



Jahresbericht 2020/2021

Mit Licht messen:  
Neue Standards in Sicht!

MESSEN · KONTROLLIEREN · OPTIMIEREN

<< **Titelbild** Der optische Sensor HoloTop NX misst die Topographie von Bauteiloberflächen direkt in der Werkzeugmaschine. Er erfasst Oberfläche und Tiefe von Fräsbahnen flächig. Mit seiner kompakten Bauform, vergleichbar zu typischen Fräswerkzeugen, lässt er sich in verschiedenen Werkzeugmaschinen einsetzen.



## UNSERE GESCHÄFTSFELDER

PRODUKTIONSKONTROLLE

OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

THERMISCHE ENERGIEWANDLER

### Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Mit unserem Newsletter erhalten Sie regelmäßig Informationen zu aktuellen Projekten und Veranstaltungen:

[www.ipm.fraunhofer.de/info](http://www.ipm.fraunhofer.de/info)

## Koordinaten und Distanzen mit Licht messen: Neue Standards in Sicht!

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

um Längen, Distanzen und Dimensionen zu erfassen, hat der Mensch immer ausgefeiltere Werkzeuge hervorgebracht – vom einfachen Zollstock, im Badischen einfach »Meter«, über Mikrometerschrauben bis zu taktil arbeitenden Messköpfen: Moderne taktile Koordinatenmessmaschinen erfassen die Struktur komplexer 3D-Bauteile auf den Tausendstel Millimeter genau. Optische Messungen, im einfachsten Fall das menschliche Auge, galten lange lediglich als Schätzweisen und haben daher kaum Eingang in Normen und Standards gefunden.

### Licht misst schnell, genau und berührungslos

Lasertechnologie – insbesondere unter Nutzung der zeitlichen Kohärenz – und dramatische Fortschritte bei Kameras und Datenverarbeitung ermöglichen immer höhere Genauigkeiten des »Photonischen Meters« und laufen taktilen Verfahren zunehmend den Rang ab: Mit Licht lässt sich genauer, deutlich schneller und zudem berührungslos messen.

### Optische Koordinatenmessmaschine

Bei der Koordinatenmesstechnik setzen wir auf die digitale Holographie, die entscheidende Mehrwerte im Vergleich zu taktilen Verfahren bietet: Die Schnelligkeit ermöglicht eine 100-%-Kontrolle im Produktionstakt. Das Titelbild zeigt einen digital-holographischen Sensor für die Werkzeugmaschine. Bei Werkzeugverschleiß kann aktiv nachgeregelt werden. So sichern wir Qualität und minimieren Ausschuss. In unserem Neubau betreiben wir eine der präzisesten taktilen Koordinatenmessmaschinen der Republik. Sie dient uns als Referenz für ein optisches Koordinatenmessgerät, das wir im Projekt »MIAME – Mikrometer auf Meter: Laserlicht für sub-Mikrometer-genaue 3D-Messungen auf Meterskalen« entwickeln (S.33).

### Highlights: minimierter Herbizid-Einsatz, Multikomponenten-Analytik und Rekorde brechende Magnetokalorik

Optisches Messen auf großen Längenskalen, mit hoher Genauigkeit und atemberaubender Geschwindigkeit ersetzt mehr und mehr das klassische Vermessen im Bereich Infrastrukturerfassung und -monitoring. Unsere Kameras erfassen von Zügen aus die Vegetation im Gleisbett, und zwar so schnell und genau, dass Herbizide punktgenau und nicht mehr per Gießkanne eingesetzt werden (S. 44)!

Auch für die Gas- und Materialanalytik haben wir unsere optischen Werkzeuge erfolgreich weiterentwickelt: Exemplarisch stellen wir hier die Breitbandspektroskopie mit Frequenzkämmen vor (S. 56). Ein Durchbruch gelang beim Betrieb magnetokalorischer Wärmepumpen mit 10 Hz Zyklusfrequenz, den wir im Nature-Journal »Communications Physics« veröffentlichten konnten (S. 64).

Unsere Innovationsstärke ist ein guter Grund, um auch in Zeiten der Pandemie in Kontakt zu bleiben. Die Veranstaltungsreihe »Online-Forum« startete im Dezember mit fast 50 Teilnehmenden sehr erfolgreich – an den Folgeveranstaltungen nahmen regelmäßig über 100 Interessierte teil. Um den Dialog mit Stakeholdern aufrecht zu erhalten, haben wir unsere Präsenz in den Sozialen Medien verstärkt.

Doch ganz gleich, ob Sie über die klassischen oder über neue Wege mit uns Kontakt aufnehmen: Schauen Sie rein – wir freuen uns immer, von Ihnen zu hören! Viel Freude beim Stöbern und Entdecken in unserem Jahresbericht wünscht Ihnen

Ihr *Karsten Buse*

Prof. Dr. Karsten Buse, Institutsleiter

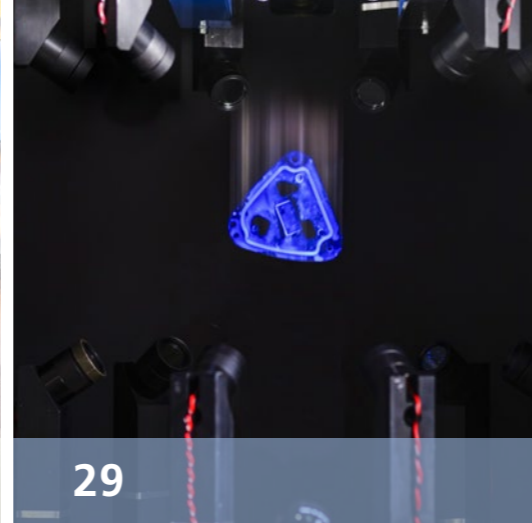




16



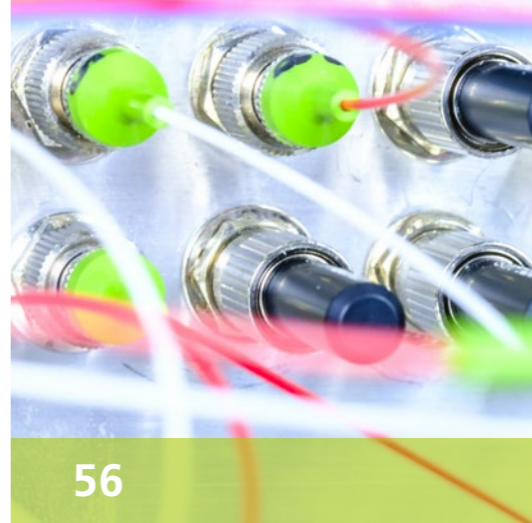
22



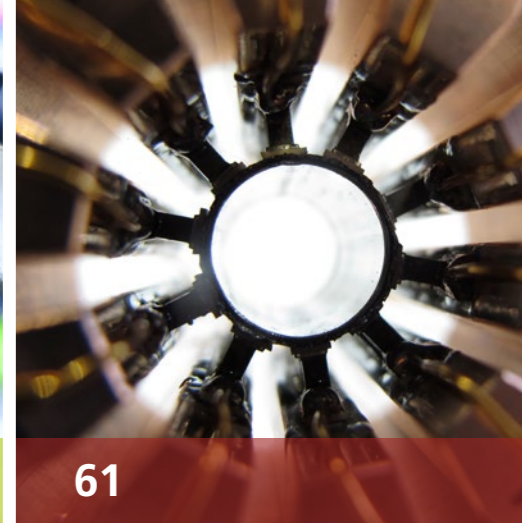
29



44



56



61

# INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 ORGANISATION
- 8 DAS INSTITUT IN ZAHLEN
- 10 PROFESSUREN | KURATORIUM
- 12 TECHNISCHE AUSSTATTUNG
- 13 GROSSPROJEKTE – Im Fokus: QUANTENPROJEKTE
- 16 MAGAZIN
- 24 KUNDENINTERVIEW
  
- 26 PRODUKTIONSKONTROLLE**
- 28 OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK
- 30 INLINE VISION SYSTEME
- 32 GEOMETRISCHE INLINE-MESSSYSTEME
- 34 Im Fokus: MOBILE PARTIKELMESSTECHNIK
  
- 36 OBJEKT- UND FORMERFASSUNG**
- 38 MOBILES TERRESTRISCHES SCANNING
- 40 AIRBORNE- UND UNTERWASSER-SCANNING
- 42 SMARTE DATENPROZESSIERUNG UND -VISUALISIERUNG
- 44 Im Fokus: EFFIZIENTE VEGETATIONSKONTROLLE

## 46 GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

- 48 INTEGRIERTE SENSORSYSTEME
- 50 SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK
- 52 THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME
- 54 NICHTLINEARE OPTIK UND QUANTENSENSORIK
- 56 Im Fokus: SPURENGASANALYSE MIT FREQUENZKÄMMEN

## 58 THERMISCHE ENERGIEWANDLER



- 60 THERMOELEKTRISCHE SYSTEME
- 62 KALORISCHE SYSTEME
- 64 Im Fokus: MAGNETOKALORISCHE HEATPIPES

## 66 MESSEN | VERANSTALTUNGEN





- 68 PUBLIKATIONEN
- 72 DOKTORARBEITEN | PATENTE
- 73 PARTNER | NETZWERKE
- 74 FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT
- 76 IMPRESSUM






### INSTITUTSLEITUNG

 <p><b>Institutsleiter</b> Prof. Dr. Karsten Buse</p>	 <p>Stellv. Institutsleiter Dr. Daniel Carl</p>
---	--


### PRODUKTIONSKONTROLLE ▶ Seite 26

 <p><b>Abteilungsleiter</b> Dr. Daniel Carl</p>	 <p>Optische Oberflächenanalytik PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg</p>	 <p>Inline Vision Systeme Dr. Tobias Schmid-Schirling</p>	 <p>Geometrische Inline-Messsysteme Dr. Alexander Bertz</p>
--	--	--	--





### REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

 <p>Leiter Kommuni- kation und Medien Holger Kock</p>	 <p>Forschung Dr. Rosita Sowade</p>	 <p>Organisations- entwicklung Dr. Heinrich Stülpnagel</p>
--	---	---





### OBJEKT- UND FORMERFASSUNG ▶ Seite 36

 <p><b>Abteilungsleiter</b> Prof. Dr. Alexander Reiterer</p>	 <p>Mobiles terrestrisches Scanning Dr. Philipp von Olshausen</p>	 <p>Airborne- und Unter- wasser-Scanning Simon Stemmler</p>	 <p>Smarte Daten- prozessierung und -visualisierung Prof. Christoph Müller</p>
---	--	--	---




### VERWALTUNG UND IT

 <p><b>Verwaltungsleiter</b> Wolfgang Oesterling</p>	 <p>Verwaltung Sabine Gabele</p>	 <p>Informations- und Telekommunikations- technik Gerd Kühner</p>	 <p>Personal Anneliese Zwölfer</p>
---	---	---	---




### GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE ▶ Seite 46

 <p><b>Abteilungsleiter</b> Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein</p>	 <p>Integrierte Sensorsysteme Dr. Marie-Luise Bauersfeld</p>	 <p>Spektroskopie und Prozessanalytik Dr. Raimund Brunner</p>	 <p>Thermische Mess- technik und Systeme Martin Jäggle</p>	 <p>Nichtlineare Optik und Quantensensorik PD Dr. Frank Kühnemann</p>
---	---	--	---	--

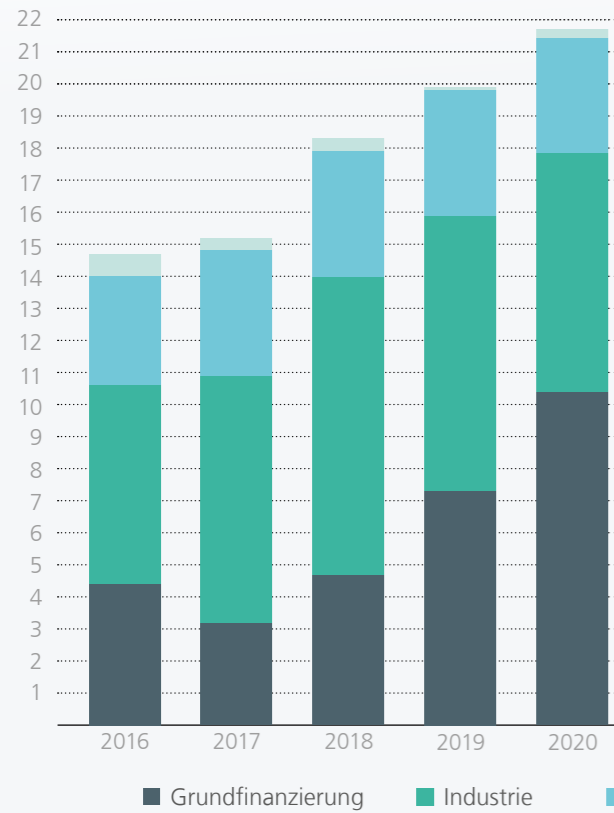
### TECHNISCHE DIENSTE

 <p><b>Technischer Leiter</b> Clemens Fallner</p>	 <p>Mechanik und Konstruktion Thomas Hinrichs</p>	 <p>Gebäude und Technik Clemens Fallner</p>
--	---	--

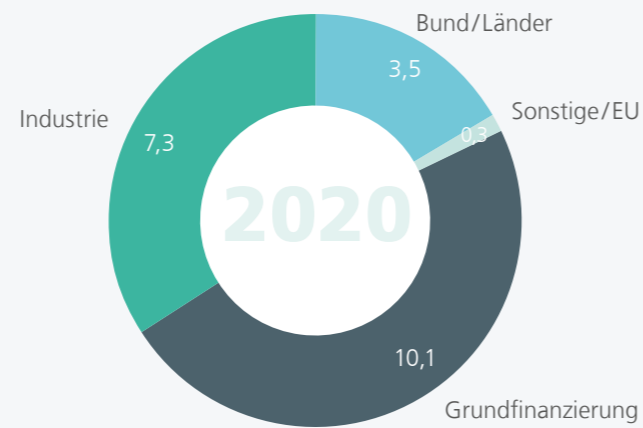
### THERMISCHE ENERGIEWANDLER ▶ Seite 58

