischen Materials – mehr als eine Größenordnung über bisher bekannten vergleichbaren Systemen.



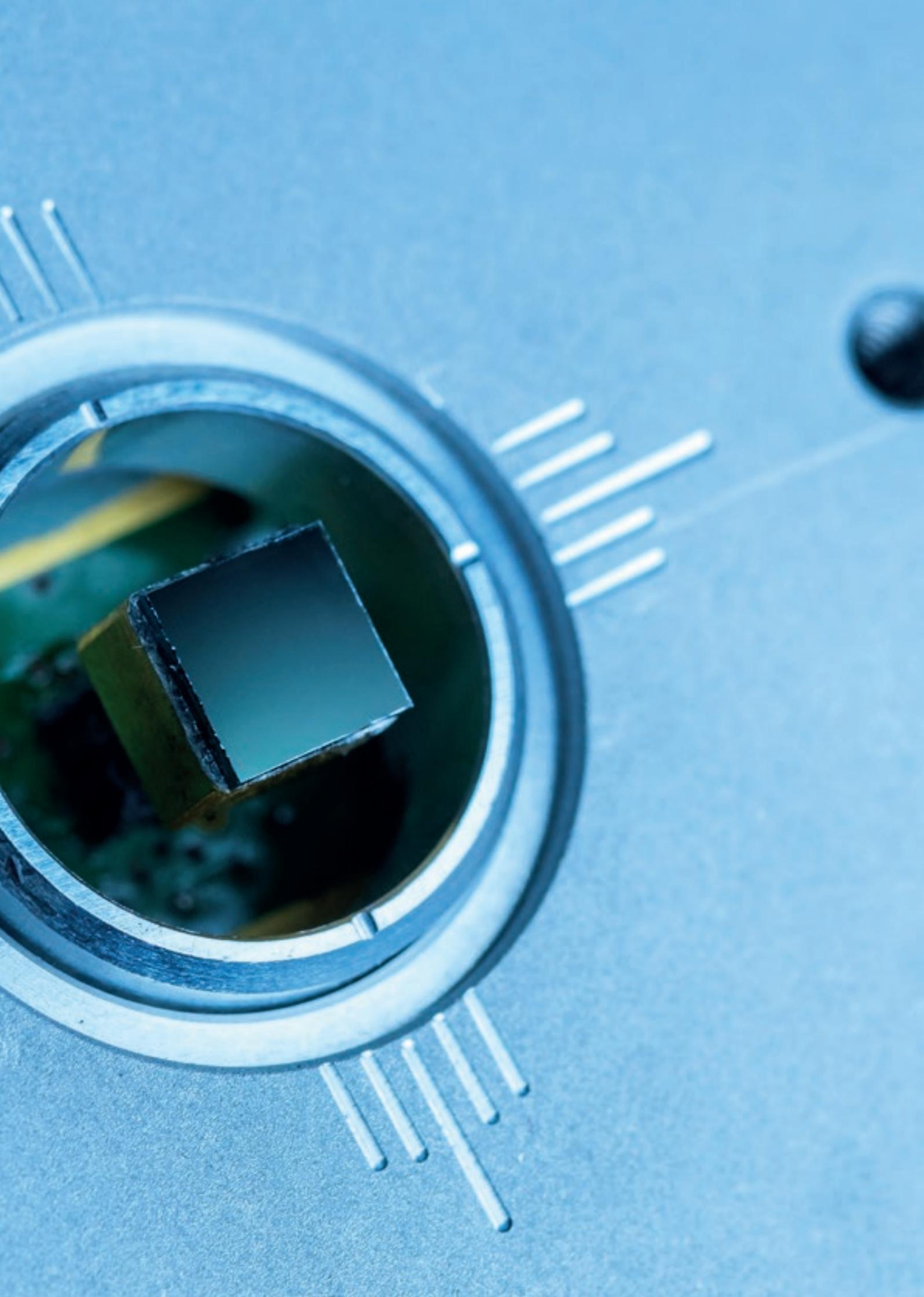
Effizient und ohne bewegliche Teile heizen und kühlen – das ist nur mit Elektrokalorik möglich!«

*Dr. Kilian Bartholomé,
Gruppenleiter*



Projektwebseite EIKaWe

Index Fraunhofer IPM



Publikationen 2022

Buchta, D.; Adolph, S.; Brandenburg, A.

