

2018
2019
JAHRESBERICHT

MESSEN · KONTROLLIEREN · OPTIMIEREN

<< **Titelbild** Elastokalorische Materialien eignen sich für den Aufbau hocheffizienter Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen – ganz ohne schädliche Kältemittel (mehr dazu auf S. 78).

»Von der Qualitätsprüfung zur Qualitätserzeugung – messen macht's möglich«



< Prof. Dr. Karsten Buse,
Institutleiter.

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

in der industriellen Produktion trägt Messtechnik auf vielfältige Weise dazu bei, die Qualität von Produkten zu sichern. Bereits während der Fertigung werden Halbzeuge und Bauteile auf Fehler überprüft, um spätere Mängel bei größeren zusammengesetzten Geräten zu vermeiden. In der Abteilung »Produktionskontrolle« entwickeln wir dafür 3D- und 2D-Messsysteme, die Bauteile sehr schnell und präzise prüfen. Mit bis zu 100 Millionen 3D-Messpunkten pro Sekunde ermitteln die Systeme Form und Oberflächeneigenschaften selbst komplexer Bauteile. Basierend auf solchen Messungen lassen sich Schlechteile identifizieren, die dann recycelt oder nachbearbeitet und erneut geprüft werden.

In den letzten Jahren sind nun viele Messverfahren in puncto Geschwindigkeit und Robustheit so viel besser geworden, dass Messungen nicht mehr nur als isolierte Prüfung nach, sondern auch schon während der Produktion erfolgen können. Durch geschickte Regelschleifen macht moderne Inline-Messtechnik es möglich, Produktionsschwankungen zu kompensieren, die z. B. durch Werkzeugverschleiß, Materialvariationen oder Klimaeinflüsse verursacht werden – und das direkt in der Fertigung. Messsysteme sind damit ein Teil der Prozessregelung: Die Qualitätsprüfung wird Teil der Produktion und damit zur Qualitätserzeugung. Beeindruckende Beispiele sind ein von uns entwickeltes digital-holographisches 3D-Messsystem, das Werkstücke beim Zerspanen direkt in der Werkzeugmaschine mikrometergenau vermisst; ebenso ein Inline-Sensor, der kleine Späne oder Partikel auf Bauteilen identifiziert, sodass diese vor der Weiterverarbeitung entfernt werden können.

Der »Return on Invest« auch für aufwändige Messsysteme wird von den Unternehmen vielfach bereits nach wenigen Monaten erreicht, da Ausschuss reduziert, Ressourcen gespart

und der Durchsatz erhöht werden. Dank der Prozessregelung kann das volle Potenzial der Maschinen genutzt werden. Der Inline-Messtechnik kommt damit eine wachsende Bedeutung in der Industrieproduktion zu, was die Ansprüche an die Messsysteme weiter nach oben schraubt. Dies erfordert nicht nur exzellente Technologie, sondern auch eine Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Messtechnik, die von Labor- oder Nearline-Geräten nicht erreicht und auch nicht erwartet werden. Vor diesem Hintergrund haben wir jüngst insbesondere Software-Entwicklungs- und Test-Standards festgelegt, die das Ausfallrisiko für unsere Systeme weiter reduzieren.

Der Trend, Prozesse durch mehr und durch bessere Messtechnik zu optimieren, wird auch in den Arbeiten unserer anderen Fachabteilungen sichtbar: Verbrennungsanlagen lassen sich gezielter steuern, indem der Brennwert von zugeführten Gasen bereits in der Pipeline gemessen wird. Die 3D-Erfassung von Infrastruktur ermöglicht es, die Trassenplanung für den Ausbau des Glasfasernetzes deutlich effizienter als bisher zu gestalten, und Fernwärmeleitungen lassen sich mithilfe optischer Messtechnik lückenlos überwachen.

Was Messtechnik kann, wie facettenreich ihre Einsatzgebiete sind, wie ideenreich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihr Wissen in anwendungsfertige Systeme umsetzen, lesen Sie auf den folgenden Seiten: Tiefenaufgelöste Materialanalysen mit ultrakurzen Lichtpulsen, Mehr-Farb-Laserscanner, Unterwasser-Laserscanner, Farbumschlagssensoren für Brandgase, thermische Sensoren und vieles mehr können Sie hier finden.

Viel Freude beim Stöbern und Entdecken in unserem Jahresbericht wünscht Ihnen Ihr

Karsten Buse

PRODUKTIONSKONTROLLE

OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

THERMISCHE ENERGIEWANDLER





14



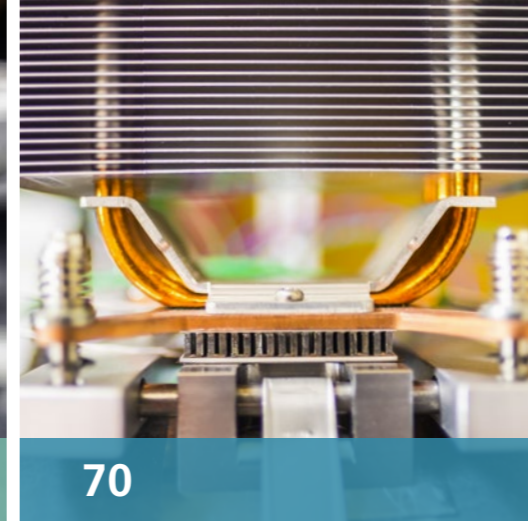
24



38



52



70



80

INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 ORGANISATION
- 8 DAS INSTITUT IN ZAHLEN | KURATORIUM
- 10 INTERN
- 12 PROFESSUREN
- 14 MAGAZIN
- 22 INTERVIEW
- 24 PRODUKTIONSKONTROLLE**

- 26 **OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK**
Die Gruppe im Überblick
Dünne Beschichtungen in der Fertigung prüfen
- 30 **INLINE VISION SYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
Der große Wurf: Bauteil-Inspektion im freien Fall
- 34 **GEOMETRISCHE INLINE-MESSSYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
Interferometrie in der Werkzeugmaschine
- 38 OBJEKT- UND FORMERFASSUNG**

- 40 **MOBILES TERRESTRISCHES SCANNING**
Die Gruppe im Überblick
Intensiv betrachtet: Rissdetektion auf Straßenoberflächen
- 44 **AIRBORNE- UND UNTERWASSER-SCANNING**
Die Gruppe im Überblick
Abgetaucht: Laserscanning unter Wasser
- 48 **SMARTE DATENVISUALISIERUNG**
Die Gruppe im Überblick
Messdaten erfassbar machen: Visualisierung wird wichtig

52 GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

- 54 **INTEGRIERTE SENSORSYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
Kolorimetrische Sensoren: Farbe zeigt giftige Gase an
- 58 **SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK**
Die Gruppe im Überblick
Sensoren für eine effizientere Landwirtschaft
- 62 **THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
HE-Lab: Sensoren unter Hitze- und Druckstress
- 66 **NICHTLINEARE OPTIK UND QUANTENSENSORIK**
Die Gruppe im Überblick
Quantensensorik: Messen mit verschränkten Photonen

70 THERMISCHE ENERGIEWANDLER

- 72 **THERMOELEKTRISCHE SYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
Thermoelektrische Generatoren: Minikraftwerke für das IoT
- 76 **KALORISCHE SYSTEME**
Die Gruppe im Überblick
Kleiner Kühlschrank, großes Potenzial: Kühlen mit elastokalorischen Materialien
- 80 **MESSEN | VORSCHAU**
- 82 **VERANSTALTUNGEN | WORKSHOPS**
- 83 **PARTNER | NETZWERKE**
- 84 **PUBLIKATIONEN**
- 87 **DOKTORARBEITEN | PATENTE**
- 88 **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT**
- 90 **IMPRESSUM**

ORGANISATION

INSTITUTSLEITUNG



Institutsleiter
Prof. Dr. Karsten Buse
T +49 761 8857 - 111
karsten.buse@ipm.fraunhofer.de



Stellv. Institutsleiter
Dr. Daniel Carl
T +49 761 8857 - 549
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de

PRODUKTIONSKONTROLLE



Abteilungsleiter
Dr. Daniel Carl
T +49 761 8857 - 549
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de



Optische Oberflächenanalytik
PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg
T +49 761 8857 - 306
albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de



Inline Vision Systeme
Dr. Tobias Schmid-Schirling
T +49 761 8857 - 281
tobias.schmid-schirling@ipm.fraunhofer.de



Geometrische Inline-Messsysteme
Dr. Alexander Bertz
T +49 761 8857 - 362
alexander.bertz@ipm.fraunhofer.de

OBJEKT- UND FORMERFASSUNG



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Alexander Reiterer
T +49 761 8857 - 183
alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de



Mobiles terrestrisches Scanning
Prof. Dr. Alexander Reiterer
T +49 761 8857 - 183
alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de



Airborne- und Unterwasser-Scanning
Simon Stemmler
T +49 761 8857 - 211
simon.stemmler@ipm.fraunhofer.de



Smarte Datenvisualisierung
Prof. Christoph Müller
T +49 761 8857 - 236
christoph.mueller@ipm.fraunhofer.de

TECHNISCHE DIENSTE



Technischer Leiter
Clemens Fallner
T +49 761 8857 - 214
clemens.faller@ipm.fraunhofer.de



Mechanik und Konstruktion
Thomas Hinrichs
T +49 761 8857 - 254
thomas.hinrichs@ipm.fraunhofer.de



Gebäude und Technik
Clemens Fallner
T +49 761 8857 - 214
clemens.faller@ipm.fraunhofer.de

REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



Wissenschaftsmanagement
Dr. Rosita Sowade
T +49 761 8857 - 222
rosita.sowade@ipm.fraunhofer.de



Organisationsentwicklung
Dr. Heinrich Stülpnagel
T +49 761 8857-269
heinrich.stuelpnagel@ipm.fraunhofer.de



Kommunikation und Medien
Holger Kock
T +49 761 8857 - 129
holger.kock@ipm.fraunhofer.de

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein
T +49 761 8857 - 134
juergen.woellenstein@ipm.fraunhofer.de



Integrierte Sensorsysteme
Dr. Marie-Luise Bauersfeld
T +49 761 8857 - 290
marie-luise.bauersfeld@ipm.fraunhofer.de



Spektroskopie und Prozessanalytik
Dr. Raimund Brunner
T +49 761 8857 - 310
raimund.brunner@ipm.fraunhofer.de



Thermische Messtechnik und Systeme
Martin Jäggle
T +49 761 8857 - 345
martin.jaegle@ipm.fraunhofer.de



Nichtlineare Optik und Quantensensorik
PD Dr. Frank Kühnemann
T +49 761 8857 - 457
frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

THERMISCHE ENERGIEWANDLER



Abteilungsleiter
Dr. Olaf Schäfer-Welsen
T +49 761 8857 - 173
olaf.schaefer-welsen@ipm.fraunhofer.de



Thermoelektrische Systeme
Dr. Olaf Schäfer-Welsen
T +49 761 8857 - 173
olaf.schaefer-welsen@ipm.fraunhofer.de



Kalorische Systeme
Dr. Kilian Bartholomé
T +49 761 8857 - 238
kilian.bartholome@ipm.fraunhofer.de

VERWALTUNG UND IT



Verwaltungsleiter
Wolfgang Oesterling
T +49 761 8857 - 120
wolfgang.oesterling@ipm.fraunhofer.de



Verwaltung
Sabine Gabele
T +49 761 8857 - 159
sabine.gabele@ipm.fraunhofer.de



Informations- und Telekommunikationstechnik
Gerd Kühner
T +49 761 8857 - 226
gerd.kuehner@ipm.fraunhofer.de

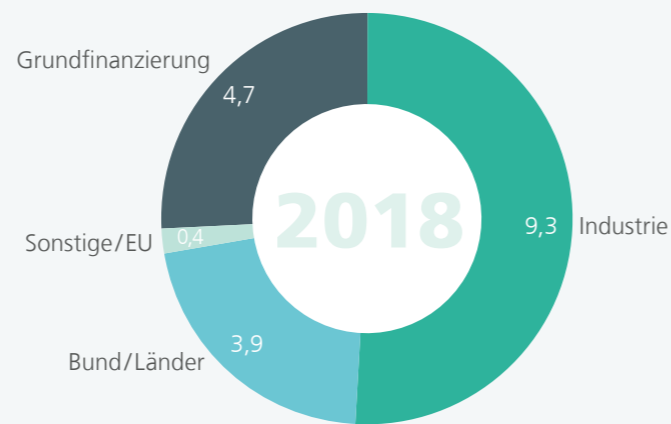
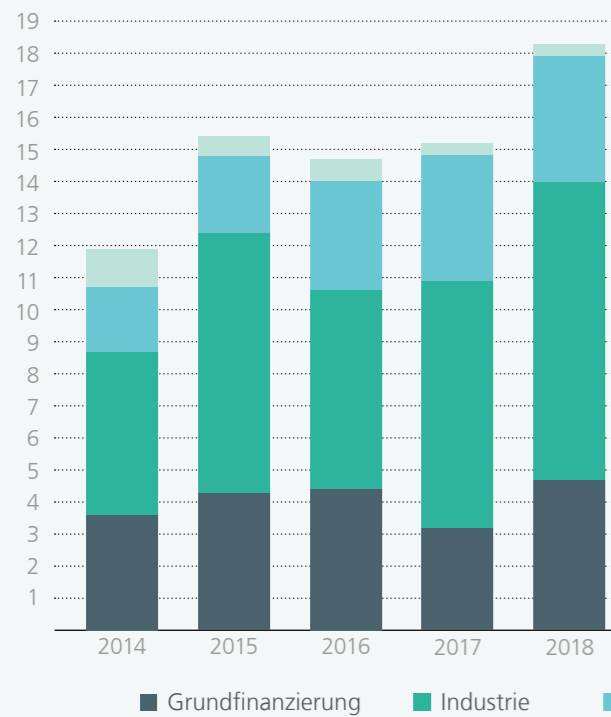


Personal
Anneliese Zwölfer
T +49 761 8857 - 116
anneliese.zwoelfer@ipm.fraunhofer.de



Betriebshaushalt in Mio. Euro

€ **18,3 Mio.**
Betriebshaushalt



UNSER KURATORIUM

Ein hochkarätig besetztes Kuratorium berät und unterstützt das Institut bei der strategischen Ausrichtung und bei Weichenstellungen für die Zukunft.

Vorsitzender

Dr. Manfred Jagiella, Endress + Hauser Conducta GmbH & Co. KG

Dr. Bernd Dallmann, Internationale Studien- und Berufsakademie Freiburg, ISBA gGmbH.

Prof. Dr. Gunther Neuhaus, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Mitglieder

Dr. Lutz Aschke, TRUMPF Gruppe, Geschäftsbereich Lasertechnik

Dr. Jürgen Gieshoff, Umicore AG & Co. KG

Dr. Volker Nussbaumer, Volkswagen AG, Group Charging GmbH

Prof. Dr. Frank Boochs, Hochschule Mainz, Fachbereich Geoinformatik & Vermessung

Dr. Mathias Jonas, Internationale Hydrographische Organisation

Dr. Stefan Raible, AMS Business Line Environmental Sensors

Stephanie Busse, DB Netz AG

Gerhard Kleinpeter, BMW AG

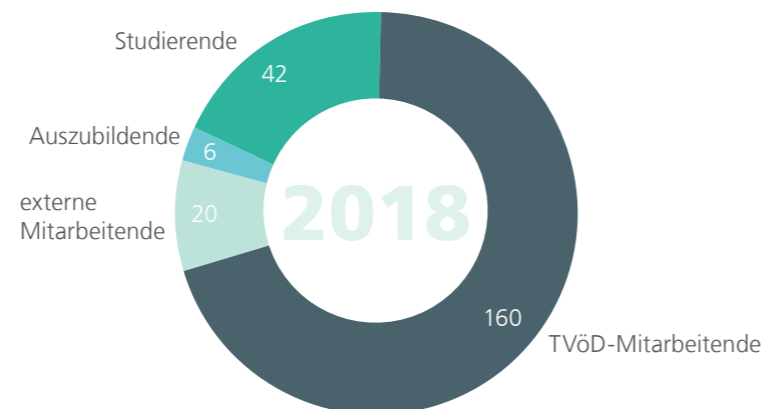
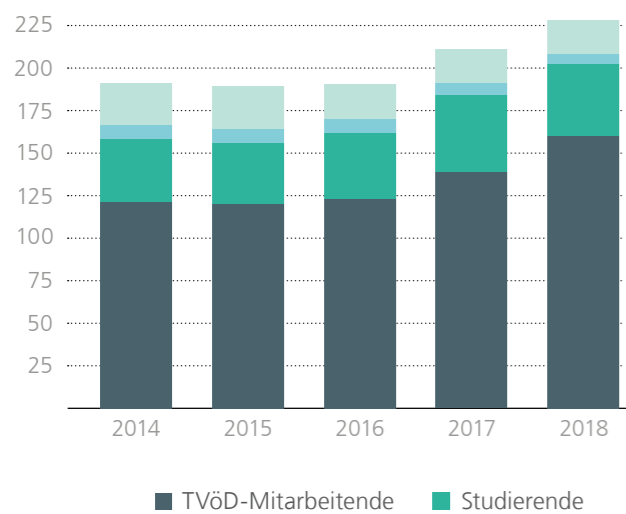
Prof. Dr. Michael Totzeck, Carl Zeiss AG

Prof. Dr.-Ing. Katharina Klemt-Albert, Leibniz Universität Hannover, Institut für Baumanagement und Digitales Bauen

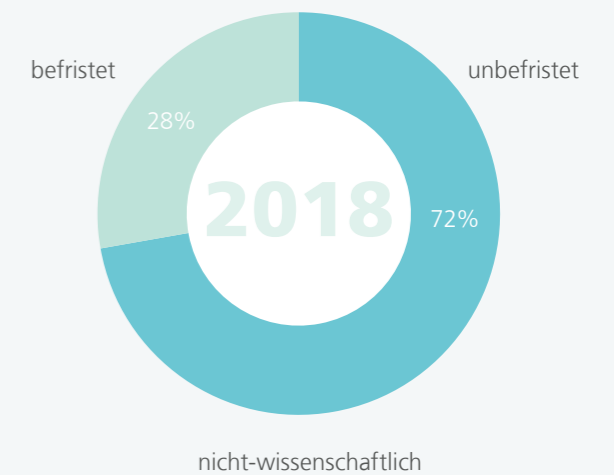
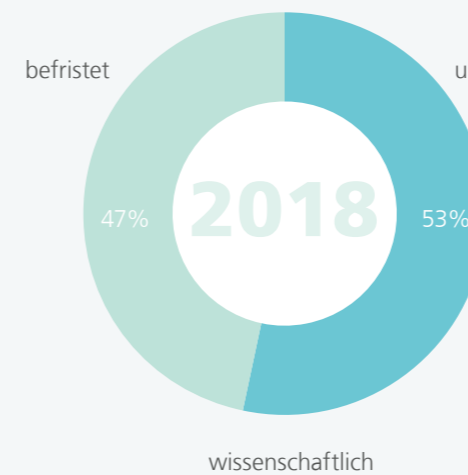
Prof. Dr. Ulrike Wallrabe, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK

Personal

👤 **228**
Mitarbeitende



Beschäftigte nach TVöD: Anteil befristeter/unbefristeter Verträge





< Zehn Tonnen bringt die neue »Hermle C250« auf die Waage. Anlieferung und Platzierung in der Werkstatt waren Millimeterarbeit.

INVESTITIONEN IN TECHNISCHE AUSSTATTUNG

Mehr als eine Million Euro hat Fraunhofer IPM in Großgeräte und Maschinen investiert, die im Jahreszeitraum 2018 in Betrieb genommen wurden.

5-Achs-Fräsmaschine (Hermle C250)

Mit dem neuen »dynamischen Bearbeitungszentrum« C250 der Firma Hermle stehen nun insgesamt fünf Fräsmaschinen zur Verfügung.

- Erhöhung der Fertigungskapazität und Flexibilität
- höhere Präzision
- leichtere Handhabung durch Nullpunktspannsystem

FT-IR-Vakuum-Spektrometer (Bruker VERTEX 80/80v)

Ein hochmodernes Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer ersetzt mehrere teilweise veraltete Spektrometer.

- leistungsfähiges Gerät für die breitbandige Spektroskopie
- hohe Stabilität, Auflösung und Empfindlichkeit

Halbautomatisches UV-/Nano-Imprint-Lithographie-System

Mit dem neuen Lithographie-System werden funktionale Materialien und Oberflächen für mikro-optische Anordnungen, miniaturisierte Gassensoren, thermische Sensoren und Energiewandler in Nano- und Mikrosystemtechnik hergestellt.

- beidseitiges Strukturieren von flexiblen Substraten, auch Sondergeometrien
- Strukturbreiten bis in den Nanometer-Bereich
- »Surface micromachining«, Formung von 3D-Oberflächen mit großen Aspektverhältnissen

Optisches Referenzmesssystem Hexagon Laser Tracker AT960 inkl. T-Scan und T-Probe

Mit dem neuen Laser-Tracker steht nun ein multifunktionales Referenzsystem für die Prüfung und Kalibration unserer Laser-scanner zur Verfügung.

- schnelle Prüfung und Kalibration von Messsystemen und Messanordnungen auch in großen Messvolumina
- Vollautomatisierung von Kalibrationsprozessen
- höchste Präzision bei Strecken- und Winkelmessung
- flexibler Einsatz (auch außerhalb des Labors) durch kleine Bauweise

Doppelkamm-Spektrometer

Spektrometer auf der Basis von Frequenzkämmen sind ein neue Klasse leistungsfähiger Werkzeuge für die Spektroskopie und Analytik. Sie kombinieren die Vorteile der Fourier-Transformations-Spektroskopie und der abstimmbaren Infrarotlaser.

- hohe Kohärenz ermöglicht lange Messstrecken für die empfindliche Analytik
- breite spektrale Abdeckung ermöglicht die Analyse komplexer Gemische
- Referenzsystem zur Entwicklung neuer Anwendungsszenarien für Kunden

GROSSPROJEKTE 2018

Fraunhofer IPM-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler bearbeiteten 2018 insgesamt elf Forschungsprojekte, an denen das Institut mit jeweils über einer Million Euro beteiligt ist. Zwei der Großprojekte wurden im Jahr 2018 abgeschlossen.

Freifall

100-Prozent Qualitätsprüfung für Halbzeuge durch Geometrie- und Oberflächenanalyse im freien Fall
 Laufzeit: 01.04.2017 – 31.03.2020
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

DeepInspect

3D-Erfassung und Überwachung von Unterwassergroßstrukturen
 Laufzeit: 01.04.2015 – 31.12.2018
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

MultiVIS

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

TOXIG

Farbwechselbasierte Sensoren zur Detektion toxischer Gase
 Laufzeit 01.03.2017 – 31.08.2020
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

eHarsh

Sensorsysteme für extrem raue Umgebungen
 Laufzeit 01.07.2017 – 31.12.2020
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

QUILT

Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions
 Laufzeit 01.09.2017 – 31.08.2020
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

FluMEMS

MEMS-basierte katalytisch-thermische Sensoren für Gase und Flüssigkeiten
 Laufzeit: 01.04.2018 – 31.03.2021
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

thermoHEUSLER 2

Integration von Systemen zur thermoelektrischen Abgaswärmeenergieerückgewinnung
 Laufzeit 01.06.2015 – 30.11.2018
 Förderung: BMWi, Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH

MagCon

Magnetokalorik: Entwicklung kältemittelfreier, hoch-effizienter Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen
 Laufzeit 01.02.2016 – 30.09.2019
 Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

MagMed

Entwicklung einer kältemittelfreien und effizienten Kühlt-technik; Teilvorhaben: Systementwicklung und Messtechnik
 Laufzeit: 01.06.2017 – 31.05.2020
 Förderung: BMWi, Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH

Elasto-Cool

Elastokalorik: Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel zum Heizen und Kühlen
 Laufzeit 01.08.2018 – 31.07.2020
 Förderung: BMBF, Projektträger VDI/VDE Innovation und Technik GmbH



> Technischer Campus der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. In unmittelbarer Nachbarschaft entsteht das neue Institutsgebäude von Fraunhofer IPM.

PROFESSUREN AN UNIVERSITÄTEN UND HOCHSCHULEN

Fraunhofer IPM ist mit drei Professuren an der Universität Freiburg vertreten. Durch die enge Universitätsanbindung können wir in unserer Projektarbeit auf neuesten Ergebnissen aus der Grundlagenforschung aufbauen. Seit Februar 2019 kooperiert das Institut zudem mit der Hochschule Furtwangen (HFU). Im Rahmen des Fraunhofer-Hochschul-Kooperationsprogramms wird Professor Christoph Müller aus der Fakultät Digitale Medien die neu eingerichtete Arbeitsgruppe »Smarte Datenvisualisierung SDV« am Fraunhofer IPM leiten. Die auf fünf Jahre ausgelegte Kooperation ermöglicht Einblick in die anwendungsorientierte Forschung der HFU.

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG



Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Professur für Optische Systeme Prof. Dr. Karsten Buse



Forschungsschwerpunkte

- nichtlinear-optische Materialien
- optische Flüstergalerieresonatoren
- miniaturisierte Festkörperlaser
- optische Frequenzkonverter (optisch

parametrische Oszillatoren, OPOs)

- Frequenzkämme
- schnelles Durchstimmen von Laserfrequenzen
- integrierte Optik

Professur für Gassensoren Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein



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



Forschungsschwerpunkte

- Inspektion und Überwachung künstlicher und natürlicher Objekte
- Entwicklung und Implementierung neuartiger Sensorkonzepte auf Basis von Laserscannern und Kameras
- Datenanalyse und -interpretation mit

- Fokus auf die Verknüpfung von Einflussparametern, verursachenden Kräften und gemessenen Veränderungen
- Entwicklung und Umsetzung kompletter Systemketten – von der Datenakquisition bis zur Datenauswertung

HOCHSCHULE FURTWANGEN



Fakultät Digitale Medien

Professur für Computergrafik Prof. Christoph Müller

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

PROFESSOR KARSTEN BUSE WIRD FELLOW DER OPTICAL SOCIETY OSA

Institutsleiter Karsten Buse wurde zum »Fellow« der Optical Society OSA ernannt.

Der Ehrentitel Fellow der Optical Society OSA wird OSA-Mitgliedern für besondere Leistungen auf dem Gebiet der Optik und Photonik verliehen. Der Physiker Karsten Buse erhielt die Auszeichnung »für grundlegende Arbeiten

zu den optischen Eigenschaften und Anwendungen von Lithiumniobat«. Die Optical Society (ehemals Optical Society of America) wurde 1916 mit dem Ziel gegründet, Wissen und Erkenntnisse auf den Gebieten der Optik und Photonik zu fördern. Sie gilt weltweit als die wichtigste Vereinigung der Optik-Community.



> Dr. Christoph Werner (2.v.l.) erhält den Hugo-Geiger-Preis vom stellvertretenden bayerischen Ministerpräsidenten Hubert Aiwanger (l.) und Fraunhofer-Vorstandsmitglied Andreas Meuer (r.).



PROMOVIEREN BEI FRAUNHOFER IPM

Fraunhofer IPM unterstützt Doktorandinnen und Doktoranden mit einem eigenen Promotionsprogramm.

Zwölf Doktorandinnen und Doktoranden forschten 2018 im Rahmen ihrer Promotion am Fraunhofer IPM. Fünfzehn weitere Promovierende wurden von Mitarbeitern des Instituts an drei Professuren der Universität Freiburg betreut. Die Nachwuchswissenschaft-

lerinnen und -wissenschaftler bearbeiten Fragestellungen mit hohem Anwendungsbezug. Gleichzeitig erfordern die Promotionen selbstständige wissenschaftliche Leistungen auf sehr hohem Niveau. Das 2014 ins Leben gerufene Promotionsprogramm unterstützt sie dabei, dieses Ziel zu erreichen: Die Promovierenden präsentieren und diskutieren den Stand ihrer wissenschaftlichen Arbeiten.

Sie erhalten Einblick in verschiedene Forschungsthemen und lernen methodische Kenntnisse von erfahrenen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen. Dazu gehören neben Tutorials zum wissenschaftlichen Arbeiten auch Themen wie Publizieren in Fachverlagen oder Präsentationstechniken.

TALENTA

Vier Mitarbeiterinnen von Fraunhofer IPM nahmen im Jahr 2018 am Karriereprogramm TALENTA der Fraunhofer-Gesellschaft teil.

Die Doktorandinnen Laura Engel, Lena Maria Maier und Annelie Schiller wurden im Rahmen von TALENTA start gefördert. Dr. Katharina Predehl, Projektleiterin in der Abteilung Objekt- und Formerfassung, nimmt an TALENTA speed up teil. Das Programm unterstützt Wissenschaftlerinnen, die Verantwortung in einer Führungs- oder Fachposition übernehmen möchten. Seit 2013 fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft-

lerinnen und weibliche Führungskräfte im Rahmen des Karriereprogramms TALENTA. Ziel des Programms ist es, besonders talentierte Mitarbeiterinnen auf

allen Stufen ihrer beruflichen Entwicklung individuell zu fördern und neue Wissenschaftlerinnen für Fraunhofer zu gewinnen.



»Talanta schafft mir zusätzlichen Freiraum, um bestimmte Aspekte meines Forschungsthemas zu vertiefen«, sagt Annelie Schiller, die am Institut zum Thema Digitale Holographie promoviert.

HUGO-GEIGER-PREIS 2019

Dr. Christoph Werner erhält den Nachwuchspreis für die Entwicklung einer neuartigen Laserlichtquelle.

Im Rahmen seiner Promotion am Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK der Universität Freiburg in Kooperation mit Fraunhofer IPM entwickelte der Mikrosystemtechniker Werner eine besonders kompakte Laserquelle mit flexibel einstellbarer Ausgangswellenlänge. Die Laserquelle basiert auf einem Flüstergalerie-Resonator und nutzt die Lichtrückkopplung, um die Lichtwellen innerhalb des Resonators zu stabilisieren. Für den Resonator verließ er bekanntes Terrain

und setzt statt einer Scheibe einen Ring ein, der auf einen piezoelektrischen Aktor aufgezogen wird. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung dehnt sich der Aktor und damit der Ring aus. Den Resonator geometrisch statt wie üblich thermisch durchzustimmen, bringt entscheidende Vorteile: Das Durchstimmen wird um den Faktor 100 000 beschleunigt und zugleich unabhängiger von den Wellenlängen.

Mit seiner Arbeit legt Werner den Grundstein für eine neue Generation von Laserlichtquellen, die so klein und

kostengünstig werden könnten, dass sie in Zukunft auch in ein Smartphone integriert werden könnten. Damit erschließen sie Applikationen für einen breiten Nutzerkreis, die bislang spezialisierte Laborlaser erfordern. Als »Nebenprodukt« der Dissertation entstand ein neues Verfahren in der Kristallstrukturierung. Dazu führt das Fraunhofer IPM mittlerweile Lizenzverhandlungen mit einem der internationalen Marktführer auf diesem Gebiet.

»TRACK & TRACE FINGERPRINT« GEWINNT INNOVATION CHALLENGE

Bei der schwedischen SmartSteel Innovation Challenge konnte sich Fraunhofer IPM gegen weltweite Konkurrenz als einer von zwei Gewinnern durchsetzen.