 <p><b>Abteilungsleiter</b> Dr. Olaf Schäfer-Welsen</p>	 <p>Kalorische Systeme Dr. Kilian Bartholomé</p>	 <p>Thermoelektrische Systeme Dr. Olaf Schäfer-Welsen</p>
--	---	--

Betriebshaushalt in Mio. Euro



€ **21,2 Mio.**  
Betriebshaushalt



WACHSTUM TROTZ PANDEMIE UND UMZUG

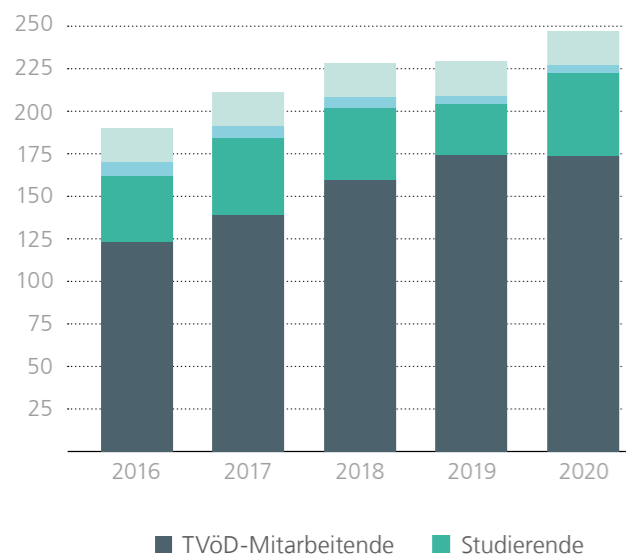
**Auch unter den erschwerten Bedingungen der Pandemie haben wir 2020 strategische sowie organisatorische Weichen gestellt, zahlreiche Forschungsprojekte erfolgreich realisiert und Forschungsmittel eingeworben. Der Umzug in unser neues Gebäude von August bis Oktober lief trotz der Umstände reibungslos.**

Das Jahr 2020 war außergewöhnlich: Bedingt durch die Pandemie sind Fachmessen zur Kundengewinnung weggefallen und Industriepartner in wirtschaftliche Schwierigkeiten geraten. Hinzu kamen strukturelle Veränderungen ganzer Branchen, insbesondere der Automobilindustrie. Durch digitale Präsenz und Nutzung der bestehenden Kontakte konnten wir diese Herausforderungen meistern, sodass sich unser Industrieertrag in der Summe kaum verändert hat. Der höhere Grundfinanzierungsanteil ist teilweise auf den Umzug in den Neubau zurückzuführen; teilweise aber auch auf den außergewöhnlichen Erfolg des Instituts, im Fraunhoferinternen Wettbewerb Forschungsmittel für die Umsetzung besonders innovativer Ideen einzuwerben.

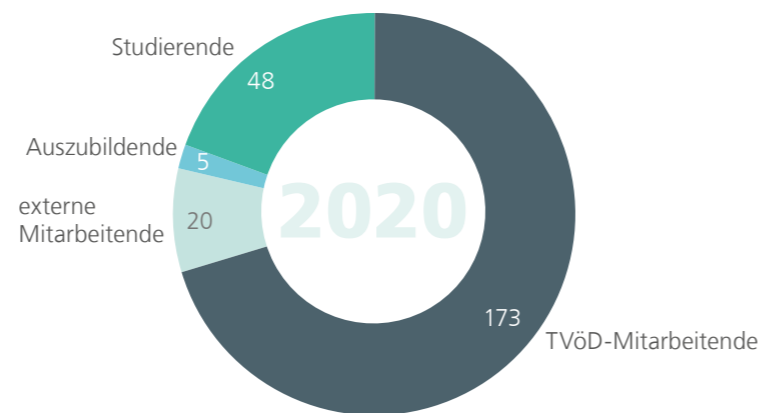
Insgesamt konnten wir das Jahr 2020 trotz Pandemie und trotz des vollständigen Umzugs unseres Instituts mit gut sieben Prozent Wachstum im Betriebshaushalt und einem positiven Jahresergebnis abschließen.

Bei der Gewinnung hoch qualifizierter Nachwuchskräfte macht sich die immer engere und bessere Vernetzung mit der Universität Freiburg und auch der Hochschule Furtwangen positiv bemerkbar. Die Zahl der Studierenden, die bei uns mitarbeiten, – oft im Rahmen ihrer Master-Abschlussarbeit – ist deutlich gewachsen. Dies zeigte sich deutlich zum Ende des Jahres 2020, nachdem der Umzug vollzogen war und wir auf dem Campus der Universität angekommen sind.

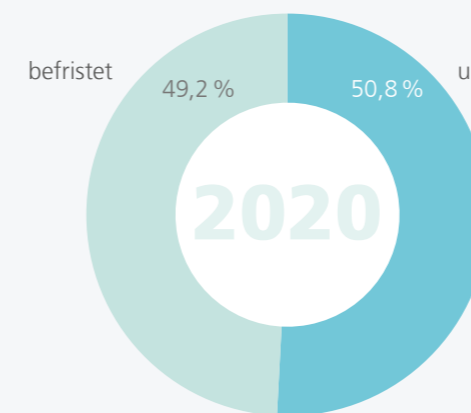
Personal



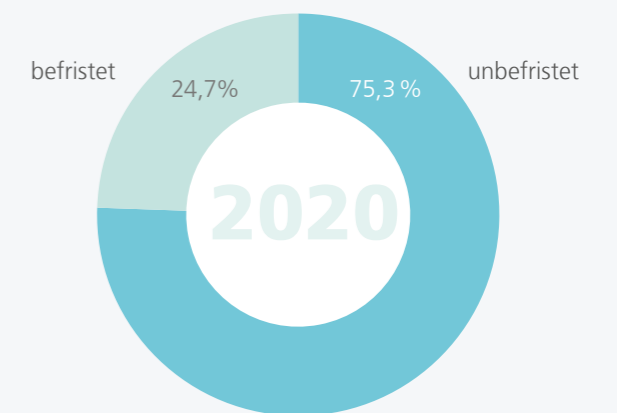
👤 **246**  
Mitarbeitende



Beschäftigte nach TVöD: Anteil befristeter/unbefristeter Verträge



wissenschaftlich



nicht-wissenschaftlich



## PROFESSUREN AN UNIVERSITÄTEN UND HOCHSCHULEN

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

### ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG



#### Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

**Professur für Optische Systeme**  
Prof. Dr. Karsten Buse  
[www.imtek.de/professuren/optische-systeme](http://www.imtek.de/professuren/optische-systeme)



- Forschungsschwerpunkte**
- nichtlinear-optische Materialien
  - optische Flüstergalerieresonatoren
  - miniaturisierte Festkörperlaser
  - optische Frequenzkonverter (optisch-parametrische Oszillatoren, OPOs)

- Frequenzkämme
- schnelles Durchstimmen von Laserfrequenzen
- integrierte Optik

**Professur für Gassensoren**  
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein  
[www.imtek.de/professuren/gassensoren](http://www.imtek.de/professuren/gassensoren)



- Forschungsschwerpunkte**
- mikrostrukturierte Gassensoren
  - mikrostrukturierte IR-Strahler für das MIR
  - Laserspektroskopie
  - kompakte optische Gasmesssysteme

- Photoakustik
- katalytische Sensoren für brennbare Gase
- Systemintegration

#### Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH

**Professur für Monitoring von Großstrukturen**  
Prof. Dr. Alexander Reiterer  
[www.inatech.de/alexander-reiterer](http://www.inatech.de/alexander-reiterer)



- Forschungsschwerpunkte**
- Inspektion und Überwachung von Objekten und Großstrukturen
  - Entwicklung und Implementierung neuartiger Sensorkonzepte auf Basis von Laserscannern und Kameras
  - Datenanalyse und -interpretation,

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

### HOCHSCHULE FURTWANGEN



#### Fakultät Digitale Medien

**Professur für Computergrafik**  
Prof. Christoph Müller  
[www.hs-furtwangen.de/fakultaeten/digitale-medien](http://www.hs-furtwangen.de/fakultaeten/digitale-medien)

- Forschungsschwerpunkte**
- Echtzeit 3D-Visualisierung in Industrie und Medizin
  - interaktive Visualisierungslösungen in der Messtechnik

- Fotorealismus in der Echtzeit-Computergrafik
- Software-Engineering in der 3D-Computergrafik
- synthetische Trainingsdaten für KI-basierte Bildklassifikation



**»Im Strategie-Audit vor vier Jahren ging es hier viel um IT und Digitalisierung. Es ist toll, dass jetzt die Erfolge zu sehen sind.«**

Prof. Dr. Andreas Nüchter

## UNSER KURATORIUM

**Ein hochkarätig besetztes Kuratorium berät und unterstützt uns bei der strategischen Ausrichtung und bei Weichenstellungen für die Zukunft. 2020 fand die Kuratoriumssitzung digital statt – inklusive Laborführungen.**

#### Vorsitzender

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

Dr. Mathias Jonas  
Internationale Hydrographische Organisation

Dr. Volker Nussbaumer  
Volkswagen AG, Group Charging GmbH

#### Mitglieder

Dr. Lutz Aschke  
Carl Mahr GmbH & Co. KG

Gerhard Kleinpeter  
BMW AG

Dr. Stefan Raible  
ScioSense Germany GmbH.

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

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

Prof. Dr. Michael Totzeck  
Carl Zeiss AG

Stephanie Busse  
DB Netz AG

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

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

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



Ein Röntgen-CT der neuesten Generation ermöglicht den Blick ins Innere kleiner und großer Proben. So erhalten wir wertvolle Informationen für die Entwicklung unserer Systeme.



## INVESTIERT IN TECHNISCHE AUSSTATTUNG

**Knapp fünf Millionen Euro hat das Institut im Jahr 2020 in neue Geräte und Maschinen investiert. Viele Anschaffungen wurden auf das Umzugsjahr verschoben, sodass die Summe weit überdurchschnittlich ausfiel.**

### Koordinatenmessmaschine (Leitz Infinity 12.10.6)

Mit dem Gerät ist Fraunhofer IPM im Besitz einer der genauesten Koordinatenmessmaschinen weltweit. Das taktil arbeitende System ermöglicht u. a. Referenzmessungen zur digitalen Mehrwellenlängen-Holographie bei der topographischen Oberflächenmessung und arbeitet mit Genauigkeiten von bis zu E0: 0,3 + L/1000 in einem Messvolumen von 900 mm x 1200 mm x 700 mm.

### 3D-Computertomograph (Baker Hughes, v|tome|x m 300)

Das 3D-CT analysiert zerstörungsfrei das Innere kleiner und größerer Proben. Das System ist in der Lage, Details bis in den sub- $\mu\text{m}$ -Bereich darzustellen, aber auch röntgendichtere Proben zu durchstrahlen und zu analysieren. Es verfügt über einen hoch performanten Detektor der neuesten Generation. Streustrahlung kann soweit reduziert werden, dass auch geometrisch komplexe Proben klar dargestellt werden. Ein Soll-Ist-Vergleich gescannter Proben gegen Referenzen ist ebenso möglich wie das Messen nach VDI 2630 1.3. In-situ-Messungen ermöglichen, die Dynamik von Fluiden live zu zeigen. Damit liefert das System wertvolle Informationen für die Systemsimulation.

### Halbautomatisches Kathodenzerstäubungssystem

**(Dreebit Co-Sputteranlage 145)** Die Anlage beschichtet starre und flexible Substrate mit bis zu 200 mm Durchmesser und einer Höhe von bis zu 10 mm. Sie ermöglicht die Erzeugung von Schichtdicken bis 2  $\mu\text{m}$ . Neben dem Abscheiden von Edelmetallen und Metalloxiden können präzise Metalllegierungen und -komposite in Dünnschicht erzeugt werden. Dies erlaubt auch eine stöchiometrische Abscheidung von Nitriden und Oxiden.

### Präzisionssiebdruckmaschine (Thieme LAB 1000)

Das System mit einem Druckformat von 400 mm x 400 mm ermöglicht das selektive Beschichten und funktionale Drucken, z. B. von gassensitiven Materialien. Eine automatische Sieb- und Substratausrichtung sorgt für den positionsgenaue Druck von Single- und Multilayerschichten mit einer mechanischen Druckgenauigkeit von  $\pm 15 \mu\text{m}$ . Vorteile des Siebdrucks liegen in der Materialflexibilität, dem variablen und homogenen Schichtaufbau sowie einer großen Substratvielfalt.

### Kalligraphischer Polaufbau zur Mikrostrukturierung von Lithiumniobatkristallen (Eigenbau)

Der kalligraphische Polaufbau ermöglicht, Lithiumniobatkristalle mikrometeregenau zu strukturieren, indem eine elektrisch geladene Metallnadel einzelne Domänen seriell in das Material einschreibt. Damit lassen sich beliebige Polungsmuster schnell und effizient herstellen, was mit konventionellen Polungstechniken nicht möglich ist. Das zugrundeliegende Verfahren wurde gemeinsam mit der Professur für Optische Systeme an der Universität Freiburg entwickelt.