A cheap, fast, and versatile illumination system for technical cleanliness

Georges, M. P.; Popescu, G.; Nicolas Verrier, N. [Hrsg.]: Unconventional Optical Imaging III. Proceedings of SPIE 12136, 1213618 (2022)

Moench, S.; Mansour, K.; Reiner, R.; Basler, M.; Waltereit, P.; Quay, R.; Molin, C.; Gebhardt, S.; Bach, D.; Binninger, R.; Bartholome, K.

A GaN-based DC-DC Converter with Zero Voltage Switching and Hysteretic Current Control for 99% Efficient Bidirectional Charging of Electrocaloric Capacitive Loads

PCIM Europe 2022, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Proceedings. doi:10.30420/565822251 (2022)

Suarez-Ibarrola, R.; Kriegmair, M.; Waldbillig, F. et al.

A novel endoimaging system for endoscopic 3D reconstruction in bladder cancer patients

Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies 31, 34-41 (2022)

Spanier, M.; Pawlikowski, J.; Ziesche, S.; Kappert, H.; Ostmann, A.; Jäggle, M.; Schneider-Ramelow, M.

A novel hermetic encapsulation approach for the protection of electronics in harsh environments

IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). Conference Proceedings, 145-149 (2022)

Vierhub-Lorenz, V.; Kellner, M.; Zipfel, O.; Reiterer, A.

A Study on the Effect of Multispectral LiDAR Data on Automated Semantic Segmentation of 3D-Point Clouds

Remote Sensing 14, 6349 (2022)

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

Accurate, high-resolution dispersive Fourier-transform spectroscopy with undetected photons

Optics Continuum 1, 189-196 (2022)

Breunig, I.; Minet, Y.; Seyler, T.; Bertz, A.; Holl, P.; Basler, M.; Zappe, H.; Buse, K.

Adiabatic frequency conversion in microresonators for multi-wavelength holography

Ilchenko, V. S.; Armani, A. M.; Sheldakova, J. V. [Hrsg.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIV. Proceedings of SPIE 11987, 1198707 (2022)

Strahl, T.; Herbst, J.; Bergau, M.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Aktive optische Bildgebung zum Aufspüren von kleinen Methanlecks

Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 440 (2022)

Gassner, S.; Schaller, R.; Eberl, M.; Koblinski, C. v.; Essing, S.; Ghaderi, M.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Anodically Bonded Photoacoustic Transducer: An Approach towards Wafer-Level Optical Gas Sensors

Sensors 22, 685 (2022)

Reiterer, A.; Olshausen, P. v.; Maus, P.; Frey, S.; Schwarzer, S.

Aufbau und Kalibration eines komplexen mobilen Multisensorsystems - Ein Überblick

Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022: Beiträge zum 208. DVW-Seminar. DVW-Schriftenreihe 101, 53 (2022)

Reiterer, A.; Störk, D.; Wäschle, K.

Auswertung von UAV-Punktwolken mit KI

UAV 2022 – Innovation und Praxis: Beiträge zum 195. DVW-Seminar. DVW-Schriftenreihe 100, 59 (2022)

Förste, A.; Schmid-Schirling, T.; Körber, T.

Bauteile per Fingerabdruck im Sekundentakt zurückverfolgen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 62(5), 40-42 (2022)

Schmid-Schirling, T.

Bauteil-Rückverfolgung rotationssymmetrischer Objekte

JOT. Journal für Oberflächentechnik 62(9), 26-27 (2022)

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

$\chi^{(2)}$ frequency comb generation based on optical parametric oscillation in a lithium niobate microresonator

Ilchenko, V. S.; Armani, A. M.; Sheldakova, J. V. [Hrsg.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIV. Proceedings of SPIE 11987, 119870A (2022)

Schütz, J.; Martin, A.; Laschinger, S.; Birkl, G.