Gesucht wurden Verfahren zur markierungsfreien Rückverfolgung von Stahlprodukten. 26 Teams aus aller Welt hatten sich Ende 2018 dieser Aufgabe gestellt. Fraunhofer IPM überzeugte die Jury mit »Track & Trace FINGERPRINT«, einem Verfahren zur markerfreien Rückverfolgung. Die schwedischen Spezialstahlhersteller Sandvik Materials Technology und SSAB riefen die SmartSteel Innovation Challenge im Herbst 2018 ins Leben.

Ziel ist es, Methoden zur sicheren Rückverfolgung von Stahlprodukten – im Sinne eines Fingerabdrucks – mithilfe von Open Innovation Methoden voranzubringen. Aus den 26 Bewerbungen aus aller Welt hatten die Veranstalter sieben Teams ausgewählt und zum Finale nach Stockholm eingeladen. Jeweils ein Vertreter des Teams präsentierte eine Lösungsidee vor der Expertenjury. Am Ende votierte die Jury für die Konzepte von Fraunhofer IPM und der schwedischen Luleå University of Technology. »Wir freuen uns jetzt ganz besonders darüber, gemeinsam mit SSAB und Sandvik die Track & Trace FINGERPRINT-Technologie



Dr. Tobias Schmid-Schirling (r.) nahm die Auszeichnung im Dezember 2018 in Stockholm entgegen.

weiter ausarbeiten zu können«, sagt Dr. Tobias Schmid-Schirling, Gruppenleiter Inline Vision Systeme. »Das ist der nächste Schritt, um die Technologie in noch größerem Umfang an den Markt zu bringen.«

< Richtfest an der Georges-Köhler-Allee 301:
Im März 2018 feierten Bauarbeiter, Bauleitung
und einige Vertreter des Instituts die Fertig-
stellung des Rohbaus.

NEUBAU WEITERHIN IM ZEIT- UND KOSTENPLAN

Zeitweilig bis zu einhundert Fachkräfte arbeiteten gleichzeitig auf der Baustelle des neuen Institutsgebäudes.

Die Arbeiten am Neubau liefen auch im Jahr 2018 auf Hochtouren: Am 26. März wurde die Fertigstellung des Rohbaus mit einem Richtfest gefeiert. Im Herbst war das Gebäude nach

Einbau der Fenster und Türen trocken und dicht, sodass die Arbeiten am Innenausbau, an der Haustechnik und an der Wärmedämmung beginnen konnten. Diese Arbeiten sowie die Anbringung der Außenfassade werden sich über das gesamte Jahr 2019 erstrecken. Zahlreiche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nutzten das Angebot,

sich im Rahmen einer »MittagsBause« vom Leiter der Technischen Dienste, Clemens Faller, durch das Gebäude führen zu lassen. Läuft weiterhin alles nach Plan, wird der Umzug Anfang 2020 stattfinden.

EIN LEBEN FÜR DIE WELTRAUMFORSCHUNG

Der Gründer des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Weltraumforschung, Professor Karl Rawer, verstarb zwei Tage vor seinem 105. Geburtstag am 17. April 2018 in March.

Aus dem 1973 gegründeten Institut, das Rawer bis zu seiner Pensionierung im Jahr 1979 leitete, ging das heutige Fraunhofer IPM hervor. Der in Neunkirchen (Saar) geborene Rawer gilt als einer der Pioniere der europäischen Weltraumforschung. Sein Lebensthema war die Erforschung der Ionosphäre, also jenes Teils der erdnahen Atmosphäre, in dem Kurzwellen reflektiert werden, die für den weltweiten Funkverkehr von Bedeutung sind. Rawer prägte maßgeblich das seit 1999 international gültige Standardmodell der Ionosphäre »International Reference Ionosphere« (IRI). Erstes Ansehen

erwarb sich der Physiker mit Arbeiten über die Ausbreitung und geophysikalische Beeinflussung von Radiowellen. Nach Kriegsende bestimmte die Satellitenforschung seinen Lebensweg. Rawer war Ehrendoktor der Universität Düsseldorf, korrespondierendes Mitglied der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und der International Academy of Astronautics sowie Träger des Bundesverdienstkreuzes 1. Klasse. Der grenzüberschreitende wissenschaftliche Austausch war ihm stets ein besonderes Anliegen. Viele Jahre hielt Rawer Vorlesungen an der Pariser Universität Sorbonne. Sein wissenschaftliches Wirken, seine Persönlichkeit und seine herzliche Art sind von Beginn an fest in die Gene des Instituts eingepreßt. Professor Rawer ist dem Institut bis ins hohe Alter verbunden geblieben und hat mit großem

Interesse und scharfem Verstand die Institutsentwicklung verfolgt.



Karl Maria Alois Rawer blieb dem Institut bis zuletzt verbunden.



> Schauplatz der Quantenphysik: Teilnehmer und Teilnehmerinnen der QUILT-Herbstschule vor dem Physikzentrum der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Bad Honnef.

»THINKING CLUB«: KREATIV STATT ELITÄR

Wo stecken eigentlich Ideen, bevor man sie gefunden hat? – Nicht selten im »Thinking Club«, einer neuen monatlichen Diskussionsrunde am Fraunhofer IPM.

Der Weg zur Innovation ist theoretisch doch recht simpel: Man wird auf etwas Interessantes aufmerksam, denkt darüber nach, verknüpft es vielleicht mit etwas Bekanntem und am Ende muss man noch ein bisschen was entwickeln und ein paar Problemchen lösen: Fertig ist die Innovation – theoretisch ... in der Praxis sieht das oft ganz anders aus. Welche Innovation wäre überhaupt interessant – für unsere Kunden und für Fraunhofer IPM? Welche neue Richtung sollten wir einschlagen, welche neue Kompetenz gezielt aufbauen? Das sind typische Fragen, für deren Beantwortung Fraunhofer IPM 2018 ein neues Diskussionsformat etabliert hat: Jede Mitarbeiterin und jeder Mitarbeiter kann Themen vorschlagen, die im Thinking Club mit rund einem Dutzend Kolleginnen und Kollegen diskutiert werden – nicht nach Schema F, sondern gerne aus einem ungewöhnlich Blickwinkel. So finden wir neue Anwendungsfelder für vorhandene Kompetenzen und bauen gezielt neue Kompetenzen für bekannte Anwendungsfelder auf – das klappt nicht immer, aber immer öfter.

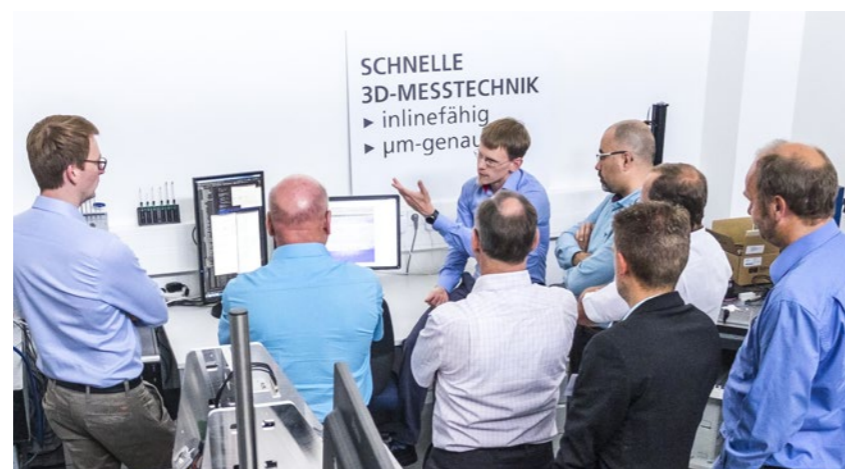
INDUSTRIE-WORKSHOP »OPTISCHE VERZÄHNUNGSMESSUNG«

Rund 40 Messtechnik-Spezialisten und Anwender kamen Mitte Juni 2018 erstmalig zum Industrie-Workshop »Optische Verzahnungsmessung« ans Fraunhofer IPM.

Ein Team um Annelie Schiller und Dr. Alexander Bertz organisierte die Veranstaltung gemeinsam mit der Alicona Imaging GmbH. Hersteller und Anwender aus dem Bereich Verzahnungstechnik sowie Messtechnikspezialisten informierten sich anhand von acht Fachvorträgen über die neuesten technologischen Entwicklungen in der optischen Verzahnungsmessung. Im Rahmen einer Ausstellung und Laborführung präsentierte Fraunhofer IPM digital-holographische Messsysteme zur Vermessung von Zahnrädern aus dem Automotive- und Luftfahrtbereich

sowie ein Verfahren zur markierungsfreien Bauteilrückverfolgung. Alicona Imaging präsentierte ein optisches Messsystem für kleine Präzisionsverzahnungen.

Die optische Verzahnungsmessung bietet einige Vorteile gegenüber der heute vorwiegend genutzten taktilen Messung: Optische Verfahren sind schnell, präzise und liefern Messdaten der gesamten Zahnflankenoberfläche. Die somit erstmals mögliche 100-Prozent-Bauteilkontrolle wird von der Industrie zunehmend nachgefragt, da viele moderne Fertigungsverfahren und Anwendungen der Verzahnungstechnologie höchste Präzision erfordern. Der Workshop wird zukünftig alle zwei Jahre stattfinden.



Dr. Tobias Beckmann präsentiert Workshop-Teilnehmern ein System zur digital-holographischen Verzahnungsmessung.

QUILT-HERBSTSCHULE

Das Innovationsfeld Quantenimaging war Thema des von Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer IOF organisierten Treffens in Bad Honnef.

Im Rahmen der viertägigen Herbstschule »Quantum-Enhanced Imaging and Spectroscopy« trafen sich im September 2018 erstmalig Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Industrie, um sich über physikalische Grundlagen, technologische Aspekte und Anwendungsmöglichkeiten des

Quantenimaging auszutauschen. Die hochkarätig besetzte internationale Veranstaltung war das erste Treffen zum Thema bildgebende Quantenverfahren in Europa. Die Fraunhofer-Gesellschaft widmet sich dem Thema Quantenimaging im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts QUILT (Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions), an dem neben fünf anderen Fraunhofer-Instituten und zwei externen Forschungseinrichtungen auch Fraunhofer IPM beteiligt

ist. »In der Fraunhofer-Gesellschaft greifen wir auf ein sehr breites, exzellentes Know-how in der Optik und Halbleitertechnologie zurück«, sagt Professor Karsten Buse, der das Projekt gemeinsam mit Fraunhofer IOF-Institutsleiter Professor Andreas Tünnermann koordiniert. »Das ist unsere Grundlage, um mit Konzepten der Quantentechnologie die spannendsten und gleichzeitig schwierigsten Spektralbereiche für die Bildgebung und Analytik zu erschließen.«

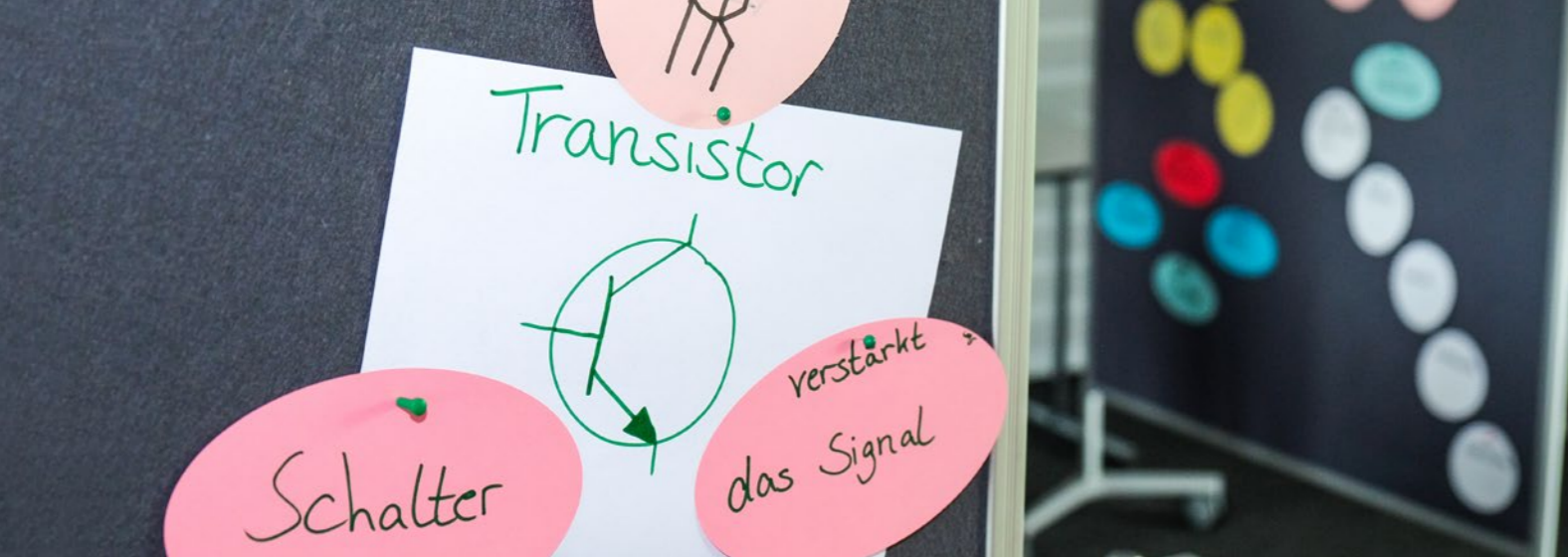
MOLAS-WORKSHOP GEHT IN SERIE

Zum dritten Mal kamen um die einhundert Teilnehmerinnen und Teilnehmer zum »Mobile Laser Scanning Technology Workshop«. Referentinnen und Referenten aus Forschung und Industrie gaben Einblick in aktuelle technologische Entwicklungen des mobilen Laserscannings. Ein thematischer Schwerpunkt des Workshops war das Unterwasser-scanning. Vier Vorträge präsentierten aktuelle Erkenntnisse auf diesem vergleichsweise jungen Anwendungsfeld. Darüber hinaus standen Trends bei Scanner-Systemen, Fragen der Kalibrierung sowie das Thema Datenauswertung und -visualisierung auf dem Programm. In seinem Keynote-Vortrag

»Laserscanning – a game-changing technology« zeigte Jürgen Mayer von Leica Geosystems die zahlreichen noch unerschlossenen Anwendungsfelder für mobiles Laserscanning auf – von hochauflösenden digitalen 3D-Karten bis hin zur Erstellung von 5G-Netzplänen. Grund genug, beim nächsten MoLaS-Workshop erneut über den Fortgang der Entwicklung zu diskutieren: Der vierte MoLaS-Workshop wird am 11. und 12. November 2020 stattfinden – dann in den Räumen des neuen Institutsgebäudes.



Fortschritte beim Airborne Laserscanning stießen auf reges Interesse. Schwerpunktthema des MoLaS-Workshops 2018 war das Laserscanning unter Wasser.



< Der Digitalisierung zum Trotz: Schülerinnen und Schüler nutzen das Flipchart für die Präsentation ihrer Praktikumsergebnisse.

SCHULE TRIFFT FORSCHUNG

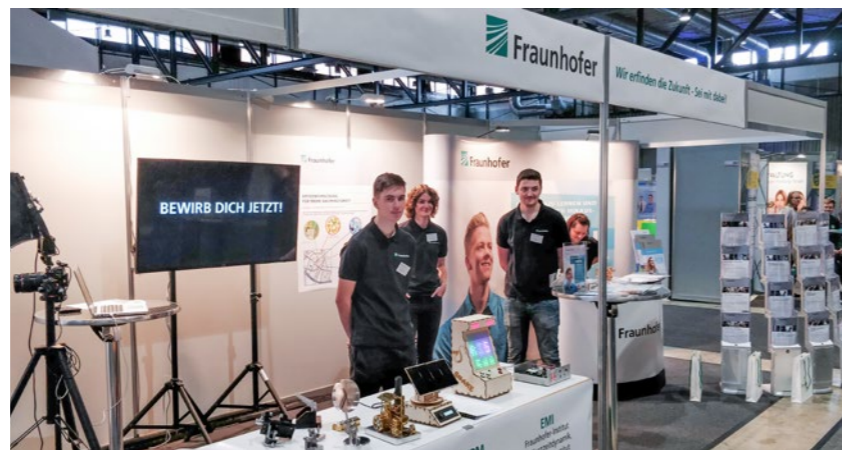
Schülerinnen und Schüler erleben bei Fraunhofer IPM Wissenschaft zum Anfassen.

Am Girls' Day im April machten insgesamt zwölf Mädchen aus den Klassenstufen acht und neun eine Tour durch Labore und Werkstätten. Auf dem Programm standen Experimente mit Licht, der Bau eines Lügendetektors, die Prozessierung eines Mikrochips, die Funktionsweise eines Computers sowie praktische Fertigkeiten wie das Löten von Draht. Im Rahmen der Initiativen BOGY (Berufs- und Studienorientierung, Gymnasien) und TOP BORS (Themenorientiertes Projekt Berufsorientierung, Realschule) verbrachten im Jahr 2018 insgesamt 18 Schülerinnen und Schüler jeweils eine Woche in den Laboren und Werkstätten des Instituts.



Nachwuchsförderung: Schülerin experimentiert mit Reinraum-Techniken.

WETTBEWERB UM DIE BESTEN AZUBIS



Fraunhofer IPM beteiligte sich 2018 an zwei regionalen Informations- und Kontaktmessen rund um das Thema Ausbildung.

Im Mai waren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf der Freiburger Job-Start-Börse präsent. Unter dem Motto »Ausbildung an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Industrie« präsentierten sich die Freiburger Fraunhofer-Institute gemeinsam als attraktiver Arbeitgeber auch für Ausbildungsberufe. Beim »marktplatz: ARBEIT SÜDBADEN« im November hatten Interessierte ebenfalls Gelegenheit, mit Ausbildern und Ausbilderinnen, aber auch mit den Auszubildenden der Institute zu sprechen.

Fraunhofer IPM bildet in drei Berufen aus: Elektroniker/-in (Fachrichtung Geräte und Systeme),

Die besten Köpfe auch für die Ausbildung: Gemeinsam warben die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute um zukünftige Auszubildende.

Fachinformatiker/-in (Fachrichtung Systemintegration) und Industriemechaniker/-in (Fachrichtung Feinwerk- und Gerätetechnik). Im Jahr 2018 waren insgesamt sechs Auszubildende am Institut beschäftigt.

Angelina Hotz schloss ihre Ausbildung zur Fachinformatikerin Systemintegration mit überdurchschnittlichem Erfolg ab. Sie wird nach dem Abschluss weiter für die Abteilung Informations- und Telekommunikationstechnik tätig sein und wurde im November 2018 zur Jugend- und Auszubildendenvertreterin (JAV) gewählt.

DREI FRAGEN AN... NICOLAS REINEBECK

Nicolas Reinebeck ist Chemiker und Patentassessor und seit Mitte 2018 bei Fraunhofer IPM für Schutzrechte zuständig. Er kümmert sich nicht nur um die Patentstrategie des Instituts, sondern er unterstützt vor allem auch die Kolleginnen und Kollegen in den Fachabteilungen – von der Recherche, über das Ausarbeiten und Formulieren von Patentansprüchen bis zur Anmeldung von Schutzrechten. Damit bieten wir unserer Kundschaft nicht nur Innovationen, sondern auch gesicherte Handlungsspielräume.

Herr Reinebeck, woran erkennt man eigentlich eine richtig gute Erfindung?

Ich würde gar nicht von einer guten Erfindung sprechen wollen. Dann müsste es ja auch eine schlechte Erfindung geben. Und das würde dem Erfinder nicht gerecht werden. Ich würde eher von einer aufregenden Erfindung sprechen. Und eine aufregende Erfindung ist für mich eine, die bekannte Lösungen neu denkt, eine, die sich auch über bestehende Denkverbote hinwegsetzt, und so zu neuen Lösungen kommt. Am Fraunhofer IPM herrschen keine Denkverbote; wir sind für alles offen und schaffen so den richtigen Rahmen für wirklich spannende Patente.



»Eine aufregende Erfindung setzt sich über Denkverbote hinweg«, meint Nikolas Reinebeck, der seit 2018 für Schutzrechte am Institut verantwortlich ist. Eine solide Patentstrategie bietet auch unseren Kunden gesicherte Handlungsspielräume.

Wie unterstützen Sie Ihre Kolleginnen und Kollegen?

Es beginnt schon bei der Ideengenerierung. Da kann man mit einer gezielten Recherche bereits viel erreichen, wenn man weiß, was andere sich schon mal überlegt haben. Auf dieser Basis kann man dann schauen, in welche Richtung es gehen könnte. Eine ganz typische Erfahrung ist, dass die Kolleginnen und Kollegen mitunter sehr überrascht sind, was es da schon in der Vergangenheit an anderen Lösungen gab. Mit diesem Wissen können wir uns besser abgrenzen und sehen: Gut, da gibt es schon was. Also gehen wir eben in eine andere Richtung, nehmen dabei aber das Vorwissen als Ergebnis

mit und lassen uns davon inspirieren. Gleichzeitig gewinnen wir aber auch Erkenntnisse über den Markt und die Marktteilnehmer.

Welchen Mehrwert haben unsere Kunden durch Ihre Expertise?

In der Regel gelangt man bereits durch eine gute Recherche in der Folge auch zu einer besseren Patentanmeldung mit einem breiten Schutzzumfang. Und von diesem breiten Schutzzumfang profitieren dann auch unsere Kunden. Denn ein breiter Patentschutz lässt nur wenig oder im Idealfall gar keinen Spielraum für Umgehungslösungen – und genau das wollen unsere Kundinnen und Kunden.

INTERVIEW

> Dr. Jochen Kopitzke: »Die Magnetokalorik hat ein sehr großes disruptives Potenzial und könnte die Kompressorkühltechnologie mittelfristig ablösen.«

>> Im Jahr 2017 zog die Philipp Kirsch GmbH von Offenburg in das benachbarte Willstätt. Das neue Gebäude bietet 4500 Quadratmeter Produktions- und 2000 Quadratmeter Lagerfläche.



»So ein Projekt macht Spaß, und Spaß ist wichtig!«

Dr. Jochen Kopitzke hat in Tübingen Wirtschaftswissenschaften studiert und in Mannheim promoviert. Seit dem Jahr 2010 ist er Inhaber und Geschäftsführer der Philipp Kirsch GmbH. Der heute Vierzigjährige hatte schon im Studium das Ziel, in einem mittelständischen Unternehmen Verantwortung zu übernehmen. Zusammen mit Fraunhofer IPM und anderen Partnern entwickelt die Philipp Kirsch GmbH einen marktreifen magnetokalorischen Kühlschrank.

Herr Kopitzke, was sind die Hauptprodukte der Philipp Kirsch GmbH?

Wir stellen medizintechnische Kühl- und Gefrierschränke her, hochpräzise Kühlschränke für wertvolles Lagergut. In diesem Segment sind wir Marktführer in Deutschland. Unsere Produkte finden Sie deutschlandweit in fast allen Krankenhäusern, in vielen Laboratorien der Pharmaindustrie und in Apotheken.

Gibt es einen globalen Trend in der medizinischen Kühltechnik?

Weltweit wächst der Stellenwert des Gesundheitswesens. Auch Schwellenländer bauen ihre Gesundheitssysteme immer weiter aus. Wir liefern schon jetzt in über hundert verschiedenen Ländern. Die qualitativ hochwertige Lagerung von Medikamenten spielt daher eine immer größere Rolle – Stichwort Qualitätssicherung. Früher haben Ärzte teilweise Haushaltskühlschränke zur Lagerung von Impfstoffen benutzt. Inzwischen besteht ein höherer Qualitätsanspruch aufgrund regulatorischer Anforderungen. Auch die elektronische Qualitätsdokumentation der Lagerbedingungen wird immer wichtiger.

Wie kam es zum ersten Projekt mit Fraunhofer IPM?

Anfang 2012 haben wir bei Kirsch begonnen, uns mit der Magnetokalorik intensiver zu beschäftigen. Zu der Zeit arbeiteten

wir mit der Uni Freiburg bereits an einer Vorstudie. An die Umsetzung des Themas gingen wir dann zunächst mit einem Projektpartner aus dem Elsass. Mit ihm zusammen haben wir den ersten magnetokalorischen Kühlschrank entwickelt, der in die Richtung fünf Grad Kaltseitentemperatur ging, und diesen auf der Medica 2015 in Düsseldorf vorgestellt. Uns war allerdings bald klar, dass mit der eingesetzten »active magnetocaloric refrigeration« nicht mehr möglich sein wird und haben daher parallel mit den Experten vom Fraunhofer IPM gesprochen und überlegt, wie ein gemeinsames Projekt aussehen könnte. Der Anstoß für den Kontakt kam vom Wirtschaftsministerium in Baden-Württemberg. Denn Fraunhofer IPM hatte im Rahmen eines Landesprojekts auf Basis seines patentierten Systemkonzepts große Fortschritte in der Magnetokalorik gemacht.

Hatten Sie zu Beginn der Zusammenarbeit bereits ein Zielprodukt vor Augen?

Ja, und zwar genau das Produkt, woran wir jetzt gemeinsam arbeiten: Wir wollen auf Basis der Magnetokalorik ein Minus-86-Grad-Gerät auf den Markt bringen. Unsere Kunden fragen ein solches Produkt bereits nach. Und für mich war klar: Mit der Kompressortechnologie kann ich da nichts erreichen, da gibt es schon genügend Hersteller. Stattdessen wollte ich den nächsten Schritt gehen und ein neuartiges Produkt auf Basis

Die **Philipp Kirsch GmbH** aus dem baden-württembergischen Willstätt ist ein weltweit agierender Hersteller professioneller Kühl- und Gefrierschränke für das Gesundheitswesen und Laboratorien. Die Firma ist marktführend in deutschen Krankenhäusern. Zum weiteren Kundenkreis gehören Apotheken, Blutbanken sowie Chemie- und Pharmaunternehmen. Gegründet wurde das Unternehmen im Jahre 1865. Zusammen mit Fraunhofer IPM entwickelt die Philipp Kirsch GmbH eine neuartige Kühltechnologie basierend auf magnetokalorischen Materialien, um Kälte besonders effizient und umweltschonend erzeugen zu können. Weitere Infos unter www.kirsch-medical.de

einer sehr zuverlässigen und energieeffizienten Technologie herstellen, d. h. mit einem komplett neuen Ansatz: Die Magnetokalorik hat ein sehr großes disruptives Potenzial und könnte die Kompressorkühltechnologie mittelfristig ablösen. Wir sehen da einen klaren Markt, den wir uns erschließen können.

Was ist aus Ihrer Sicht entscheidend, damit Zusammenarbeit gut funktioniert?

Ich glaube, dass man zunächst einfach gerne in Projekten arbeiten sollte, dass man offen ist für Neues und dass man genau die richtigen Projektpartner mit im Boot haben muss: Bei drei Jahren Projektlaufzeit braucht man ein schlagkräftiges, kleines Team – eher ein Schnellboot und keinen Supertanker. Vom Projektmanagement her muss man auf regelmäßige Termine setzen und diese auch nachverfolgen. Und nicht zuletzt muss eben auch die Chemie stimmen: Wenn jemand im Team ist, der nicht bereit ist, generiertes Wissen im Projektteam zu teilen, dann wird es schwierig. In unserem Projektteam leben wir zu 100 Prozent eine offene, zielstrebige, produktive Zusammenarbeit und unterstützen uns gegenseitig. Außerdem sitzen wir nicht tausende von Kilometern verstreut. Keiner sagt: »Nein, das ist nicht meine Aufgabe, das ist eure Aufgabe!« Stattdessen sind wir zielorientiert.

Was schätzen Sie an der gemeinsamen Arbeit mit Fraunhofer IPM?

Zunächst natürlich die Erfahrung und das Wissen im Bereich der Magnetokalorik: Fraunhofer IPM besitzt ein wichtiges Patent, es gibt kompetente Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter,

und auch die technischen Ressourcen sind alle vorhanden, um die Sachen auch tatsächlich zu untersuchen; technisch, fachlich und menschlich ist das ein sehr angenehmes Arbeiten auf Augenhöhe. So etwas macht einfach Spaß, und Spaß ist wichtig!

Was entwickeln Sie selbst und was mit externen Partnern?

Was die Abstimmung einzelner Produktkomponenten in der Kühltechnik betrifft, haben wir über 60 Jahre Erfahrung. Das machen wir immer selbst. Ansonsten gilt: Wir entwickeln die Dinge nur dann selbst, wenn wir alle erforderlichen Kernkompetenzen haben. Alles andere machen wir zusammen mit Partnern, denen wir vertrauen können.

Herr Kopitzke, herzlichen Dank für das Gespräch!



Mit magnetokalorischen Materialien lässt sich ein Kühlzyklus realisieren. Fraunhofer IPM besitzt ein wichtiges Patent, um diesen Kühlzyklus besonders schnell durchlaufen zu können.

»Unsere Messsysteme optimieren Ihre Produktion.«

Für die Produktionskontrolle entwickelt Fraunhofer IPM optische Systeme und bildgebende Verfahren, mit denen sich Oberflächen prüfen und komplexe 3D-Strukturen in der laufenden Produktion messen lassen, sodass Prozesse geregelt werden können. Die 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 wird eine 100-Prozent-Echtzeitkontrolle und die direkte Rückkopplung in die Produktion im Sinne von Industrie 4.0 möglich.

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.

Gruppe **Optische Oberflächenanalytik**

- ▶ Reinheitskontrolle und Beschichtungsprüfung
- ▶ Inline-Mikroskopie
- ▶ Laserinduzierte Plasmaspektroskopie

Gruppe **Inline Vision Systeme**

- ▶ Oberflächeninspektion und Maßhaltigkeitsprüfung
- ▶ Bahnwareninspektion
- ▶ markierungsfreie Bauteilidentifikation

Gruppe **Geometrische Inline-Messsysteme**

- ▶ Inline-Bauteilprüfung
- ▶ Verzahnungsmessung
- ▶ dynamische Verformungsmessung

< Eine von mehreren Kameras des Inspektionssystems F 360°, das Verunreinigungen auf Bauteiloberflächen im freien Fall detektiert – ohne aufwändiges Handling.



KONTAKT

Dr. Daniel Carl
Abteilungsleiter
T +49 761 8857-549
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de

GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg, T +49 761 8857-306, albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung schlüsselfertiger Geräte zur Oberflächenanalytik. Eingesetzt werden Fluoreszenz-Messtechnik sowie Infrarot-Reflexions-Spektroskopie und Laserinduzierte Plasmaspektroskopie. Die langjährige Erfahrung bei der Systementwicklung umfasst optische Einheiten, Bilderfassung und Bildverarbeitung.



Gruppenleiter: PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg

>> Einzelne partikuläre Verunreinigungen auf Bauteilen lassen sich mithilfe verschiedener Bildgebungsverfahren detektieren und klassifizieren.