### Inspektionssystem zur automatisierten Texturanalyse

**(Eigenbau)** Basierend auf Pixel-Shift-Technologie ermöglicht der »Tex-Messplatz« mikroskopische Auflösung bei makroskopischem Messfeld. Die Bilder mit einer Auflösung von 500 MP pro Bild werden auf der Grafikkarte ausgewertet. Verschiedene RGB-Beleuchtungsanordnungen ermöglichen realistische Lichtverhältnisse. Die Bauteile werden mithilfe eines Roboters automatisiert zugeführt. Wir nutzen den Messplatz für Texturanalysen großer Flächen und komplexer Objekte im Kundenauftrag ebenso wie für den Nachweis der Prüfmittelfähigkeit unserer für die Industrie entwickelten Inspektionssysteme.

## UNSERE GRÖSSTEN FORSCHUNGSPROJEKTE IM JAHR 2020

**Vierzehn Forschungsprojekte mit einem finanziellen Volumen von jeweils mehr als einer Million Euro für Fraunhofer IPM haben unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über das Jahr 2020 bearbeitet. Die Liste enthält nur Projekte, die von der Öffentlichen Hand oder der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert wurden.**

**TOXIG** Farbwechsel-basierte Sensoren zur Detektion toxischer Gase

Laufzeit: 01.03.2017 – 31.12.2020

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

**Freifall** 100-Prozent Qualitätsprüfung für Halbzeuge durch Geometrie- und Oberflächenanalyse im freien Fall

Laufzeit: 01.04.2017 – 30.09.2020

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

**MagMed** Entwicklung einer kältemittelfreien und effizienten Kühltechnik (Systementwicklung und Messtechnik)

Laufzeit: 01.06.2017 – 31.05.2021

Förderung: BMWi / Forschungszentrum Jülich GmbH

**eHarsh** Sensorsysteme für extrem raue Umgebungen

Laufzeit: 01.07.2017 – 30.06.2021

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

**QUILT** Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions

Laufzeit: 01.09.2017 – 30.11.2021

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

**FluMEMS** MEMS-basierte katalytisch-thermische Sensoren für Gase und Flüssigkeiten

Laufzeit: 01.04.2018 – 31.12.2021

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

**MultiVIS** Fachhochschulkooperation mit der Hochschule Furtwangen HFU

Laufzeit: 01.07.2018 – 31.12.2023

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Kooperationsprogramm Fachhochschulen)

**Elasto-Cool** Elastokalorik: Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel zum Heizen und Kühlen

Laufzeit: 01.08.2018 – 31.07.2021

Förderung: BMBF / VDI/VDE Innovation und Technik GmbH

**ISLAS** Intracavity-Laserspektroskopie für den hochempfindlichen Nachweis von Spurengasen

Laufzeit: 01.03.2019 – 28.02.2022

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (MAVO)

**QMag** Entwicklung zweier komplementärer Quantenmagnetometer, um kleinste Magnetfelder mit hoher Auflösung und hoher Empfindlichkeit bei Raumtemperatur zu messen

Laufzeit: 21.03.2019 – 31.03.2024

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

**LaserBeat** Hammerschlagtest mit Licht – berührungslose und flächenhafte Inspektion von Tunneln auf Basis laserinduzierten Körperschalls

Laufzeit: 01.04.2019 – 31.03.2022

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (WISA)

**EIKaWe** Elektrokolorische Wärmepumpe

Laufzeit: 01.10.2019 – 30.09.2023

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (Leitprojekt)

**HochPerForm** Hochkompakte, schnelle Aktorik auf Basis von Formgedächtnislegierungen

Laufzeit: 01.10.2019 – 28.02.2023

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE)

**MIAME** Mikrometer auf Meter: Laserlicht für sub-Mikrometer-genaue 3D-Messung auf Meterskalen

Laufzeit: 01.04.2020 – 31.03.2023

Förderung: Fraunhofer-Gesellschaft (PREPARE)



## FREIFALL: OPTISCH PRÜFEN OHNE HANDLING

**ZIEL** Entwicklung eines optischen Systems zur 100-Prozent-Qualitätsprüfung von Bauteilen durch Geometrie- und Oberflächenanalyse im freien Fall

**HINTERGRUND** Die Qualitätskontrolle von Massenbauteilen erfolgt heute häufig noch per Sichtprüfung durch Menschen. Für eine automatisierte optische Inspektion müssen die Bauteile gezielt orientiert werden. Die dazu notwendige Handling-Technik ist aufwändig und teuer. Eine automatisierte 100-Prozent-Kontrolle insbesondere für Halbzeuge war daher bislang selten rentabel.

**ERGEBNIS** Im Rahmen des Projekts »Freifall« erarbeitete Fraunhofer IPM gemeinsam mit Fraunhofer IGD eine Lösung zur automatisierten optischen 100-Prozent-Kontrolle von Massenbauteilen. Dazu entwickelte das Team ein Freifall-Prüfsystem: Die zu prüfenden Bauteile werden über ein Zuführsystem in eine homogen ausgeleuchtete Hohlkugel befördert. Während das Teil die Prüfkugel passiert, wird es von 24 Kameras von allen Seiten aufgenommen. Drei zusätzliche Lagekameras geben Aufschluss über die Orientierung. Im Rahmen der Bildauswertung lassen sich Geometrieabweichungen detektieren. Hierfür wird die Kontur des Bauteils aus vielen Perspektiven bestimmt und mit der Sollkontur verglichen. Bilder von sechs Fluoreszenzkameras geben zusätzlich Aufschluss über die Reinheit und Beschichtung der Bauteiloberfläche mit einer Genauigkeit von 0,01 g/m<sup>2</sup>.

**PERSPEKTIVE** Mit Studien und Pilotinstallationen wird die Einsatzfähigkeit der Technologie im industriellen Umfeld validiert. Dazu arbeitet das Team an einer höheren Taktfrequenz und flexibleren Einlernverfahren. Im Projekt GUmProDig, das im Mai 2021 gestartet ist, wird die Freifall-Prüftechnologie mit dem Track & Trace Fingerprint-Verfahren zur Bauteilrückverfolgung verknüpft.



## TOXIG: SPÜRNASEN FÜR GIFTIGE GASE

**ZIEL** Detektion brennbarer Gase mithilfe von Farbumschlagensoren

**HINTERGRUND** Bei einem Feuer entstehen Brandgase, bevor sich Rauch entwickelt. Mithilfe von Brandgasmeldern lassen sich Brände früher erkennen und Leben retten. Kleine und kostengünstige Brandgasmelder sind bisher nicht am Markt verfügbar.

**ERGEBNIS** In Zusammenarbeit mit Fraunhofer ISC und EMFT entwickelte das Team um Dr. Marie-Luise Bauersfeld ein kostengünstiges, miniaturisiertes Gassensor-System, das brandtypische Gase wie CO, NO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub> sicher und frühzeitig detektiert. Der Brandgasdetektor basiert auf Farbumschlagensensoren mit Empfindlichkeiten bis in den ppb-Bereich. Die Auslesung erfolgt über Leuchtdioden und Photodetektoren. Getestet

wurden die Sensoren in den Realbrandlaboren von Minimax und Hekatron.

**PERSPEKTIVE** Der im Projekt entwickelte Demonstrator hat am Beispiel Brandgase das Potenzial des Farbumschlag-Messprinzips für den sensitiven Gasnachweis gezeigt. Für den serienmäßigen Einsatz in Brandmeldern gilt es nun, die Sensoren mit Blick auf die Langzeitstabilität weiterzuentwickeln. Das Potenzial des Farbumschlag-Prinzips soll darüber hinaus in Zukunft auch für die Detektion weiterer Gase in anderen Einsatzfeldern genutzt werden – etwa zur Überwachung von Grenzwerten am Arbeitsplatz oder für das Monitoring der Luftqualität in Innenräumen.



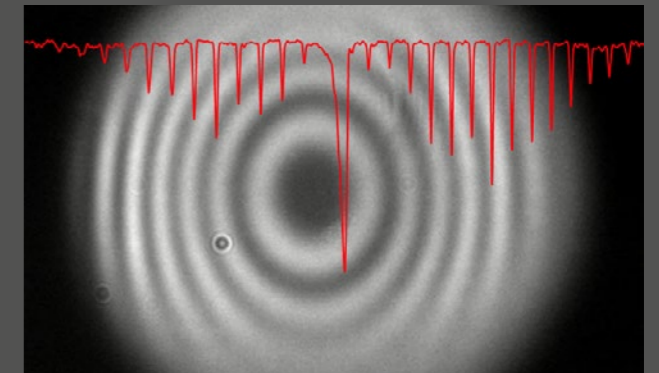
## QUILT: INFRAROTSPEKTROSKOPIE MIT SICHTBAREN PHOTONEN

**ZIEL** Anwendungsorientierte Messtechnik für Bildgebung und Spektroskopie mit verschränkten Photonenpaaren

**HINTERGRUND** Verschränkte Photonenpaare erlauben es, Informationen über das infrarote Photon mithilfe seines sichtbaren »Partners« zu detektieren. Das ermöglicht es, für die Infrarot-Spektroskopie und -Bildgebung kostengünstigere, schnellere und deutlich rauschärmere Silizium-basierte Detektoren zu verwenden. Im Projekt forschen insgesamt sechs Fraunhofer-Institute an verschiedenen Anwendungsfeldern und Schlüsseltechnologien.

**PROJEKTSTAND** Das QUILT-Team bei Fraunhofer IPM demonstrierte erstmalig ein Quanten-Spektrometer in Analogie zur Messtechnik eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers. Diese Messmethode ermöglicht hochauflösende und sensitive Spektroskopie. Die Ergebnisse hierzu wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften und auf internationalen Konferenzen präsentiert.

**PERSPEKTIVE** Im weiteren Verlauf des Projekts wird ein mobiler und leistungsfähiger Demonstrator für die Gas-Spektroskopie entwickelt und realisiert, mit dessen Hilfe neue Anwendungsfelder erschlossen werden sollen.



Verschränkte Photonenpaare machen Infrarotspektren mit Interferogrammen im Sichtbaren messbar.

## QMAG: HOCHGENAUE MESSUNG SCHWACHER MAGNETFELDER

**ZIEL** Realisierung neuer Applikationen für quantenoptische Magnetfeldsensoren

**HINTERGRUND** Optisch gepumpte Magnetometer (OPM) sind in ihrem Kern kleine Laserspektrometer, mit denen sich extrem schwache Magnetfelder detektieren lassen, wie sie z. B. von Hirnströmen erzeugt werden. Magnetfelder können die meisten Materialien sehr gut durchdringen. In QMAG arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler daran, die OPM zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder für den berührungslosen »Blick« in Rohre für Durchflussmessungen einzusetzen.

**PROJEKTSTAND** In Zusammenarbeit mit Fraunhofer IWM wurde ein Aufbau realisiert, in dem Stahlproben mechanisch ermüdet und dabei deren Magnetfelder gemessen werden. In proof-of-concept-Experimenten konnten so die magnetischen »Fingerabdrücke« von Materialien bei verschiedenen Belastungen beobachtet werden. Für den »Blick ins Rohr« werden Techniken der kernmagnetischen

Resonanz (NMR) eingesetzt. Mit OPM konzentriert man sich dabei auf Signale bei sehr niedrigen Frequenzen, die auch Metallrohre durchdringen können. Das Projektteam konnte demonstrieren, wie sich dabei verschiedene Flüssigkeiten anhand von Signalen unterscheiden lassen, die nur wenige Pikotesla (10<sup>-12</sup> T) stark sind.

**PERSPEKTIVE** In der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit wird es darum gehen, die erfolgreich demonstrierten Konzepte zu Messverfahren weiterzuentwickeln. Parallel dazu sollen weitere Anwendungsmöglichkeiten erschlossen werden. Um auch an größeren Proben und Bauteilen Grundlagenuntersuchungen unter kontrollierten magnetischen Umgebungsbedingungen durchführen zu können, wird in einem Laborraum eine »magnetisch abgeschirmte Kammer« installiert. Für die spätere wirtschaftliche Anwendung soll zudem die Messtechnik in Zusammenarbeit mit den OPM-Herstellern so weiterentwickelt werden, dass sie auch ohne magnetische Abschirmungen eingesetzt werden kann.

[www.qmag.fraunhofer.de](http://www.qmag.fraunhofer.de)

Aufbau zur magnetomechanischen Werkstoffprüfung: Das optisch gepumpte Magnetometer (OPM) in der Mitte prüft das Magnetfeld der Probe.



Freiburgs Baubürgermeister Prof. Dr. Martin Haag, Landeswirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut, Institutsleiter Prof. Dr. Karsten Buse, Universitätsrektorin Prof. Dr. Kerstin Krieglstein und Fraunhofer-Vorstand Andreas Meuer (v.l.) beim Durchtrennen des »Roten Bands« im Foyer des Neubaus.



## WIR SIND DRIN! NEUBAU EINGEWEIFHT

**Minutiöse Vorbereitung – reibungsloser Verlauf: Exakt wie geplant von Juni bis September dauerte der Umzug in unser neues Gebäude auf dem »Campus am Flugplatz«. Im Oktober wurde der Neubau eingeweiht.**

Zur offiziellen Einweihung am 1. Oktober 2020 kamen rund 40 hochrangige Gäste aus Politik, Wissenschaft und Industrie. »Wohlfühlatmosphäre plus Hightech« – so beschrieb Prof. Dr. Karsten Buse die neue Arbeitsumgebung in

seiner Begrüßungsrede im Rahmen der offiziellen Einweihung. »Der 'Campus Am Flugplatz' ist die optimale Umgebung, in der sich innovative Spitzenforschung mit wirksamem Transfer in die Wirtschaft verbindet«, betonte Prof. Dr. Kerstin Krieglstein, die an ihrem ersten Arbeitstag als neue Rektorin der Universität Freiburg an der Veranstaltung teilnahm. Pandemiebedingt wurde auf eine große zentrale Einweihungsfeier verzichtet. Im Rahmen weiterer Veranstaltungen hatten auch Forschungspartner,

Alumni und Baubeteiligte die Gelegenheit, das Gebäude zu besichtigen. Auch wenn Teile der Belegschaft aufgrund der Pandemie seit dem Bezug des Gebäudes von zuhause aus arbeiten: Die neuen Büros und Labore, zahlreiche zusätzliche Geräte, viel Raum für Begegnungen und nicht zuletzt die Campus-Atmosphäre des Standorts schaffen hervorragende Arbeitsbedingungen – die wir noch intensiver nutzen werden, wenn alle Mitarbeitenden wieder regelmäßig am Institut präsent sind.