Coherent dynamics in a five-level atomic system

Journal of Physics. B 55, 234004 (2022)

Laskin, G.; Heider, J.; Schnetzler, R.; Fratz, M.; Schiller, A.; Bertz, A.; Laufenberg, M.; Carl, D.

Combined electronic speckle pattern interferometry and digital holography for analysis of deformations in magnetic shape memory actuators

Georges, M. P.; Popescu, G.; Nicolas Verrier, N. [Hrsg.]: Unconventional Optical Imaging III. Proceedings of SPIE 12136, 121360X (2022)

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

Compact, large aperture 2D deflection optic for LiDAR underwater applications

Bostater Jr., C. R.; Neyt, X. [Hrsg.]: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2022. Proceedings of SPIE 12263, 1226306 (2022)

Baliozian, P.; Corhan, P.; Hess, T.; Bartholome, K.; Wöllenstein, J.
Concept of a Magnetocaloric Generator with Latent Heat Transfer for the Conversion of Heat into Electricity
Energy Technology 10, 2100891 (2022)

Voigt, I.; Lütke, N.; Thüsing, K.; Winkler, M.; Drossel, W.-G.
Development and Examination of an Internally Switchable Thermosiphon
Energies 15, 3891 (2022)

Grümbel, F.; Vahlenkamp, M.; Weber, N.; Lambrecht, A.
**Die NAMUR Technologie-Roadmap "Prozess-Sensoren 2027+" .
Thesen und Anwendungsbeispiele**
Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung.
ITG-Fb. 303, 270 (2022)

Reiterer, A.; Merkle, D.; Schmitt, A.
Digitalisierung von Bestandsbauwerken mit KI
Bautechnik 6, 425-432 (2022)

Conrad, F.; Blug, A.; Regina, D. J.; Kerl, J.; Bertz, A.; Kontermann, C.;
Oechsner, M.
**Direction- and path-independent DIC strain-field evaluation for
uniaxial and biaxial fatigue crack growth investigations**
Ninth International Conference on Low Cycle Fatigue (LCF9), LCF9-
2022-048 (2022)

Groß, H.; Ekici, Y.; Poschmann, M.; Groeneveld, D.; Dankwort, T.;
König, J.; Bensch, W.; Kienle, L.
**Does a Low Amount of Substituents Improve the Thermoelectric
Properties of $\text{Cr}_{2-x}\text{M}_x\text{S}_3$ (M = Ti, V, Sn)?**
Journal of Electronic Materials 51, 3510-3520 (2022)

Groß, H.; Poschmann, M.; Groeneveld, D.; König, J. D.; Kienle, L.;
Bensch, W.
**Does Low-Level Substitution Aid in Improving Thermoelectric
Properties? A Case Study of $\text{M}_{0.1}\text{Ni}_{0.9}\text{Cr}_2\text{S}_4$ (M = Mn, In)**
Advanced Engineering Materials 24, 2100828 (2022)

Sturman, B.; Podivilov, E.; Szabados, J.; Breunig, I.
**Dual backgrounds and their stability during frequency comb and
second harmonic generation in $\chi^{(2)}$ microresonators**
Journal of the Optical Society of America. B 39, 378-387 (2022)

Minet, Y.; Herr, S.; Breunig, I.; Zappe, H.; Buse, K.
**Electro-optically tunable single-frequency lasing from neodymium-
doped lithium niobate microresonators**
Optics Express 30, 28335 (2022)

Mönch, S.; Reiner, R.; Waltereit, P.; Molin, C.; Gebhardt, S.; Bach, D.;
Binninger, R.; Bartholome, K.
**Enhancing Electrocaloric Heat Pump Performance by Over 99%
Efficient Power Converters and Offset Fields**
IEEE Access 10, 46571 (2022)