KOMPETENZEN

schnelle, ortsauflösende Fluoreszenzmesstechnik mit kundenspezifisch entwickelten Beleuchtungssystemen | Laserinduzierte Plasmaspektroskopie zur Oberflächenanalytik nicht-transparenter Medien | Entwicklung endoskopischer Techniken unter Nutzung spektraler Informationen | Inline-Mikroskopiesysteme mit Gerätesteuerung und Datenauswertung | »Shortwave-Infrared«-Analyse: Nutzung spektraler Abhängigkeit von Absorptions- und Streueigenschaften zur Materialanalyse | Auswertung von biochemischen Reaktionen auf der Basis von Fluoreszenz-Markern

ANWENDUNGEN

Inline-Reinheitskontrolle – macht Verunreinigungen auf Bauteilen sichtbar | Erkennung von Defekten und Beschichtungen an Oberflächen | flächige Ölauf lagenmessung von Bandwaren und komplex geformten Bauteilen in der Produktion | Echtheitsprüfung durch Analyse fluoreszierender Pigmente | Mikroskopie im Produktionstakt, z. B. 100-Prozent-Prüfung von Schlüsselkomponenten in Medizinprodukten | stoffspezifische Erkennung von Materialien an Oberflächen | in-vitro Diagnosesysteme

SPEZIFIKATIONEN

REINHEITSKONTROLLE UND BESCHICHTUNGSPRÜFUNG

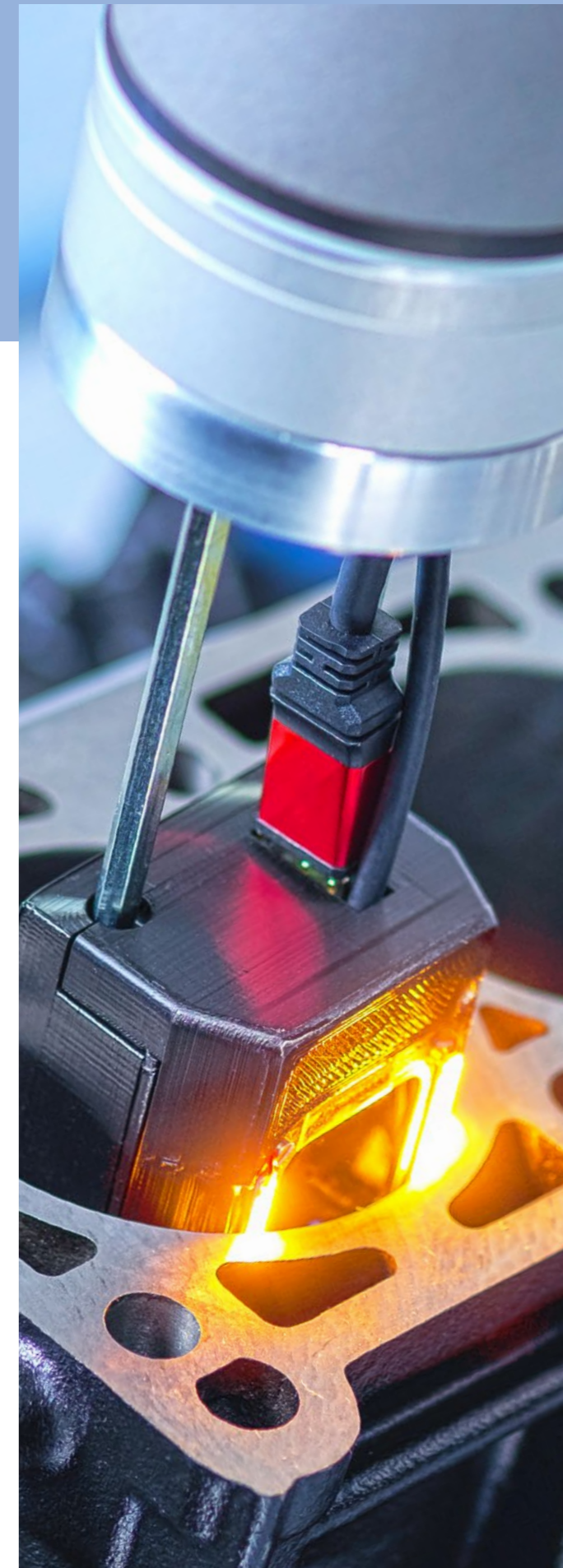
- ▶ Auswertung von Position, Form und Menge filmischer Verunreinigungen im Produktionstakt
- ▶ bildgebende Messung von Prozesshilfsstoffen wie Öle, Fette oder Reinigungsmittel (Nachweisgrenze bei Standardölen: 0,01 g/m²)
- ▶ Kamerasystem: Sichtfeld einige cm², Auflösung 20 µm
- ▶ Scannersystem: Sichtfeld einige m², Auflösung 500 µm

INLINE-MIKROSKOPIE

- ▶ Charakterisierung komplexer 3D-Mikrostrukturen
- ▶ Strukturfehler, Verunreinigungen, fehlerhafte Außenabmessungen oder Kratzer erkennen
- ▶ Wiederholgenauigkeit der Abstandsmessung im Submikrometerbereich
- ▶ Messmittelfähigkeit bei der Bestimmung von Bauteilabmessungen
- ▶ Taktrate rund 1 Sekunde

LASERINDUZIERTE PLASMASPEKTROSKOPIE

- ▶ berührungslose Materialanalyse an Oberflächen
- ▶ Dickenmessung mikrometerdünner funktionaler Schichten
- ▶ Charakterisierung nanometerdünner Korrosionsschutzschichten in der Produktionslinie
- ▶ Nachweis von Beschichtungsbestandteilen bis in den ppm-Bereich





< Funktionelle Beschichtungen, die mitunter nur wenige Nanometer stark sind, müssen homogen und vollständig sein. ANALIZEsingle misst Schichtdicke, Elementzusammensetzung und -verteilung während des Beschichtungsprozesses.

GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

Dünne Beschichtungen in der Fertigung prüfen

Industriell hergestellte Bauteile werden häufig mit funktionellen Beschichtungen als Korrosionsschutz, Veredelung oder Haftvermittler versehen. Für den späteren Einsatz der Komponenten in Hightech-Produkten müssen die Beschichtungen hohe Qualitätsanforderungen erfüllen. Das optische Messsystem ANALIZEsingle misst erstmals Vollständigkeit, Schichtdicke und Elementverteilung von Beschichtungen während der Produktion.

Wer einmal einen Fensterrahmen lackiert hat, weiß um die Schwierigkeit, eine makellose Schicht auf eine Fläche auszubringen. Ungleich komplizierter ist es, Beschichtungen mit Stärken bis hinunter in den Bereich von wenigen Nanometern auf komplex geformte Bauteile aufzubringen. Verschiedenste Verfahren wie Sputtern, Galvanotechniken oder Fällungsreaktionen mit Sprüh- oder Tauchbeschichtung kommen dabei zum Einsatz. Fehler beim Beschichtungsprozess sind hier kein ästhetisches Problem: Unvollständige oder inhomogene Schichten können Funktion und Qualität des späteren Gesamtprodukts beeinträchtigen. Dies leuchtet unmittelbar ein, denkt man etwa an defekte Korrosionsschutzschichten oder unvollständig aufgebrachte Haftvermittler, die dafür sorgen, dass Lackschichten dauerhaft auf Autokarosserien haften. Aber auch bei beschichteten Elektronikbauteilen, wo hauchdünne Kupferschichten zur Wärmeableitung oder Kontaktierung genutzt werden, können minderwertige Beschichtungen zum Ausfall des Bauteils führen.

Da ein homogener Schichtauftrag nicht immer zuverlässig erreicht wird, ist zur Prozesskontrolle und Qualitätssicherung eine permanente Messung der Schichtdicke von

großem Vorteil. Bekannte Verfahren zur Bestimmung der Elementzusammensetzung wie etwa Röntgenfluoreszenz (XRF), Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX), Glimmentladungsspektroskopie (GDOES), Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) oder Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) sind nicht für den Einsatz im Produktionsprozess geeignet und haben zudem Einschränkungen, was die detektierbaren Elemente betrifft. Lediglich Röntgenfluoreszenz taugt für den Einsatz in der Fertigungslinie. Sehr dünne Schichten, zum Beispiel nur wenige Nanometer dicke Korrosionsschutzschichten, können damit allerdings in der Fertigungslinie nicht detektiert werden.

Materialplasma gibt Aufschluss über Elementzusammensetzung, Elementverteilung und Schichtdicke

Das Schichtdickenmesssystem ANALIZEsingle ermöglicht es erstmals, die chemische Elementverteilung von Bauteiloberflächen orts aufgelöst während der Produktion zu messen. Aus der Elementverteilung wird die Dicke nanometerstarker Beschichtungen mit einer Genauigkeit von ± 10 Prozent bestimmt. Um die Schichtdicke am jeweiligen Messpunkt zu bestimmen, wird eine spezielle Form der

LASERINDUZIERTE PLASMASPEKTROSKOPIE (LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY, LIBS):

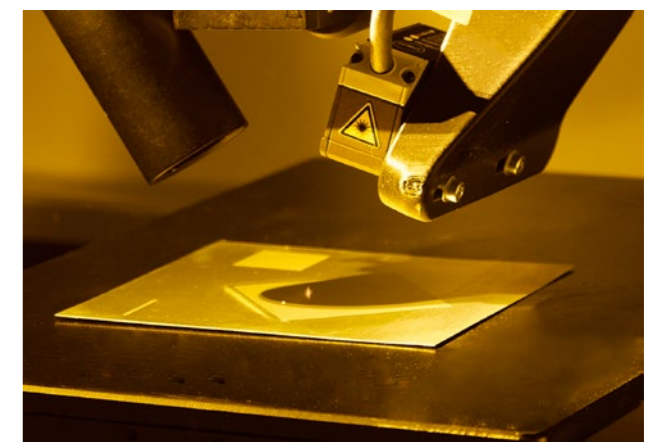
Ein Kurzpuls-Laser schlägt wenige Kubikmikrometer Material aus einer Oberfläche heraus. Dieses Material bildet ein Gemisch geladener Teilchen, ein sogenanntes Plasma, das ähnlich einem Funken ein materialspezifisches Lichtspektrum emittiert. Anhand der spektralen Analyse der emittierten Strahlung lässt sich die Elementverteilung des abgetragenen Volumens bestimmen. Der winzige Materialabtrag ist für die allermeisten Anwendungen unkritisch. In Ausnahmefällen, etwa bei der Beschichtung sehr glatter Oberflächen, besteht die Möglichkeit, an unkritischen Stellen – z. B. an Schneidkanten – zu messen.

laserinduzierten Plasmaspektroskopie verwendet: Es reicht ein einziger Laserpuls, der sowohl Beschichtungsmaterial als auch Material aus der Bauteiloberfläche abträgt. Die jeweils für das Beschichtungs- und das Bauteilmaterial charakteristischen Bereiche des Emissionsspektrums werden miteinander verglichen. Auf dieser Basis lässt sich die Schichtdicke ermitteln. Gleichzeitig gibt das Spektrum Aufschluss über das Mischungsverhältnis der Beschichtungskomponenten, sodass die Homogenität der Zusammensetzung der Schichten geprüft werden kann. Die Auswertung des Spektrums erfolgt unmittelbar nach der Messung, sodass die Parameter des Beschichtungsprozesses aufgrund dieser Daten nicht nur kontrolliert, sondern auch schnell nachgeregelt werden können.

Schichtdicke innerhalb von einer Sekunde bestimmen

In der Linie wird ANALIZEsingle so positioniert, dass das Blech am Messfleck um eine Umlenkrolle läuft. Für eine flächige Messung soll der Messkopf so weiterentwickelt werden, dass er über die gesamte Breite des Bandes bewegt werden kann. Die Anzahl der Messpunkte pro Fläche ergibt sich beim Inline-System aus der Wiederholrate des Lasers von bis zu 100 Pulsen pro Sekunde und der Vorschubgeschwindigkeit des Bandes in der Größenordnung von wenigen Metern pro Sekunde. Bei einer Geschwindigkeit von zwei Metern pro Sekunde sind 50 Messpunkte pro

Meter möglich. Da kleinräumige Unterschiede in der Beschichtungsdicke nicht immer eine Rolle spielen, kann eine Mittelung über einige Messpunkte ausgeführt werden. Damit ist die Bestimmung der Schichtdicke trotzdem innerhalb weniger als einer Sekunde abgeschlossen. Die Messdaten werden automatisiert gespeichert und können sowohl als Regelungsparameter ausgegeben als auch im Sinne einer Industrie 4.0-Datenerfassung für prozessübergreifende Optimierungen genutzt werden.



Ein kontrollierter Materialabtrag durch den Laserpuls ist Voraussetzung für eine hohe Wiederholgenauigkeit. Eingesetzt werden Kurzpuls-Laser mit hoher Puls-zu-Puls-Stabilität.

GRUPPE INLINE VISION SYSTEME

Dr. Tobias Schmid-Schirling, T +49 761 8857 - 281, tobias.schmid-schirling@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe sind kundenspezifische Prüfsysteme, die Bauteiloberflächen während der Produktion mikrometergenau inspizieren. Die kamerabasierten Systeme prüfen Qualitätsmerkmale der Bauteile mithilfe von schneller, hardwarenaher Bildverarbeitung auf Basis modernster Algorithmen – wo notwendig auf der gesamten Bauteiloberfläche. Gleichzeitig kann anhand der Mikrostruktur der Bauteiloberfläche ein digitaler Fingerabdruck für jedes einzelne Bauteil erzeugt und zur Rückverfolgung genutzt werden. Ein solches markierungsfreies »Track & Trace« macht durch die Kombination mit individuellen Prüfdaten den Weg frei für die vollständige Digitalisierung von Produktionsprozessen im Sinne der Industrie 4.0.



Gruppenleiter: Dr. Tobias Schmid-Schirling

>> Bei der Inline-Inspektion von Bahnwaren erzeugt eine helle LED-Beleuchtung einen extrem kurzen Blitz. So entsteht ein Standbild des Messobjekts.

KOMPETENZEN

schnelle bildbasierte Inspektion von Oberflächen | Multi-kamera-Systeme zur vollständigen Inspektion von Bauteilen | Algorithmen zur Auswertung mikroskopisch kleiner Oberflächenstrukturen

ANWENDUNGEN

Prüfsysteme zur Qualitätsüberwachung von Bahnwaren und Langprodukten | kundenspezifische Inspektionssysteme zur vollständigen Prüfung komplex geformter Bauteile im Sekundentakt (Inspect 360°) | Lesesysteme zur sicheren, markierungsfreien Identifikation einzelner Bauteile im Produktionstakt (Track & Trace FINGERPRINT)

SPEZIFIKATIONEN

KONTINUIERLICHE 100-PROZENT-KONTROLLE

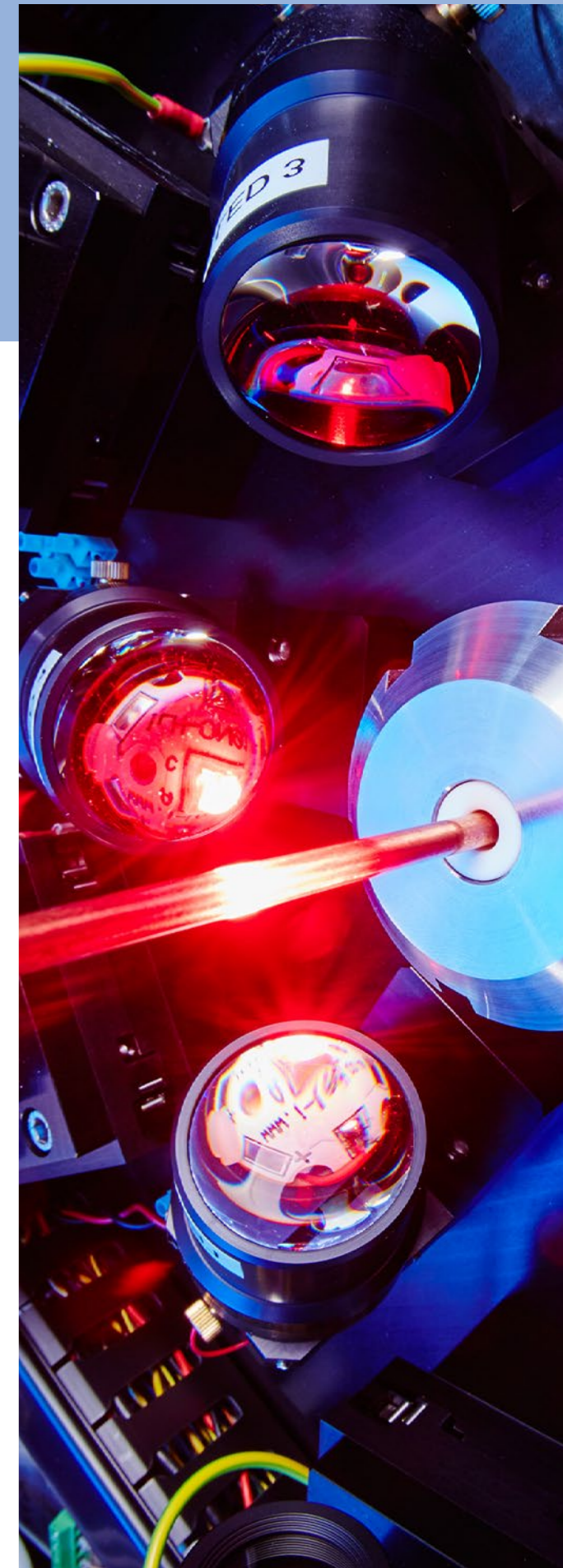
- ▶ Oberflächenkontrolle von Drähten, Kabeln, Bändern oder auch Rohren, Stangen und Profilen
- ▶ in Echtzeit bis 30 m/s
- ▶ Defekterkennung bis 50 µm in der Linie
- ▶ automatische Erkennung, Klassifizierung und Dokumentation der Fehler

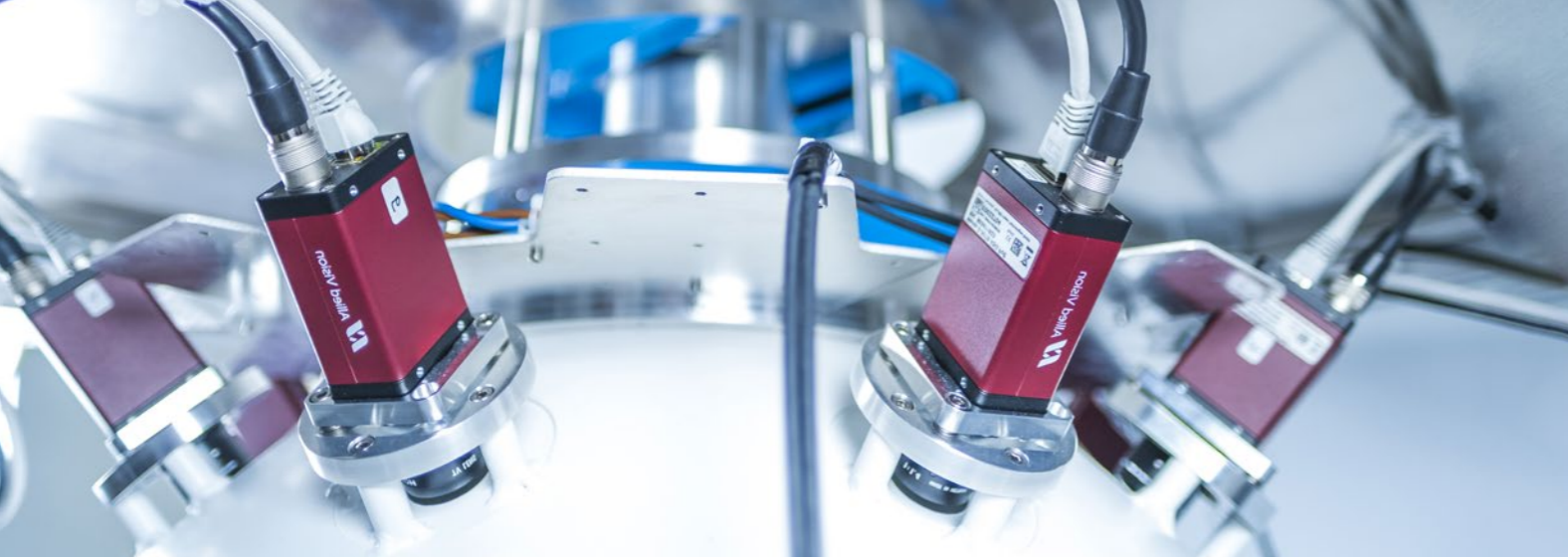
INSPECT 360°: BAUTEILPRÜFUNG IM FREIEN FALL

- ▶ 100-Prozent-Prüfung der Bauteiloberfläche auf Geometriefehler und Oberflächendefekte
- ▶ Inspektion unterschiedlicher Bauteile in der Linie ohne spezifisches Handling und Umrüstaufwand
- ▶ Fehler > 100 µm im Sekundentakt detektierbar

TRACK & TRACE FINGERPRINT: MARKIERUNGSFREIE BAUTEILRÜCKVERFOLGUNG

- ▶ sichere bildbasierte Rückverfolgung von Massenbauteilen in Chargen von vielen Mio. Teilen
- ▶ robust gegenüber lokalen Oberflächenbeschädigungen und -verunreinigungen
- ▶ kleine Signaturen (wenige kB) ermöglichen schnelle Erkennung im Produktionstakt





< Die Qualitätsprüfung von Massenbauteilen scheiterte bisher vor allem am Bauteilhandling. Optische Prüfungen im freien Fall umgehen dieses Problem.

GRUPPE INLINE VISION SYSTEME

Der große Wurf: Bauteil-Inspektion im freien Fall

Hohe Stückzahl, geringer Preis – hohe Qualitätsanforderungen: Die Qualitätskontrolle von Massenbauteilen stellt viele Hersteller von Halbzeugen vor nahezu unlösbare Probleme. Für den Einsatz automatisierter optischer Prüfverfahren müssen die Bauteile gezielt orientiert und positioniert werden. Ein solches Schüttgut-Handling ist jedoch unverhältnismäßig teuer. Inspect 360° von Fraunhofer IPM schafft Abhilfe: Das optische System analysiert Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit von Bauteilen im freien Fall – Handling überflüssig.

Die meisten Produkte bestehen aus einer Vielzahl von Einzelbauteilen. Bis zu tausend verschiedene Halbzeuge aus Metall oder Kunststoff sind es allein im Automobil. Produziert werden die Guss-, Stanz-, Zieh- oder Schmiedeteile im Sekundentakt, bevor sie als Schüttgut weitertransportiert werden. Trotz des geringen Preises übernehmen sie wichtige Funktionen im späteren Produkt. Einmal verbaut können geometrische Abweichung, defekte Oberflächen oder Verunreinigungen fatale Folgen haben, beispielsweise wenn es um Fahrwerks- und Bremskomponenten, Prothesen oder etwa um Dosiervorrichtungen für Medikamente geht. Daher gelten strenge, gesetzlich festgelegte Qualitätsnormen – insbesondere in sicherheitsrelevanten Branchen wie der Automobil- und Luftfahrtindustrie oder der Medizintechnik. Umso erstaunlicher ist es, dass manuelle Sichtprüfung oder taktile Lehrenprüfung auch heute noch häufig Stand der Technik bei der Qualitätsprüfung von Massenbauteilen sind.

Prüfen ohne Handling

Optische Messtechnik kann Maßhaltigkeit und Oberflächen-defekte von Bauteilen zuverlässig und sehr genau prüfen. Problematisch ist beim Schüttgut das dafür notwendige

Bauteil-Handling. Im Sekundentakt purzeln die Bauteile aus den Stanz- oder Gussmaschinen. Hier kann auch moderne Robotik nicht mithalten und wäre letztendlich wohl auch unverhältnismäßig teuer.

Das von Fraunhofer IPM gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD entwickelte Prüfsystem Inspect 360° umgeht das Handling-Problem elegant: Die Bauteile werden direkt vom Förderband nacheinander in eine Hohlkugel befördert und im freien Fall optisch analysiert. Im Bruchteil einer Sekunde passiert das Bauteil die »Prüfkugel«, die innen wie eine Ulbrichtkugel diffus reflektierend gestaltet ist. In dieser Zeit passiert einiges: 27 Kameras erfassen die homogen beleuchtete Oberfläche des fallenden Objekts vollständig in einem Schuss. Die einzelnen Objektbereiche werden aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen, was die Robustheit des Verfahrens deutlich erhöht. Neben 24 hochauflösenden Inspektionskameras registrieren drei Tracking-Kameras mit geringerer Auflösung und Weitwinkeloptik die Lage des Bauteils, das in beliebiger Orientierung in das Freifall-Inspektionssystem fällt.

Das Schwestersystem **F-360° ZUR REINHEITSPRÜFUNG IM FREIEN FALL** detektiert filmische Verunreinigungen und Partikel auf Oberflächen auf Basis von Fluoreszenz-Messungen. Dazu wird das Innere des Prüfvolumens mithilfe von UV-LEDs ausgeleuchtet. Das Licht regt die Fluoreszenz von Produktionsrückständen, z. B. Ölen, Fetten oder nasschemischen Reinigungsmitteln, an. Das von der Oberfläche ausgestrahlte Fluoreszenzlicht wird mithilfe von sechs Kameras aufgenommen. Das Ergebnis: ein Verschmutzungsbild der gesamten Objektoberfläche.

Echtzeit-Abgleich mit idealisiertem 3D-Modell

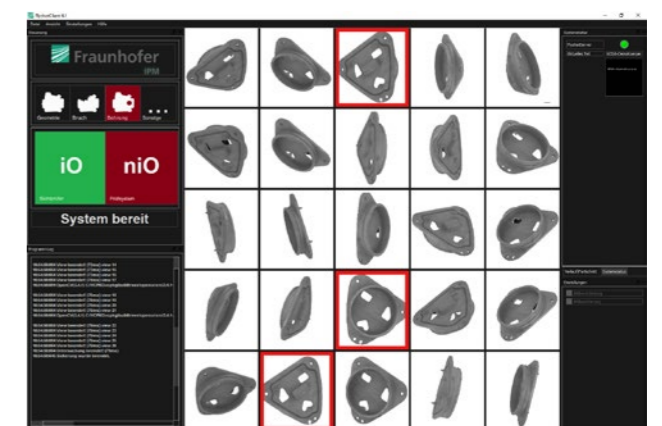
Analysiert werden die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils. Das Schwestersystem F-360° misst zusätzlich Verunreinigungen und Fremdpartikel. Abweichungen bei der Maßhaltigkeit werden über einen Abgleich mit einem zuvor erstellten CAD-konformen 3D-Modell des Bauteils ermittelt. Typische Oberflächendefekte – z. B. Risse, Löcher, Riefen oder Pickel – werden durch den Abgleich mit Gut-Teilen detektiert. Dabei werden geometrische Abweichungen sowie Risse oder Löcher von wenigen 100 µm erkannt.

Die geometrische Komplexität der Bauteile spielt für Inspect 360° keine Rolle – abgesehen von optisch nicht zugänglichen Kavitäten und transparenten Bauteilen. Das System prüft Bauteile mit Durchmessern oder Kantenlängen ab wenigen Millimetern bis zu einem Durchmesser von 20 cm – je nach Anforderung wird der Prüfraum entsprechend ausgelegt. Speziell angeordnete Hochleistungs-LED sorgen für die geeignete Beleuchtung im Inneren der Hohlkugel. Um Hintergrund- oder Fremdlicht vollständig auszublenden, ist das Inspektionssystem bis auf die beiden kleinen Öffnungen zum Ein- und Austritt des Prüfobjekts vollständig gekapselt.

»Bits statt Robots«

Die Freifall-Inspektion im Produktionstakt stellt hohe Anforderungen nicht nur an Optik- und Systemdesign, sondern auch an die Datenverarbeitung. Speziell entwickelte

KI-basierte Algorithmen ermitteln den Bauteiltyp und die Lage der Prüflinge direkt nach der Aufnahme. Anschließend werden die Einzelbilder der entsprechenden Ansicht des Bauteil-CAD-Modells zugeordnet. So wird die Textur der Gesamtoberfläche durch Echtzeit-Bildverarbeitung auswertbar gemacht. Definierte Bereiche auf dem Modell können ausgeblendet oder gezielt auf Defekte untersucht werden. Auch die Unterscheidung nach Qualitätsklassen anhand zuvor definierter Normabweichungen ist möglich. Qualitätskonforme Teile werden beim Austritt aus dem Prüfraum als solche klassifiziert, Mängelbeispiele aussortiert.



Bedienoberfläche von Inspect 360°: Bildperspektiven, auf denen Fehler festgestellt wurden, sind markiert. Durch Abgleich der Ergebnisse von Sichtprüfung und Prüfsystem können Prüfkriterien und Schwellenwerte nachträglich angepasst werden.

GRUPPE GEOMETRISCHE INLINE-MESSSYSTEME

Dr. Alexander Bertz, T +49 761 8857-362, alexander.bertz@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung von Messsystemen, die Geometrie und 3D-Oberflächenstruktur komplexer Bauteile in der Produktionslinie berührungslos und hochgenau vermessen und Messdaten in Echtzeit bereitstellen. Dazu werden modernste optische Messtechniken wie die Digitale Holographie oder die Speckle-Korrelation mit extrem schnellen Auswerteverfahren kombiniert. So entstehen Systeme, die es erstmals ermöglichen, Verzahnungsgeometrien binnen weniger Sekunden optisch zu erfassen, Werkstücke hochgenau in der Werkzeugmaschine zu vermessen oder kleinste Bauteilverformungen und Rissbildung unter Belastung zu erkennen.



Gruppenleiter: Dr. Alexander Bertz

>> Das Verzahnungsmesssystem HoloGear erfasst alle Funktionsflächen eines Zahnrads vollständig und mikrometergenau mithilfe Digitaler Mehrwellenlängen-Holographie.