40 Gäste aus Politik, Wissenschaft und Industrie kamen zur Einweihung des neuen Gebäudes.



Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut betonte die wichtige Rolle angewandter Forschung für die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit von KMU.



### »... RIGHT NOW, OVER ME« – KUNST AM BAU

65 unterschiedlich große, farbige Kugelleuchten hat der Künstler Tobias Rehberger verteilt über das gesamte Gebäude installiert. Für das Werk hat sich Rehberger von Optik-Aufbauten inspirieren lassen, bei denen Licht durch verschiedene Linsen, Prismen oder Spiegel

geführt wird. Die Kugeln sind in acht unterschiedlich langen Strängen angeordnet, denen jeweils eine andere Lichtfarbe zugeordnet ist. Sie können jederzeit durch in den Fluren installierte Schalter eingeschaltet werden. Im Foyer

laufen alle Stränge zusammen und ergeben ein buntes Farbenspiel – so bunt und lebendig wie die Belegschaft des Instituts.

Der Neubau hat ein Investitionsvolumen von 43,1 Millionen Euro, die als Sonderfinanzierung von Bund und Land jeweils zu 25 Prozent und zu 50 Prozent aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) getragen werden. Das Bauvorhaben ist die größte Einzelmaßnahme, die im Rahmen des EFRE in der Förderperiode 2014 bis 2020 vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg unterstützt wird. Für die Erschließung und Erstausrüstung des Instituts wurden von Land und Bund je 50 Prozent Sonderinvestitionsmittel in Höhe von insgesamt weiteren 14 Millionen Euro bereitgestellt.







Spaß am Tüfteln: Mit großer Freude engagierten sich die Jugendlichen im Projekt.

## HOLOGRAPHIE-MIKROSKOP ZUM SELBERBAUEN



**Im Rahmen einer Schulkooperation entwickelten wir mit zwei Physik-AGs aus dem Freiburger Raum ein günstiges 3D-Mikroskop auf Basis des Einplatinencomputers Raspberry Pi. Ein ausführliches Porträt des Projekts erschien im Make Magazin 2/2020.**

Drei Jahre dauerte das Kooperationsprojekt zwischen Forschenden von Fraunhofer IPM und Schülerinnen und Schülern verschiedener Freiburger Schulen. Das Ergebnis heißt »HolMOS« – ein digitalholographisches Mikroskop für Open Science, mit dem transparente biologische Proben dreidimensional vermessen werden können. Herzstück ist ein Raspberry Pi mit Kamera. Mit dieser kostengünstigen Hardware und frei veröffentlichter, leicht bedienbarer Software kann das Mikroskop auch ohne Vorkenntnisse aufgebaut werden – erst als einfaches Mikroskop, dann als vollständiges Interferometrie-Mikroskop.

*Durch seinen einfachen Aufbau ist das Mikroskop auch für Anfänger ohne Vorwissen gut geeignet.*

Mit Begeisterung arbeiteten die Jugendlichen gemeinsam mit unseren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an der Entwicklung und Erprobung des Mikroskops in der Praxis. Einige der Beteiligten engagierten sich auch über ihren Schulabschluss hinaus noch im Projekt. Das fertige Mikroskop wurde anschließend an verschiedenen Schulen, auf der Maker Faire in Berlin und auf der Konferenz »Digital Holography and 3D Imaging« in Bordeaux präsentiert.

Kooperationspartner war das Freiburg-Seminar, das naturwissenschaftliche Arbeitsgruppen für Schülerinnen und Schüler aus gymnasialen Oberstufen im Freiburger Raum organisiert. Finanzielle Förderung für das Projekt kam aus dem Programm »Open Photonik« des Bundesforschungsministeriums.



Im »Online-Forum« diskutieren Messtechnikexperten von Fraunhofer IPM mit Fachleuten aus Industrie und Wissenschaft über Einsatz und Anwendung neuester Messtechniklösungen.

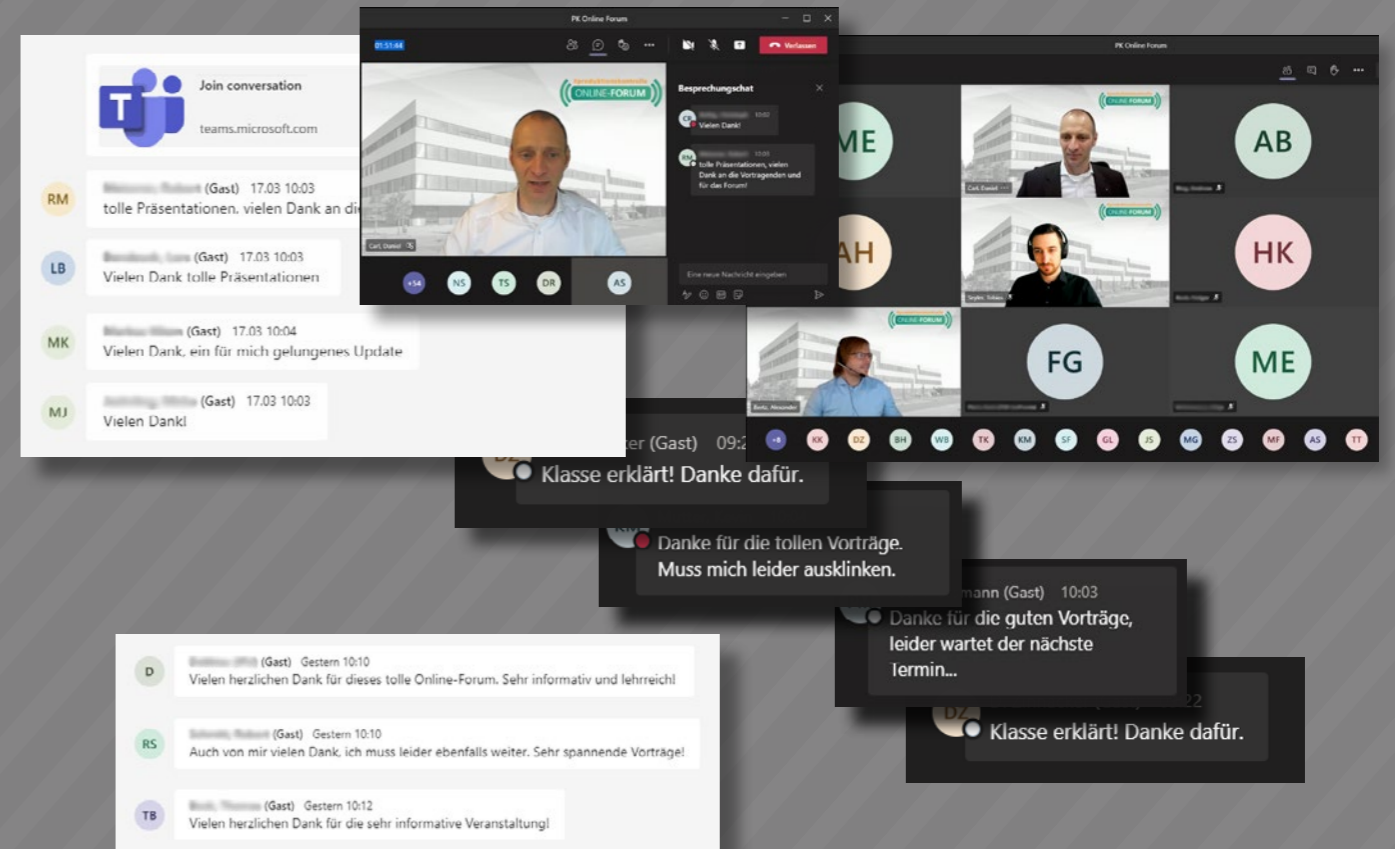
## ONLINE-FORUM: AUSTAUSCH IM VIRTUELLEN RAUM

**Keine Messen, keine Workshops, keine persönlichen Treffen – um den Austausch während der Coronapandemie aufrecht zu erhalten, war 2020 Kreativität gefragt. Mit der Reihe »Online-Forum« startete Fraunhofer IPM ein erfolgreiches neues Veranstaltungsformat.**

90 Minuten, ein Thema und bis zu fünf Impulsvorträge: 2020 ging unsere neue Veranstaltungsreihe »Online-Forum« an den Start. Das Forum bietet eine unkomplizierte Plattform für den fachlich fundierten Austausch im digitalen Raum. Den Auftakt machte die Abteilung Produktionskontrolle mit dem Thema »Messtechnik für die Umfor-

mung« – mit großer Resonanz: Knapp 50 Fachleute aus Industrie und Wissenschaft diskutierten virtuell mit.

Auch 2021 wird die Veranstaltungsreihe fortgesetzt. Die bereits feststehenden Termine finden Sie auf Seite 67. Auf unserer Homepage werden die Termine laufend ergänzt.







**INNO COOL**

Mit »InnoCool – Konsortialstudie Kalorik« entstand ein Expertengremium, in dem offene Fragen zur Zukunft der kalorischen Kältetechnik analysiert werden.

in cooperation with: **DKV** **GSI**



Automatische Bilderkennung zur Dokumentation verlegter Erdkabel. Die Daten werden umgehend in ein 3D-Bild sowie in ein Geo-Vermessungssystem übertragen.

## GEMEINSAMER BLICK IN DIE ZUKUNFT DER KÄLTETECHNIK

Seit einigen Jahren forscht Fraunhofer IPM an kalorischen Systemen zum Heizen und Kühlen. Mit »InnoCool – Konsortialstudie Kalorik« bringen wir Hersteller, Technologieentwickler, Anwender und Forschungsinstitutionen zusammen, um über den Stand der Technik zu informieren und gemeinsam Zukunftspotenziale zu eruieren.

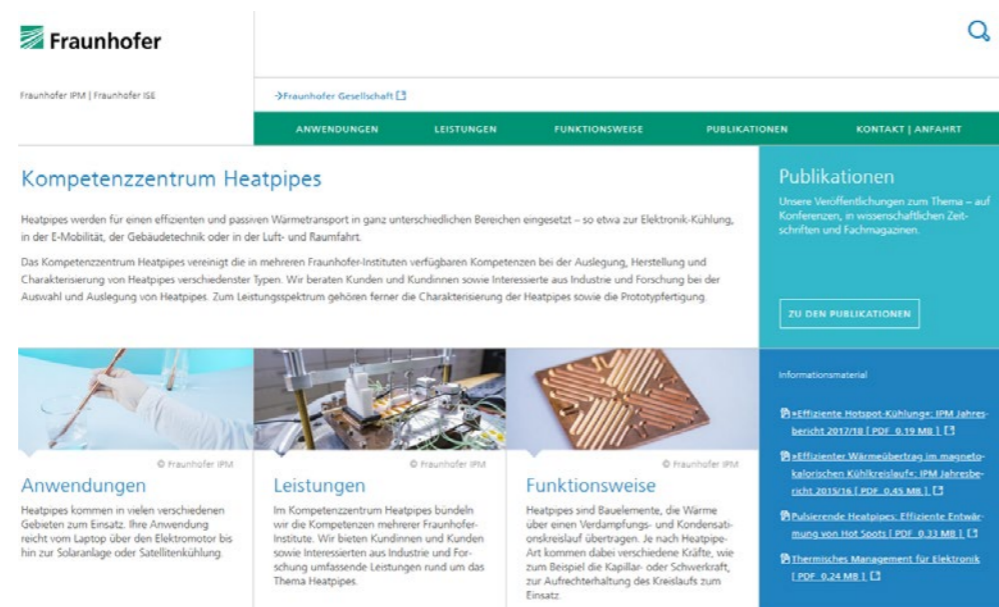
Die kalorische Klima- und Kältetechnik rückt als Alternative zu herkömmlichen Kühltechniken immer mehr in den Fokus. Doch noch sind viele Fragen offen: Wird diese neue Technologie den Sprung in die Anwendung schaffen? Für welche Bereiche ist sie interessant, und was sind die spezifischen Anforderungen? Im vergangenen Jahr gelang es uns, mit »InnoCool – Konsortialstudie

Kalorik« ein Konsortium von knapp 15 Unternehmen und Forschungsinstitutionen aufzubauen. In gemeinsamen Workshops werden nun offene Fragen diskutiert und mögliche Entwicklungsszenarien analysiert. Ziel ist die Vernetzung entlang der Wertschöpfungskette – um frühzeitig die richtigen Weichen für einen erfolgreichen Markteintritt dieser Technologie zu stellen.

## KOMPETENZZENTRUM HEATPIPES

Fraunhofer IPM und Fraunhofer ISE bündeln ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der Heatpipe-Forschung.

Vor diesem Hintergrund entstand eine gemeinsame Internet-Seite, die Fakten zur Heatpipe-Technologie sowie Neuigkeiten aus Forschung und Anwendung bereithält. Heatpipes werden für einen effizienten und passiven Wärmetransport in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt – so etwa zur Elektronik-Kühlung, in der E-Mobilität, der Gebäudetechnik oder in der Luft- und Raumfahrt. Für zukünftige Anwendungen arbeiten Fraunhofer IPM und Fraunhofer ISE an neuen Konzepten unterschiedlicher Arten von Heatpipes, an Herstellungsverfahren sowie an der Charakterisierung der Wärmerohre.