Schwarz, D.; Binninger, R.; Maiwald, D.; Bucht, A.; Weck, C.; Bartholome,
K.; Schäfer-Welsen, O.
Enhancing the dynamics of SMA actuators by using latent heat
ACTUATOR 2022; International Conference and Exhibition on New
Actuator Systems and Applications, 158-161 (2022)

Hauer, B.; Behrendt, V.; Brandenburg, A.
Erregernachweis: Ohne PCR das richtige Antibiotikum wählen
Labor-Praxis, 2, 18-20 (2022)

Fratz, M.; Seyler, T.; Schiller, A.; Bertz, A.; Carl, D.
**Extended depth of field with absolute position detection in
multi-wavelength digital holography**
Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2022, W1A.7
(2022)

Kellner, M.; Stahl, B.; Reiterer, A.
Fused Projection-Based Point Cloud Segmentation
Sensors 22, 1139 (2022)

Mönch, S.; Reiner, R.; Mansour, K.; Basler, M.; Waltereit, P.; Quay, R.;
Bartholome, K.
**GaN Power Converter Applied to Electrocaloric Heat Pump Proto-
type and Carnot Cycle**
IEEE 9th Workshop on Wide Bandgap Power Devices & Applications
(WiPDA), 186-191 (2022)

Reiterer, A.
Geodäsie und Nachhaltigkeit
AVN. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 129, 1 (2022)

Blug, A.; Bertz, A.; Carl, D.; Conrad, F.; Kontermann, C.; Oechsner, M.
**GPU-basierte Bildkorrelation für uni- und biaxiale Risswach-
tumsversuche**
Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand. Prüftechnik - Kennwert-
ermittlung - Schadensvermeidung. 40. Tagung Werkstoffprüfung,
361-376 (2022)

Stemmler, S.; Merkle, D.; Reiterer, A.
**Hochpräzises Laserscanning aus der Luft – Neue Anwendungsfel-
der durch die Fusion von 2D-Bilddaten und 3D-LiDAR-Daten**
UAV 2022 – Innovation und Praxis: Beiträge zum 195. DVW-Seminar.
DVW-Schriftenreihe 100, 69 (2022)