KOMPETENZEN

Topographiemessung mit Digitaler Holographie | flächige Messung der Formabweichung von Verzahnungen im sub- μm -Bereich | dynamische Verformungs- und Dehnungsmessung an Bauteilen und Materialverbänden auf der μm -nm-Skala

ANWENDUNGEN

Bauteilprüfung in der Werkzeugmaschine zur mikrometergenauen Herstellung und Messung – ohne das Werkstück neu zu spannen | holographische Systeme zur genauen und berührungslosen Vermessung von Verzahnungsgeometrien in der Linie | zyklische Ermüdungsmessung zur Versagensanalyse – berührungslos, optisch dehnungsgeregt

SPEZIFIKATIONEN

INLINE-BAUTEILPRÜFUNG

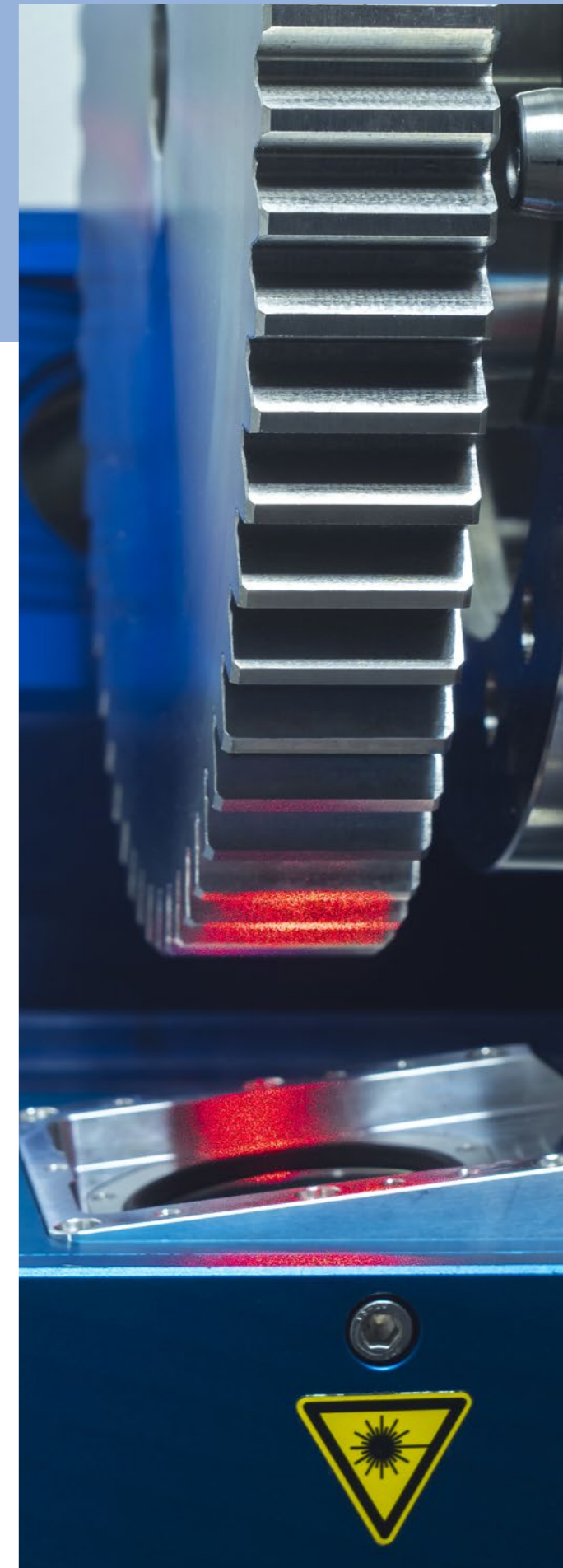
- ▶ Topographiemessung von Präzisionsbauteilen
- ▶ Messfeldgröße $30 \times 30 \text{ mm}^2$, applikationsspezifisch skalierbar
- ▶ Messgenauigkeit axial $< 1 \mu\text{m}$, lateral $< 10 \mu\text{m}$, abhängig von der Bildfeldgröße
- ▶ Messzeit $< 0,1 \text{ s}$ bis zum 3D-Bild mit 10 Mio. Punkten
- ▶ Arbeitsabstand flexibel bis ca. 300 mm, mechanisches Fokussieren entfällt

VERZÄHNUNGSMESSUNG

- ▶ 100-Prozent-Kontrolle der gesamten Verzahnung in wenigen Minuten
- ▶ Einzelpunkt-Messgenauigkeit $< 1 \mu\text{m}$
- ▶ Gerad- und Schrägverzahnungen möglich
- ▶ aktive Unterdrückung von Mehrfachreflexionen an den Zahnflanken
- ▶ berührungslose Messung auch an bewegten Objekten

DYNAMISCHE VERFORMUNGSMESSUNG

- ▶ zeitaufgelöste bildgebende Messung mit bis zu 1 kHz Bildrate
- ▶ Bildfeld von $10 \times 10 \text{ mm}^2$
- ▶ Messgenauigkeit $< 0,5 \mu\text{m}$
- ▶ berührungs- und markierungsfrei bis $1000 \text{ }^\circ\text{C}$
- ▶ dehnungsgeregelte Belastungsmessung und Rissverhalten
- ▶ Ermüdungsversuche nach Norm in nur 1 Stunde Messzeit
- ▶ Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI)





< Werkzeugmaschinen müssen mikrometergenau produzieren – und stoßen dabei an ihre Grenzen. Mit dem kabellosen 3D-Sensor HoloPort steht erstmals ein Sensor zur Verfügung, der direkt in der Werkzeugmaschine die Topographie von Bauteilen flächig und sub-mikrometergenau messen kann.

GRUPPE GEOMETRISCHE INLINE-MESSSYSTEME

Interferometrie in der Werkzeugmaschine

Präzisionsbauteile müssen auf wenige Mikrometer genau produziert werden. Moderne Bearbeitungsmaschinen kommen dabei an ihre Grenzen. Ein portabler optischer Sensor von Fraunhofer IPM sorgt für die notwendige Bauteilqualität: Der HoloPort-Sensor erfasst 3D-Strukturen flächig und mikrometergenau – direkt in der Werkzeugmaschine.

Präzisionsbauteile müssen häufig so genau gefertigt sein, dass selbst modernste Bearbeitungsmaschinen dies nicht immer zuverlässig liefern können. Allein geänderte Trajektorien, geringfügig abgenutzte Werkzeuge oder intern falsch kalibrierte Sensoren können schon zu Geometrien führen, die außerhalb der Spezifikation liegen. Das präzise Vermessen geschieht heute meist taktil mit Koordinatenmessmaschinen in separaten Messräumen. Das ist umständlich, langsam und nur in Stichproben möglich. Eine eventuell notwendige Nachbearbeitung erfordert ein erneutes Einrichten des Werkstücks in der Maschine. Der kabellose optische Sensor HoloPort von Fraunhofer IPM verspricht nun Abhilfe: Er misst die frisch bearbeitete Bauteiloberfläche flächig, direkt in der Werkzeugmaschine. Der Sensor ist so konzipiert, dass er zwischen zwei Bearbeitungsschritten wie ein Werkzeug von der Spindel gegriffen werden kann, um Oberflächendaten ohne neues Spannen berührungslos zu erfassen. Seine interferometrische Genauigkeit ermöglicht erstmals sogar die direkte Regelung der Werkzeugmaschine. Finanziert wurde die Entwicklung im Rahmen des Forschungsprojekts Holo-Cut durch die Baden-Württemberg Stiftung gGmbH.

100-Prozent-Qualitätskontrolle im Fertigungsprozess
HoloPort misst kontaktlos und hochpräzise und arbeitet dabei so schnell und robust, dass er direkt in die Werkzeugmaschine integriert werden kann. Das Werkstück bleibt eingerichtet und die Messwerte können direkt in eine Regelschleife zur Nachbearbeitung einfließen. HoloPort ermöglicht somit erstmals eine echte 100-Prozent-Qualitätskontrolle im Fertigungsprozess. Der Sensor nutzt die Digitale Mehrwellenlängen-Holographie zur 3D-Inline-Vermessung und ist axial nicht größer als ein Standard-Fräswerkzeug. Er besitzt einen integrierten Energiespeicher und erlaubt eine vollständig kabellose Ansteuerung und Auswertung. Hierfür wurden die für die Digitale Mehrwellenlängen-Holographie benötigten frequenzstabilisierten Laser sowie die Signalerzeugung und -auswertung direkt in den kompakten Sensorkopf integriert.

Das System erfasst die Topographie selbst rauer Objekt-oberflächen mit interferometrischer Genauigkeit. So lassen sich Fräsparemeter, Frästrajektorie oder die Abnutzung der Werkzeuge per Regelschleife überwachen und optimieren. In Sekundenbruchteilen stehen alle relevanten Maße und Oberflächenparameter zur Verfügung. Die Reproduzierbarkeit der Höhenmesswerte ist dabei besser als ein Mikrometer. Durch die Prüfung in Echtzeit lässt sich einerseits die Ferti-

Bei der **DIGITALEN MEHRWELLENLÄNGEN-HOLOGRAPHIE** wird neben der beim Foto üblichen räumlichen Intensitätsverteilung des Lichts zusätzlich auch die Phaseninformation des Lichts erfasst. Voraussetzung hierfür ist eine kohärente Lichtquelle – typischerweise ein Laser. Wird die Oberfläche eines Prüflings mit Laserlicht beleuchtet, ist in der Phasenverteilung der rückgestreuten Lichtwelle die Form des Prüflings gespeichert. Durch die interferometrische Aufzeichnung und anschließende digitale Rekonstruktion wird diese Information zugänglich und genutzt, um Oberflächen dreidimensional zu vermessen. Das Grundprinzip der Holographie geht auf eine Erfindung von Dennis Gabor aus dem Jahr 1948 zurück, für die er 1971 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde.

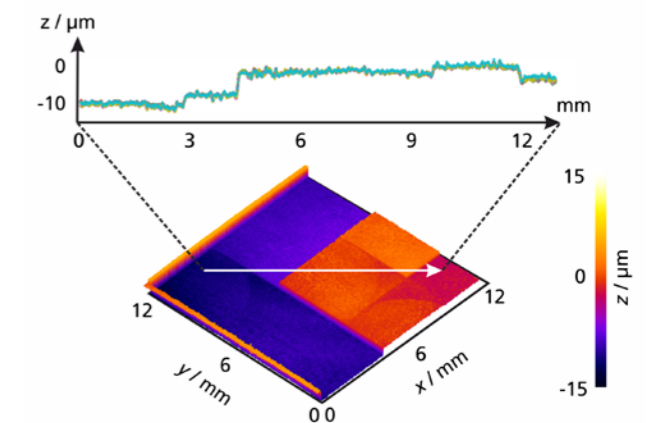
gung überwachen, andererseits aber auch die Qualität jedes einzelnen Werkstücks zu 100 Prozent garantieren. Ein weiterer Pluspunkt von HoloPort ist die kostengünstige Integration in bestehende Fertigungsprozesse: Durch den Einsatz direkt in der Werkzeugmaschine entfallen kostspielige Handling-Prozesse nahezu vollständig.

Topographieanalyse in Echtzeit

Die Abbildung rechts zeigt am Beispiel eines Gehäusedeckels, mit welcher hoher Genauigkeit HoloPort sowohl die Tiefe als auch die Oberflächenrauheit einzelner Frässpuren flächig erfasst. Üblicherweise werden zur Oberflächencharakterisierung und damit zur Prüfung des Fräsergebnisses 2D-Profilschnitte herangezogen. Ein solcher 2D-Schnitt beschreibt Oberflächen jedoch nur sehr begrenzt und reicht z. B. nicht aus, um Riefen oder zufällige Strukturelemente zu charakterisieren. Die 2D-Oberflächenauswertung ist in diversen Normen abgebildet (ISO 3274, ISO 11562, ISO 13565-1, ISO 4287, ISO 4288, ISO 1365-2). Der HoloPort-Sensor bietet die Möglichkeit, die gemessene Oberflächentopographie flächig auszuwerten, wodurch eine funktions- und strukturorientierte 3D-Auswertung der Oberfläche nach Normenreihe EN ISO 25178 ermöglicht wird. Darin werden unter anderem die in der Praxis etablierten 2D-Kenngrößen Ra, Rq und Rz auf ihre entsprechenden 3D-Kenngrößen Sa, Sq und Sz übertragen.

Automatisierte Inline-Inspektion

Der portable Sensorkopf HoloPort kann in vielen Fertigungslinien zum entscheidenden Baustein werden, um die Inline-Inspektion hochpräziser Bauteile vollständig automatisieren zu können. Durch den Wegfall komplizierter Handling-Verfahren bietet der Sensor zudem enorme Kostenvorteile: Der Sensor ist so konzipiert, dass er in der Werkzeugmaschine wie ein Werkzeug von der Spindel gegriffen werden kann. Das senkt unterm Strich die Prüfkosten für den Gesamtprozess.



Der HoloPort-Sensor erfasst die Oberfläche und Tiefe von Fräsbahnen flächig. Ein Linienschnitt über zehn Messungen der Oberflächendaten verdeutlicht die Messgenauigkeit.

»Wir erweitern den Einsatzbereich von Laserscannern: in die Luft und ins Wasser.«

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« bedienen wir die gesamte Prozesskette für die Erfassung, Auswertung und Visualisierung der 3D-Geometrie und Lage von Objekten. Dazu entwickeln wir nicht nur Laserscanner, sondern auch maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamerasysteme. Diese Geräte messen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision insbesondere von bewegten Plattformen aus. Speziell entwickelte Software wertet die Messdaten vollautomatisiert aus und interpretiert sie. Dazu nutzen wir Techniken aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) wie beispielsweise »Deep-Learning«. Anwendungsspezifisch aufbereitete und visualisierte Daten liefern Experten eine solide Entscheidungsgrundlage, zum Beispiel wenn es um die Planung von Infrastrukturmaßnahmen geht.

Besonderes Augenmerk liegt auf der Geschwindigkeit, Robustheit und langen Lebensdauer der Systeme. Objekte und Formen werden über einen weiten Größenbereich dreidimensional erfasst: von wenigen Zentimetern bis in den 100-Meter-Bereich. Die Messsysteme sind weltweit im Einsatz – zur Überwachung von Bahninfrastruktur ebenso wie zur Vermessung von Straßenoberflächen. Neue Anwendungsbereiche sind die mobile Datenerfassung aus der Luft und unter Wasser.

Gruppe **Mobiles terrestrisches Scanning**

- ▶ Systeme für die Bahn
- ▶ Systeme für die Straße
- ▶ Systeme für meteorologische Anwendungen (u. a. Wind-LiDAR)
- ▶ schnelle und robuste Laserscanner
- ▶ Software für die Datenauswertung

Gruppe **Airborne- und Unterwasser-Scanning**

- ▶ Systeme für autonome Flugplattformen
- ▶ Systeme für Unterwasseranwendungen
- ▶ Miniaturisierung von Messsystemen
- ▶ Systeme auf der Basis von Low-Cost- und Consumer-Produkten (u. a. Smartphones)
- ▶ Software für die Datenauswertung

< Nach Datenakquisition und -verarbeitung ist die Visualisierung von Messdaten der nächste logische Schritt in der Systemkette.



KONTAKT

Prof. Dr. Alexander Reiterer
Abteilungsleiter
T +49 761 8857 - 183
alexander.reiterer@
ipm.fraunhofer.de

Gruppe **Smarte Datenvisualisierung**

- ▶ Echtzeit-Visualisierung räumlicher Daten
- ▶ smarte Datenkonzentration
- ▶ Erstellung synthetischer Messdaten (u. a. für das maschinelle Lernen)
- ▶ flexible Funktionsbibliotheken
- ▶ plattformunabhängige Systeme

GRUPPE MOBILES TERRESTRISCHES SCANNING

Prof. Dr. Alexander Reiterer, T +49 761 8857-183, alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung optischer Messsysteme basierend auf Lichtlaufzeitmessung für den mobilen Einsatz auf Schienen- und Straßenfahrzeugen. Die Systeme bestimmen mit hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision Abstände zu Objekten. Kombiniert mit einer Scaneinheit erfassen sie dreidimensionale Objekt-Geometrien. Mobiles Laserscanning erfordert eine präzise Positions- und Lageerkennung des Messsystems. Die Gruppe entwickelt hierfür spezielle, kamerabasierte Verfahren, die – eigenständig oder in Kombination mit konventioneller Inertialsensorik – eine Zuordnung der Daten zu einem festen lokalen oder globalen Koordinatensystem ermöglichen. Weiterer Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die automatisierte Interpretation von 2D- und 3D-Daten mithilfe selbstlernender Algorithmen (u. a. »Deep-Learning«).



Gruppenleiter: Prof. Dr. Alexander Reiterer

>>Hochgeschwindigkeits-Laserscanner erzeugen eine detaillierte Punktwolke der Umgebung. Herzstück ist die schnell rotierende Ablenkheit.

KOMPETENZEN

Lichtlaufzeit-Messsysteme zur submillimetergenauen Erfassung von Distanzen | schnelle Laserscanner zum Abtasten von Umgebungen | robuste Laserscanner für den Einsatz auf Straßen- und Schienenmessfahrzeugen

ANWENDUNGEN

Scanner- und Kamerasysteme zur Vermessung und Prüfung von Bahninfrastruktur (Gleisen, Bahnsteigen und Oberleitungen) | Systeme zur schnellen und detailgenauen Erfassung von Straßenoberflächen und zur Tunnelinspektion (Rissdetektion im Millimeterbereich) | Systeme auf mobilen Plattformen und autonomen Fahrzeugen zur Erkundung schwer zugänglicher Objekte, z. B. integriert auf mobilen Robotersystemen | vollautomatisierte Analyse und Klassifizierung von 2D- und 3D-Daten mit Hilfe von »Deep Learning«-Algorithmen (z. B. zur Analyse von Straßenszenen)

SPEZIFIKATIONEN

SYSTEME FÜR DIE BAHN

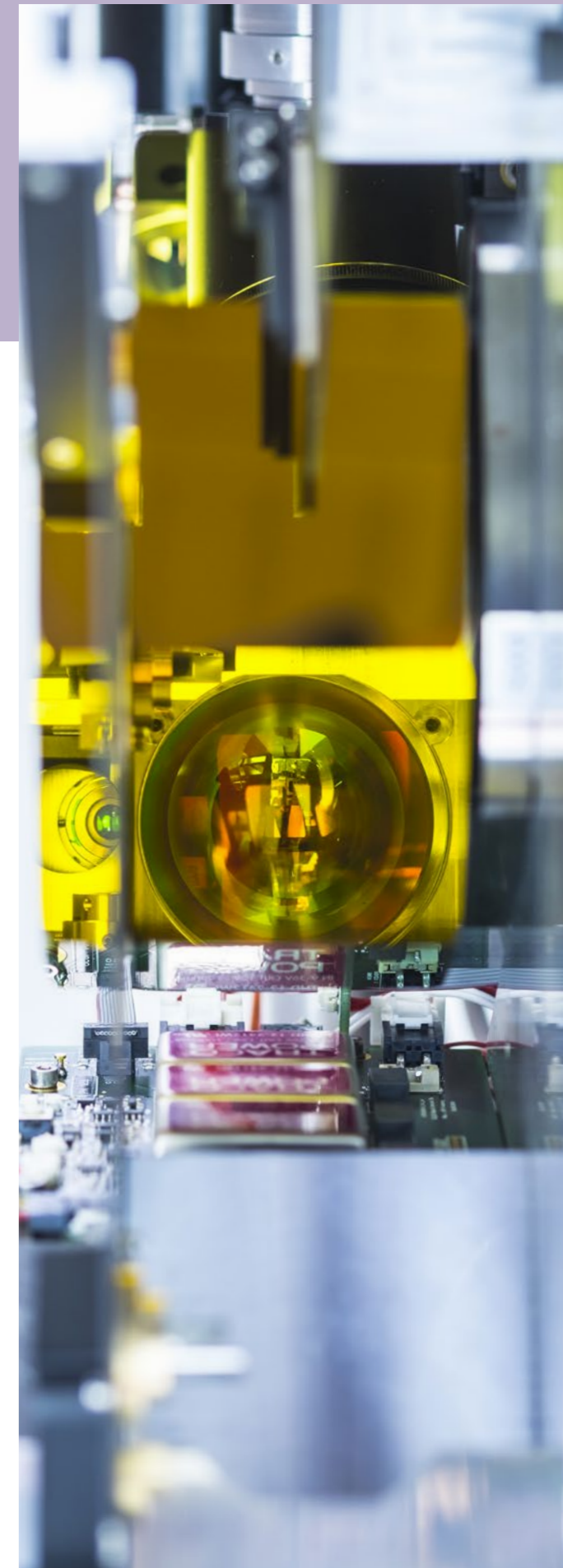
- ▶ Erfassen von Bahnoberleitungen bei Geschwindigkeiten bis 250 km/h
- ▶ Überwachung des Lichtraums von Bahnstrecken mit einer Präzision von 3 mm
- ▶ Abtasten der Umgebung mit bis zu 800 Profilen pro Sekunde
- ▶ Messung des Schienenprofils mit einer Präzision von 0,3 mm

SYSTEME FÜR DIE STRASSE

- ▶ Messung der Querebenheit mit einer Präzision von 0,3 mm
- ▶ Aufnahme von 2 Millionen Messpunkten pro Sekunde
- ▶ Erfassung von Straßenkorridoren bis 300 m Breite mit einer Präzision von 3 mm
- ▶ Rissdetektion in Straßenoberflächen bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h mit einer Auflösung von 1 mm

AUTOMATISIERTE INTERPRETATION VON DATEN

- ▶ vollautomatische Interpretation von 2D- und 3D-Messdaten, u. a. durch »Deep Learning«
- ▶ Implementierung von cloudbasierten Lösungen für die Datenverarbeitung
- ▶ Aufbau umfangreicher Trainingsdatensätze für das automatisierte Anlernen von Algorithmen





< Feine Risse in der Fahrbahnoberfläche sind oftmals Vorboten größerer Schäden. Für eine wirtschaftliche Instandhaltung gilt es, solche Schäden so früh wie möglich zu erkennen und zu beheben.

GRUPPE MOBILES TERRESTRISCHES SCANNING

Intensiv betrachtet: Rissdetektion auf Straßenoberflächen

Zur Ebenheitsmessung von Straßenoberflächen sind heute vermehrt Laserscanner im Einsatz. Kleinere Strukturschäden werden jedoch noch immer mithilfe zusätzlicher Kameras erfasst. Fraunhofer IPM hat nun seinen Pavement Profile Scanner PPS aufgerüstet: Der PPS Plus liefert neben geometrischen 3D-Informationen erstmals auch fotorealistiche Bilder der Fahrbahnoberfläche, auf denen millimeterfeine Strukturen, zum Beispiel Risse, erkennbar sind. Erzeugt werden die 2D-Bilder nicht von einer Kamera, sondern von einem zusätzlichen Intensitätslaser.

Für die Instandhaltung von Straßen sind neben dem Höhenprofil vor allem Oberflächenschäden wie zum Beispiel Flickstellen, Ausbrüche oder feine Risse interessant. Werden diese Schäden in einem frühen Stadium erkannt, lassen sich mitunter teure Folgeschäden vermeiden. Der Fahrbahns scanner PPS von Fraunhofer IPM, auf dem das neue Modell aufbaut, wurde als einziges laserbasiertes Messsystem von der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt für die Messung der Querebenheit von Straßen zugelassen. Das Gerät ist weltweit führend, was Präzision und Auflösung von Straßenbelagsmessungen angeht. Der schuhkartongroße Scanner ist auf einem Messfahrzeug montiert und tastet die Straßenoberfläche mit einem augensicheren Laserstrahl auf einer Breite von etwa vier Metern ab. Der Abstand zur Fahrbahn wird per Phasenlaufzeitverfahren submillimetergenau bestimmt. Der Laser scannt die Oberfläche mithilfe eines rotierenden Polygonspiegels quer zur Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs und erzeugt dabei 800 Profile pro Sekunde. Jedes Profil besteht aus bis zu 900 Messpunkten, je nach gewählter Messfrequenz. So erzeugt der PPS ein detailliertes 3D-Höhenprofil des Fahrbahnbelags. Bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h beträgt der Messpunktabstand in Längsrichtung allerdings noch immer zirka 28 Millimeter, in Querrich-

tung sind es 4,5 Millimeter. Viele Schäden werden bereits bei einer solchen Auflösung sichtbar; für die Rissdetektion im Millimeterbereich reicht die Auflösung jedoch nicht.

Intensitätslaser: Foto ohne Kamera

Um millimeterfeine Schäden zu erkennen, haben Wissenschaftler am Fraunhofer IPM den PPS nun mit einer patentierten Technologie aufgerüstet: Beim PPS Plus ersetzt ein zusätzlicher Laser die üblicherweise für die Rissdetektion verwendeten Kameras. Gemessen wird die Intensität des rückgestreuten Lichts. Aus diesen Intensitätsinformationen lässt sich ein fotorealistiche Abbild mit einer Auflösung im Millimeterbereich ableiten, auf dem auch sehr feine Schäden erkennbar sind. Für den patentierten 2D-Messaufbau wurden Optik, Mechanik und Detektor neu entwickelt und mit der Laserablenkvorrichtung (Spiegelpolygon), Empfangsoptik und Empfangseinheit des 3D-Laserscanners synchronisiert.

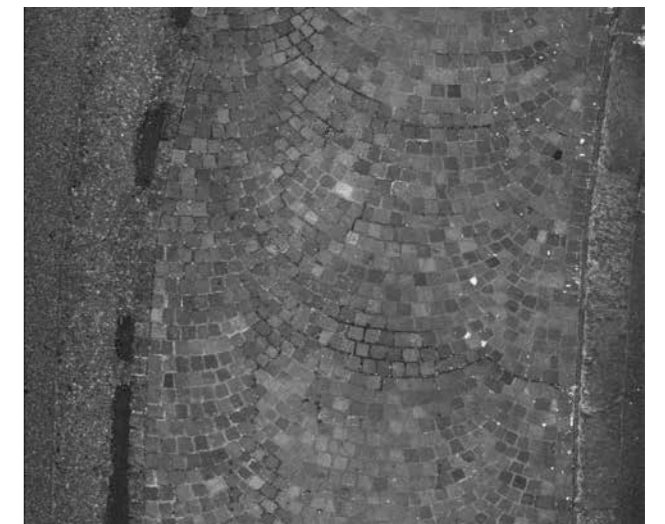
Die Intensität eines rückgestreuten Laserstrahls zu messen, bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber der klassischen Kameratechnik, wie sie üblicherweise zur Rissdetektion eingesetzt wird: Kameras benötigen eine starke zusätzliche

KOMBINIERTE INTENSITÄTS- UND ABSTANDSMESSUNGEN MIT LASERN:

Bei der herkömmlichen Laser-Abstandsmessung wird immer auch die Intensität des rückgestreuten Lichts gemessen. Die optimale Wellenlänge, Messfrequenz und Fokusgröße sind jedoch für Distanzmessung und Intensitätsmessung unterschiedlich. Nur mit einem separaten Laser für die Intensitätsmessung, bei dem diese Parameter frei wählbar sind, lassen sich Grauwertbilder in Kameraqualität erzeugen. Der Trick: Beide Laser werden über einen einzigen Scan-Spiegel abgelenkt, sodass Geometrie- und Bilddaten grundsätzlich exakt übereinanderliegen. Die räumliche Merkmalszuordnung ist somit systemimmanent.

Beleuchtung, was sperrige Aufbauten auf den Messfahrzeugen zur Folge hat. Die Integration von Distanz- und Intensitätsscanner im PPS Plus erlaubt einen kompakten optischen Aufbau und ein flexibles Systemdesign zur Installation auf verschiedenen mobilen Plattformen. So können mit diesem System reproduzierbare Messungen im rollenden Verkehr ohne Straßensperrungen durchgeführt werden. Anders als Kameras liefert der Laser Bilder von hoher Tiefenschärfe unabhängig von der Umgebungsbeleuchtung – auch dies ein großer Vorteil gegenüber Kameras, denn die Straße bei unterschiedlichen Umgebungslichtverhältnissen so auszuleuchten, dass die Bildqualität identisch ist, ist praktisch unmöglich – für eine automatisierte und standardisierte Auswertung aber unabdingbar. Die hohe farbliche Dynamik der Straße – von dunklem Asphalt bis zur helleren Fahrbahnmarkierung – stellt für Intensitätsmessungen, anders als für Bildaufnahmen, kein Problem dar. Das Zusammenfügen der einzelnen Kamerabilder und die aufwändige nachträgliche Fusion von Scanner- und Kameradaten entfällt.

Die Wellenlänge des Lasers für die Intensitätsmessung wurde so gewählt, dass der Bildkontrast optimal ausfällt. Während der Distanzlaser mit einer Messfrequenz von 1 MHz ausreichend schnell misst, ist für die Intensitätsmessung bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h eine Pixelmessfrequenz von zirka 4 MHz nötig. Daraus ergibt



Der Pavement Profile Scanner erzeugt fotorealistiche Bilder der Fahrbahnoberfläche, auf denen millimeterfeine Strukturmerkmale erkennbar sind.

sich eine Ortsauflösung von zirka 1 mm über die Scanbreite von 4 Metern. Um auch in Fahrtrichtung eine höhere Punktdichte zu erreichen, wird der zweite Laserstrahl in Fahrtrichtung zusätzlich aufgefächert und mit mehreren Detektoren gleichzeitig gemessen. Dies erhöht die Auflösung in Fahrtrichtung, ohne dass die mechanische Scanfrequenz geändert werden muss. Vier Straßenoberflächenscanner vom Typ PPS Plus sind bereits im Einsatz, drei weitere werden derzeit ausgerüstet.

GRUPPE AIRBORNE- UND UNTERWASSER-SCANNING

Simon Stemmler, T +49 761 8857-211, simon.stemmler@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung optischer Messsysteme für den Einsatz auf Drohnen und Unterwasserfahrzeugen. Die Systeme nutzen Lichtlaufzeitmessung, um mit hoher Genauigkeit Abstände zu Objekten zu messen und in Kombination mit Kameras dreidimensionale Strukturdaten zu generieren. Dank extremer Leichtbauweise und Miniaturisierung können die Messsysteme auf kleinen fliegenden Plattformen eingesetzt werden. Weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von Komplettsystemen zur Erfassung von 3D-Daten in trüben Medien. Sie ermöglichen unter anderem die Zustandsüberwachung von Unterwasser-Bauwerken wie zum Beispiel Offshore-Windkraftanlagen. Weitere Arbeiten der Forschungsgruppe zielen auf die Entwicklung von schlanken 3D-Messtechniklösungen auf Basis von Low-Cost- und Consumer-Produkten wie z. B. Smartphones.



Gruppenleiter: Simon Stemmler

>> Laserscanning unter Wasser erfordert besonders robuste Systeme. Gemessen wird mit Pulslaufzeitverfahren.