[www.heatpipes.fraunhofer.de](http://www.heatpipes.fraunhofer.de)

## FRAUNHOFER-AKQUISITION DES MONATS: PROJEKT »TRENCHLOG«

Den fraunhoferweit größten Auftrag aus der Industrie im März 2020 erhielt ein Team unserer Abteilung Objekt- und Formerfassung. Rund eine Million Euro investiert die Bayernwerk Netz GmbH in das Digitalisierungstool »NEXT.TrenchLog«, welches das Team im Rahmen des Projekts bis Mai 2022 entwickelt. Mit dem Tool will Bayerns größter Netzbetreiber Baufirmen in die Lage versetzen, Art, Länge und

Position unterirdisch verlegter Versorgungsleitungen vollautomatisiert zu dokumentieren. Erfasst werden die Baugruben mithilfe handelsüblicher Tablet-PCs, ausgerüstet mit einer Stereokamera. Aus den Kameradaten werden automatisch georeferenzierte 3D-Daten erzeugt, verlegte Leitungen werden mittels künstlicher Intelligenz erkannt und in ein Geo-Vermessungssystem übertragen. »NEXT.TrenchLog«

wird das weltweit erste KI-basierte System sein, um georeferenzierte Daten für den Netzausbau zu erzeugen.



Prof. Dr. Alexander Reiterer (l.), Simon Stemmler, Dr. Christoph Werner (r.)

## TALENTA

Drei unserer Doktorandinnen erhalten derzeit individuelle Förderung für ihre Forschungsprojekte durch das Fraunhofer-Karrierprogramm TALENTA.

Nora Bachmann forscht für ihre Doktorarbeit an elastokalorischen Systemen, Laura Engel entwickelt Farbumschlagensensoren und Chiara Lindners Arbeit widmet sich der Quantensensorik. Alle drei werden im Rahmen des Programms TALENTA start gefördert, das besonders talentierte Mitarbeiterinnen in der frühen Phase ihrer Karriere unterstützt. Die Förderung durch TALENTA soll jungen Frauen den nötigen Freiraum für ihre Promotion und die fachliche Weiterentwicklung ermöglichen und bietet zudem verschiedene Angebote zur weiteren

Qualifizierung und Vernetzung. »Für mich ist es sehr wertvoll, mich mit Kolleginnen anderer Institute auszutauschen und Kontakte aufzubauen. Das hilft mir,

meine eigene Arbeit einzuschätzen, motiviert mich und gibt mir Ideen, wie ich Dinge noch besser angehen kann«, findet Nora Bachmann.



Nora Bachmann hat Maschinenbau an der TU Darmstadt studiert und entwickelt im Rahmen ihrer Doktorarbeit bei Fraunhofer IPM ein neues Konzept für elastokalorische Kühlsysteme.





Minister Hubert Aiwanger mit den Hugo-Geiger-Preisträgern: Dr. Simon Fichtner, Dr. Annelie Schiller, Dr. Christian Kalupka. Zu den Gratulanten gehörten auch die Fraunhofer-Vorstandsmitglieder Andreas Meuer und Prof. Alexander Kurz (v. l.).

## DR. ANNELIE SCHILLER ERHÄLT HUGO-GEIGER-PREIS

**Schiller zeigte in ihrer Promotion, dass digital-holographische Messungen auch an bewegten Objekten möglich sind. Dafür wurde sie mit dem Hugo-Geiger-Preis für herausragende Promotionsleistungen im Bereich der angewandten Forschung ausgezeichnet.**

Die digitale Holographie hat in den vergangenen Jahren Fahrt aufgenommen. Digital-holographische Messungen liefern extrem genaue 3D-Daten von Oberflächen. Moderne Lasertechnik, exzellente Kameras und schnelle parallele Datenverarbeitung auf Grafik-Karten ermöglichen es mittlerweile, Bilder mit 10 Millionen 3D-Punkten innerhalb von 100 Millisekunden aufzunehmen und zu prozessieren. Damit ist das Verfahren ausreichend schnell für den Einsatz direkt in der Fertigungslinie. Fraunhofer IPM forscht

seit Jahren auf diesem Gebiet und hat das digital-holographische Messsystem HoloTop erfolgreich zur Qualitätskontrolle bei Industriekunden installiert. Bislang störten jedoch schon kleinste Bewegungen die Aufnahme der Interferenz-Bilder, die durch Überlagerung von Mess- und Referenzstrahl erzeugt werden. Damit waren Messungen nur für stillstehende Objekte möglich. Dieses Problem hat Schiller in ihrer Dissertation »Messung der Topographie bewegter Objekte mittels digitaler Holographie« gelöst: Sie konnte zeigen, dass sich sowohl linear bewegte als auch rotierende Objekte digital-holographisch vermessen lassen. Besonders bemerkenswert sind Schillers Lösungen für rotierende Objekte: Sie nutzt dabei aus, dass das Verstimmen des Referenzstrahls – eine Voraussetzung, um den durch die Rotationsbewegung hervorgerufenen kritischen axialen

Geschwindigkeitsvektor zu kompensieren – nicht vom Radius des rotierenden Objekts abhängt. Stattdessen hängt der Anteil der kritischen Bewegung am Geschwindigkeitsvektor linear von der Winkelgeschwindigkeit und der Sensorposition ab.



Dr. Annelie Schiller forscht als wissenschaftliche Mitarbeiterin an digital-holographischen Messverfahren.

Ein neuartiger holographischer Liniensensor erfasst 3D-Oberflächenparameter eines rotierenden Metallzylinders in Bewegung und erkennt selbst feinste Bearbeitungsspuren und Defekte.

Chiara Lindner promoviert seit 2018 bei Fraunhofer IPM im Bereich der Quantensensorik

**CHIARA LINDNER** forscht im Rahmen ihrer Promotion bei Fraunhofer IPM seit 2018 zur Quantensensorik. Ihre Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie sich verschränkte Photonenpaare für die Infrarotspektroskopie nutzen lassen.

## DREI FRAGEN AN ... CHIARA LINDNER

**Frau Lindner, was fasziniert Sie am Thema Quantensensorik?**

Ich komme aus der angewandten Physik, mein Thema war schon immer die Optik. Daraus ist dann die Quantensensorik geworden, die ja gerade ein sehr aktuelles und aufstrebendes Thema ist. Dieses neue Forschungsfeld baut auf den grundlegenden Prinzipien der Photonik auf. Auch wenn die Quantensensorik am Institut noch ein sehr junges Thema ist, haben wir es so erstaunlich schnell geschafft, einen Beitrag zum Stand der Technik zu leisten.

Der Vorteil unseres Ansatzes ist: Mit extrem kleinen Lichtmengen können wir erstaunlich gute spektroskopische Ergebnisse erreichen. Da gibt es sehr spannende Anwendungsfelder. Biologische Proben beispielsweise reagieren teilweise sehr empfindlich auf Licht.

**Letztes Jahr haben Sie im Projekt einen Durchbruch erzielt: Sie haben ein Quanten-Spektrometer entwickelt. Wie fühlt sich das an?**

Es kam ja nicht ganz unerwartet, man arbeitet natürlich darauf hin. Es ist ein bisschen so, als würde man einen Schal stricken. Man setzt Masche um Masche, und irgendwann hält man inne und stellt fest: Man hat schon zwei Meter gestrickt. Im Alltag nimmt man sich nicht immer die Zeit, den eigenen Forschungsfortschritt

Revue passieren zu lassen. Wenn man dann einen Konferenzvortrag vorbereitet und das Ganze von außen betrachtet, stellt man fest, wie weit man schon gekommen ist. Das ist ein tolles Gefühl.

**Was waren bislang die größten Herausforderungen in Ihrer Promotion? Was waren die schönsten Momente?**

Eine Promotion an sich ist natürlich eine Herausforderung. Für viele ist es wie auch für mich der Berufseinstieg. Man muss selbstständiger arbeiten, als man es aus dem Studium kennt. Das ist aber auch eine der nachhaltigsten und wichtigsten Kompetenzen, die man daraus mitnimmt.

Ein Highlight war sicherlich meine Teilnahme an der »Photonics West« in San Francisco, kurz vor Pandemiebeginn. Es ist wirklich spannend, seine eigenen Forschungsergebnisse auf einer so riesigen internationalen Konferenz vorstellen zu dürfen. Anfang 2021 wurde außerdem mein zweites Paper angenommen und direkt zum Editor's Pick gekürt. Das hat mich sehr gefreut, damit hatte ich überhaupt nicht gerechnet.



> Zur automatisierten Erfassung von Planungsdaten für den Glasfaserausbau hat Fraunhofer IPM spezielle Mobile-Mapping-Messfahrzeuge entwickelt: die T-Cars.

>> Niko Gitzen, Projektleiter bei der Deutschen Telekom Technik GmbH: »Mit Unterstützung von Fraunhofer IPM konnten wir unsere Planungszeiten für den Netzausbau um bis zu 75 Prozent reduzieren.«

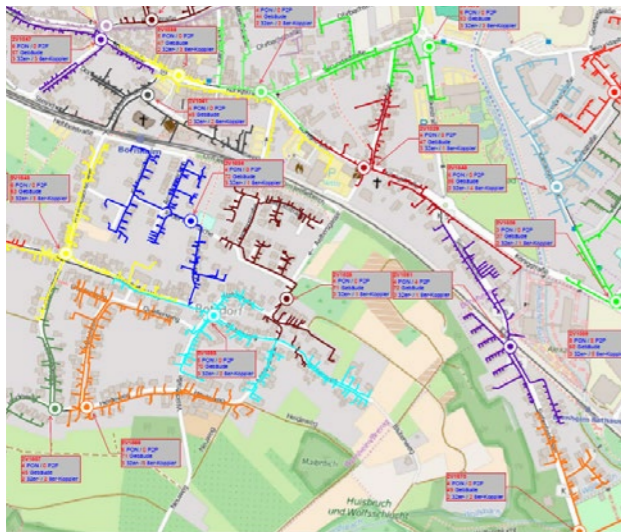


## »Wir haben beide fest an den Erfolg geglaubt«

»Schnellerer Glasfaserausbau dank vollautomatisierter Trassenplanung«, so beschreibt Niko Gitzen das Ziel der Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM. Um dieses Ziel zu erreichen, hat das Team nicht nur Messfahrzeuge entwickelt und aufgebaut, sondern auch ein revolutionäres Planungs-Tool. Beides zusammen ermöglicht eine automatisierte Trassenplanung, die weltweit einzigartig ist. Das Verfahren basiert auf hochgenauen 3D-Daten, die mittels künstlicher Intelligenz (KI) automatisiert klassifiziert werden. Niko Gitzen verantwortet bei der Deutschen Telekom Technik GmbH den Aufbau von Mobile-Mapping-Aktivitäten.

### Wie kam es zur Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

**Gitzen:** Nach einer Marktanalyse im Jahr 2017 haben wir sehr schnell festgestellt, dass es nicht viele Anbieter auf dem Markt gibt, die eine automatisierte Oberflächenerkennung durchführen können – und schon gar nicht auf dem hohen Niveau, das wir für unsere Trassenplanung benötigen.



»Digitale Planungskarten beschleunigen den Trassenausbau«, sagt Niko Gitzen. »Was früher manuell gemacht wurde, geht heute automatisiert – dank der Entwicklungsarbeit von Fraunhofer IPM.«

### Warum haben Sie die Messfahrzeuge oder die digitale Prozesskette nicht selbst entwickelt?

Die DT Technik hat die Kompetenz, Netze zu bauen, Netze zu betreiben und Netze zu entstoren. Wir liefern mit unseren ausgezeichneten Netzen das beste Kundenerlebnis, egal ob über Funk oder kabelgebunden. Aber um Mobile-Mapping-Themen anzugehen, fehlte uns damals schlichtweg die nötige Expertise. Die kam erst über die Zeit.

### Welche Rolle spielt die von uns entwickelte Technologie für den Erfolg des Breitbandausbaus in Deutschland?

In der Vergangenheit war es in der Regel so, dass unsere Planerinnen und Planer für alles rausfahren mussten. Mit dem Klemmbrett unterm Arm und der Kamera in der Hand haben sie vor Ort geschaut. Heute und künftig machen das die T-Cars und das neuronale Netz. Das sind zwei wesentliche Bausteine für den Breitbandausbau. Denn heute erstellen Planerinnen und Planer keine Planungskarten mehr, vielmehr bewerten und optimieren sie automatisiert erstellte Planungskarten. Dadurch ist deren Wertschöpfung um ein Vielfaches höher.

### Welche Erwartungen hatten Sie an das Projekt?

Auf beiden Seiten war anfangs viel Unsicherheit, aber wir haben auch beide fest an den Erfolg geglaubt. Der Zeitplan

Die **Deutsche Telekom Technik GmbH (DT Technik)** ist eine Tochtergesellschaft der Telekom Deutschland GmbH. Sie verantwortet innerhalb Deutschlands die Planung, den Bau und den Betrieb der Festnetz- und Mobilfunkinfrastruktur der Deutschen Telekom. Zudem erteilt die DT Technik Auskunft über die Lage technischer Einrichtungen an Behörden, Tiefbaufirmen und Versorger. Der Sitz des Unternehmens ist Bonn.

war von Beginn an sehr ambitioniert und nachdem unsere Geschäftsführung auch noch angekündigt hat, jährlich bis zu zwei Millionen Haushalte mit Glasfaser versorgen zu wollen, wurde der Druck nicht geringer. Es war klar: Wir müssen es hinbekommen, sowohl Fraunhofer IPM als auch die Telekom. Unsere Erwartung war eine funktionierende Hard- und Software mit hoher Zuverlässigkeit zum vereinbarten Liefertermin. Umso mehr haben wir uns gefreut, dass alles am Ende funktioniert hat.