- Kappeler, M.; Basler, C.; Brandenburg, A.; Carl, D.; Wöllenstein, J.
Homogeneity Measurements of Li-Ion Battery Cathodes Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
 Sensors 22, 8816 (2022)
- Winkler, M.; Schipper, J.; Teicht, C.; Corhan, P.; Polyzoidis, A.; Bartholome, K.; Schäfer-Welsen, O.; Pappert, S.
Improved Thermal Switch Based on an Adsorption Material in a Heat Pipe
 Energies 15, 3271 (2022)
- Conrad, F.; Kontermann, C.; Blug, A.; Bertz, A.; Carl, D.; Oechsner, M.
Influence of Multiaxial Far Field Loadings on the Fatigue Crack-Growth Behaviour by Using Corner-Crack and Cruciform Specimen
 ASME Turbo Expo 2022. Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Proceedings, 8A, GT2022-79394, V08AT24A001 (2022)
- Isserstedt-Trinke, A.; Lambrecht, A.; Bolwien, C.; Fuhr, H.; Sulz, G.; Magi, A.; Biermann, S.; Wöllenstein, J.
Kompaktes ATR-Sensormodul für die Flüssigkeitsanalyse
 Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 275 (2022)
- Herbst, J.; Rademacher, S.; Strahl, T.; Maier, E.; Wöllenstein, J.
Laser-basierte Ferndetektion von Propan und Methan
 Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 418 (2022)
- Lohfink, M.-A.; Miznazi, D.; Stroth, F.; Müller, C.
Learn Spatial! Introducing the MARBLE-App - A Mixed Reality Approach to Enhance Archaeological Higher Education
 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), 435-440 (2022)
- Weber, C.; Yassine, H.; Eberhardt, A.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
LED-basierter, miniaturisierter photoakustischer CO₂-Sensor zur Umgebungsluftüberwachung
 Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 53 (2022)
- Ianniciello, L.; Bartholome, K.; Fitger, A.; Engelbrecht, K.
Long life elastocaloric regenerator operating under compression
 Applied Thermal Engineering 202, 117838 (2022)
- Abel, C.; Ayres, N. J.; Ban, G. et al.
Mapping of the magnetic field to correct systematic effects in a neutron electric dipole moment experiment
 Physical Review. A 106, 032808 (2022)
- Blug, A.; Durmaz, A. R.; Straub, T.
Material Testing with Optically Pumped Magnetometers
 Neugebauer, R. [Hrsg.]: Quantum Technologies. 95-109 (2022)
- Blug, A.; Durmaz, A. R.; Straub, T.
Materialprüfung mit optisch gepumpten Magnetometern
 Neugebauer, R. [Hrsg.]: Quantentechnologien. 109-125 (2022)
- Pernau, H.-F.; Yurchenko, O.; Bierer, B.; Jägle, M.; Wöllenstein, J.; Dreiner, S.; Naumann, F.
MEMS-basierte Mikro-Pellistoren zur Detektion von Methan
 Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 29 (2022)
- El-Safoury, M.; Weber, C.; Yassine, H.; Wöllenstein, J.; Schmitt, K.
Miniaturisierter transkutaner Sensor für die Überwachung der CO₂-Blutgaswerte
 Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 426 (2022)
- Stahl, B.; Reiterer, A.
Mobile mapping platform with integrated end-to-end data processing chain for smart city applications
 Erbertseder, T.; Chrysoulakis, N.; Zhang, Y. [Hrsg.]: Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VII. Proceedings of SPIE 12269, 1226902 (2022)
- Olshausen, P. v.; Stahl, B.; Blattmann, S.; Reiterer, A.
Mobile mapping system for high-resolution imaging
 Erbertseder, T.; Chrysoulakis, N.; Zhang, Y. [Hrsg.]: Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VII. Proceedings of SPIE 12269, 1226907 (2022)
- Bachmann, N.; Schwarz, D.; Bach, D.; Schäfer-Welsen, O.; Koch, T.; Bartholome, K.
Modeling of an Elastocaloric Cooling System for Determining Efficiency
 Energies 15, 5089 (2022)
- Stemmler, S.; Kaufmann, T.; Bange, M. J.; Merkle, D.; Reiterer, A.; Klemt-Albert, K.; Marx, S.
Multisource-data-fusion for the digitization of critical infrastructural elements
 Erbertseder, T.; Chrysoulakis, N.; Zhang, Y. [Hrsg.]: Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VII. Proceedings of SPIE 12269, 1226905 (2022)

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

Multiwavelength digital holography with meter scale synthetic wavelengths at micrometer precision

Groot, P. J. de; Leach, R. K.; Picart, P. [Hrsg.]: Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology II. Proceedings of SPIE 12137, 121370R (2022)

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

Noninvasive Magnetic-Marking-Based Flow Metering with Optically Pumped Magnetometers

Applied Sciences 12, 1275 (2022)

Koss, P. A.; Durmaz, A. R.; Blug, A.; Laskin, G.; Pawar, O. S.; Thiemann, K.; Bertz, A.; Straub, T.; Elsässer, C.

Optically pumped magnetometer measuring fatigue-induced damage in steel

Applied Sciences 12, 1329 (2022)

Merkle, D.; Reiterer, A.

Overview of 3D point cloud annotation and segmentation techniques for smart city applications

Erbertseder, T.; Chrysoulakis, N.; Zhang, Y. [Hrsg.]: Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VII. Proceedings of SPIE 12269, 1226903 (2022)

Bachmann, N.; Fitger, A.; Unmüßig, S.; Bach, D.; Schäfer-Welsen, O.; Koch, T.; Bartholome, K.

Phenomenological model for first-order elastocaloric materials

International Journal of Refrigeration 136, 245-253 (2022)

Hauer, B.; Buchta, D.

Prozessbegleitender Nachweis ultradünner Beschichtungen

JOT. Journal für Oberflächentechnik 63(1), 34-37 (2022)

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

Pump tuning of a mid-infrared whispering gallery optical parametric oscillator

Optics Express 30, 41084 (2022)

Bertz, A.