KOMPETENZEN

Lichtlaufzeit-Messsystem zur subzentimetergenauen Erfassung von Distanzen | leichte Laserscanner zur Installation auf fliegenden Plattformen | spezielle Laserscanner für das Abtasten der Umgebung unter Wasser | Nutzung von Consumer- und Low-Cost-Sensorik für ein breites Anwendungsspektrum

ANWENDUNGEN

Scanner- und Kamerasysteme auf fliegenden Plattformen (UAV) zur Vermessung und Überprüfung von Baustellen, Brücken und Vegetationsflächen | Scanner auf Unterwasser-Robotern (Remotely Operated Vehicle, ROV) zur Erfassung von Infrastrukturelementen wie z. B. Pipeline-Fundamenten oder Offshore-Windkraftanlagen | Sensoren auf Basis von Low-Cost- und Consumer-Sensorik zur effizienten und kostengünstigen Objekterfassung z. B. auf Baustellen | spezielle Software zur Datenauswertung, z. B. für die Beurteilung von Vegetationszuständen

SPEZIFIKATIONEN

SYSTEME FÜR DIE LUFT

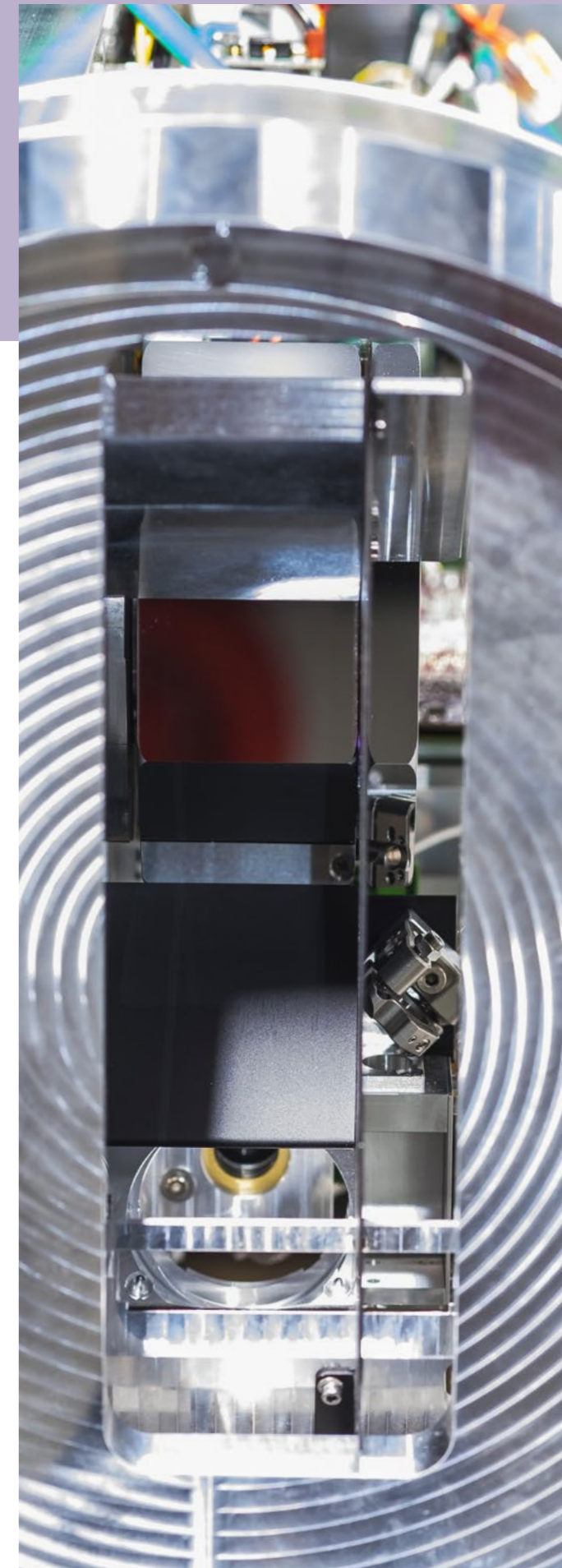
- ▶ Messsysteme (Laserscanner und Kameras) mit einem Gesamtgewicht von unter 2,5 kg
- ▶ Messpräzision von 1 cm
- ▶ typische Messdistanzen bis 100 m
- ▶ Messfrequenzen bis 60 kHz
- ▶ Positionsbestimmung mittels visueller Odometrie, Positionierungs- und Orientierungssystemen

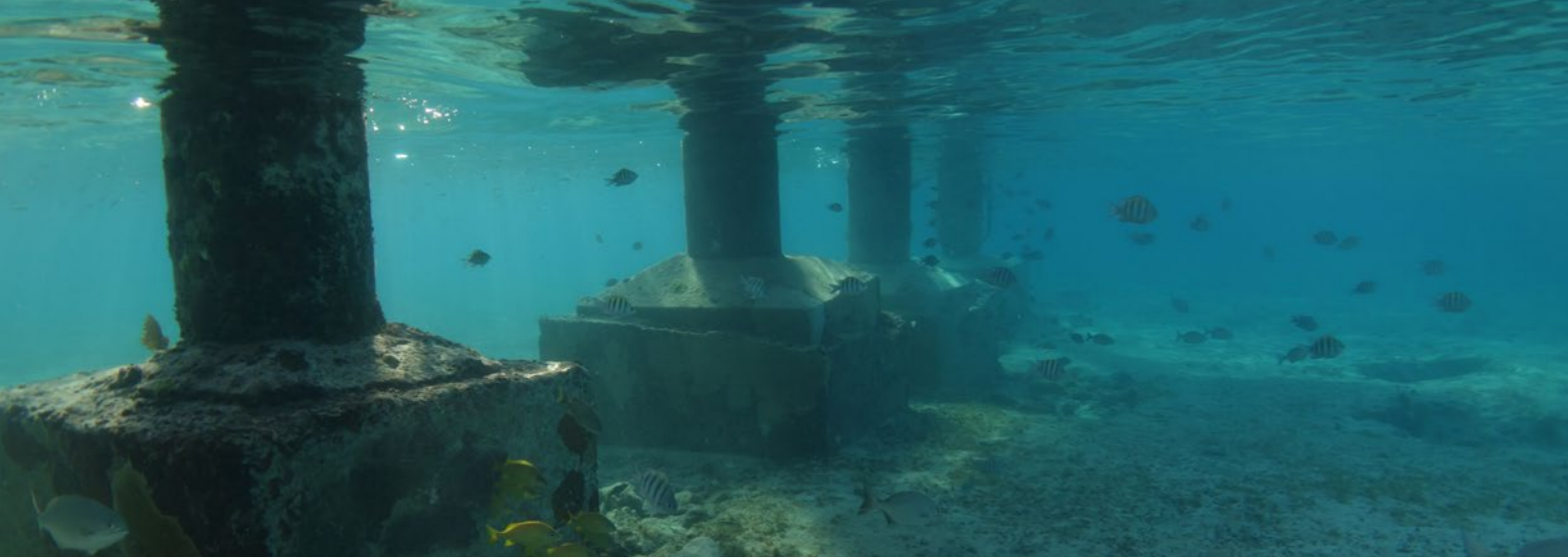
SYSTEME FÜR DIE VERMESSUNG UNTER WASSER

- ▶ 3D-Vermessung mit Subzentimeterauflösung auch in trübem Wasser
- ▶ beleuchtungs- und tiefenunabhängige Messungen
- ▶ Messfrequenz bis 50 kHz
- ▶ stationäre und mobile Vermessung

DATENAUFBEREITUNG

- ▶ Fusion von 3D- und 2D-Daten samt Positionierung (Texturierung)
- ▶ Ableitung von Metadaten aus texturierten 3D-Daten
- ▶ Automatisierte Datenauswertung, u. a. durch »Deep Learning«
- ▶ Automatisierung von Vermessungsaufgaben





< Die Inspektion von Unterwasser-Bauwerken ist aufwändig und gefährlich. Laserscanner sollen in Zukunft die Überwachung der Anlagen übernehmen. Sie messen genauer und zuverlässiger als bisher eingesetzte Systeme.

GRUPPE AIRBORNE- UND UNTERWASSER-SCANNING

Abgetaucht: Laserscanning unter Wasser

Unterwasserbauwerke werden heute in der Regel von Tauchern inspiziert – teilweise unter hohem Risiko. Echte geometrische Zustandsmessungen finden praktisch nicht statt. Fraunhofer IPM konnte nun zeigen, dass 3D-Messungen mit Laserscannern auch unter Wasser möglich sind. Langfristiges Ziel ist ein LiDAR-basiertes Messsystem für die 3D-Erfassung von Unterwasserbauwerken.

Vor der deutschen Küste drehten sich im Jahr 2017 weit mehr als tausend Windenergieanlagen, weltweit förderten um die 600 Bohrplattformen Rohöl. Die Bauwerke liegen größtenteils unter Wasser und sind sehr rauen Umweltbedingungen ausgesetzt. Wie wichtig es ist, den Zustand solcher Bauwerke zu überwachen, hat der »Blowout« der Bohrplattform Deepwater Horizon im Jahr 2010 der Welt drastisch vor Augen geführt. Großstaudämme oder Tidenhubkraftwerke bergen ähnlich große Risiken. Messtechnik kann helfen, die Inspektion solcher Anlagen effizient, kostengünstig und präzise zu gestalten. Aber auch für die Kartierung von Binnengewässern und den Schiffsbau ist innovative Unterwassermesstechnik ein Gewinn: Fahrinnen könnten schneller und zuverlässiger vermessen, Retrofit-Maßnahmen an Schiffen effizienter geplant werden.

LiDAR statt Sonar

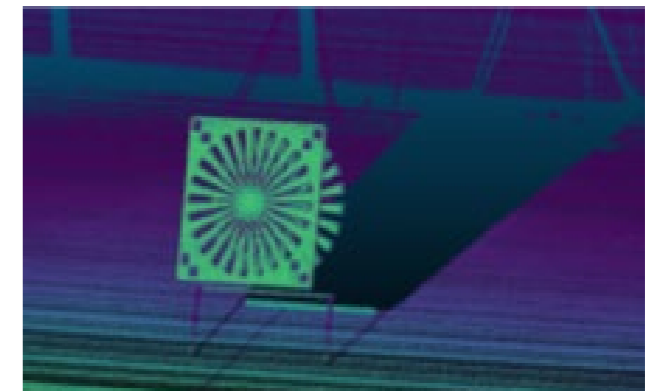
Zur Überwachung von Unterwasserbauwerken werden in der Regel Kameras genutzt. Die Bilder und Videos unterstützen die Sichtprüfung durch Taucher. Qualität und Reichweite der Bildaufnahmen sind aufgrund der Lichtverhältnisse jedoch begrenzt. Die Bewertung der Messbilder erfolgt manuell und liefert keine objektiven Messparame-

ter. Geometrische Größen – etwa zur Topographie von Meeresböden oder zur Positionsbestimmung von Objekten – lassen sich aus den Bildern mithilfe von photogrammetrischen Ansätzen nur mit sehr großem Aufwand ableiten. Großstrukturen werden üblicherweise mithilfe akustischer Messsysteme, zum Beispiel Sonar, erfasst. Der Nachteil: Sonar misst vergleichsweise langsam und ungenau. Scannende Sonar-Systeme liefern auch im Nahbereich nur Auflösungen von wenigen Zentimetern. Für das Zustandsmonitoring gilt es jedoch, auch millimeterfeine Verformungen aufzuspüren, die Schäden bereits in einem frühen Stadium ankündigen. Optische Verfahren sind den akustischen aufgrund kürzerer Wellenlängen und der konstanten und hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit in puncto Genauigkeit und Messgeschwindigkeit grundsätzlich überlegen. Das Pulslaufzeitverfahren (Time-of-flight) gilt dabei als am besten geeignet für den Einsatz unter Wasser. Im Rahmen des von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Projekts DeepInspect arbeitet Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer IGP an einem Unterwasser-Laserscanner, der diese Methode nutzt und eine echte 3D-Erfassung von Unterwasserbauwerken ermöglichen soll.

PULSLAUFZEITMESSUNG UNTER WASSER: Das Pulslaufzeitverfahren (Time-of-flight) ist eine sehr genaue optische Methode der Abstandsmessung. Ein kurzer Laserpuls wird ausgesendet, vom Messobjekt zurückgestreut und mit einem Detektor erfasst. Die Entfernung zum Objekt ergibt sich aus der Laufzeit, die der Puls von der Laserquelle zum Detektor benötigt. Lenkt man den Laserstrahl über einen kontinuierlich schwingenden oder rotierenden Spiegel ab, so lassen sich aus der Spiegelposition und der Lichtlaufzeit 3D-Bildpunktinformation ableiten (Scanner). Im optisch dichteren Medium Wasser ist die Lichtgeschwindigkeit geringer als in der Atmosphäre – ein Vorteil für die Messgenauigkeit. Gleichzeitig erschweren die geringe Sichtweite, Schwebeteilchen, Salzgehalt und damit Reflexionen die Messungen.

Streulichteffekte digital kompensieren

Time-of-flight-Messungen im trüben Medium Wasser durchzuführen, stellt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor neue Herausforderungen, denn für das Verhalten von Licht gelten unter Wasser andere physikalische Gesetze als in der Atmosphäre: Wasser schwächt Lichtstrahlen sehr stark ab, Streupartikel erschweren die Interpretation des eigentlichen Messsignals. Bereits im Vorfeld war klar, dass das Problem der Lichtabschwächung lösbar ist, da die Laserpulse bei ungestörter Lichtausbreitung über einige Kilometer ausreichend reflektiert werden. Ein Laserentfernungsmessgerät, das an Land über einen Kilometer misst, erreicht auch bei einer Abschwächung des Lichts auf ein Prozent über eine Messentfernung von 100 Metern noch immer eine ausreichende Signalthöhe. Solche Messentfernungen sind ausreichend für die meisten Messaufgaben unter Wasser. Als schwieriger erweist sich das Streulicht: Im Wasser schwebende Partikel reflektieren einen Teil des Messstrahls. Auf den Detektor trifft das Streusignal aller Objekte im Messvolumen, gesucht ist jedoch lediglich das Signal des am weitesten entfernten Messobjekts. Überflüssige Signale müssen daher vom Objektsignal getrennt werden. Der Schlüssel dazu liegt in der Signal-Digitalisierung: Schnelle Analog-/Digital-Wandler ordnen die digitalisierten Signale einer bestimmten Laufzeit und damit einer bestimmten Entfernung zu. Diese Technik wird bereits bei terrestrischen Laserscannern angewandt, z. B. um



Unter idealen Bedingungen im Testbecken misst der Unterwasser-Laserscanner mit einer Präzision von zirka vier Millimetern (hier ein Testobjekt).

Störsignale durch Vegetation zu beseitigen. Nun konnte das Team zeigen, dass dies auch bei kontinuierlich auftretenden Störobjekten gelingt – mithilfe von Echtzeit-Digitalisierung und nachträglicher Signalverarbeitung.

Das Team hat mit einem Prototyp erfolgreich Testmessungen in einem speziellen Wassermessbecken durchgeführt. In klarem Wasser wurde dabei eine Messgenauigkeit von vier Millimetern über eine Distanz von bis zu zehn Metern erreicht. Im Frühjahr 2019 wird das Messsystem, das in einem wasserfesten Druckgehäuse untergebracht ist, im Meer getestet.

GRUPPE SMARTE DATEN-VISUALISIERUNG

Prof. Christoph Müller, T +49 761 8857-236, christoph.mueller@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die maßgeschneiderte Visualisierung von Messdaten. Smarte Datenvisualisierung schafft die Voraussetzung, komplexe Sachverhalte schnell zu erfassen und daraus zielsicher Handlungen abzuleiten. Überall dort, wo Prozesse interaktiv nachgeregelt werden sollen, müssen Messergebnisse in Echtzeit visualisiert werden. Dazu bedarf es je nach Anwendungsfall unterschiedlichster Visualisierungsvarianten und geeigneter Plattformen. Profundes Wissen rund um die zugrundeliegenden Daten bietet Potenzial für mehr: So lassen sich beispielsweise für eine KI-basierte Objekterkennung synthetische Trainingsdaten bereits in den Messdaten erstellen. Oder die Messdaten werden während der Erfassung für eine zielgerichtete Auswertung reduziert. Das ist besonders wichtig, wenn eine Datenvisualisierung für leistungslimitierte mobile Umgebungen realisiert werden muss.



Gruppenleiter: Prof. Christoph Müller

>> Synthetische Bilddaten sind geeignet, das Training künstlicher neuronaler Netze effizienter zu gestalten. Aus den Strukturelementen eines Objekts (M.) lassen sich simulierte Kamerabilder (o.) oder eine klassifizierte Szene (u.) generieren.

KOMPETENZEN

Algorithmen und Methoden zur smarten Datenkonzentration zum optimierten Handling umfangreicher Messdaten | Ausweitung der Einsatzgebiete etablierter und zukünftiger Messtechnik durch Echtzeit-Visualisierung räumlicher Daten | Expertise in der Bildgenerierung aus 3D-Modellen zur Erstellung synthetischer Messdaten

ANWENDUNGEN

Qualitäts- und Vollständigkeitskontrolle während der Datenaufnahme (z. B. bei drohnenbasierten Scannern) durch Visualisierungen auf mobilen Endgeräten | interaktive Applikationen für die Navigation in aufbereiteten Messdaten zur Unterstützung komplexer Analysen und Entscheidungsprozesse (z. B. in medizinischen Anwendungen) | automatisiert generierte Trainingsdaten zur Konditionierung künstlicher neuronaler Netze, die eine iterative Optimierung der Messtechnik für die spätere maschinelle Erkennung erlauben

SPEZIFIKATIONEN

FLEXIBEL

- ▶ Echtzeit-3D-Visualisierung
- ▶ Punktwolken-Darstellung
- ▶ 3D-Datenhandling
- ▶ User-Interfaces

PLATTFORMUNABHÄNGIG

- ▶ Desktop
- ▶ Android
- ▶ Web-Browser
- ▶ 80 Prozent gemeinsame Code-Basis

MODULAR

- ▶ Softwarebibliothek





< Bauwerkskontrolle aus der Luft mithilfe von drohnenbasierten Laserscannern: Die Visualisierung macht Auffälligkeiten und Zusammenhänge in den Messdaten leicht erfassbar.

GRUPPE SMARTE DATENVISUALISIERUNG

Messdaten erfassbar machen: Visualisierung wird wichtig

Moderne optische Messsysteme erfassen die 3D-Geometrie und Lage von Objekten schnell und präzise. Die Messdaten werden immer häufiger automatisiert interpretiert. Am Ende der Verwertungskette erwarten Nutzer heute eine rasch erfassbare Präsentation der Messergebnisse. Vor diesem Hintergrund verstärkt Fraunhofer IPM die Forschung an Methoden zur Visualisierung von Messdaten.

Komplizierte Sachverhalte lassen sich durch ansprechende grafische Gestaltung schnell und eingängig vermitteln. Dies gilt auch im Kontext von Messtechnik: Nutzer können Messdaten, die als Grafiken, Bilder oder Videos präsentiert werden, schneller und effizienter interpretieren als Punktwolken, Messkurven oder Zahlenkolonnen. Mithilfe moderner Computergrafik lassen sich Grafiken, Bilder oder Animationen schnell und in hoher Qualität erzeugen – vor allem die Computerspieleindustrie gibt hier den Takt vor, setzt technologische Standards und lässt gleichzeitig die Nutzeransprüche an die Visualisierung steigen. Dieser Entwicklung muss auch die Messtechnik Rechnung tragen: Anwender erwarten, dass Messergebnisse in Echtzeit zur Verfügung stehen, intuitiv erfassbar sind und so am Ende als ergonomisches Werkzeug bei der Analyse und Entscheidungsfindung funktionieren.

Um dies zu gewährleisten, arbeitet Fraunhofer IPM an Konzepten und Techniken zur Messdaten-Visualisierung, die nun in der Arbeitsgruppe »Smarte Datenvisualisierung« gebündelt werden. Das Projekt MultiVIS in Zusammenarbeit mit der Hochschule Furtwangen (HFU) wird im Rahmen des Kooperationsprogramms Fachhochschulen über fünf Jahre von der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert. Professor

Christoph Müller von der HFU, der die Gruppe leitet, bringt umfangreiches Know-how und Erfahrung in der Datenprozessierung und -visualisierung mit.

Datenvisualisierung auf mobilen Endgeräten

Bei der Vermessung großer Strukturen wie beispielsweise Verkehrsinfrastruktur oder Vegetationsflächen mithilfe von Laserscannern fallen riesige Datenmengen an. Je schneller und greifbarer die Messergebnisse präsentiert werden, desto mehr Nutzen entfalten sie: Entscheidungen können rasch getroffen, laufende Prozesse gesteuert werden. Voraussetzung ist: Die Daten werden automatisch interpretiert und in Echtzeit visualisiert. Die extrem großen Punktwolken sind von Vorteil, wenn es darum geht, ein möglichst detailgenaues Abbild der Umgebung zu erzeugen. Gleichzeitig sind multidimensionale Datenströme, z. B. aus 2D- und 3D-Daten, eine Herausforderung für die Echtzeitverarbeitung. Letztere gelingt nur durch spezifisch designte Algorithmen und Methoden zur Datenreduktion. Dies gilt umso mehr für die letztendlich angestrebte Visualisierung von Messdaten auf mobilen Endgeräten mit begrenzter Bandbreite. Dazu zählen auch Neuentwicklungen aus den Bereichen Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR), die bisher jedoch nur vereinzelt im Zusammenhang mit der Visualisierung

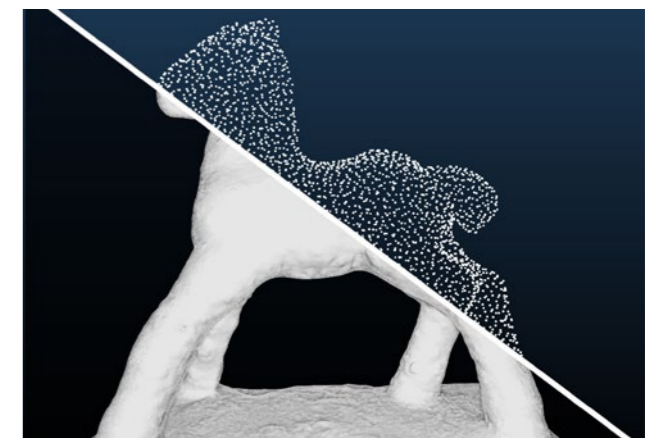
SOFTWAREPLATTFORMEN FÜR DIE 3D-VISUALISIERUNG VON PUNKTWOLKEN:

Namhafte Geräte- und Softwarehersteller sowie Forschungsorganisationen haben mit der sogenannten Point-Cloud-Library (PCL) eine quelloffene Forschungs- und Entwicklungsplattform geschaffen, die als Basis für eine effiziente Auswertung von 3D-Punktwolken dient. Analog baut Fraunhofer IPM – basierend auf der von Professor Christoph Müller an der HFU entwickelten 3D-Plattform FUSEE – eine eigene Softwareplattform auf, die Komponenten zur interaktiven Interpretation und Visualisierung von Messdaten enthält.

von Messdaten erprobt werden. Hier gilt es, Lösungen zur Kopplung von Messgeräte-Hardware und Visualisierungssoftware für die einzelnen Gerätetypen zu entwickeln. Ein erstes Einsatzszenario dieser Art, an dem die Gruppe arbeiten wird, ist die Visualisierung von Messdaten zur Überwachung von Deformationsprozessen im Tunnelbau. Fraunhofer IPM entwickelt dazu derzeit ein neuartiges multispektrales Scanner-System, das Geometrie, Oberflächenstruktur und Feuchte erfasst. Für die Interaktion zwischen Messdienstleistern, Bauingenieuren und Baupersonal sollen die Messdaten über eine 3D-Brille zugänglich gemacht und mithilfe von AR präsentiert werden – statt wie bisher als statisch dargestellte Diagramme oder Schaubilder.

Synthetische Trainingsdaten für KNN

In verschiedenen gemeinsamen Projekten haben Fraunhofer IPM und die HFU bereits Strategien für die Echtzeitvisualisierung von Messdaten erarbeitet. So entstand im Projekt Traxplorer eine Echtzeit-Visualisierungssoftware, die es ermöglicht, Daten darzustellen, die beim Scannen von Bahnstrecken anfallen. Für die spezielle Anordnung der Daten – hohes Datenvolumen entlang eines linearen Gleisverlaufs – wurden geeignete Algorithmen entwickelt. Im Rahmen des Projekts CloudVision entwickelten Studierende eine Software, mit deren Hilfe während eines Drohnenflugs erfasste Laserscanner-Daten in Echtzeit auf einem mobilen Gerät dargestellt werden können. Das vom BMBF geförderte Projekt RaVENNa-4PI hat zum Ziel, endoskopische Untersuchungen von Harnblasenkarzinomen durch eine



Visualisierung einer Punktwolke: Die unsortierten 3D-Koordinaten (oberer Bildteil) werden durch »Splatting« und Berechnung der räumlichen Ausrichtung aller Punkte zu einer geschlossenen 3D-Darstellung vervollständigt (unterer Bildteil).

verbesserte Visualisierung von Messdaten zu unterstützen. Dazu werden am INATECH unter Leitung von Professor Alexander Reiterer Strategien zur automatisierten Datenaufbereitung auf Basis von maschinellem Lernen entwickelt.

Computergenerierte fotorealistische Bilder sind nicht nur für Anwender ein Gewinn. Die synthetischen Daten lassen sich auch für das Training künstlicher neuronaler Netze (KNN) nutzen. Fraunhofer IPM nutzt immer häufiger KNN, um Messdaten automatisch zu erkennen und zu klassifizieren. Hier sehen die Forschungspartner großes Potenzial, den Trainingsprozess in Zukunft effizienter zu gestalten.

»Mit neuen Technologien erweitern wir unsere Möglichkeiten in der Messtechnik.«

Im Geschäftsfeld »Gas- und Prozesstechnologie« entwickelt und fertigt Fraunhofer IPM Mess- und Regelsysteme nach kundenspezifischen Anforderungen. Kurze Messzeiten, hohe Präzision und Zuverlässigkeit, auch unter extremen Bedingungen, zeichnen diese Systeme aus.

Zu den Kompetenzen gehören unter anderem laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Partikelmesstechnik, thermische Sensoren und Systeme sowie die nichtlineare Optik und seit Neuestem die Quantensensorik. Die Bandbreite der Anwendungen ist groß: Sie reicht von der Abgasanalyse über die Transportüberwachung von Lebensmitteln bis hin zu Sensoren und Systemen zur Messung kleinster Temperaturunterschiede.

Gruppe **Integrierte Sensorsysteme**

- ▶ gassensitive Materialien
- ▶ mikrooptische Komponenten
- ▶ miniaturisierte Gassensorsysteme

Gruppe **Spektroskopie und Prozessanalytik**

- ▶ spektroskopische Analytik
- ▶ optische Systeme
- ▶ Auswertverfahren

Gruppe **Thermische Messtechnik und Systeme**

- ▶ maßgeschneiderte Mikrostrukturen
- ▶ thermische Messsysteme
- ▶ Simulation physikalischer Prozesse

Gruppe **Nichtlineare Optik und Quantensensorik**

- ▶ nichtlineare Optik
- ▶ Laser-Absorptionsspektroskopie
- ▶ Quantensensorik

< Im Labor entwickelt, im Feld eingesetzt: Für den Einsatz in unterschiedlichen Umgebungen passen wir optische Verfahren jeweils gezielt an.



KONTAKT

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein
Abteilungsleiter
T +49 761 8857-134
juergen.woellenstein@
ipm.fraunhofer.de

GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Dr. Marie-Luise Bauersfeld, T +49 761 8857 - 290, marie-luise.bauersfeld@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung funktionaler, gas-sensitiver Materialien und Oberflächen sowie miniaturisierter Gassensoren. Dazu werden Sensortechnologie und Elektronik in kompakten und kostengünstigen Mikrosystemen kombiniert.



Gruppenleiterin: Dr. Marie-Luise Bauersfeld

KOMPETENZEN

anwendungs- und kundenspezifische Synthese sowie Verarbeitung gas-sensitiver Materialien | mikrostrukturierte IR-Strahler als Lichtquellen in mikrooptischen Sensoren (MOEMS) | Entwicklung preiswerter, miniaturisierter und energieeffizienter Gassensoren zur Einbettung in drahtlose Sensornetzwerke oder mobile Endgeräte

ANWENDUNGEN

effiziente Lüftungstechnik durch den selektiven Nachweis von Gasen | frühzeitige Detektion toxischer Gase | Qualitätskontrolle von Lebensmitteln im Lager oder auf dem Transportweg | Gassensoren für »smarte« Anwendungen (z. B. Smarthome)

>> Miniaturisiertes photoakustisches Sensorsystem zur Detektion von Kohlendioxid.

SPEZIFIKATIONEN

GASSENSITIVE MATERIALIEN

- ▶ Materialsynthese und -verarbeitung, Schichtdicken von wenigen nm bis mehreren μm , Beschichtung auf mikrostrukturierten Substraten (MEMS)
- ▶ Halbleiter-Gassensoren: Metalloxidschichten wie SnO_2 , WO_3 oder $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_{3+z}$ mit katalytischen Zusätzen
- ▶ kolorimetrische Gassensoren: u. a. Farbumschlagmaterialien für CO , NO_2 , NH_3 , H_2S und flüchtige organische Verbindungen (VOC)

MIKROOPTISCHE KOMPONENTEN

- ▶ Infrarot-Strahler für einen Wellenlängenbereich von 5 bis 12 μm , z. B. modulierbar
- ▶ Infrarot-Detektoren für einen Wellenlängenbereich von 3 bis 5 μm , z. B. aus PbSe
- ▶ diffraktive Optiken, z. B. Fresnel-Linsen aus Silizium oder Komponenten für IR-Emitter

MINIATURISIERTE GASSENSORSYSTEME

- ▶ je nach Messprinzip sind Gaskonzentrationen von ppb bis Prozent messbar; modulare Systeme durch Kombination verschiedener Sensorprinzipien
- ▶ Sensorik für energieautarke Systeme mit drahtloser Kommunikation
- ▶ photoakustische Systeme, Filterphotometer und miniaturisierte Gaschromatographie-Systeme



< Kolorimetrische Gassensoren können Brandgase frühzeitig detektieren. So könnten sie in Zukunft die heute üblichen Rauchwarnmelder ergänzen. Die Technologie lässt sich auch in vielen anderen Bereichen einsetzen.

GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Kolorimetrische Sensoren: Farbe zeigt giftige Gase an

Neuartige Sensorsysteme werden toxische Gase in Zukunft nach dem Prinzip des Farbumschlags schnell und selektiv messen. Fraunhofer IPM forscht in verschiedenen Projekten an Materialien und Systemkonzepten für kolorimetrische Gassensoren. Eine miniaturisierte Sensorplattform wird unter anderem für die Detektion von Brandgasen aufgebaut.

Ein Brand kündigt sich laut- und geruchslos an: Bevor Rauch sichtbar wird, treten giftige Gase wie Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoffdioxid (NO₂) auf. Wenige Atemzüge reichen aus, um daran zu sterben. Handelsübliche Rauchmelder reagieren nicht auf die Gase, sondern schlagen erst Alarm, wenn Rauchpartikel freigesetzt werden. Brandgassensoren können dazu beitragen, Brände in einem früheren Stadium zu erkennen. Bisher sind solche Gasmelder – i. d. R. auf Basis von Halbleiter-Gassensoren oder Infrarot-Sensoren – in Privathaushalten allerdings kaum zu finden. Je nach Technologie sind sie zu teuer, haben eine begrenzte Lebensdauer, verbrauchen zu viel Strom oder unterscheiden nicht zuverlässig zwischen verschiedenen Gasen. Farbumschlagssensoren stellen die Brandfrüherkennung auf eine technologisch neue Basis, die über die Brandgaserkennung hinaus eine Vielzahl an Anwendungen ermöglicht – überall dort, wo kompakte, energieeffiziente und langlebige Gasdetektoren gefragt sind.

Brandgas sensitiv und selektiv detektiert

Farbumschlagssensoren zeichnen sich durch hohe Selektivität und Sensitivität aus, was vor allem bei der Brandgaserkennung entscheidend ist. Der gassensitive Farbstoff reagiert ausschließlich bei Kontakt mit einem spezifischen

Gas. Dank der geringen Querempfindlichkeit kolorimetrischer Sensoren werden Fehlalarme seltener. Gleichzeitig reichen die Nachweisgrenzen farbumschlagsbasierter Gassensoren bis in den ppm-Bereich (parts per million, 10⁻⁶), wie Fraunhofer IPM am Beispiel der Brandgase CO und NO₂ zeigen konnte. Verschiedene Sensorkonzepte sind dabei möglich: So kombinieren die Wissenschaftlerinnen beispielsweise eigens designte Sensormaterialien mit optischen und elektrischen Messverfahren. Dabei werden poröse Trägerpartikel mit Durchmessern von wenigen Mikrometern mit einem Farbstoff beschichtet und zu Sensorpartikeln kombiniert. Diese Sensorpartikel werden als sogenannte »mole-hill«-Strukturen in eine Matrix aus elektrisch leitfähigen Polymeren eingebettet, die als Elektrodenstrukturen aufgebaut werden. Dieses Sensordesign gewährleistet ein günstiges Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und erleichtert den Zugang des Zielgases zum gassensitiven Farbstoff. Licht, das auf die Sensorpartikel trifft, wird diffus reflektiert. Die Reaktion mit dem Gas führt zu einer Intensitätsänderung des reflektierten Lichts, die mithilfe eines Photodetektors registriert wird. Parallel zum optischen Auslesen des Farbumschlags erfolgt eine referenzierte elektrische Messung der Materialeigenschaften im selben System. Auf diese Weise können geänderte Umgebungseinflüsse – beispiels-

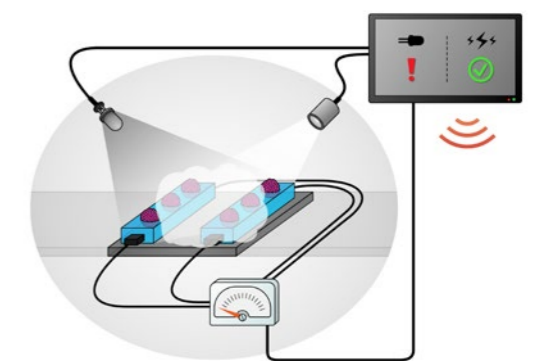
GASDETEKTION PER FARBUMSCHLAG: Gase lassen sich über chemische Reaktionen nachweisen, die einen Farbwechsel in einem spezifisch gewählten Sensorfarbstoff auslösen. Die Farbe schlägt um, sobald ein Molekül des Zielgases auf die kolorimetrische Schicht trifft. Die Reaktion folgt dem Schlüssel-Schloss-Prinzip: Nur das Indikatormolekül bewirkt den Farbwechsel; alle anderen Gase reagieren kaum oder gar nicht. Verbreitung fand das Prinzip bereits 1937 mit der Einführung der sogenannten »Dräger-Röhrchen«, die auch zum Nachweis von CO genutzt werden. Für den Einsatz in Alltagssensoren allerdings taugen die Röhrchen nicht, da sie nur zur einmaligen Verwendung bestimmt sind.

weise hohe Umgebungsfeuchte, Verschmutzungen durch Staub oder Fett – registriert und bei der Signalauswertung kompensiert werden.