### Was muss passen, damit ein Entwicklungsprojekt überhaupt gelingen kann?

Das Wichtigste ist regelmäßige und offene Kommunikation! Wir haben uns oft über kleinste Details ausgetauscht und den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unsere klassischen Planungsabläufe erklärt. Wir hätten auch sagen können: »Da ist der Werkvertrag, da steht alles drin.« Aber so funktioniert das nicht. Unser Ziel war immer, einen regelmäßigen Dialog zu führen und dadurch ein gemeinsames Verständnis zu schaffen.

### Inwiefern rechnet sich die Investition für die Telekom?

Schnelle und zuverlässige Breitbandverbindungen sind wichtiger denn je. Ob im Home-Office, fürs Home-Schooling oder die Anbindung von Unternehmen. Die Nachfrage nach Konnektivität steigt immer weiter an. Durch die automatisierte Planung können wir unsere Planungszeiten für den Netzausbau um bis zu 75 Prozent reduzieren. Dadurch sind wir viel schneller. Das rechnet sich. Zusätzlich versu-

chen wir, durch digitale Verfahren die Genehmigungszeiten bei Städten und Kommunen zu reduzieren. Und nebenbei sparen wir auch noch CO<sub>2</sub> ein, indem wir vieles jetzt vom Schreibtisch aus erledigen können.

### Vor welchen technologischen Herausforderungen steht die Telekommunikation derzeit?

Die Telekommunikationsbranche ist stets vom Einsatz neuer Technologien geprägt – inzwischen auch verstärkt von KI. Ein Beispiel: Im Netzmanagement nutzen wir KI-Algorithmen, die selbstständig erkennen, wenn Lastspitzen aufkommen oder Techniken ausfallen könnten – bevor der Kunde es merkt.

### Unser gemeinsames Projekt wurde mehrfach ausgezeichnet – mit dem Fraunhofer-Preis 2019 und mit dem Lead-to-Win Award 2020 der Telekom. Was bedeutet das für Sie und Ihr Team?

Der Lead-to-Win-Award wird international in verschiedenen Kategorien vergeben. In der Kategorie Innovation kamen wir auf den ersten Platz – als innovativstes Projekt der gesamten Deutschen Telekom! Das bedeutet für uns erst einmal eine hohe Wertschätzung unserer Arbeit, verstärkt aber auch den Druck, noch erfolgreicher zu sein. Gemeinsam mit Partnern wie Fraunhofer IPM sind wir aber auf dem richtigen Weg.



## GESCHÄFTSFELD PRODUKTIONSKONTROLLE

»Wir entwickeln maßgeschneiderte Mess- und Prüfsysteme für eine sich wandelnde 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 präzise vermessen 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 ermöglichen optische Sensoren und Messsysteme somit in vielen Fällen erstmals eine 100-Prozent-Echtzeitkontrolle. Damit kommt ihnen eine Rolle als »enabling technology« zu – für die Umsetzung einer Industrie 4.0-Strategie in der modernen Produktion.

Eingesetzt wird eine große Bandbreite an Technologien, darunter digitale Holographie, Infrarot-Reflexions-Spektroskopie und Fluoreszenzverfahren, kombiniert mit sehr schneller hardwarenaher Bild- und Datenverarbeitung. Die kundenspezifisch optimierten Systeme werden beispielsweise in der Umformtechnik im Automobilbereich und zur Qualitätssicherung bei Medizinprodukten bis hin zur Elektronikfertigung eingesetzt.

#### Gruppe **Optische Oberflächenanalytik**

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

#### Gruppe **Inline Vision Systeme**

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

*< Inspect 360° prüft Bauteile auf Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit im freien Fall. Die Teile werden mit einem Förderband zugeführt und unabhängig von der räumlichen Orientierung inspiziert.*



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

#### Gruppe **Geometrische Inline-Messsysteme**

- ▶ präzise Vermessung von Funktionsflächen im Produktionstakt
- ▶ kabellose 3D-Vermessung von Werkstücken direkt in der Werkzeugmaschine
- ▶ schnelle, dynamische Verformungsmessung



## GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung schlüsselfertiger Geräte für die Prüfung von Oberflächen. Die Systeme werden für die Reinheits- und Beschichtungsprüfung von Bauteilen und die Defekterkennung eingesetzt. Sie prüfen Bandwaren sowie komplex geformte Bauteile in der Produktion und erfassen Oberflächen beliebig geformter Bauteile vollständig – auch im freien Fall ohne weiteres Handling. Unsere Systeme prüfen extrem dünne Beschichtungen – wie z. B. Barrierschichten auf Kunststoffmaterialien – bezüglich Dicke und Vollständigkeit oder kontrollieren die Dickenverteilung von Umform- oder Korrosionsschutz-Öl auf Bauteilen und Blechen. Bei der Überwachung von Laserbearbeitungsprozessen setzen wir auf Laserverfahren, um Element-Analysen von Oberflächen und Beschichtungen durchzuführen. In der Gruppe entwickelte Inline-Mikroskope charakterisieren Geometrie und Oberflächen von Mikrobauanteilen im Produktionstakt mit sehr hoher Genauigkeit, z. B. bei der Herstellung von Medizinprodukten. Aufgrund unserer langjährigen Erfahrung bei der Entwicklung optischer Einheiten, Bilderfassung und -verarbeitung sowie spezifischer Elektronik und Mechanik sind wir in der Lage, kundenspezifische Mess- und Prüfsysteme in die Fertigungslinie zu integrieren.



Gruppenleiter: PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg

#### PROBLEMSPEZIFISCHE BILDERFASSUNG UND -AUSWERTUNG

- ▶ Erkennung schwer erfassbarer Fehlermerkmale
- ▶ optimierte Beleuchtung und angepasste Bildaufnahme
- ▶ Klassifizierung von Merkmalen nach kundenspezifischen Kriterien

#### BILDGEBENDE FLUORESZENZ

- ▶ Erkennung und Lokalisierung organischer Verunreinigungen ( $< 0,01 \text{ g/m}^2$ )
- ▶ Erkennung und orts aufgelöste Charakterisierung von Beschichtungen
- ▶ Schichtdickenbestimmung an organischen Schichten bis hinunter zu Dicken von 20 nm

#### INFRAROTMESSTECHNIK

- ▶ Erkennung und Dickenmessung an Barrierschichten ab 20 nm Dicke

#### LASERINDUZIERTES PLASMA-SPEKTROSKOPIE

- ▶ berührungslose Materialanalyse an Oberflächen
- ▶ Dickenmessung funktionaler Schichten
- ▶ Nachweis von Beschichtungsbestandteilen bis in den ppm-Bereich

#### MIKROSKOPIE

- ▶ Charakterisierung komplexer 3D-Mikrostrukturen
- ▶ Erkennung von Strukturfehlern, Verunreinigungen, fehlerhaften Außenabmessungen oder Kratzern
- ▶ Wiederholgenauigkeit der Abstandsmessung im Submikrometerbereich



#### Fasersensor überwacht Ablagerungen in Rohren

Der Fasersensor F-Fiber liefert kontinuierlich Daten zur Verunreinigung von Rohren oder Wärmetauschern in Abfüllanlagen. Solche Ablagerungen sind problematisch, wenn sie mit Lebensmitteln in Berührung kommen. Eine Glasfaser, die einfach in den Querschnitt eines Rohres integriert werden kann, detektiert die Ablagerungen über die Eigenfluoreszenz des zumeist organischen Materials.

#### System zur Ölaufagenmessung wird integriert

Das Team hat damit begonnen, vier Laserscanner für die Ölaufagenmessung in die Presslinie eines US-amerikanischen Automobilherstellers zu integrieren. Das Scanner-System misst orts aufgelöst eine bis zu  $1 \mu\text{m}$  dünne Ölaufage, die verhindert, dass Bleche beim Pressen reißen. Bis zu vier Meter breite Karosseriebleche werden vollflächig von beiden Seiten von je zwei Scannern geprüft.

#### Verunreinigungen und Beschichtungen im freien Fall prüfen

Bauteile lassen sich im freien Fall vollständig von allen Seiten prüfen – ohne Handling. In einem im Jahr 2020 abgeschlossenen Fraunhofer-Projekt wurde ein bildgebendes Fluoreszenzmessverfahren für die Freifall-Messung entwickelt, das filmische Verunreinigungen und organische Beschichtungen detektiert. In Zukunft soll das System auch Risse erkennen.



# GRUPPE INLINE VISION SYSTEME

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe sind kundenspezifische Prüfsysteme, die Bauteiloberflächen während der Produktion mikrometergenau inspizieren. Die Multikamera-Systeme prüfen Qualitätsmerkmale der Bauteile mithilfe von schneller, hardwarenaher Bildverarbeitung auf Basis modernster Algorithmen. Unsere Inline-Systeme zur Qualitätsüberwachung von Bahnwaren und Langprodukten erkennen Produktionsfehler bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Mit einem von uns entwickelten Freifall-Inspektionssystem sind wir in der Lage, komplex geformte Bauteile im Sekundentakt ohne weiteres Handling vollständig zu prüfen. Die hochgenauen Bilddaten zur Oberflächenstruktur nutzen wir gleichzeitig, um einen digitalen Fingerabdruck für jedes einzelne Bauteil zu erzeugen, der sich zur Rückverfolgung nutzen lässt. Ein solches markierungsfreies Track & Trace-Verfahren 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

## KONTINUIERLICHE 100-PROZENT-KONTROLLE

- ▶ Oberflächenkontrolle von Drähten, Kabeln, Bändern oder auch Rohren, Stangen und Profilen
- ▶ Kontrolle in Echtzeit bis 30 m/s
- ▶ Erkennung mikroskopischer Defekte 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 größer als 100 µm im Sekundentakt detektierbar

## TRACK & TRACE FINGERPRINT: MARKIERUNGSFREIE BAUTEILRÜCKVERFOLGUNG

- ▶ sichere bildbasierte Rückverfolgung von Massenbauteilen in Chargen von vielen Millionen Teilen
- ▶ robust gegenüber lokalen Oberflächenbeschädigungen und -verunreinigungen
- ▶ kleine Signaturen (wenige kB) für schnelle Identifikation im Produktionstakt
- ▶ stationäres Vision-System oder Smartphone-Kamera als Lesesystem



## Track & Trace Fingerprint per App: Bauteile schnell und einfach identifizieren

Bauteile lassen sich mit einer von uns entwickelten Technologie markierungsfrei anhand ihrer Oberflächen-Mikrostruktur rückverfolgen. Dazu wird aus dem hochauflösenden Oberflächenbild eine numerische Kennung errechnet und einer ID zugeordnet. Dies ist nun auch mit dem Smartphone möglich: Nutzer nehmen eine Nahaufnahme der Oberfläche auf, der Datenabgleich erfolgt auf einem zentralen Server.



## Laserscanning ermöglicht präzise Geradheitsmessung in der Linie

Ein patentiertes Verfahren ermöglicht es erstmals, die Geradheit von Langprodukten wie beispielsweise Stangen in der Produktion über die gesamte Länge zu prüfen. Der Prüfling wird mit einem Laser abgescannt. Die Geradheit lässt sich aus dem Zusammenhang zwischen der Intensität des reflektierten Laserstrahls und der Position des Laserscanners ableiten.

## Bauteilprüfung: Pixelshift-Kamera für vergrößertes Objektfeld

Die Kamera ermöglicht es, Oberflächendefekte in größeren Bereichen als bisher hochauflöst zu erkennen. Die 500 Megapixel der Kamera werden auf einer leistungsstarken Grafikkarte in wenigen Sekunden verarbeitet, mögliche Defekte klassifiziert. Ein Roboter positioniert die Bauteile vor der Kamera, während eine RGB-Beleuchtung für realistische Lichtverhältnisse sorgt.





# GRUPPE GEOMETRISCHE INLINE-MESSSYSTEME

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung berührungslos und hochgenau arbeitender Messsysteme, die sowohl Geometrie- als auch 3D-Oberflächenstrukturdaten komplexer Bauteile in der Produktionslinie in Echtzeit bereitstellen. Dazu kombinieren wir modernste optische Messtechniken wie die Digitale Holographie oder die Speckle-Korrelation mit extrem schnellen Auswerteverfahren. So entstehen optische Systeme, die es erstmals ermöglichen, z. B. Formabweichung in Verzahnungsgeometrien flächig binnen weniger Sekunden zu erfassen, Werkstücke hochgenau in der Werkzeugmaschine zu vermessen oder kleinste Bauteilverformungen und Rissbildungen an Bauteilen unter Belastung zu erkennen.



Gruppenleiter: Dr. Alexander Bertz

## INLINE-BAUTEILPRÜFUNG

- ▶ 100-Prozent-Kontrolle der Topographie von Präzisionsbauteilen
- ▶ Messfeldgröße applikationsspezifisch skalierbar (15 × 15 mm<sup>2</sup> bis 190 × 150 mm<sup>2</sup> aktuell verfügbar)
- ▶ Messgenauigkeit axial unter 0,2 µm, lateral abhängig von Bildfeldgröße und Kameraoption 3 µm bis 30 µm
- ▶ Messzeit unter 0,1 s bis zum 3D-Bild mit 10 Mio. Punkten
- ▶ Arbeitsabstand flexibel bis ca. 300 mm, mechanisches Fokussieren entfällt

## VERZÄHNUNGSMESSUNG

- ▶ flächige Flankenprüfung innerhalb weniger Sekunden
- ▶ Einzelpunkt-Messgenauigkeit kleiner als 1 µm
- ▶ 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 × 10 mm<sup>2</sup>
- ▶ Messgenauigkeit kleiner als 0,5 µm
- ▶ berührungs- und markierungsfrei bis 1000 °C
- ▶ dehnungsgeregelte Belastungsmessung und Rissverhalten
- ▶ Ermüdungsversuche nach Norm in nur einer Stunde Messzeit
- ▶ Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) und Digital Image Correlation (DIC)



## Neueste Sensorgeneration der HoloTop-Familie dringt in noch höhere Genauigkeitsbereiche vor

Mit unserem HoloTop-Sensor ist es gelungen, ein hochpräzises 20-µm-Stufennormal, das von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt eigens für uns spezifiziert wurde, mit einer Abweichung von unter 0,003 µm zu vermessen. Bei Abnahmemessungen von Elektronik-Bauteilen erreichte der Sensor unter Industriebedingungen Wiederholbarkeiten von unter 0,1 µm.