Quantenmagnetometrie hilft, Materialschädigungen früher zu detektieren

Quality Engineering 41(3), 46-48 (2022)

Goldschmidt, J.; Nitzsche, L.; Wolf, S.; Lambrecht, A.; Wöllenstein, J.

Rapid Quantitative Analysis of IR Absorption Spectra for Trace Gas Detection by Artificial Neural Networks Trained with Synthetic Data

Sensors 22, 857 (2022)

Bormann, P.; Dorra, T.; Stahl, B.; Fellner, D.

Real-time indexing of point cloud data during LiDAR capture

Vangorp, P.; Turner, M. J. [Hrsg.]: Computer Graphics & Visual Computing (CGVC). doi:10.2312/cgvc.20221173 (2022)

Schmitt, K.; Sendelbach, M.; Strahl, T.; Weber, C.; Wöllenstein, J.

Resonante photoakustische Zellen zum laserbasierten Methanachweis

Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 22 (2022)

Kappert, H.; Schopferer, S.; Saeidi, N.; Ziesche, S.; Olowinsky, A.; Naumann, F.; Jäggle, M.; Spanier, M.

Sensor Systems for Extremely Harsh Environments

Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 21. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fb. 303, 110 (2022)

Kappert, H.; Schopferer, S.; Saeidi, N.; Döring, R.; Ziesche, S.; Olowinsky, A.; Naumann, F.; Jäggle, M.; Spanier, M.; Grabmaier, A.

Sensor Systems for Extremely Harsh Environments

Journal of Microelectronics and Electronic Packaging 19, 101-114 (2022)

Pannek, C.; Lambrecht, A.; Wöllenstein, J.; Buse, K.; Keßler, A.; Tschuncky, R.; Jäckel, P.; Quirin, S.; Oeckl, S.; Youssef, S.; Herrmann, H.-G.

Sensorik und Sicherheit

Neugebauer, R. [Hrsg.]: Wasserstofftechnologien. 367-402 (2022)

Binnering, R.; Pernau, H.-F.; Schäfer-Welsen, O.; Triebel, F.; Polte, M.; Uhlmann, E.

Simulativer Vergleich tubularer Peltierelemente: FEM-Simulation tubularer Peltierelemente zur Temperierung von Werkzeugmaschinenkomponenten

WT Werkstattstechnik 112, 451-457 (2022)

Yurchenko, O.; Bierer, B.; Isserstedt-Trinke, A.; Jäggle, M.; Biermann, S.; Wöllenstein, J.

Size dependent sensor response for cobalt oxide-based MEMS pellistors

Conference on Micro and Nano Engineering (MNE Eurosensors). doi:10.24406/publica-861 (2022)

Negassi, M.; Wagner, D.; Reiterer, A.

Smart(Sampling)Augment: Optimal and Efficient Data Augmentation for Semantic Segmentation

Algorithms 15, 165 (2022)

Hanisch, P.; Gangelhoff, J.; Olshausen, P. v.; Eicher, L.; Reiterer, A.

Thermal optimization of a laser scanner

Stein, K.; Gladysz, S. [Hrsg.]: Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems V. Proceedings of SPIE 12266, 1226608 (2022)

Groeneveld, D.; König, J. D.; Poschmann, M.; Groß, H.; Bensch, W.; Kienle, L.; Wöllenstein, J.

Time-dependent investigation of a mechanochemical synthesis of bismuth telluride-based materials and their structural and thermoelectric properties

Royal Society Open Science 9, 210714 (2022)

Schmid-Schirling, T.; Koerber, T.; Förste, A.

Trace Components by Fingerprint Every Second

IST International Surface Technology 15(2), 44-47 (2022)

Nitzsche, L.; Goldschmidt, J.; Lambrecht, A.; Wöllenstein, J.