Sensorkonzept passend zur Anwendung

Kolorimetrische Gassensoren sind für viele Anwendungen interessant. Fraunhofer IPM entwickelt über die Brandgaserkennung hinaus Sensorsysteme für die Detektion von Ammoniak (NH₃), Ethanol (C₂H₆O), Formaldehyd (CH₂O) oder Schwefelwasserstoff (H₂S). Dazu werden Polymer-/Farbstoffstrukturen, Systemaufbau und Ausleseeinheiten anwendungsspezifisch angepasst. Alternativ zu »mole-hill«-Strukturen lassen sich die Farbstoffe zum Beispiel in eine Polymermatrix einbetten. Die Messung erfolgt dann optisch durch einfache Transmissionsmessung. Einkoppeltes LED-Licht durchläuft dabei einen Wellenleiter in Totalreflexion und wird an der Austrittsseite auf einen Photodetektor fokussiert. Eine Farbänderung des gassensitiven Materials führt zu einer messbaren Absorptionsänderung. Fraunhofer IPM hat die einfache Transmissionsmessung in einem patentierten Aufbau so optimiert, dass die Sensitivität vergleichbar mit wellenleiterbasierten Sensoren ist. Der Trick: Der flexible Sensorträger wird gefaltet. So durchläuft der Lichtstrahl die gassensitive Schicht mehrfach – der Absorptionsweg wird größer, der Sensor bleibt klein. Solche Sensoren lassen sich mithilfe von Rolle-zu-Rolle-Verfahren kostengünstig und in hohen Stückzahlen herstellen.

Auch an der Integration der Polymer/Farbstoff-Matrix in eine Sensorfolie arbeitet das Team. Solche Folien sollen als Sensor im Scheckkartenformat Teil von Schutzausrüstungen werden und kritische Gaskonzentrationen anzeigen, zum Beispiel über ein akustisches Signal. Aber auch ohne Signalumwandlung kann ein Farbumschlag einfach mit dem Auge ausgelesen werden. Ein sichtbarer Farbumschlag ist besonders für Anwendungen in der Lebensmittelindustrie und -logistik, der Klima- und Sicherheitstechnik oder in der Medizin interessant. Wichtig für alle Anwendungen: Gasdetektion nach dem Farbumschlagsprinzip funktioniert bei Raumtemperatur. Damit ist die Technologie grundsätzlich geeignet, eines Tages auch in Smart Devices integriert zu werden.



Trägerpartikel, beschichtet mit einem Sensorfarbstoff, werden in ein Polymer eingebettet. Diese »mole-hill«-Strukturen gewährleisten aufgrund ihrer großen Oberfläche einen guten Zugang des Zielgases und damit eine hohe Nachweismempfindlichkeit.

GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

Dr. Raimund Brunner, T +49 761 8857-310, raimund.brunner@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung spektroskopischer Systeme zur Detektion und Analyse von Gasen und Flüssigkeiten. Die Basis der Arbeiten bilden langjährige Erfahrung in der Abgas- und Brenngasmesstechnik. Zum Einsatz kommen Methoden wie Raman-, ATR- oder Laserspektroskopie. Die Leistungen der Gruppe reichen von Laboruntersuchungen über die Entwicklung von Prototypen bis hin zur Produktentwicklung und Unterstützung bei der Aufnahme der Serienfertigung.



Gruppenleiter: Dr. Raimund Brunner

>> Gaslecks in Industrieanlagen können großen Schaden anrichten. Mithilfe von Laserspektroskopie und Infrarot-Messtechnik lassen sich große Anlagen zuverlässig auf Leckagen überwachen.

KOMPETENZEN

Infrarot- und Laserspektrometer als Grundlage für Messsysteme in der Gas- und Flüssigkeitsanalytik | Simulationen und Analysemethoden für die Entwicklung optischer Spezialbaugruppen und Elektronikmodule | Charakterisierung optischer Komponenten mittels Fourier- oder Röntgenspektroskopie, Untersuchung zur Degradation und Stabilität

ANWENDUNGEN

Prozessspektrometer zur Qualitätskontrolle bei der Getränkeherstellung oder bei Fermenterprozessen | schnelle Gasanalytoren in komplexer Gasmatrix für Abgasprüfstände bei der Motorenentwicklung und Brennwert-Kontrolle in Erdgasleitungssystemen | Detektion von Leckagen mittels Laserspektroskopie und bildgebender Infrarot-Messtechnik zur Sicherheitsüberwachung und für Industrieanlagen

SPEZIFIKATIONEN

SPEKTROSKOPISCHE ANALYTIK

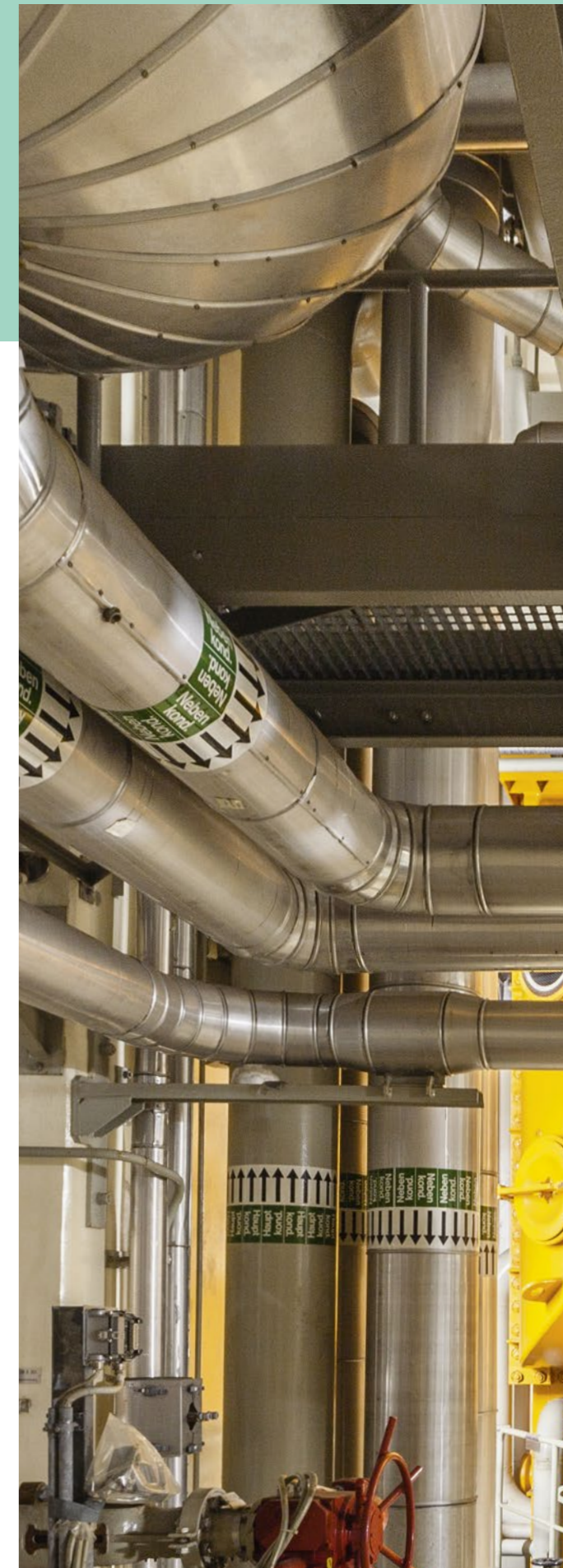
- ▶ optische Spurengasanalytoren auf der Basis von Laserspektroskopie: Empfindlichkeit 10 ppb bei N₂O oder NH₃ und 10 ppm bei O₂
- ▶ Raman-Spektroskopie: Chemometrie und Analyse von Flüssigkeiten, Zellen oder Gasen
- ▶ ATR-Spektroskopie: Gase gelöst in Flüssigkeiten bis in den ppm-Bereich messen
- ▶ photoakustische Messmethoden, individuelle Anpassung von akustischen Resonatoren

OPTISCHE SYSTEME

- ▶ Simulationen: Optik, Mechanik, Strömung, Elektronik
- ▶ Langweg-Absorptionszellen (White-, Herriott- und Single-Pass-Anordnungen): 0,1 bis 15 m Lichtweg, bis zu 200 °C
- ▶ Spezialoptiken: EUV-Gitteroptiken, Laserpackage inkl. Kollimation, Referenzsysteme
- ▶ In-situ-Messmethoden, Detektion von Rückstreuung

AUSWERTEVERFAHREN

- ▶ chemometrische Methoden zur Analyse von Messdaten
- ▶ Bestimmung von Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit von Gassensoren und Lasersystemen unter verschiedenen Bedingungen
- ▶ Modellbildung als Grundlage für eine Linearisierung und kalibrationsfreie Spektroskopie





< Etwa ein Drittel der klimaschädlichen Lachgas-Emissionen ist auf die Anwendung von Stickstoff-Düngemitteln zurückzuführen.

GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

Sensoren für eine effizientere Landwirtschaft

Die Agrarerträge müssen mit dem Anstieg der Weltbevölkerung Schritt halten. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Düngung mit Stickstoff. Weltweit werden pro Jahr über 120 Mio. Tonnen Stickstoff auf die Äcker ausgebracht. Für den optimalen Ertrag würde jedoch weniger als ein Drittel dieser Menge genügen. Das Zuviel an Stickstoff belastet nicht nur Böden und Gewässer, sondern wirkt sich auch in Form von Lachgas negativ aufs Klima aus. Ziel muss eine bedarfsgerechte Düngung sein. Messtechnik von Fraunhofer IPM hilft, dieses Ziel zu erreichen.

Nach Angaben des Umweltbundesamts verursacht die Landwirtschaft in Deutschland rund 80 Prozent der Lachgas-Emissionen (Stand: 2016). Lachgas (N_2O) entsteht vor allem in stickstoffüberdüngten und feuchten Böden – meist durch mikrobielle Abbauprozesse von Stickstoffverbindungen. Diese Prozesse laufen bereits unter natürlichen Bedingungen ab, werden aber durch den Stickstoffeintrag aus Landwirtschaft (Gülle), Industrie und Verkehr enorm verstärkt. Ein Problem, das alles andere als neu ist, und trotzdem werden die Lachgas-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden seit rund 30 Jahren nicht weniger.

Bedarfsgerechte Stickstoffdüngung

Viele Untersuchungen belegen den direkten Zusammenhang zwischen Stickstoffdüngung und Lachgas-Emissionen. Nach aktuellem Sachstand kann etwa ein Drittel der klimaschädlichen Lachgas-Emissionen auf die Anwendung von Stickstoff-Düngemitteln zurückgeführt werden. Dünger effizient und sparsam einzusetzen, ist daher nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, sondern hat auch für die Umwelt gleich mehrere wertvolle Effekte: Die Belastung von Boden und Grundwasser durch Ausschwemmen wird minimiert, die Lebensräume vieler Pflanzen- und Tierarten bleiben erhalten und der Klima-

schutz profitiert von einer sparsamen Stickstoffdüngung, da die Emission von klimaschädlichem Lachgas reduziert wird.

Messtechnik unterstützt innovative Anbaumethoden

Statt lediglich die Ausbringung von Stickstoff-Dünger zu reduzieren, werden auch einige innovative Ansätze zur optimalen Stickstoff-Düngung diskutiert – hier die drei wichtigsten: Erstens sollen neuartige, doppelt stabilisierte Stickstoffdünger die Lachgas-Emissionen bei konventioneller Ausbringtechnik reduzieren. Zweitens sollen Düngerdepots mithilfe innovativer Einbringtechniken präzise und in ausreichender Bodentiefe so platziert werden, dass der Bodenkontakt minimiert wird; volatile Stickstoffverluste sollen so nahezu komplett vermieden werden. Und drittens sollen humusaufbauende und -erhaltende Bodennutzungskonzepte wie z. B. vielfältige Fruchtfolgen humusreichere Böden schaffen – Böden mit einer stabilen Stickstoffdynamik und mit geringeren Stickstoffverlusten.

Solche innovativen Anbau- und Düngeverfahren zeigen in ersten Feldversuchen nicht nur eine Verminderung der für ein gesundes Pflanzenwachstum erforderlichen Menge an Dünger, sondern auch einen positiven Effekt auf Wurzelbil-

Im Fraunhofer-Leitprojekt **COGNITIVE AGRICULTURE** (COGNAC) forschen acht Fraunhofer-Institute gemeinsam an Technologien, um die hohe Produktivität und Qualität konventioneller Landwirtschaft zu erhalten und mit den Zielen eines nachhaltigen ökologischen Landbaus in Einklang zu bringen. Eine Schlüsselrolle kommt dabei Messdaten zu, die als Plattform eines digitalen Ökosystems bereitgestellt werden sollen. Im Rahmen dieses Projekts entwickelt Fraunhofer IPM u. a. neue Sensorik zur Lachgasdetektion. Geleitet wird das Projekt vom Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE.

dung und Ertrag. Eine zusätzlich Minderung der Lachgas-Emissionen konnte bisher jedoch nicht genau genug bewertet werden: In der Bodenkunde etablierte Messmethoden sind entweder zu teuer, zu aufwändig oder zu langwierig, sodass heutige Messungen immer nur auf wenige Szenarien beschränkt bleiben. Bereits existierende Daten zu Lachgas-Emissionen sind daher wenig belastbar.

Lachgas-Sensorik für bodennahe Messungen

Seit über zehn Jahren entwickelt Fraunhofer IPM Laserspektrometer zur Messung von Lachgasemissionen – dies jedoch hauptsächlich für den Automobilbereich. Denn unerwünschtes Lachgas entsteht auch in Verbrennungsmotoren. Aufbauend auf dieser Expertise entwickeln Forscherinnen und Forscher am Fraunhofer IPM nun eine neuartige Lachgas-Sensorik, und zwar im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts Cognitive Agriculture. Ziel dieser Sensorentwicklung ist es, mobil zu sein und Lachgaskonzentrationen direkt über das Feld verteilt bodennah messen zu können. Für diese spezielle Anwendung benötigt man einen kompakten und vor allem hochauflösenden Laserspektroskopischen Bodensensor.

Die Anforderungen an die Sensitivität eines so speziellen Lachgas-Sensors sind enorm: Denn relevante Konzentrationsanstiege bewegen sich bei bodennahem Lachgas im Bereich weniger ppb pro Minute (ppb, parts per billion, 1×10^{-9}). Derzeit gängige Messmethoden verwenden einzelne Behälter oder Bodenhauben über das Feld verteilt, um das vom Boden emittierte Gas zu sammeln und anzureichern. Für mess- und

auswertbare Konzentrationsanstiege sind bei derzeit üblichen Messmethoden Schließ- und Sammelzeiten von bis zu 60 Minuten keine Seltenheit (typische Lachgas-Emissionsraten aus dem Boden liegen bei weniger als $10 \mu\text{g}$ pro Quadratmeter und Stunde).

Beim neuen Sensor liegt der Entwicklungsfokus daher darauf, die Lachgas-Emissionen schnell und verlässlich bestimmen zu können. Nur so wird eine benötigte hohe Flächenabdeckung mit praktikablen Messzeiten erreicht. Fraunhofer IPM setzt dazu auf ein neuartiges Messkonzept mit Interbandkaskadenlasern (ICL). Damit lässt sich Lachgas im mittleren Infrarot frei von Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen eindeutig messen – mit einer drastischen Verkürzung der Messzeiten bei gleichzeitig verbesserter Genauigkeit. Ein solch kompaktes, batteriebetriebenes ICL-Messsystem erlaubt erstmals quasi-mobile Echtzeitmessungen von Lachgas – auch integriert in autonome Landmaschinen.



Im Rahmen des Fraunhofer-Leitprojekts Cognitive Agriculture entwickelt Fraunhofer IPM eine neuartige Lachgas-Sensorik.

GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

🗨 Martin Jäggle, T +49 761 8857-345, martin.jaegle@ipm.fraunhofer.de

Die Gruppe entwickelt thermische Sensoren und Systeme aus unterschiedlichen Materialien. Flexible Substrate ermöglichen die Messung kleinster Temperaturunterschiede mittels sogenannter Kalorimeterchips oder die Bestimmung unterschiedlicher Materialparameter, wie etwa die thermische und elektrische Leitfähigkeit, mittels aufpressbarer Messstrukturen.



Gruppenleiter: Martin Jäggle

>> Im »Harsh Environment Laboratory« wird die Zuverlässigkeit von Sensoren bei hohen Temperaturen und Drücken getestet.

KOMPETENZEN

Entwicklung und Herstellung maßgeschneiderter Mikrostrukturen und Mikrosysteme | kundenspezifische Messsysteme zur temperaturabhängigen Bestimmung von Materialparametern | gekoppelte thermisch-elektrische Finite-Elemente-Simulation zur thermischen Impedanzanalyse

ANWENDUNGEN

kostengünstige Fluidsensorik auf Polymersubstraten, z. B. zur Überwachung der Ölqualität | Fouling-Sensorik zur Vermessung der Belagsbildung in Industrieanlagen | Modellierung und Validierung von Energiespeichern für geothermische Anwendungen

SPEZIFIKATIONEN

MASSGESCHNEIDERTE MIKROSTRUKTUREN

- ▶ Mikrostrukturen für organische Elektronik, Heizer und Mikrofluidik mit Strukturgrößen von typischerweise 1 µm
- ▶ Thermopile-Sensoren, Fouling-Sensoren, kalorimetrische Sensoren
- ▶ thermische Sensoren zur Bestimmung von Materialparametern, insbesondere Wärmeleitfähigkeit
- ▶ elektronische Zungen

THERMISCHE MESSSYSTEME

- ▶ Messsysteme zur Bestimmung von elektrischer Leitfähigkeit, Ladungsträgerkonzentration, Seebeck-Koeffizient und Majoritätsladungsträgern, z. B. mittels Hall-Messungen an Halbleitern im Bereich von -200 bis 800 °C
- ▶ Systeme zur Messung thermischer Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen, z. B. mittels Impedanz- und 3-Omega-Methoden

SIMULATION PHYSIKALISCHER PROZESSE

- ▶ gekoppelte Finite-Elemente-Simulationen (FEM)
- ▶ Strömungssimulationen (CFD) gekoppelt mit thermischer Analyse
- ▶ Simulationen zu geothermischen Vorgängen und Konzeption von Energiespeichern
- ▶ thermisches Management zur Validierung von Systemen



< Hochintegrierte Sensorsysteme für die Industrie müssen extrem rauen Umgebungsbedingungen standhalten.

GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

HE-Lab: Sensoren unter Hitze- und Druckstress

Hochintegrierte Sensorsysteme sind Stand der Technik in vielen Lebensbereichen. Nicht so im industriellen Umfeld: Hier sorgen extreme Temperaturen und Drücke, chemisch aggressive oder feuchte Medien und mechanische Belastungen oft dafür, dass die empfindlichen Sensoren und Elektronikkomponenten versagen. Für die Entwicklung besonders robuster Sensoren nutzt Fraunhofer IPM eigens entwickelte Messtechnik, die solche Extrembedingungen nachstellt.

Die Geothermiebohrung ist in vollem Gange, die Turbine dreht auf Hochtouren: Eine Messplattform steuert zentral diverse Sensoren, sammelt und verarbeitet die digitalen Messdaten und »meldet« sie nach außen. Dort werden die Daten für das Monitoring und die intelligente Prozesssteuerung genutzt – z. B., indem ein Aktuator angesteuert wird. Dies ist die Vision von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern im Fraunhofer-Leitprojekt eHarsh, an dem Fraunhofer IPM und weitere Fraunhofer-Institute beteiligt sind. Am Einsatzbeispiel Triebwerks- oder Turbinenüberwachung und Geothermiebohrungen entwickeln sie exemplarisch eine Sensor-Plattform, die extrem rauen Umgebungsbedingungen standhalten soll. Die zentrale Hochtemperatur- und Hochdruckelektronik verfügt über genügend Rechenleistung, um Signale direkt am Sensor auszulesen und vorauszuwerten, bevor sie über eine Signalleitung an eine Kontrollstelle übermittelt werden. So kommen die Sensoren weitgehend ohne Kabel aus. Letztere erweisen sich angesichts der rauen Einsatzbedingungen oftmals als Schwachstelle – zum einen wegen der vorherrschenden hohen Temperaturen, zum anderen wegen der schlechten Signalübertragung und der schier Menge an Kabeln, die beim Betrieb von Sensornetzwerken notwendig wäre.

HE-Lab: Maßgeschneiderte Materialtests

Leistungsfähige Sensoren und Elektronikkomponenten, die Temperaturen bis 300 °C und Drücken bis 1000 bar standhalten, sind Grundlage für den Aufbau solcher Systeme. Für die Entwicklung und Charakterisierung der bisher nicht kommerziell verfügbaren Sensoren und Komponenten bedarf es geeigneter Messtechnik. Daher hat das Team ein Messlabor aufgebaut, in dem sich die Umgebungsbedingungen möglichst real nachstellen lassen. Im HE-Lab (Harsh Environment Laboratory) werden Komponenten und Systeme unter hohen Temperaturen und Drücken getestet. Der erste Teststand für Elektronikkomponenten wurde Anfang 2019 in Betrieb genommen; im neuen Institutsgebäude werden voraussichtlich ab 2020 maßgeschneiderte Messplätze für kleine Elektronikkomponenten und für Systeme mit bis zu mehreren Litern Volumen zur Verfügung stehen. Der Messbereich umfasst Temperaturen von bis zu 200 °C und Drücke bis 2000 bar. Installationen für Druckshocks und Vibrationen sind ebenso vorgesehen.

Neben den Stresstests im HE-Lab wird eine Hochtemperatur-Messplattform zur Ansteuerung von Sensoren innerhalb der Messkammern aufgebaut. Sie beinhaltet eine Steuereinheit

IMPEDANZANALYSE: In der Elektrotechnik ist die Impedanz der frequenzabhängige komplexe Widerstand eines Bauteils. Er setzt sich zusammen aus einem ohmschen, kapazitiven und induktiven Anteil. Impedanzmessungen liefern eine Vielzahl an Informationen: Bei niedrigen Frequenzen lässt sich die klassische Leitfähigkeit messen; Messungen bei hohen Frequenzen geben zusätzlich Aufschluss über dielektrische Eigenschaften, also etwa die Kapazität des gemessenen Objekts. Ergänzt um frequenzabhängige Messungen thermischer Eigenschaften erhält man zusätzlich Informationen über dessen Wärmeleitfähigkeit und -kapazität.

sowie diverse Schnittstellen zum Anschluss von integrierten und externen Sensorkomponenten. Die eingesetzten Komponenten sind kommerziell erhältlich, allerdings mit erlaubten Einsatztemperaturen von nur 150 °C bis 210 °C. Erste Temperaturtests dieser Elektronik bei 210 °C waren erfolgreich. Viele der eingesetzten Komponenten haben bereits Drucktests bis 2000 bar überstanden, für den Dauereinsatz im Feld ist aber noch eine druckfeste, hermetisch abgedichtete Verkapselung notwendig.

Impedanzanalyse liefert vielfältige Informationen

Neben der zentralen Steuereinheit entwickelt das Team Sensoren, die unter diesen rauen Bedingungen wichtige Informationen beispielsweise über umgebende Medien liefern. Solche Medien können im Fall von Geothermie-Bohrungen das umgebende Fluid oder die Wand der Bohrung sein, aber auch sensitive Schichten mit zusätzlichen Informationen wie beispielsweise Art der Mineralisierung oder Kohlenwasserstoffkonzentration. Eine Schlüsseltechnologie ist hierbei die Kombination aus elektrischer, thermischer und mechanischer Impedanzanalyse. Die elektrische Impedanzanalyse gibt Aufschluss über die Leitfähigkeit der Umgebung; die messtechnische Trennung unterschiedlicher Medien wie Wasser, Öl und Gas gelingt mithilfe thermischer Impedanzanalyse. Die mechanische Impedanzanalyse hingegen misst Druck, Vibrationen und Festigkeit von Material oder Objekten in der Umgebung des Sensors. In Kombina-

tion erfasst das integrierte Messsystem somit eine Vielzahl an Informationen, die den Betrieb und die Erstellung von Anlagen günstiger und sicherer machen können.



Der Messbereich im »Harsh Environment Laboratory« umfasst Temperaturen bis 200 °C und Drücke bis 2000 bar.

GRUPPE NICHTLINEARE OPTIK UND QUANTENSENSORIK

PD Dr. Frank Kühnemann, T +49 761 8857-457, frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

Zentrale Forschungsthemen der Gruppe sind die nichtlineare Frequenzkonversion und die Quantensensorik. Das Team entwickelt neuartige Laserlichtquellen, die auf Basis von Frequenzverdopplung, Summenfrequenzbildung oder optisch parametrischer Oszillation arbeiten. So entstehen beispielsweise Lichtquellen, die über weite Wellenlängenbereiche durchstimmbare sind oder Summenfrequenz-Konverter, die Strahlung aus dem mittleren Infrarot in den Bereich sichtbaren Lichts übertragen. Die Lichtquellen erweitern die Möglichkeiten der Messtechnik, beispielsweise bei der Gasspektroskopie, der Materialcharakterisierung oder bei holographischen Anwendungen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler greifen dabei auf umfangreiche Erfahrungen mit optischen Materialien wie zum Beispiel Lithiumniobat zurück. In der Quantensensorik liegt der Schwerpunkt auf der Evaluierung neuer Messverfahren, die auf der Nutzung speziell präparierter Photonenzustände beruhen.



Gruppenleiter: PD Dr. Frank Kühnemann

>> Im Rahmen des Fraunhofer-Max-Planck-Kooperationsprogramms (Projekt COSPA) möchte Fraunhofer IPM die Frequenzkamm-Technologie für die breitbandige Molekülspektroskopie in der Echtzeit-Prozessanalytik nutzbar machen.

KOMPETENZEN

nichtlinear-optische Frequenzkonversion zur Erzeugung von durchstimmbarem Laserlicht und zur IR-Detektion | Entwicklung neuer Techniken zur laserbasierten photothermischen Absorptionsspektroskopie | nichtlineare Interferometrie

ANWENDUNGEN

schnelle IR-Emissions-Spektroskopie für die Untersuchung von Verbrennungsprozessen | durchstimmbare Laserquellen für Wissenschaft und Industrie, z. B. für Holographie-Anwendungen | Materialcharakterisierung für Hochleistungslaser

SPEZIFIKATIONEN

NICHTLINEARE OPTIK

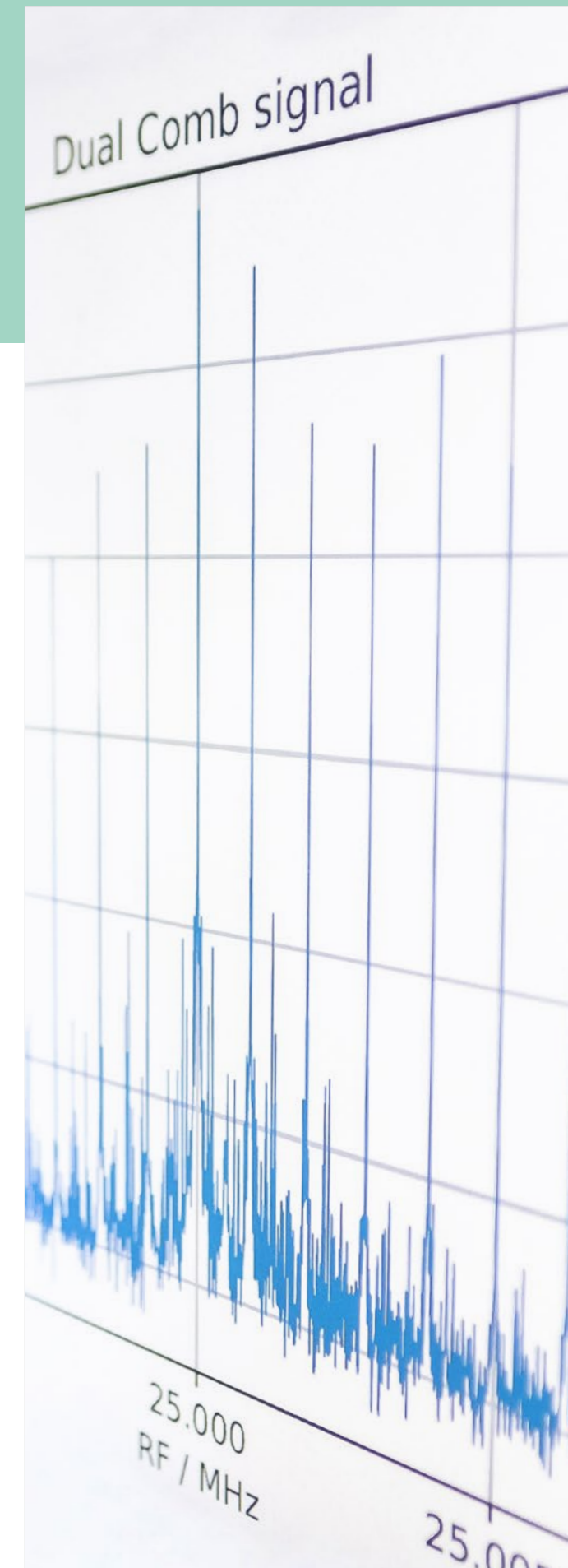
- ▶ optisch-parametrische Oszillatoren: von 450 nm bis 5 µm durchstimmbare, 10 mW bis 2 W Ausgangsleistung (wellenlängenabhängig), 1 MHz Linienbreite
- ▶ Frequenzverdopplung: über 50 Prozent Konversionseffizienz
- ▶ MIR-NIR-Konversion: Aufnahme von MIR-Prozessdaten mit mehr als 5000 Spektren pro Sekunde

LASER-ABSORPTIONSSPEKTROSKOPIE

- ▶ photothermische Verfahren für die hochempfindliche Absorptionsspektroskopie in Feststoffen und Gasen
- ▶ Messung von Spektren im Sichtbaren, im nahen und mittleren Infrarot
- ▶ Bestimmung von Restabsorptionen in Materialien bis 1 ppm

QUANTENSENSORIK

- ▶ nichtlineare Interferometrie für die Wellenlängenbereiche von 1–4 µm
- ▶ Gewinnung spektraler Informationen in schwer zugänglichen Wellenlängenbereichen
- ▶ infrarot-spektroskopische Analytik mit »undetektierten Photonen«





< Das Falschfarbenbild zeigt ein mit einer CMOS-Kamera aufgenommenes Interferogramm im sichtbaren Wellenlängenbereich. In diesem ist spektroskopische Information aus dem mittleren Infrarot enthalten, die mithilfe korrelierter Photonenpaare ins Sichtbare übertragen wurde.