## Auf dem Weg zur optischen Koordinatenmessmaschine

Ein optisches Koordinatenmessgerät ist das Ziel des im April 2020 gestarteten Projekts MIAME. Es soll komplex geformte, metergroße Objekte in Zukunft schnell und vollflächig mit Submikrometer-Genauigkeit messen. Zentraler Baustein ist eine neuartige Lichtquelle auf Basis von Flüstergalerieresonatoren. Das Vorhaben ist auf breites Interesse in Wissenschaft und Industrie gestoßen.



## Echtzeitsensorik für die Dehnungsregelung in der Materialprüfung

In Materialprüfständen lässt sich u.a. Risswachstum markierungsfrei optisch untersuchen. Unser Strain-Control-System ermöglicht die Überwachung und Regelung uni- und biaxialer Ermüdungsversuche in Echtzeit dank GPU-gestützter Auswertung und CoaXPress 2.0 Kameras. So lässt sich die Lebensdauer von Werkstoffen in hochbelasteten Komponenten wie z. B. Gasturbinen besser abschätzen.





## Mobile Partikelmesstechnik – automatisch, schnell, bildgebend

In vielen Produktionsabläufen sind partikuläre Verunreinigungen auf Oberflächen ein großes Problem. Zur schnellen Vor-Ort-Partikelanalyse hat Fraunhofer IPM das mobile Messsystem Surf-Inspect entwickelt. Es besteht aus einem kleinem Messkopf und einer dazugehörigen Basisstation. Setzt man den kabellosen Messkopf auf eine Oberfläche, so erkennt das System automatisch darauf befindliche Partikel und bestimmt deren Größe sowie – patentgeschützt – auch die Partikelart.

Ob die Oberfläche eines Bauteils auch wirklich sauber genug ist, lässt sich in der Fertigungslinie nur selten zufriedenstellend beantworten. Ein Standard-Verfahren ist die Analyse der Oberflächenpartikel durch Abwaschen und Untersuchung der Waschflüssigkeit. Aus der Flüssigkeit müssen die Partikel durch Filtration abgeschieden werden, um sie letztendlich lichtoptisch analysieren zu können – insgesamt ein sehr aufwändiger Vorgang, der in der Praxis nur stichprobenartig durchgeführt wird. Um die Partikelanalyse zu vereinfachen, sodass sie direkt in der Linie durchgeführt werden kann, hat ein Team von Fraunhofer IPM zusammen mit der PMT Partikel-Messtechnik GmbH das mobile Partikelmesssystem Surf-Inspect entwickelt. Mit diesem gelingt jetzt erstmals die Reinheitskontrolle in der Linie – einfach durch Aufsetzen eines kabellosen Messkopfs. Das handliche System bestimmt zum einen die Partikelgröße – zuverlässig bis rund 25 µm – zum anderen die Partikelart: metallisch, nicht-metallisch oder Faser. Das Messfeld hat eine Größe von 19 mm x 14 mm und eine Pixelauflösung von 5 µm.

### Charakterisierung nach VDA 19 – direkt auf dem Bauteil

Nach Aufsetzen des Messkopfs auf die zu prüfende Oberfläche und Starten der Messung erkennt und bewertet Surf-Inspect automatisch die auf der Oberfläche befind-

lichen Partikel und bestimmt berührungslos deren Größe und Art entsprechend der Prüfnorm VDA 19. Die Ergebnisse liegen in Echtzeit vor und können z. B. in die Regelung der Prozesskette einfließen. Überschreitet die Menge kritischer Verunreinigungen einen Grenzwert, kann das Bauteil entweder aussortiert oder nach einer Reinigung wieder in die Fertigung eingeschleust werden. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse in kundeneigenen Qualitätsmanagement-Systemen hinterlegen, um Qualitätsmerkmale zu dokumentieren. Somit gewährleistet Surf-Inspect die Dokumentation der Oberflächenreinheit entlang der gesamten Prozesskette. Das System liefert sowohl Bilddaten als auch quantitative Messungen der Partikelgröße, -art, -position oder -zahl. Denn allein die Bestimmung der Partikelgröße reicht zur Qualitätssicherung bei Weitem nicht aus. Kritisch sind insbesondere Verunreinigungen durch Metallpartikel. Bereits einzelne Späne können zum Ausfall einer gesamten Baugruppe führen.

### Funktion demonstriert, Technologie transferiert

Die Entwicklung des mobilen Partikelmesssystems erfolgte zweistufig: In einem ersten Schritt wurde, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, ein funktionierendes Labormuster entwickelt (Projekt MOPA – Mobiler Oberflächen-Partikelmesser). Schon das Labormuster verfügt

< Mit dem mobilen Partikelmesssystem Surf-Inspect gelingt erstmals die Reinheitskontrolle in der Linie – einfach durch Aufsetzen des kabellosen Messkopfs (rechts). Er sendet die gemessenen Rohdaten per WLAN zur automatischen Auswertung an eine Basisstation (links).

Durch eine **PATENTIERTE BILDAUSWERTUNG** ist Fraunhofer IPM in der Lage, Partikel auf Oberflächen nach Größe und Art zu klassifizieren. Dabei kommt es nicht nur auf eine geschickte digitale Bildauswertung, sondern vor allem auch auf die richtige Beleuchtung an: Die Art der Beleuchtung entscheidet darüber, ob im Bild überhaupt Informationen enthalten sind, die eine entsprechende Bildauswertung ermöglichen. Der entscheidende Trick dabei: Es wird – vereinfacht gesagt – sehr flach von der Seite und zweimal von oben beleuchtet. So können Partikel zum einen sicher erkannt und segmentiert werden und zum anderen auch zuverlässig klassifiziert werden – in metallisch, nicht-metallisch und Faser. Dieser Klassifizierungsschritt gelingt anhand von Lichtreflexen, deren Ähnlichkeitsmaß ausreichend unterschiedlich ist.

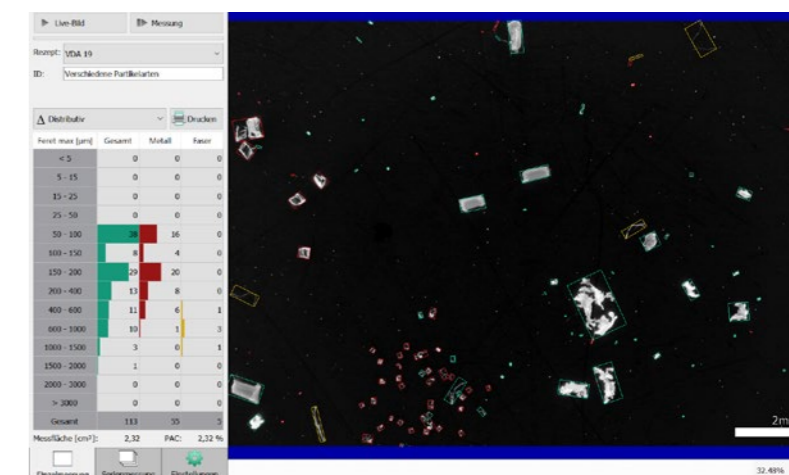
te über sämtliche notwendigen Funktionen zur Detektion und Klassifikation von Partikeln. Für den mobilen Einsatz in der Linie entwickelte das Team dann in einem zweiten Schritt zusammen mit der Firma PMT ein kabelloses Design: den Demonstrator Surf-Inspect. Der Messkopf sendet die Daten per WLAN drahtlos an die Basisstation. Dort wird die Messung automatisch ausgewertet und als Ergebnis dargestellt.

Die Klassifizierung nach Partikelart gelingt entsprechend der Anforderungen der VDA 19. Voraussetzung dafür ist, dass die Forscherinnen und Forscher von Fraunhofer IPM mehrere Bildgebungsverfahren sehr geschickt kombiniert haben.

### Mobile Partikelmesstechnik für die Industrie

Wie die VDA 19 Standardanalyse nutzt auch Surf-Inspect zur Analyse aus, dass metallische Partikel bei geeigneter Beleuchtung metalltypisch glänzen. Mittels Bildverarbeitung lassen sich somit kritische Metallpartikel von unkritischen Fasern und nicht-metallischen Partikeln unterscheiden. Die dafür speziell entwickelte und patentgeschützte Bildauswertungstechnologie wurde an die Firma PMT transferiert. PMT startete im Jahr 2020 mit der Vermarktung ihres »PartSens 4.0« auf der Messe parts2clean. Seitdem produziert PMT diesen mobilen Partikelsensor im Rahmen einer Know-how-Lizenz. Die Lizenzvereinbarung ist für beide Seiten attraktiv gestaltet: PMT kann mit der Know-

how-Lizenz Sensoren produzieren, Fraunhofer IPM kann auf Basis dieser patentierten Technologie auch anderen Partnern kundenspezifische Partikelmesstechnik-Lösungen anbieten.



Patentierter Bildauswertung: Durch Kombination verschiedener Bildgebungsverfahren lassen sich Partikel direkt auf dem Bauteil erkennen und gemäß VDA 19 nach Größe und Art klassifizieren: metallisch (rot), nicht-metallisch (grün), Faser (gelb).



## GESCHÄFTSFELD OBJEKT- UND FORMERFASSUNG



»Wir decken die gesamte Prozesskette der 3D-Datenerfassung ab.«

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« bedienen wir die gesamte Prozesskette für die Erfassung, Referenzierung, Interpretation und Visualisierung der Form und Lage von Infrastruktur-Objekten. Dazu entwickeln wir Laserscanner und maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamerasysteme. Unsere Systeme 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 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, Präzision 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 Komplettsysteme
- ▶ 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

*< Unsere Mobile Mapping-Fahrzeuge liefern hochauflösende Aufnahmen der Straßenumgebung und -oberfläche.*



Prof. Dr. Alexander Reiterer  
Abteilungsleiter

T +49 761 8857 - 183

[alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de](mailto:alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de)

### Gruppe **Smarte Datenprozessierung und -visualisierung**

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



# GRUPPE MOBILES TERRESTRISCHES SCANNING

Dr. Philipp von Olshausen, Telefon +49 761 8857-289, philipp.olshausen@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 Abstände zu Objekten schnell und submillimetergenau. Kombiniert mit einer Scaneinheit und Kameras erfassen sie dreidimensionale Objekt-Geometrien. Zur präzisen Positions- und Lageerkennung des Messsystems kombinieren wir die Systeme mit Inertialsensorik, die eine Zuordnung der Messdaten zu einem festen lokalen oder globalen Koordinatensystem ermöglichen. Unsere robusten Messsysteme sind auf Straßen- und Schienenmessfahrzeugen oder mobilen Robotersystemen installiert. Sie vermessen und prüfen Bahninfrastruktur, erfassen Straßenoberflächen und inspizieren Tunnelbauten mit hoher Präzision. Zur vollautomatisierten Analyse und Klassifizierung der 2D- und 3D-Messdaten entwickeln wir selbstlernende Algorithmen u. a. auf der Basis von »Deep Learning«.



Gruppenleiter: Dr. Philipp von Olshausen

## SYSTEME FÜR DIE BAHN

- ▶ Erfassen von Bahnüberleitungen bei bis zu 250 km/h
- ▶ Lichtraumüberwachung 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
- ▶ Tunnelinspektion: 360°-3D-Geometrieerfassung, Oberflächenbild mit einer Auflösung im Millimeterbereich, Feuchtedetektion

## SYSTEME FÜR DIE STRASSE

- ▶ Messung der Querebenheit mit einer Präzision von 0,3 mm
- ▶ Aufnahme von zwei 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

## MINIATURISIERUNG VON MOBILE MAPPING SYSTEMEN

- ▶ Optimierung des mechanischen und elektronischen Aufbaus komplexer Multisensor-Systeme
- ▶ Datenreduktion in Echtzeit zur schnellen und effizienten Datenübertragung
- ▶ Datenauswertung in Echtzeit
- ▶ adaptierbar für die Erfassung von Bahn- und Straßenumgebungen



## Digitales Modell der Bahninfrastruktur

Gemeinsam mit dem Institut für Baumanagement und Digitales Bauen der Universität Hannover und einem Industriepartner erarbeiten wir einen Prozess, der aktuelle geometrische Bauwerksdaten mit sämtlichen vorhandenen Infrastrukturdaten automatisiert verknüpft. Das Projekt mdfBIM wird im Rahmen des mFUND durch das BMVI gefördert.



## Messfahrzeug ausgeliefert

Seit Herbst 2020 setzt die Oßwald GmbH ein Fahrzeug ein, das unser Team auf Basis der Mobile Urban Mapping-Systemplattform aufgebaut hat. Es liefert 2D- und 3D-Aufnahmen der Straßenumgebung und hochaufgelöste Bilder der Straßenoberfläche, die Aufschluss über die Längs- und Querebenheit geben. Mit im Paket ist eine maßgeschneiderte Software zur Datenauswertung.

## Form- und Materialerkennung für Desinfektionsroboter

Im Projekt MobDi entwickeln zwölf Fraunhofer-Institute einen mobilen Desinfektionsroboter. Für eine ressourcen- und materialschonende Desinfektion steuern wir Technologie bei, die typische Ansteckungsherde erkennt. Die Messdaten werden mithilfe von Deep Learning-Algorithmen automatisiert ausgewertet.