Two-component gas sensing with MIR dual comb spectroscopy: Fast and precise monitoring of concentrations despite complex spectra

tm – Technisches Messen 89, 50-59 (2022)

Thiemann, K.; Blug, A.; Koss, P.; Durmaz, A. R.; Laskin, G.; Bertz, A.; Kühnemann, F.; Straub, T.

Using optically pumped magnetometers to identify initial damage in bulk material during fatigue testing

Diamanti, E.; Ducci, S.; Treps, N.; Whitlock, S. [Hrsg.]: Quantum Technologies 2022. Proceedings of SPIE 12133, 121330F (2022)

Reiterer, A.

Vollautomatische Segmentierung von 2D- und 3D-Mobile-Mapping-Daten zur zuverlässigen Modellierung von Oberflächenstrukturen mittels Deep Learning

Grunau, W. [Hrsg.]: Künstliche Intelligenz in Geodäsie und Geoinformatik. 69-82 (2022)

Waasem, N.; Ngo, J.; Zeman, M.; Kießling, J.; Kühnemann, F.; Hens, K.

Widely tunable CW optical parametric oscillators for optical characterization of quantum systems

Figer, D. F. [Hrsg.]: Photonics for Quantum. Proceedings of SPIE PC12243, PC122430V (2022)

Berichte 2022

Schmid-Schirling, T.

Adaptive, prozessübergreifende Qualitätsregelkreise mittels photonischer Sensoren zur Identifikation und Qualitätsmessung von Hochpräzisionsbauteilen (ProIQ); Teilvorhaben: Cloud-basiertes, markierungsfreies Track & Trace-Verfahren für Präzisionsbauteile (ProIQ-FingerPrint)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.07.2018 – 31.12.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 29 S.

Olshausen, P. v.; Gangelhoff, J.

Drone-based Tunnel Inspection System (E! 113673 DoTIS); Teilvorhaben: Lightweight tunnel profiler (LTP)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.06.2020 – 31.05.2022
Freiburg/Brsg., 2022, 19 S.

Fitger, A.; Bartholome, K.; Bachmann, N.; Unmüßig, S.; Winkler, M.; Mahlke, A.

Elastokalorik: Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel zum Heizen und Kühlen (ElastoCool)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.08.2018 – 31.12.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 66 S.

Koschel, A.; Müller, C.

Hochauflösende Überflutungsberechnungen auf Basis KI-basierter 3D-Objekterkennung in Drohnendaten (3D-Hydra)

Schlussbericht
Freiburg/Brsg., 2022, 40 S.

Sperling, M.

KI-basierte dynamische Sicherheitsinformationen in Navigationssystemen (GOSAIFE)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2021 – 31.12.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 18 S.

Seyler, T.

KI-basierte Qualitätskontrolle von Hochpräzisions-Drehteilen (HOLO-KI); Teilvorhaben: Holographisch gemessene 3D-Daten mit selbstlernender, KI-basierter Bildverarbeitung auswerten – Pseudoausschuss in der Serienproduktion reduzieren

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.01.2021 – 31.12.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 11 S.

Steiger, D.

Operation Oriented Tunnel Inspection System (E! 12267 OpOrTunity); Teilvorhaben: Entwicklung eines Multisensor Messsystems (MSS)

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.10.2018 – 30.09.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 15 S.

Hauer, B.

Signal-Booster für Fluoreszenz-Assays in der molekularen Diagnostik (SiBoF); Teilvorhaben: Entwicklung eines Demonstrators zur automatisierten Verarbeitung und Auslesung von plasmatisch verstärkten Fluoreszenz-Assays

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.10.2017 – 30.09.2021
Freiburg/Brsg., 2022, 25 S.

Conrad, F.; Kontermann, C.; Blug, A.

Verification, development and usage of models to assess the crack behaviour under multiaxial component near conditions (ARIMA)

Schlussbericht; Berichtszeitraum 01.10.2018 – 31.03.2022
Proceedings of the FVV, R603, 2022, 35 S.

Erteilte Patente 2022

Bartolomé, K.; König, J.