GRUPPE NICHTLINEARE OPTIK UND QUANTENSENSORIK

Quantensensorik: Messen mit verschränkten Photonen

Effekte aus der Quantenwelt eröffnen auch für die Messtechnik völlig überraschende Möglichkeiten. So lassen sich die Eigenschaften verschränkter Photonen in der Spektroskopie beispielsweise ausnutzen, um wertvolle spektrale Informationen aus schwer zugänglichen Wellenlängenbereichen zu gewinnen. Fraunhofer IPM arbeitet zusammen mit anderen Fraunhofer-Instituten an der Weiterentwicklung modernster quantensensorischer Messtechniken mit dem Ziel einer möglichen industriellen Umsetzung.

Die Quantenforschung hat in den vergangenen Jahren eine Reihe wissenschaftlicher Durchbrüche erzielt. In Wissenschaft, Politik und Wirtschaft spricht man von einer »zweiten Quantenrevolution«, bei der der Quantentechnologie eine Rolle als Schlüsseltechnologie der modernen Informationsgesellschaft zukommt. Im Unterschied zur ersten Generation von Quantentechnologien, die auf der Nutzung großer Ensembles basierte, können heute einzelne Quanten in ihrer Verschränkung und in Überlagerungszuständen präpariert, manipuliert, übermittelt und gemessen werden.

Quantensensorik – Messen mit neuen Möglichkeiten

Wenn man von Quantensensorik spricht, meint man Sensorik, die physikalische Parameter messen kann, indem sie die besonderen Eigenschaften isolierter Quantensysteme ausnutzt. Dabei kann es sich um Atome in gezielt präparierten elektronischen Zuständen, um lokalisierte Zustände in Festkörpern oder um Photonen handeln, die in ihren Eigenschaften miteinander »verschränkt« sind. Quantensensoren und darauf basierende Messsysteme sind methodisch bedingt meist komplizierter im Aufbau als klassische Sensoren. Im Hinblick auf Empfindlichkeit und Messgenau-

igkeit können sie jedoch deutliche Vorteile bieten: Die Entwicklung von Atomuhren auf der Basis ultrakalter Atome ist dafür das bekannteste Beispiel.

Mit verschränkten Photonen lassen sich neue Messtechniken für die Bildgebung und Spektroskopie entwickeln. Dazu wird ein nichtlinear-optisches Medium – ein Kristall mit speziellen physikalischen Eigenschaften – mit geeignetem Laserlicht angeregt. Einzelne Photonen des Laserstrahls werden dabei in einem parametrischen Prozess jeweils in korrelierte Paare aus zwei verschränkten Photonen umgewandelt. Verschränkt bedeutet, dass die beiden erzeugten Photonen als ein einziges Quantensystem angesehen werden können; ihre Eigenschaften sind daher in höchstem Maße korreliert. Das hat zur Folge, dass die Messung einer Eigenschaft an einem der beiden Photonenpartner unmittelbar auf die Eigenschaften des zweiten Photonenpartners schließen lässt.

Von besonderem Interesse für die Spektroskopie ist nun die Möglichkeit, diese verschränkten Photonenpaare mit unterschiedlicher Wellenlänge zu erzeugen und damit

Im Fraunhofer-Leitprojekt **QUANTUM METHODS FOR ADVANCED IMAGING SOLUTIONS (QUILT)** sollen Forschungsergebnisse aus der Quantentechnologie in innovative Komponenten und Systeme sowie Funktionsdemonstratoren umgesetzt werden. Dabei fokussiert sich QUILT auf das Themengebiet des Quantum Imaging, bei dem nicht-klassische Zustände von Licht genutzt werden, um neue Verfahren für Bildgebung und Spektroskopie umzusetzen. Koordiniert wird das Projekt von Fraunhofer IOF und Fraunhofer IPM gemeinsam. Vier weitere Fraunhofer-Institute gehören zum Konsortium. Das Projekt läuft seit dem 01.09.2017 und endet am 31.08.2020.

wertvolle spektrale Information aus schwer zugänglichen Wellenlängenbereichen zu gewinnen. Der Trick dabei ist, dass bei dieser Methode die spektrale Information nicht nur vom wechselwirkenden Photon getragen wird, sondern auch vom korrelierten Partnerphoton.

MIR-Spektroskopie mit verschränkten Photonen

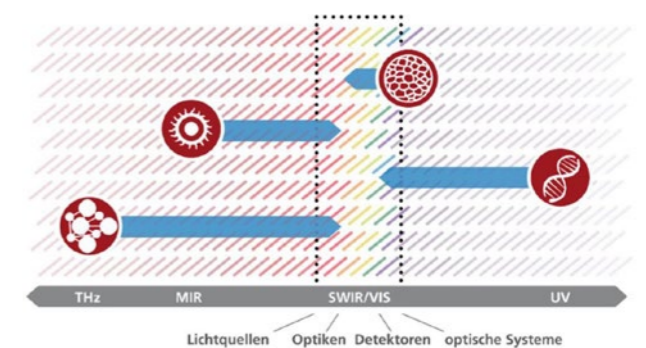
Der mittlere Infrarotbereich (MIR) wird oft als »Finger-Print-Bereich« bezeichnet. Denn viele Stoffe weisen genau hier im Wellenlängenbereich zwischen etwa drei und fünfzehn Mikrometer charakteristische Absorptionslinien auf, anhand derer die Stoffe besonders gut detektiert und unterschieden werden können. Doch leider gibt es ein Problem: Dieser Spektralbereich erfordert anspruchsvolle Laser. Und geeignete Detektoren für den MIR-Bereich sind technisch aufwändig und teuer.

Das Team am Fraunhofer IPM setzt daher auf einen alternativen Lösungsansatz, bei dem die Photonenpaare aus je einem sichtbaren und einem Mittelinfrarot-Photon bestehen. Die Infrarot-Photonen wechselwirken mit der zu untersuchenden Probe. Mithilfe der sichtbaren Partnerphotonen ist die spektroskopische Information dann messtechnisch viel einfacher, schneller und sensitiver zugänglich, wobei Standarddetektoren oder -kameras genutzt werden.

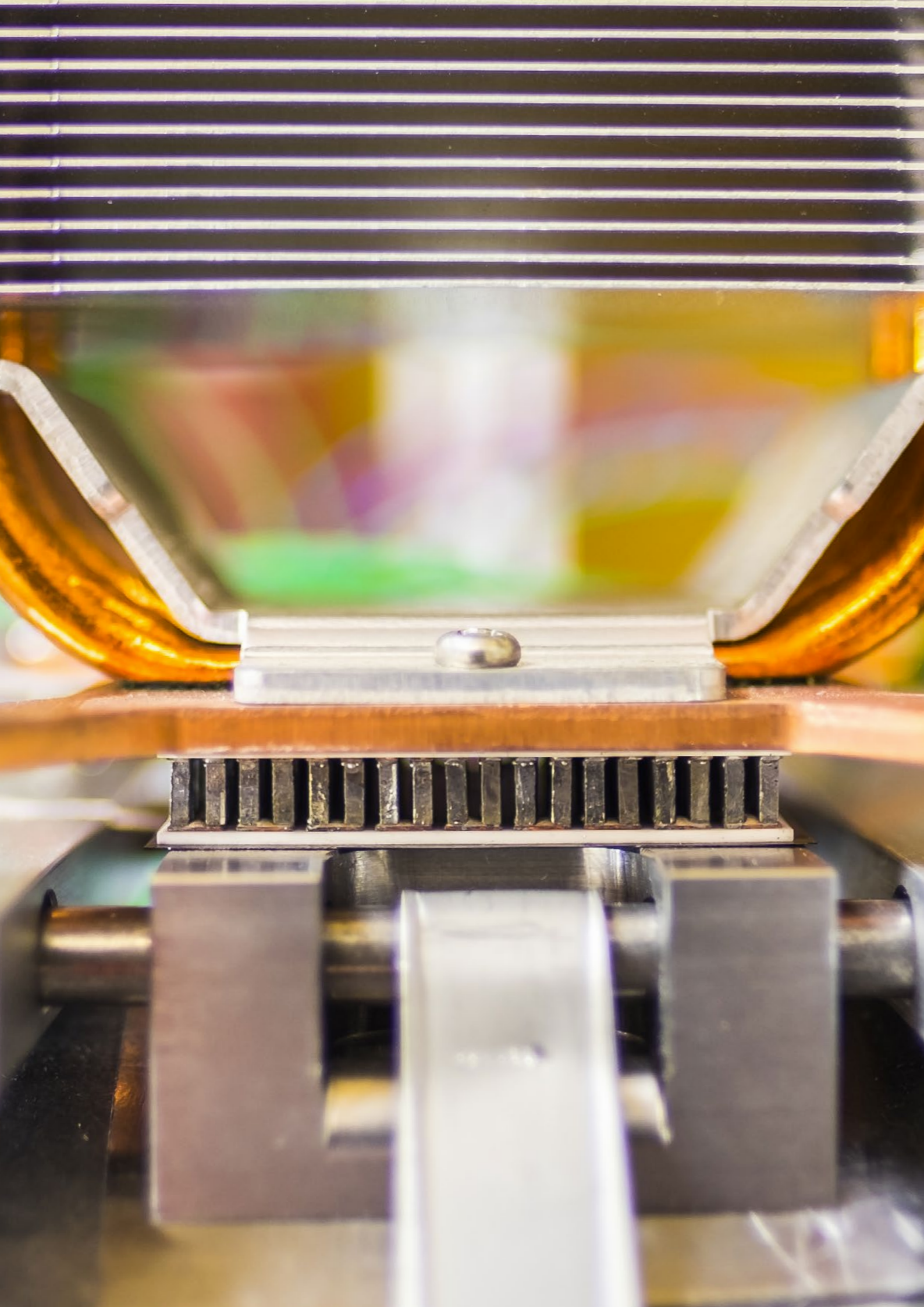
Ein junges Arbeitsgebiet mit großem Potenzial

Im Unterschied zu anderen Gebieten der Quantensensorik

ist die Nutzung solcher spektral weit gespreizter Photonenpaare für die Spektroskopie ein noch junges Arbeitsfeld. Fraunhofer IPM engagiert sich hier in einer frühen Forschungsphase, um mit eigenen Arbeiten das Potenzial des Verfahrens für mögliche spektroskopische und analytische Anwendungen zu erkunden und später in Lösungen auch für die Industrie nutzbar zu machen. Die Arbeiten sind Teil des Fraunhofer-Leitprojekts QUILT.



Korrelierte Photonenpaare mit weiter Wellenlängenspreizung erlauben es, spektroskopische Informationen aus dem Ultraviolett- (UV), dem Mittelinfrarot- (MIR) und dem Terahertz- (THz) Bereich leichter zu detektieren. Silizium-Detektoren erfassen die spektroskopische Information durch eine Messung an einem korrelierten Photon im sichtbaren Spektralbereich (SWIR/VIS).



»Wir arbeiten an Kühltechnologien der kommenden Generation.«

Schwerpunkt der Forschung im Geschäftsfeld »Thermische Energiewandler« sind funktionelle Materialien mit besonderen physikalischen Eigenschaften. Wir nutzen kalorische und thermoelektrische Materialien zum Aufbau neuartiger Systeme zur Kühlung, Temperaturkontrolle und Wärmeverstromung.

Durch Einsatz dieser Materialien in Wärmepumpen, Kühlsystemen und Generatoren entstehen besonders umweltfreundliche, kostengünstige und langlebige Systeme. Darüber hinaus werden neue Arten von Heatpipes zum effizienten Wärmetransport konzipiert, gebaut und charakterisiert.

Gruppe **Thermoelektrische Systeme**

- ▶ Abwärme verstromen (elektrische Leistung im Kilowatt-Bereich)
- ▶ energieautarke Feuerungsanlagen (elektrische Leistung im Watt-Bereich)
- ▶ »Energy Harvesting« (elektrische Leistung im Milliwatt-Bereich)
- ▶ Peltier-Kühlung

Gruppe **Kalorische Systeme**

- ▶ effizientes Kühlen und Heizen (Magneto-, Elasto- und Elektrokalorik)
- ▶ effizienter Wärmetransport mittels latenter Wärme (Heatpipes)
- ▶ thermisches Management

< Eine sehr gute thermische Kontaktierung ist entscheidend für die Effizienz eines thermoelektrischen Generators.



KONTAKT

Dr. Olaf Schäfer-Welsen
Abteilungsleiter
T +49 761 8857 - 173
olaf.schaefer-welsen@
ipm.fraunhofer.de

GRUPPE THERMOELEKTRISCHE SYSTEME

Dr. Olaf Schäfer-Welsen, T +49 761 8857-173, olaf.schaefer-welsen@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe sind thermoelektrische Module und Systeme zur Umwandlung von Wärmeenergie in elektrischen Strom. In der Gruppe entwickelte thermoelektrische Module werden zur Abwärmeverstromung in Hochtemperaturprozessen ebenso wie zum »Energy Harvesting«, also der Nutzung kleinster Temperaturgefälle, eingesetzt. In umgekehrter Richtung lassen sich thermoelektrische Module zur Kühlung einsetzen (Peltier-Kühlung). Das Team greift auf mehr als 20 Jahre Erfahrung in Material- und Modulentwicklung, Messtechnik, Simulationsverfahren und Systemaufbau zurück. Eine Kernkompetenz dabei ist die Entwicklung hochtemperaturstabiler elektrischer und thermischer Kontakte.



Gruppenleiter: Dr. Olaf Schäfer-Welsen

>> Thermoelektrische Generatoren versorgen einen Pelletofen mit Strom für die Regelungstechnik oder Smarthome-Anwendungen.

KOMPETENZEN

halbautomatische Fertigung mittels Setzroboter für die kostengünstige Herstellung thermoelektrischer Module | Systembau für Demonstratoren und Funktionserprobungen im Feld und auf eigenen Prüfständen | Simulationsrechnungen und Validierungsmessungen für optimal ausgelegte thermoelektrische Module

ANWENDUNGEN

thermoelektrische Generatoren zur Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit in Blockheizkraftwerken | thermoelektrische Generatoren für energieautarke und emissionsarme Feuerungssysteme | thermoelektrische Generatoren zur Umwandlung kleinster Energiemengen in Strom für die Messung und Übertragung relevanter Informationen | thermoelektrische Generatoren zur Kühlung und präzisen Temperierung in verschiedensten Anwendungsbereichen

SPEZIFIKATIONEN

ABWÄRMEVERSTROMUNG

- ▶ thermoelektrische Module für den Hochtemperatur-einsatz
- ▶ thermoelektrische Module zur Steigerung der elektrischen Effizienz von BHKW
- ▶ Verstromung ungenutzter thermischer Energie in Verbrennungskraftmaschinen und industriellen Prozessen

ENERGIEAUTARKE FEUERUNGSANLAGEN

- ▶ thermoelektrische Module für kleine elektrische Leistungen
- ▶ energieautarker Betrieb elektrischer Systemkomponenten
- ▶ energieautarke Mess- und Regelungstechnik zum emissionsarmen Betrieb

ENERGY HARVESTING

- ▶ ungenutzte Wärmeenergie in kleinste elektrische Leistung wandeln
- ▶ Powermanagement
- ▶ Datenübertragung und -analyse
- ▶ »Internet of Things«-fähige Gesamtlösungen

PELTIER-KÜHLUNG

- ▶ hochpräzise Temperierung von Prozessen und Bauteilen
- ▶ temperaturspezifisch optimierte Materialien
- ▶ anwendungs- und kundenspezifische Systemlösungen



< Für den Energiebedarf der vielen Milliarden an Sensoren, die das Internet der Dinge (IoT) ausmachen, sind energieautarke Lösungen gefragt. Thermoelektrische Generatoren sind dabei eine vielversprechende Option.

GRUPPE THERMOELEKTRISCHE SYSTEME

Thermoelektrische Generatoren: Minikraftwerke für das IoT

Thermoelektrische Generatoren gewinnen elektrische Energie aus kleinsten Temperaturunterschieden. Damit sind sie bestens geeignet, um geringe Strommengen dezentral bereitzustellen – genug für den kabellosen Betrieb von Sensoren und die Datenübertragung im »Internet of Things« (IoT). Fraunhofer IPM entwickelt sowohl einzelne thermoelektrische Komponenten als auch komplette Plattformen für den Einsatz in Sensornetzwerken.

Die Welt vernetzt sich. Das gilt für die Menschen, die über das Netz kommunizieren, zunehmend aber auch für Dinge. Das IoT erfährt seit einigen Jahren eine rasante Entwicklung. Viele Milliarden Geräte und Systeme sind bereits vernetzt und es werden täglich mehr. Die Sprache des IoT besteht dabei nicht aus Worten, sondern aus Sensordaten. An immer mehr Orten wird Sensorik installiert. So lassen sich Geräte, Systeme, Prozesse oder Infrastruktur kontinuierlich überwachen und steuern. Zahlreiche Anwendungen gibt es bereits – vom »Smarthome« über »Smart Lighting« bis hin zu »Smart Roads«. Und auch die Industrie setzt stark auf die vernetzte Produktion. Auch wenn einige der Anwendungen das Ziel haben, Energie zu sparen, so gerät der Energieverbrauch der immer leistungsfähigeren vernetzten Sensoren stärker in den Fokus von Forschung und Entwicklung. Neue Konzepte für energieeffiziente, energieautarke Sensoren und Strategien für das Datenmanagement sind daher gefragt. Dabei geht der Trend in Richtung Dezentralisierung: Ziel ist es, Energie lokal bereitzustellen und Daten dezentral auszuwerten.

Vorreiter Flugzeug

Eine Option für die energieautarke Stromversorgung von Sensoren sind thermoelektrische Generatoren (TEG). Sie

gewinnen geringe Mengen an Strom aus Temperaturunterschieden bzw. zeitlichen Temperaturänderungen, um damit Sensoren batterieless und somit wartungsfrei mit Energie zu versorgen. Für den Einsatz im Flugzeug ist das »Energy Harvesting« von besonderem Interesse. Hier ist ein kabelloser Betrieb vorteilhaft, denn Kabel bedeuten Gewicht und damit erhöhten Treibstoffbedarf, zudem steigt durch die Verkabelung die Komplexität des Systems. Fraunhofer IPM hat in den vergangenen zehn Jahren in verschiedenen Projekten energieautarke Sensoren für Luftfahrtanwendungen entwickelt, die dort vor allem zur Materialüberwachung (Structural Health Monitoring) und vorausschauenden Wartung (Predictive Maintenance) eingesetzt werden. Installiert am Flugzeugrumpf überwachen sie beispielsweise mechanische Lasten im Betrieb und ermöglichen es so, Materialverschleiß frühzeitig zu erkennen. In einem Ende 2017 abgeschlossenen Projekt hat Fraunhofer IPM die Technologie im Hinblick auf den Einsatz an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) weiterentwickelt und eine entsprechende Testumgebung zur Simulation von Flugtemperaturprofilen entwickelt. Die thermoelektrischen Minikraftwerke ziehen ihre Energie dabei entweder aus dem Temperaturunterschied zwischen Flugzeuginnenraum und -rumpfaußenseite oder aus der Temperaturänderung bei Start und Landung. Bei stationä-

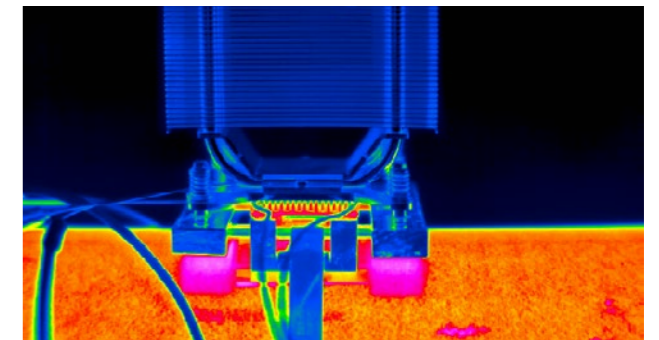
THERMOELEKTRISCHE GENERATOREN (TEG) wandeln Wärmeströme in elektrischen Strom. Der Wirkmechanismus beruht auf dem sogenannten »Seebeck-Effekt«: Danach entsteht ein elektrisches Feld, wenn an zwei miteinander verbundenen metallischen Leitern unterschiedliche Temperaturen vorherrschen. Vorhandene Temperaturgefälle können also genutzt werden, um Strom zu »ernten«. Für den energieautarken Betrieb von Sensoren reichen Temperaturgefälle von 5–10 Kelvin für die Erzeugung von elektrischer Leistung im Milliwatt-Bereich.

ren Temperaturdifferenzen von ca. 40 K erzeugt der TEG so elektrische Leistung in einer Größenordnung von etwa 1 Milliwatt pro 10 Gramm.

Das Konzept der Nutzung zeitlicher Temperaturveränderungen, wie sie im Flugzeug regelmäßig bei Start und Landung auftreten, lässt sich auch gut auf andere Anwendungen übertragen: Brücken oder Gebäude haben eine große thermische Masse, die nur sehr träge auf Temperaturveränderungen reagiert. Bei tageszeitlich schwankenden Temperaturen entsteht ein lokales Temperaturgefälle, das zum Betrieb von thermoelektrisch versorgten Sensoren verwendet werden kann. Neben der Nutzung großer thermischer Massen können darüber hinaus auch der Phasenübergang von Phase-Change-Materialien (PCM) oder reversible chemische Prozesse zum »Energy Harvesting« aus zeitlichen Temperaturschwankungen für den Betrieb von thermoelektrisch versorgten Sensoren genutzt werden.

Edge Computing: Datenauswertung am Messort

Im Kontext des IoT rücken – über die Energieversorgung von Sensoren hinaus – zunehmend Strategien zur Sensordatenauswertung und -übertragung in den Fokus. Voraussetzung für die digitale Vernetzung unzähliger Sensoren ist, dass Daten dezentral, also am Messort, reduziert und vorausgewertet werden. Nur so lässt sich die Datenmenge auf ein Maß begrenzen, das problemlos per Funk übertragen werden kann. Fraunhofer IPM arbeitet aktuell gemeinsam mit Partnern an einer energieautarken Messplattform,



Energieautarkes Monitoring von Rohrleitungen: Installiert an der warmen Außenwand des Rohrs liefert der TEG elektrischen Strom für den Betrieb von Sensoren, Powermanagement und Funksensorik.

die neben der Energieversorgung (mittels TEG) und der Sensorik auch Technik für das Powermanagement und die Funksensorik umfasst. Das Messsystem lässt sich u. a. an der Außenwand eines warmen Rohrs installieren und erzeugt elektrische Energie aus dem Temperaturgefälle zwischen der Rohrwand und dem umgebenden Medium. Parameter wie z. B. Temperatur, Feuchte oder Durchflussgeschwindigkeit können gemessen werden. Die Messdaten werden vor Ort verarbeitet und per Langstreckenfunk an einen Cloud-Dienst übertragen. Langfristiges Ziel ist es, mithilfe von TEG so viel Energie zu »ernten«, dass Messdaten kontinuierlich erhoben und am Sensor vollumfänglich prozessiert werden können. Auswertestrategien auf Basis Künstlicher Intelligenz (KI) können dann dafür sorgen, dass solche Systeme erst ab einem bestimmten Schwellenwert Messdaten nach außen funken.

GRUPPE KALORISCHE SYSTEME

Dr. Kilian Bartholomé, T +49 761 8857-238, kilian.bartholome@ipm.fraunhofer.de

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung innovativer Systeme zum effizienten Heizen und Kühlen auf Basis kalorischer Materialien. Ziel ist es, Wärmepumpen und Kühlsysteme durch Einsatz magneto-, elektro bzw. elastokalorischer Materialien besonders effizient und umweltfreundlich zu realisieren. Für unsere Arbeit greifen wir auf mehr als 20 Jahre Erfahrung im Bereich der funktionalen Materialien zurück, insbesondere bezüglich ihrer Charakterisierung, Simulation und Systemintegration.

Darüber hinaus entwickelt die Gruppe neuartige Heatpipes für den effizienten Wärmetransport in wärmebelasteten Bauteilen. Diese sogenannten pulsierenden Heatpipes transportieren Wärme um eine Größenordnung effizienter als Kupfer und schaffen so die Voraussetzung für eine völlig neue Art der Wärmeabfuhr bei thermisch stark beanspruchten Bauteilen.



Gruppenleiter: Dr. Kilian Bartholomé

>> Auf Basis des magnetokalorischen Effekts lassen sich besonders energieeffiziente Kühlsysteme entwickeln, die ganz ohne Kältemittel auskommen.

KOMPETENZEN

magneto-, elektro- und elastokalorische Systeme zum effizienten Kühlen und Heizen | Auslegung, Fertigung und Charakterisierung pulsierender Heatpipes für den effizienten Abtransport thermischer Energie aus Hotspots

ANWENDUNGEN

Kühlung von Laborgeräten auf Basis kalorischer Systeme | effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Fluide als Enabler der Wärmewende | optimiertes, thermisches Management zur Minimierung des Ausfallrisikos elektronischer Bauteile

SPEZIFIKATIONEN

EFFIZIENTES KÜHLEN UND HEIZEN

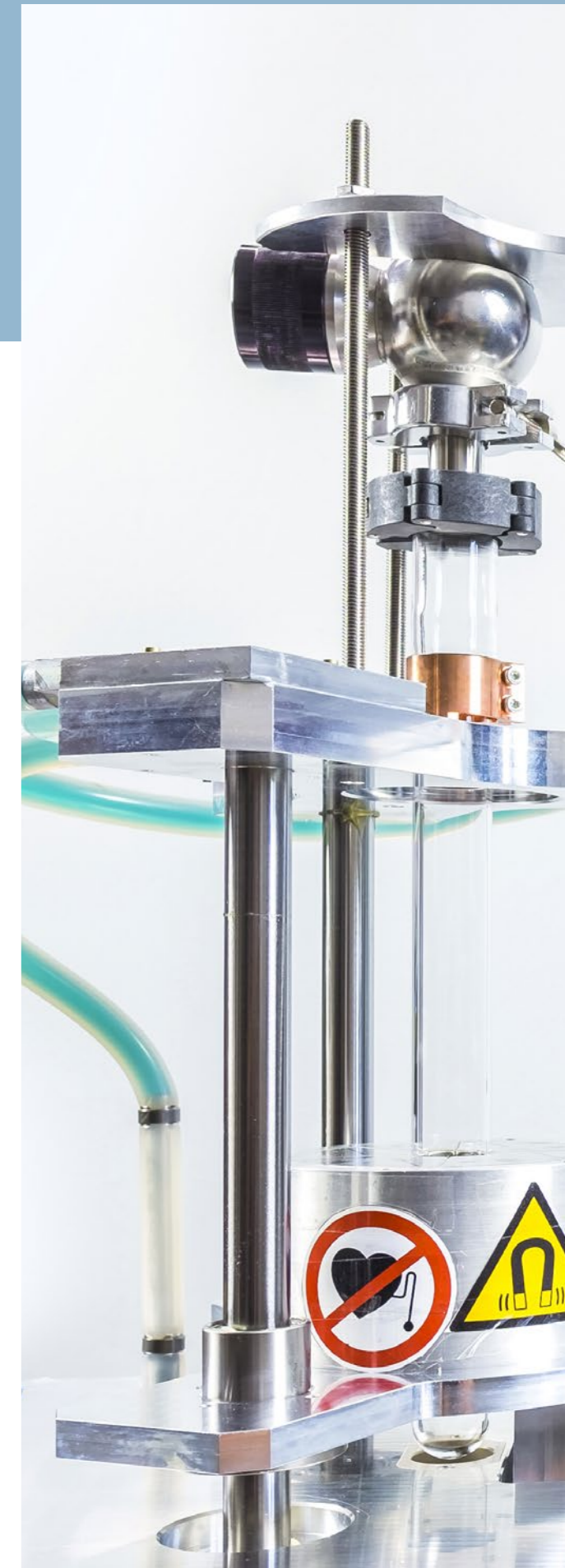
- ▶ reduzierter Energiebedarf dank effizienter Technologie
- ▶ Kühlen und Heizen ohne schädliche Kältemittel
- ▶ kompakte Bauweise durch die hohe Energiedichte kalorischer Materialien
- ▶ wartungsarme Systeme

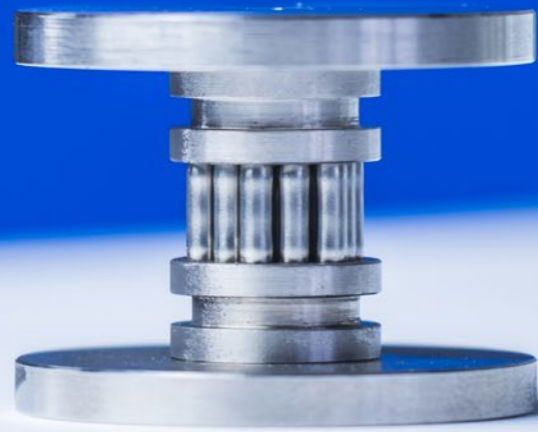
THERMISCHES MANAGEMENT

- ▶ schnelle und exakte Temperaturregelung mit Peltierelementen
- ▶ passive Kühlung elektronischer Bauteile mittels Heatpipes
- ▶ effiziente Wärmeverteilung durch pulsierende Heatpipes
- ▶ Wärmeleitwerte $> 4000 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

EFFIZIENTER WÄRMETRANSPORT MITTELS LATENTER WÄRME

- ▶ Wärmeübertrag mittels Verdampfung und Kondensation
- ▶ hohe Wärmeübertragskoeffizienten $> 10^5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
- ▶ sehr schneller und effizienter Wärmeübertrag im System $> 5 \text{ Hz}$





< Fraunhofer IPM setzt zur Kühlung auf druckbasierte elastokalorische Systeme, die sich als besonders langzeitstabil erweisen.

GRUPPE KALORISCHE SYSTEME

Kleiner Kühlschranks, großes Potenzial: Kühlen mit elastokalorischen Materialien

Seit einigen Jahren forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer IPM an festkörperbasierten Kühltechnologien. Mit Erfolg: Auf der Kühltechnik-Messe Chillventa 2018 stellte das Team den weltweit ersten Mini-Kühlschrank vor, der mithilfe eines elastokalorischen Kühlsystems betrieben wird.

Festkörperbasierte Wärmepumpen auf Basis kalorischer Materialien könnten eines Tages die in der Kühltechnik üblichen Kompressoren ersetzen. Sie sind potentiell effizienter als Kompressoren und kommen ohne schädliche Kältemittel aus.

Elastokalorische Kühlung – das Prinzip

In elastokalorischen Materialien kommt es unter Zug oder Druck zu einer kristallinen Phasenumwandlung, wobei sich das Material von der Ausgangstemperatur T_0 auf $T_0 + \Delta T$ erwärmt. Über eine Wärmesenke wird die entstandene Wärme abgeführt und die Temperatur des Materials fällt auf die Temperatur T_0 zurück. Entfernt man die mechanische Spannung, so kühlt sich das Material auf eine Temperatur unterhalb des Ausgangsniveaus ($T_0 - \Delta T$) ab. Beim Verbinden des Materials mit einer zu kühlenden Stelle nimmt es Wärme auf, bis die Ausgangstemperatur erreicht ist. Durch zyklische Be- und Entlastung des Materials und entsprechende Wärmeabfuhr lässt sich ein Kreisprozess für die Kühlung herstellen. Ein solches am Fraunhofer IPM aufgebautes elastokalorisches Kühlsystem hat nun erstmals die Marke von über drei Millionen Zyklen geknackt – ein wichtiger Schritt in Richtung Langzeitstabilität und damit in Richtung Markttauglichkeit. Für eine mögliche Kommerzialisierung liegt die

Messlatte bei um die fünf Milliarden Zyklen. Dass dies eine Herausforderung ist, leuchtet unmittelbar ein, bedenkt man die Funktionsweise elastokalorischer Systeme, die naturgemäß auf Materialermüdung ausgelegt ist: Das schnelle Dehnen und Entlasten des Materials führt zu Mikrorissen und damit früher oder später zum Zerreißen. Elastokalorische Systeme, die den Temperatursprung durch Dehnen des Materials herbeiführen, erreichen denn auch bisher lediglich bis etwa zehntausend Zyklen.

Drücken statt Ziehen

Fraunhofer IPM setzt vor diesem Hintergrund auf einen alternativen Ansatz: Statt das elastokalorische (EK) Material zu dehnen, wird es mithilfe einer Presse komprimiert. Das am Fraunhofer IPM aufgebaute System arbeitet mit Nitinolstäben von 11 mm Länge und einem Durchmesser von 2,5 mm. Durch das Stauchen kommt es äquivalent zu den zugbelasteten Materialien zu vergleichbaren Temperaturhüben, jedoch ohne Rissbildung. Allerdings bringt der Ansatz gegenüber der Zugvariante durchaus einige Herausforderungen mit sich: Beim Ziehen des elastokalorischen Materials können haarfeine, wenn nötig meterlange Drähte eingesetzt werden, sodass relativ geringe Systemkräfte ausreichen. Vergleichbar dünne

ELASTOKALORISCHE (EK)-MATERIALIEN sind Formgedächtnislegierungen, die nach einer Verformung – z. B. durch Ziehen oder Pressen – in ihre ursprüngliche Form zurückfinden. Die kommerziell verfügbare Nickel-Titan-Legierung Nitinol zählt zu den bekanntesten EK-Materialien. Allerdings: Beim Ziehen stellt sich bereits nach wenigen tausend Zyklen Materialermüdung ein. Neue Materialien lassen hoffen, dass diese Grenze in Zukunft deutlich nach oben verschoben wird: Ein deutsch-amerikanisches Forscherteam entwickelte 2015 eine Legierung ($Ti_{54}Ni_{34}Cu_{12}$), die durch Zusetzen von Kupfer zur herkömmlichen Nickel-Titan-Mischung eine Stabilität über mehr als 10^7 Zyklen erreicht.

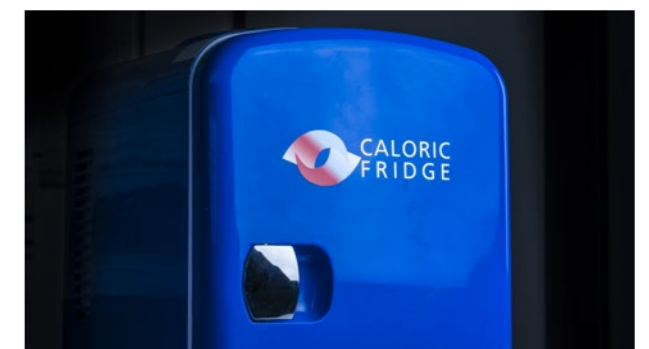
Drähte würden beim Stauchen einfach wegnicken. Daher ist die Länge der Stäbe – und damit die für den Wärmeübertrag zur Verfügung stehende Oberfläche – in druckbasierten Systemen geringer als in Zugsystemen.

Patentiertes Konzept zum Wärmeübertrag

Den geringeren Wärmeübertrag aufgrund des ungünstigeren Aspektverhältnisses gleicht das von Fraunhofer IPM entwickelte System durch ein besonders effizientes patentiertes Konzept zum Wärmeübertrag zwischen EK-Material und Wärmeübertragereinheit aus. Üblicherweise wird dieser Wärmeübertrag durch aktives Pumpen eines Fluids bzw. durch Presskontakte zwischen elastokalorischem Material und Wärmeübertrager realisiert. Fraunhofer IPM setzt auf einen passiven Ansatz mit latentem Wärmeübertrag, auf dem auch sogenannte Heatpipes oder Thermosiphons basieren. Der Wärmeübertrag wird dabei über Verdampfen und Kondensieren eines Fluids, in diesem Fall Wasser (latent), realisiert. Das Fluid befindet sich in einem hermetisch abgeschlossenen, von allen Fremdgasen befreiten Rohr und liegt sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Form vor. Einzelne elastokalorische Segmente werden in Reihe geschaltet und als thermische Dioden konzipiert, sodass Wärme segmentweise in eine Richtung transportiert und jeweils eine Seite des Segments gekühlt und die andere erwärmt wird. Der Wärmeübergangskoeffizient erreicht Werte bis $100 \text{ kW} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und ist somit um Größenordnungen höher als bei alternativen Wärmeübertragungskonzepten. Der Ansatz ermöglicht Zyk-

lusfrequenzen von über 10 Hz – eine essentielle Voraussetzung für kostengünstige, marktfähige Systeme.

Der Prototyp des elastokalorischen Mini-Kühlschranks zeigt, dass festkörperbasierte Kühlkonzepte die nötige Langzeitstabilität erreichen können. Bis zur Marktreife gibt es jedoch noch einiges zu tun: Derzeit optimiert das Team Systemdesign und Komponenten, u. a. mithilfe von Simulationen, und arbeitet an Strategien zur vollständigen Rekuperation der zur Komprimierung eingesetzten Druckenergie, um Kühlleistung und Energieeffizienz zu steigern. Außer an elastokalorischen Kühlkonzepten arbeitet Fraunhofer IPM auch erfolgreich an magnetokalorischer Kühltechnik. Lesen Sie dazu das Interview mit unserem Kooperationspartner Dr. Jochen Kopitzke vom Kühltechnik-Hersteller Philipp Kirsch GmbH (S. 22–23).



Prototyp eines am Fraunhofer IPM entwickelten elastokalorisch betriebenen Mini-Kühlschranks.



> InnoTrans 2018: Prof. Dr. Alexander Reiterer (v. r.) im Gespräch mit einem Kunden auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Verkehr.

MESSEN 2018

Control

Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung

Stuttgart, 24.04.–27.04.2018

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Vision

Fraunhofer IPM stellte zwei Verfahren zur Messung von Oberflächen in der Fertigungslinie vor: HoloCut, ein digital-holographisches Messsystem zur mikrometergenauen 3D-Vermessung von Bauteilen sowie Systeme zur bildgebenden Fluoreszenzanalyse für die Erfassung von Oberflächenverschmutzungen und Defekten.

LaSyS

Internationale Fachmesse für Laser-Materialbearbeitung

Stuttgart, 05.06.–07.06.2018

Als Mitaussteller auf dem Stand der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH zeigte Fraunhofer IPM das 3D-Inline-Messsystem HoloCut. Der digital holographische Sensor misst die Topographie von Bauteiloberflächen direkt in der Werkzeugmaschine.

ACHEMA

Weltforum und Internationale Leitmesse der Prozessindustrie

Frankfurt a. M., 11.06.–15.06.2018

Eigener Stand

Fraunhofer IPM stellte Systeme zur Analyse komplexer Gasgemische sowie zur Inline-Analytik von Flüssigkeiten vor. Darüber hinaus präsentierte das Institut verschiedene Sensoren und Sensorkonzepte zur Messung von Gasen und Flüssigkeiten sowie Lichtquellen für die Spektroskopie.

SENSOR+TEST

Die Messtechnik-Messe

Nürnberg, 26.06.–28.06.2018

Fraunhofer-Gemeinschaftsstand

Die Gruppen Integrierte Sensorsysteme und Thermische Messtechnik und Systeme präsentierten eine Vielfalt von

Sensoren und Sensorsystemen zur Immissions- und Emissionsüberwachung, zur Kontrolle von Lebensmittelqualität, zur industriellen Prozessüberwachung und zur Flüssigkeitsanalytik. Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein leitete die parallel zur Messe stattfindende zweitägige »19. ITG/GMA-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2018«.

InnoTrans

Internationale Leitmesse für Verkehrstechnik, Innovative Komponenten, Fahrzeuge und Systeme

Berlin, 18.09.–21.09.2018

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Verkehr

Auf der InnoTrans 2018 war Fraunhofer IPM mit den Themen Lichtraummessung, automatisierte Interpretation von 3D-Messdaten und UAV-basiertes Laserscanning vertreten.

Chillventa

Messe rund um Energieeffizienz, Wärmepumpen und Kältetechnik

Nürnberg, 16.10.–18.10.2018

Eigener Stand

Auf der internationalen Messe rund um die Themen Energieeffizienz, Wärmepumpen und Kältetechnik präsentierten Mitarbeiter der Abteilung »Thermische Energiesysteme« magneto- und elastokalorische Kühlsysteme mit Heatpipes zum effizienten Wärmeübertrag. Weitere Themen waren Konzepte und Technologien zur effizienten Entwärmung und Temperierung – darunter u. a. pulsierende Heatpipes.

INTERGEO

Kongress und Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement

Frankfurt a. M., 16.10.–18.10.2018

Eigener Stand

Das Institut präsentierte Laserscanner und Kamerasysteme zur 3D-Erfassung großflächiger Strukturen. Ausgestellt wurde

ein Lichtraumprofil-Scanner, der Verkehrswege von Fahrzeugen und Zügen aus vermisst. Erstmals vorgestellt wurde der Lightweight Airborne Profiler, ein kombiniertes Laserscanner-/Kamerasystem, das zur 3D-Messung von fliegenden Plattformen (UAV) entwickelt wurde. Weiteres Messthema war ein »Deep Learning Framework« zur automatisierten Interpretation von 3D-Messdaten.

parts2clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung

Stuttgart, 23.10.–25.10.2018

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik

Fraunhofer IPM stellte den »F-Scanner« zur Oberflächeninspektion vor. Der Scanner nutzt Fluoreszenz-Messtechnik zur bildgebenden Ölaufagenmessung oder zur Reinheitsprüfung von Oberflächen. Mit dem Inline-Partikel-detektor zeigte das Institut zudem erstmals ein Messsystem zur bildgebenden Detektion von partikulären Oberflächenverunreinigungen, das mit einer Kombination verschiedener Bildgebungsverfahren arbeitet. Andreas Hofmann von Fraunhofer IPM hielt einen Forumsvortrag zum Thema »Partikuläre und filmische Verunreinigungen detektieren und bildgebend klassifizieren«

euroBlech

Internationale Technologiemesse für Blechbearbeitung

Hannover, 23.10.–26.10.2018

Fraunhofer-Gemeinschaftsstand

Fraunhofer IPM präsentierte die Messsysteme ANALIZE-single und ANALIZEmulti zur Schichtdickenmessung und Elementanalyse sowie den »F-Scanner« zur bildgebenden Ölaufagenmessung.

MESSEN 2019: VORSCHAU

4. VDI-Fachkonferenz Schwingungen in Werkzeug- und Verarbeitungs-maschinen

Stuttgart, 26.03.2019–27.03.2019

HANNOVER MESSE

Hannover, 01.04.–05.04.2019

Control

Stuttgart, 07.05.2019–10.05.2019

AUTOMOTIVE ENGINEERING EXPO

Nürnberg, 04.06.2019–05.06.2019

LASER World of PHOTONICS

München, 24.06.2019–27.06.2019

SENSOR+TEST

Nürnberg, 25.06.2019–27.06.2019

INTERGEO

Stuttgart, 17.09.2019–19.09.2019

parts2clean

Stuttgart, 22.10.2019–24.10.2019

BlechEXPO

Stuttgart, 05.11.2019–08.11.2019



< Die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute waren 2018 gemeinsam auf zwei regionalen Veranstaltungen präsent, um qualifizierte junge Menschen für eine Ausbildung bei Fraunhofer zu gewinnen.

VERANSTALTUNGEN DER FREIBURGER FRAUNHOFER-INSTITUTE

Job-Start-Börse Freiburg

Freiburg, 16.–17.05.2018

Gemeinsam mit den vier weiteren Freiburger Fraunhofer-Instituten nahm Fraunhofer IPM erstmals als Aussteller an der regionalen Recruiting-Messe für Auszubildende teil.

Marktplatz: Arbeit Südbaden

Freiburg, 16.–17.11.2018

Alle fünf Freiburger Fraunhofer-Institute waren mit einem gemeinsamen Stand erstmalig auf der Ausbildungsmesse »marktplatz: ARBEIT SÜDBADEN 2018« vertreten. Ausbilderinnen und Ausbilder standen für Fragen rund um das Thema Ausbildung bei Fraunhofer zur Verfügung. Fraunhofer-Auszubildende stellten einzelne Projekte vor und lieferten Informationen aus erster Hand.

WORKSHOPS AM FRAUNHOFER IPM

Industrie-Workshop Optische Verzahnungsmessung

Fraunhofer IPM, Freiburg, 14.06.2018

Messtechnikexperten von Fraunhofer IPM und der Alicona Imaging GmbH gaben zusammen mit geladenen Referenten einen Überblick über den Stand der Technik sowie die neuesten Entwicklungen und Trends in der Verzahnungsmesstechnik (mehr dazu auf S. 18).

MoLaS – Mobile Laser Scanning Technology Workshop

Fraunhofer IPM, Freiburg, 14.–15.11.2018

Bereits zum dritten Mal veranstalteten die Laserscanning-Experten von Fraunhofer IPM den Technologie-Workshop rund um das Thema mobiles Laserscanning (mehr dazu auf S. 19).

WORKSHOPS 2019

Industrie-Workshop Thermoelektrik

Fraunhofer IPM, Freiburg, 20.–21.03.2019

Erstmalig veranstaltet Fraunhofer IPM den »Industrie-Workshop Thermoelektrik« für Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Industrie.

Kalorik-Workshop 2019

Fraunhofer IPM, Freiburg, 27.–28.03.2019

Der Workshop gibt Experten aus Wissenschaft und Industrie Gelegenheit, sich über aktuelle Entwicklungen und Trends auf dem Gebiet magneto-, elektro- und elastokalorischer Systeme zu informieren und auszutauschen.

8. Gassensor-Workshop 2019

Fraunhofer IPM, Freiburg, 24.10.2019

Die Gassensor-Community trifft sich, um Technologien und Anwendungen auf dem Gebiet der Gassensorik zu präsentieren und zu diskutieren.

UNSERE PARTNER

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

Fraunhofer-Gesellschaft

- Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces
- Fraunhofer-Allianz Food Chain Management
- Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik
- Fraunhofer-Allianz Verkehr
- Fraunhofer-Allianz Vision

International

- ETS – European Thermoelectric Society
- ITS – International Thermoelectric Society
- MRS – Material Research Society
- OSA – The Optical Society

Deutschland

- AMA Fachverband für Sensorik
- Arbeitskreis 4.3.2 Ebenheit der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)
- Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA
- Competence Center for Applied Security e.V. (CAST)
- Cluster Bahntechnik e.V. (CNA)
- Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung (DFO)
- Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF)
- Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V. (DHyG)
- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)
- Draht-Welt Südwestfalen – netzwerkdraht e.V.
- Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V. (DTG)
- Forum Angewandte Informatik und Mikrosystemtechnik e.V. (FAIM)
- Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)
- Green City Freiburg Regional Cluster
- innoEFF Innovations- und Effizienzcluster
- Klimaschutz am Oberrhein e.V. (Strategische Partner)
- microTEC Südwest e.V.
- Nano-Zentrum Euregio Bodensee e.V.
- Photonics BW Innovationsnetz für Optische Technologien
- VDI/VDE – GMA Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
- Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e.V. (VDSI)

PUBLIKATIONEN 2018

- Sandfort, V.; Goldschmidt, J.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Cavity-enhanced Raman spectroscopy for food chain management
Sensors 18, 709 (2018)
- Engel, L.; Tarantik, K.; Pannek, C.; Wöllenstein, J.
Colorimetric detection of hydrogen sulfide in ambient air
Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 804 (2018)
- Schmitt, K.; Tarantik, K.; Pannek, C.; Wöllenstein, J.
Colorimetric materials for fire gas detection - A review
Chemosensors 6, 14 (2018)
- Jia, Y.; Hanka, K.; Zawilski, K. T.; Schunemann, P. G.; Buse, K.; Breunig, I.
Continuous-wave whispering-gallery optical parametric oscillator based on CdSiP₂
Optics Express 26, 10833-10841 (2018)
- Werner, C. S.; Sturman, B.; Podivilov, E.; Kini Manjeshwar, S.; Buse, K.; Breunig, I.
Control of mode anticrossings in whispering gallery microresonators
Optics Express 26, 762771 (2018)
- Szabados, J.; Kini Manjeshwar, S.; Breunig, I.; Buse, K.
Electro-optic tuning of potassium tantalate-niobate whispering gallery resonators
Kudryashov, A. V. (Ed.): *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XX. Proceedings of SPIE 10518*, Paper 1051802 (2018)
- Palzer, S.; Sandfort, V.; Goldschmidt, J.; Wöllenstein, J.
Enhancement techniques to improve Raman spectroscopy of gases
Reindl, L. M.: *Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 19. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fachbericht 281*, 308-310 (2018)
- Pohle, R.; Pohl, T.; Pannek, C.; Tarantik, K.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.; Raible, S.; Seiler, F.
Evaluation of a colorimetric sensor system for early fire detection
Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 966 (2018)
- Schäfer, R.; Schmidtke, G.; Brunner, R.
Experiences with a three-current ionization chamber as primary detector standard for absolute calibration in space
Applied Optics 57, 6851-6859 (2018)
- Seyler, T.; Fratz, M.; Beckmann, T.; Schiller, A.; Bertz, A.; Carl, D.
Extending the depth of field beyond geometrical imaging limitations using phase noise as a focus measure in multiwavelength digital holography
Applied Sciences 8, 1042 (2018)
- Seyler, T.; Fratz, M.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Grün, V.; Börret, R.; Ströer, F.; Seewig, J.
Extensive microstructural quality control inside a machine tool using multiwavelength digital holography
Jaroszewicz, L. R. (Ed.): *Speckle 2018, VII International Conference on Speckle Metrology. Proceedings of SPIE 10834*, Paper 108342B (2018)
- Herr, S. J.; Brasch, V.; Szabados, J.; Obrzud, E.; Jia, Y.; Lecomte, S.; Buse, K.; Breunig, I.; Herr, T.
Frequency comb up- and down-conversion in synchronously driven $\chi^{(2)}$ optical microresonators
Optics Letters 43, 5745-5748 (2018)
- Scholz, L.; Ortiz Perez, A.; Bierer, B.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Gas sensors for climate research
Reindl, L. M.: *Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 19. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fachbericht 281*, 453-456 (2018)
- Pannek, C.; Tarantik, K.; Engel, L.; Vetter, T.; Wöllenstein, J.
Gasochromic detection of NO₂ on the example of the food additive E141 (ii)
Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 721 (2018)
- Péntek, Q.; Hein, S.; Miernik, A.; Reiterer, A.
Image-based 3D surface approximation of the bladder using structure-from-motion for enhanced cystoscopy based on phantom data
Biomedizinische Technik 63, 461-466 (2018)
- Boerman, J. K.; van Harberden, J.-K.; Pannek, C.; Schmitt, K.; Tarantik, K.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.
Improvement methods for colorimetric gas sensors for use in indoor livestock farming
Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 769 (2018)
- Herr, S. J.; Buse, K.; Breunig, I.
Incoherently pumped lasing and self-pumped three-wave mixing in laser-active whispering-gallery resonators
Kudryashov, A. V. (Ed.): *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XX. Proceedings of SPIE 10518*, Paper 105180U (2018)
- Ortiz Perez, A.; Gao, H.; Lyu, X.; Wöllenstein, J.; Kallfaß, V.; Fonollosa, J.; Palzer, S.
Inkjet-printed, functional heterolayers of ZnO@CuO for stoma pouch monitoring
Applied Nanoscience 8, 1907-1914 (2018)
- Pannek, C.; Tarantik, K.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
Investigation of gasochromic rhodium complexes towards their reactivity to CO and integration into an optical gas sensor for fire gas detection
Sensors 18, 1994 (2018)
- Wigger, B.; Meissner, T.; Winkler, M.; Förste, A.; Jetter, V.; Buchholz, A.; Zimmermann, A.
Label/tag-free traceability of electronic PCB in SMD assembly based on individual inherent surface patterns
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98, 3081-3090 (2018)
- Reiterer, A.; Leidinger, M.
Laserscanner zur Lichtraummessung: Präzise messen, effizient auswerten
Der Eisenbahningenieur 69 (5), 44-47 (2018)
- Seyler, T.; Fratz, M.; Grün, V.; Börret, R.; Ströer, F.; Seewig, J.
Messen am eingerichteten Werkstück: 3D-Inline-Messtechnik für die Werkzeugmaschine
Qualität und Zuverlässigkeit 63 (12), 52-54 (2018)
- Jia, Y.; Hanka, K.; Breunig, I.; Zawilski, K. T.; Schunemann, P. G.; Buse, K.
Mid-infrared whispering gallery resonators based on non-oxide nonlinear optical crystals
Kudryashov, A. V. (Ed.): *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XX. Proceedings of SPIE 10518*, Paper 105180X (2018)
- Schiller, A.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.; Buse, K.
Multiwavelength digital holography: Height measurements on linearly moving and rotating objects
Jaroszewicz, L. R. (Ed.): *Speckle 2018, VII International Conference on Speckle Metrology. Proceedings of SPIE 10834*, Paper 108342E (2018)
- Kogut, I. R.; Nichkalo, S. I.; Ohorodniichuk, V.; Dauscher, A.; Candolfi, C.; Masschelein, P.; Jacquot, A.; Lenoir, B.
Nanostructure features, phase relationships and thermoelectric properties of melt-spun and spark-plasma-sintered skutterudites
Acta Physica Polonica. A 133, 879-883 (2018)
- Gao, H.; Amann, J.; Lyu, X.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Novel method for thermal characterization of MEMS
Journal of Microelectromechanical Systems 27, 521-528 (2018)
- Jägle, M.; Pernau, H.-F.; Pfützner, M.; Benkendorf, M.; Li, X.; Bartel, M.; Drost, S.; Wöllenstein, J.
On-chip temperature compensation for thermal impedance sensors
Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 1053 (2018)

Sandfort, V.; Goldschmidt, J.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
One quantum sensor for all gases: Cavity-enhanced Raman spectroscopy for food-chain monitoring
 Razeghi, M. (Ed.): Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XV. Proceedings of SPIE 10540, Paper 105400Z (2018)

Holz, P.; Brandenburg, A.
Ortsaufgelöste Messung filmischer Verunreinigungen
 JOT Journal für Oberflächentechnik 58 (10), 46-49 (2018)

Knobelspies, S.; Bierer, B.; Daus, A.; Takabayashi, A.; Salvatore, G. A.; Cantarella, G.; Ortiz Perez, A.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.; Tröster, G.

Photo-induced room-temperature gas sensing with a-IGZO based thin-film transistors fabricated on flexible plastic foil
 Sensors 18, 358 (2018)

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

Photoacoustic gas detector for the monitoring of sulfur dioxide content in ship emissions
 Reindl, L. M.: Sensoren und Messsysteme: Beiträge der 19. ITG/GMA-Fachtagung. ITG-Fachbericht 281, 450-452 (2018)

Jia, Y.; Winkler, M.; Cheng, C.; Chen, F.; Kirste, L.; Cimalla, V.; Zukauskaitė, A.; Szabados, J.; Breunig, I.; Buse, K.
Pulsed laser deposition of ferroelectric potassium tantalate-niobate optical waveguiding thin films
 Optical Materials Express 8, 541-548 (2018)

Wolf, R.; Jia, Y.; Bonaus, S.; Werner, C. S.; Herr, S. J.; Breunig, I.; Buse, K.; Zappe, H.
Quasi-phase-matched nonlinear optical frequency conversion in on-chip whispering galleries
 Optica 5, 872-875 (2018)

Herr, S. J.; Werner, C. S.; Buse, K.; Breunig, I.
Quasi-phase-matched self-pumped optical parametric oscillation in a micro-resonator
 Optics Express 26, 10813-10819 (2018)

Bierer, B.; Nägele, H.-J.; Ortiz Perez, A.; Wöllenstein, J.; Kress, P.; Lemmer, A.; Palzer, S.
Real-time gas quality data for on-demand production of biogas
 Chemical Engineering and Technology 41, 696-701 (2018)

Strahl, T.; Herbst, J.; Maier, E.; Rademacher, S.; Lambrecht, A.
Remote detection of leakages of non-IR-active gases by laser spectroscopy

Razeghi, M. (Ed.): Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XV. Proceedings of SPIE 10540, Paper 105402K (2018)

Weber, C.; Kapp, J.; Schmitt, K.; Pernau, H.-F.; Wöllenstein, J.
Resonant photoacoustic detection of NO₂ with an LED based sensor
 Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 1036 (2018)

El-Safoury, M.; Dufner, M.; Weber, C.; Schmitt, K.; Pernau, H.-F.; Willing, B.; Wöllenstein, J.
Resonant photoacoustic gas monitoring of combustion emissions
 Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 962 (2018)

Wolf, R.; Breunig, I.; Zappe, H.; Buse, K.
Scattering-loss reduction of ridge waveguides by sidewall polishing
 Optics Express 26, 19815-19820 (2018)

Wang, X.; Veremchuk, I. V.; Burkhardt, U.; Bobnar, M.; Böttner, H.; Kuo, C. Y.; Chen, C. T.; Chang, C. F.; Zhao, J.; Grin, Y.
Thermoelectric stability of Eu- and Na-substituted PbTe
 Journal of Materials Chemistry. C 6, 9482-9493 (2018)

König, J. D.
Thermoelectrics - Next step in manufacturing
 Nature Energy 3, 259-260 (2018)

Graunke, T.; Schmitt, K.; Busch, S.; Raible, S.; Wöllenstein, J.
Towards an empirical model for the prediction of the selectivity of polymer membranes
 Proceedings. MDPI Open Access Journal 2, 979 (2018)

Schäfer, R.; Gottwald, A.; Richter, M.
Traceable measurements of He, Ne, Ar, Kr, and Xe photoionization cross sections in the EUV spectral range
 Journal of Physics. B 51, 135004 (2018)

Wigger, B.; Meissner, T.; Förste, A.; Jetter, V.; Zimmermann, A.

Using unique surface patterns of injection moulded plastic components as an image based Physical Unclo-nable Function for secure component identification
 Scientific Reports 8, 4738 (2018)

Breunig, I.; Hanka, K.; Jia, Y.; Zawilski, K. T.; Schunemann, P. G.; Buse, K.

Whispering gallery optical parametric oscillators for the mid-infrared spectral range
 Vodopyanov, K. L. (Ed.): Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVII. Proceedings of SPIE 10516, Paper 105160E (2018)

Ortiz Perez, A.; Bierer, B.; Scholz, L.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
A wireless gas sensor network to monitor indoor environmental quality in schools
 Sensors 18, 4345 (2018)

ERTEILTE PATENTE 2018

Schmitt, K.; Pannek, C.
Gassensor und Verfahren zur Herstellung einer gassensitiven Schicht für einen opt. Gassensor
 DE 10 2016 107 158 B4

DOKTORARBEITEN 2018

Bierer, B.
Entwurf und Aufbau eines robusten Gassensorsystems
 Aachen, Shaker-Verlag, 2018; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Eberhardt, A.
Filterrotationsspektrometer für die Detektion von Ethen
 Aachen, Shaker Verlag, 2018; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Graunke, T.
Selektivitätssteigerung von Gassensoren durch symmetrisch dichte Polymere und aktiv beheizte Filter
 Aachen, Shaker-Verlag, 2018; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Sandfort, V.
Entwicklung von Methoden zur Verstärkung des Raman-Streueffektes in komplexen Gasgemischen
 [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Scholz, L.
Novel Concepts for Miniaturized Photoacoustic-based Gas Sensing Devices
 Aachen, Shaker Verlag, 2019; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Werner, C.
Stabilisierung und Durchstimmung nichtlinear-optischer Prozesse in Lithiumniobat-Flüstergalerieresonatoren
 [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Wolf, R.
Frequenzkonversion mittels chipintegrierter Flüstergalerieresonatoren aus Lithiumniobat
 Norderstedt, BoD, 2018; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2018]

Wolf, S.
Infrarotspektroskopie mittels nichtlinear-optischer Hochkonversion
 Aachen, Shaker Verlag, 2018; [Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2017]

FORSCHEN IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 26 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,6 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 2,2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die

Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten 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



Neue Adresse ab Januar 2020
Georges-Köhler-Allee 301
79110 Freiburg

Fraunhofer IPM
Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8
79110 Freiburg
T +49 761 8857-0
F +49 761 8857-224
info@ipm.fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de

Hauptstandorte ●
Nebenstandorte ○

Bildquellen

ambrozinio – shutterstock (56)
Christoph Müller/Fraunhofer IPM (38; 49; 50; 51)
David Nadler/Fraunhofer IPM (20 M.)
Felix Groteloh (52)
Fraunhofer-Gesellschaft e.V. (89)
Fraunhofer IOF (19 o.; 69)
Fraunhofer IPM (33; 37; 43; 47; 57; 75; 81)
GINGER - Lehmann + Partner GmbH (42)
Holger Kock/Fraunhofer IPM (Titel; 3; 6; 7; 10; 14; 16; 17; 18;
20 o., 20 u.; 21; 23 u.; 24; 25; 26; 27; 29; 30; 32; 34; 35; 39; 40;
41; 44; 45; 48; 53; 54; 58; 61; 62; 63; 64; 65; 66; 67; 68; 70; 71;
72; 73; 74; 76; 77; 78; 79; 82)
Jenny Korhonen/FindIT (15 u.)
Marc Mueller/dedinag / Fraunhofer (15 o.)
markobe - stock.adobe.com (28)
MEV Verlag (59)
Kai-Uwe Wudtke (31; 55)
Klaus Polkowski (9; 19 u.)
Krofoto/Shutterstock.com (46)
Oticki - shutterstock (60)
Philipp Kirsch GmbH (22; 23 o.)
Tobias Seyler/Fraunhofer IPM (36)
Universität Freiburg, Technische Fakultät (13)

Fraunhofer IPM

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8
79110 Freiburg
T +49 761 8857 - 0
F +49 761 8857 - 224
info@ipm.fraunhofer.de



Homepage

www.ipm.fraunhofer.de



Youtube Kanal

[https://www.youtube.com/
channel/UCiSbuFula85ryZ5COlRrZQ](https://www.youtube.com/channel/UCiSbuFula85ryZ5COlRrZQ)

Neue Adresse ab Januar 2020

Georges-Köhler-Allee 301
79110 Freiburg

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Kommunikation und Medien
Holger Kock
Heidenhofstraße 8
79110 Freiburg
T +49 761 8857 - 129
holger.kock@ipm.fraunhofer.de

Redaktion

Holger Kock, Anja Strobel

Layout und Gestaltung

Adam Lipinski

Druck

Burger Druck GmbH, Waldkirch

© 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.