Klimatisierungseinrichtung mit zumindest einem Wärmerohr, insbesondere einem Thermosiphon

BR 112017000350-3

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

Verfahren und Vorrichtung zum Betrieb kreisprozessbasierter Systeme

US 11454429 B2

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

Verfahren und Vorrichtung zur nichtlinearen Spektroskopie an einer Probe

EP 3792606 B1

Anders, J.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Fratz, M.

Verfahren und Vorrichtung zum optischen Vermessen eines ersten Oberflächenabschnitts eines Prüflings

EP 3581883 B1

Herbst, J.; Lambrecht, A.; Maier, E.; Rademacher, S.; Strahl, T.

Vorrichtung und Verfahren zur Ferndetektion eines Zielgases

EP 3816609 B1

Dimopoulos, N.; Höfler, H.; Reiterer, A.; Wölfelschneider, H.

Vorrichtung zum Aufnehmen von überlagerten Distanz- und Intensitätsbildern

CA 2936281 C

Doktorarbeiten 2022

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

Doppel-Frequenzkamm-Spektrometer für die Spurengasdetektion

[Freiburg, Univ., Diss., 2022]

Groeneveld, D.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

Einfluss der Präparation auf die strukturellen und physikalischen Eigenschaften von Chromsulfiden

[Freiburg, Univ., Diss., 2022]

Bernhardsgrütter, R. E.; Wöllenstein, J. [Erstgutachter]

Fluid Independent Thermal Flow Sensor Using a Combination of the 3 Ω -Method and Constant Temperature Anemometry

[Freiburg, Univ., Diss., 2022]

Aachen, Shaker-Verlag. Gas Sensors 13 (2022)

Szabados, J.; Breunig, I. [Erstgutachter]

Frequenzkammerzeugung mittels Frequenzverdopplung in Lithiumniobat-Flüstergalerieresonatoren

[Freiburg, Univ., Diss., 2022]

Freiburg, FreiDoc plus, urn:nbn:de:bsz:25-freidok-2286147

Lindner, C.; Kühnemann, F. [Erstgutachter]

Nonlinear interferometers based on spontaneous parametric down-conversion for Fourier-transform mid-infrared spectroscopy

[Freiburg, Univ., Diss., 2022]

Freiburg, FreiDoc plus, urn:nbn:de:bsz:25-freidok-2282295

Großprojekte Öffentliche Forschungsvorhaben 2022

Zehn öffentlich geförderte Forschungsprojekte mit einem finanziellen Volumen von mehr als einer Million Euro für Fraunhofer IPM haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über das Jahr 2022 bearbeitet.

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

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

ISLAS Intracavity-Laserspektroskopie für den hochempfindlichen Nachweis von Spurengasen
Laufzeit: 01.03.2019 – 30.09.2022
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 – 31.12.2023
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

LaserBeat Hammerschlagtest mit Licht – berührungslose und flächenhafte Inspektion von Tunneln auf Basis laserinduzierten Körperschalls
Laufzeit: 01.04.2019 – 31.12.2023
Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

EIKaWe Elektrok calorische Wärmepumpen
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

FMD-QNC Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) – Modul Quanten- und neuromorphes Computing (QNC)
Laufzeit: 01.11.2022 – 31.12.2025

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 wissenschaftlichem Niveau, um komplexe technologische Fragen aus Industrie und Wirtschaft mit Blick auf die konkrete Anwendung zu lösen. Für die Industrie sind die Institute nicht nur Innovationspartner, sondern in Kooperation mit Universitäten auch eine Quelle für den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs und damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

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

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
- Cluster Brennstoffzelle BW
- 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)
- Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V. (DHyG)
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)

- Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V. (DTG)
- Deutscher Hochschulverband (DHV)
- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)
- 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.
- Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik 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

Holger Kock, Anja Strobel

Layout und Gestaltung

Hanna Schweizer

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. 20: Fotostudio Ute Klein
S. 26: Piotr Banczerowski
S. 27 oben: Uwe Böhm

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:



2023 FEIERN
WIR JUBILÄUM:
50 JAHRE
FRAUNHOFER IPM

50a