# GRUPPE AIRBORNE- UND UNTERWASSER-SCANNING

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

Forschungsschwerpunkte der Gruppe sind die Entwicklung besonders leichter Messsysteme für den Einsatz auf Drohnen (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) sowie die Anpassung von LiDAR-Messverfahren für die 3D-Vermessung großer Strukturen unter Wasser. Unsere UAV-Scanner-Systeme nutzen Lichtlaufzeitverfahren, um mit hoher Genauigkeit Abstände zu Objekten zu messen und um in Kombination mit Kameras 3D-Strukturdaten zu generieren. Damit eignen sie sich für das Zustandsmonitoring von Baustellen, Bauwerken oder Vegetationsflächen. Installiert auf Unterwasser-Robotern werden unsere LiDAR-Systeme in Zukunft Unterwasser-Bauwerke wie zum Beispiel Offshore-Windkraftanlagen oder Pipeline-Fundamente überwachen. Auch akute Schäden – wie etwa Hochwasserschäden an Brückenpfeilern – sollen die Systeme detektieren. Weitere Arbeiten in der Gruppe zielen auf die Entwicklung schlanker 3D-Messtechniklösungen auf Basis von Low-Cost- und Consumer-Produkten wie z. B. Smartphones.



Gruppenleiter: Simon Stemmler

## SYSTEME FÜR DIE VERMESSUNG AUS DER 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 Subzentimetraufösung auch in trübem Wasser
- ▶ beleuchtungs- und tiefenunabhängige Messungen
- ▶ Messfrequenz bis 40 kHz, Scanfrequenz 800 Hz
- ▶ Messdistanz bis zu 40 m (abhängig von der Trübung des Wassers)
- ▶ stationäre und mobile Vermessung

## SYSTEME AUF BASIS VON CONSUMER-ELEKTRONIK

- ▶ mobile 3D-Erfassung von Baustellen und Baugruben
- ▶ Nutzung von Smartphones oder Tablet-Computern
- ▶ Georeferenzierung mittels GNSS oder Passpunkten
- ▶ User Interfaces – adaptiert im Hinblick auf spezielle Nutzung

## DATENAUFBEREITUNG

- ▶ Fusion von 3D- und 2D-Daten samt Positionierung und Texturierung
- ▶ Ableitung von Metadaten aus texturierten 3D-Daten
- ▶ Automatisierung von Vermessungsaufgaben



### Bauliche Veränderungen digital erfassen und dokumentieren

In einem Fraunhofer-Projekt entwickeln wir einen Prozess, in dem Videoaufnahmen von Innenräumen mit Grundrissplänen verknüpft werden. Die georeferenzierten Daten, erfasst per Smartphone-Kamera, werden mithilfe von Algorithmen in digitale Bestandspläne integriert. So können Umbauten, etwa neue Leitungen, digital nacherfasst werden.



### Unterwasser-Scanning: 3D-Video-Modus ergänzt

Für die Detektion von Objekten unter Wasser haben wir unser LiDAR-System ULI um einen 3D-Video-Modus ergänzt. Dazu wurde eine neue Ablenkeinheit entwickelt, die eine flächige Objekterfassung in bisher unerreichter Qualität aus großer Entfernung ermöglicht. So lassen sich z. B. Bauwerke in trübem Gewässern überwachen oder Munitionsrückstände im Meer aufspüren.



### Optisches System erkennt Vegetation im Gleisbett

Zwei Spritzzüge für die automatisierte Vegetationspflege, ausgerüstet mit unserem System zur Grünerkennung, sind seit März 2020 rund um die Uhr mit rund 80 km/h im deutschen Schienennetz unterwegs. Sie sorgen dafür, dass Herbizide nur dort ausgebracht werden, wo tatsächlich unerwünschte Pflanzen wachsen (mehr dazu s. S. 44).



# GRUPPE SMARTE DATENPROZESSIERUNG UND -VISUALISIERUNG

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

Forschungsschwerpunkte der Gruppe sind die Analyse, Klassifizierung und Visualisierung räumlicher Messdaten. Für die vollautomatisierte Interpretation von 2D- und 3D-Messdaten setzen wir auf maschinelles Lernen, darunter vor allem auf das Konzept des »Deep Learning«. Dabei werden künstliche neuronale Netze (KNN) so trainiert, dass sie gesuchte Objekte – beispielsweise aus dem Bereich städtischer Infrastruktur – in umfangreichen Daten mobiler Messsysteme erkennen und lokalisieren können.

Mit interaktiven Applikationen zur Navigation in Messdaten unterstützen wir komplexe Analysen und Entscheidungsprozesse visuell. Je nach Anwendungsfall entwickeln wir unterschiedlichste Visualisierungsvarianten auf geeigneten Plattformen, die Messergebnisse in Echtzeit darstellen. So können Erfassungsprozesse interaktiv nachgeregelt werden. Bei der Echtzeit-Visualisierung auf mobilen Endgeräten mit limitierter Rechenleistung greifen wir auf eigens entwickelte Visualisierungskomponenten zurück. Für eine KI-basierte Objekterkennung erstellen wir synthetische Trainingsdaten. Damit wiederum legen wir gleichzeitig die Grundlage für eine iterative Optimierung der Messtechnik im Hinblick auf eine spätere maschinelle Dateninterpretation.



Gruppenleiter: Prof. Christoph Müller

## VISUALISIERUNG

- ▶ Darstellung massiver Punktwolken
- ▶ Echtzeit-Rendering mit mehr als 20 Frames pro Sekunde
- ▶ diverse Visualisierungstechniken zur intuitiven Darstellung komplexer Sachverhalte, wie z. B. Beleuchtungsberechnung, Kanten-Färbung oder Falschfarben-Darstellung

## SYNTHETISCHE TRAININGSDATEN

- ▶ Erstellung von 3D-Szenen inkl. Materialeigenschaften, Beleuchtungssituationen, Wetterphänomenen, dynamischen Eigenschaften
- ▶ algorithmische Erzeugung von 3D-Modellen aus parametrisierbaren Bausteinen
- ▶ Erstellung simulierter Messdaten: fotorealistische Bilder, 3D-Punktwolken

## AUTOMATISIERTE DATENINTERPRETATION

- ▶ 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



## Rein virtuell: Kameradaten und semantische Segmentierung auf Basis eines gemeinsamen 3D-Modells

Im Fraunhofer-Projekt »Syntra« schuf das Team eine Simulationsumgebung, mit der sich synthetische Trainingsdaten für urbane Umgebungen besonders effizient generieren lassen. Die Trainingsdaten wurden nun in unterschiedlichen Netzarchitekturen evaluiert.



## Rissdetektion: Messdaten effizient auswerten

Ein Visualisierungswerkzeug unterstützt die visuelle Risserkennung und das schnelle, interaktive Navigieren in umfangreichen Scandaten von Straßenoberflächen. Das Tool entspricht den Standards der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt und entstand in Zusammenarbeit mit der Hochschule Furtwangen.

## Digitale Dokumentation der Baugrube

Eine in der Gruppe entwickelte Visualisierungskomponente ermöglicht die exakte Dokumentation unterirdisch verlegter Leitungen, Rohre und Anschlüsse. Die Messdaten werden mithilfe eines Tablet-PCs, ausgestattet mit Low-Cost-Sensorik, aufgenommen. Die Software wurde im Rahmen des Projekts »NEXT.TrenchLog« für die Bayernwerk Netz GmbH entwickelt.







< Herbizide wie Glyphosat sind nach wie vor das Mittel der Wahl, um Vegetation im Gleisbett in Schach zu halten. Um den Einsatz zu reduzieren, kommt nun ein optisches System zur automatisierten Grünerkennung zum Einsatz.

## Effiziente Vegetationskontrolle dank optischer Grünerkennung

Mehr als 60000 Kilometer umfasst das Schienennetz der DB Netz AG. Die Vegetation an und in den Gleisen zu kontrollieren und zu entfernen ist extrem aufwändig. Ohne Herbizide lässt sich der unerwünschte Bewuchs nicht eindämmen. Ein optisches System zur automatisierten Grünerkennung ermöglicht es, Herbizide sehr gezielt nur dort auszubringen, wo Pflanzen wachsen. Zusätzlich dokumentiert das System den Bewuchs. Damit wird die Vegetationspflege effizienter und gleichzeitig umweltfreundlicher.

Ackerschachtelhalm, Brombeere, Geranium, Trespe oder Gemeine Nachtkerze – so heißen die am häufigsten vorkommenden Beikräuter, deren Wurzeln in die Hohlräume des Schotterbetts von Gleisanlagen einwachsen. Die Folge: Regenwasser fließt nicht zügig genug ab, das Gleisbett verschlammt und der Schotter verliert seine Pufferfunktion. Vibrationen und Stöße vorbeifahrender Züge werden nicht mehr ausreichend abgefedert, was Veränderungen der Gleislage zur Folge haben kann. So werden Pflanzen zum Sicherheitsrisiko für die Bahn.

### Weniger Herbizide, höhere Effizienz

Die Vegetationskontrolle des Gleisbetts ist eine stetige Herausforderung. Die Arbeiten übernehmen spezialisierte Dienstleister wie die Certis Europe B.V. im Auftrag der Schienennetzbetreiber. Sie setzen dabei auf Pflanzenschutzmittel, vor allem Glyphosat. Das Blattherbizid eliminiert den Bewuchs zuverlässig, effektiv und nachhaltig, ist jedoch ökologisch umstritten. Die Deutsche Bahn hat daher angekündigt, den Einsatz von Glyphosat bereits ab 2020 um die Hälfte zu senken. Für Certis hat Fraunhofer IPM ein kamerabasiertes System entwickelt, das hilft, dieses Ziel zu erreichen: Dank automatisierter Grünerkennung werden Herbizide nur dort ausgebracht, wo tatsächlich

Pflanzen wachsen. Zusätzlich wird anhand der Kamerabildder erstmals die Entwicklung des Pflanzenbestands inklusive Informationen zu Standort und Bedeckungsgrad über mehrere Jahre hinweg dokumentiert. Seit Frühjahr 2020 sind zwei Spritzzüge mit dem System zur Vegetationspflege im deutschen Schienennetz unterwegs.

Bisher erfolgte die Grünerkennung manuell bzw. visuell: Bis zu drei Personen beobachten vom Spritzzug aus jeweils einen bestimmten Streckenbereich und lösen manuell einen Spritzbefehl aus, sobald sie »grün sehen«. Dabei fährt der Zug mit einer maximalen Geschwindigkeit von 40 km/h. Im Gegensatz dazu löst das kamerabasierte Grünerkennungssystem den Spritzmechanismus automatisch und sehr gezielt aus. Es arbeitet zuverlässig auch über lange Zeiträume – ohne Fehler und Ungenauigkeiten aufgrund von Ermüdungserscheinungen. Kamera und Prozessor sind zudem schneller als der Mensch: Der Spritzzug fährt mit bis zu 80 km/h statt wie bisher 40 km/h – eine deutliche Effizienzsteigerung im Vergleich zum manuellen System. Mittelfristig sollen noch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Die ausgebrachte Herbizid-Menge von bisher sechs Litern pro Hektar soll mithilfe des Systems in Zukunft deutlich reduziert werden.

**SPEKTRALER FINGERABDRUCK VON PFLANZEN – DIE »GRÜNLÜCKE«:** Grüne Vegetation hat einen charakteristischen spektralen Fingerabdruck. Das heißt: Licht im Wellenlängenbereich zwischen 490 nm und 620 nm, der sogenannten Grünlücke, und ab 780 nm im NIR-Bereich (nahes Infrarot) wird reflektiert, während die Wellenlängenbereiche zwischen 400 nm und 490 nm (blauer Spektralbereich) und zwischen 620 nm und 780 nm (roter Spektralbereich) absorbiert werden. Dieses spezifische Verhältnis von Absorption und Reflexion nutzen wir zur automatisierten Erkennung lebender Pflanzen.

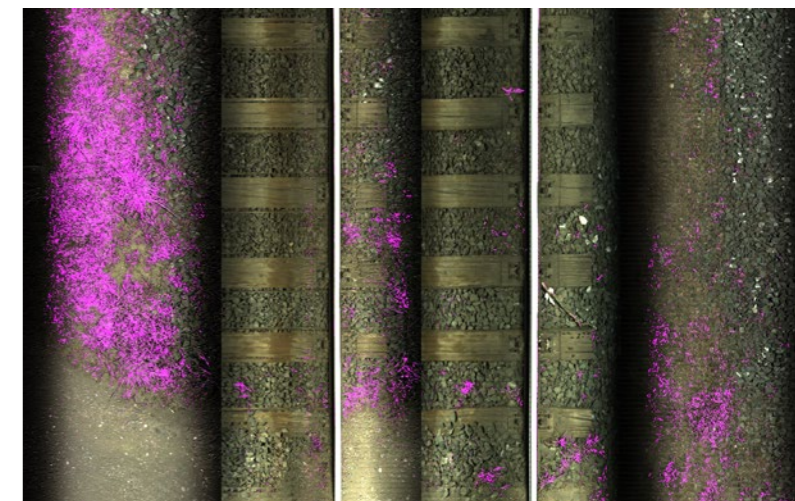
### Multispektrales System sieht grün

Zur Grünerkennung werden insgesamt acht Kameras, integriert in witterungsbeständige Gehäuse, eingesetzt: Zwei Kamerapaare mit jeweils einer RGB- und einer NIR-Kamera erfassen den linken und rechten Seitenbereich der Gleise; zwei RGB-NIR-Kamerapaare sind unter dem Zug auf den mittleren Gleisbereich ausgerichtet. Die Bodenauflösung beträgt 1,5 mm. Das Gleisbett wird mit 500 leistungsstarken LED homogen ausgeleuchtet, sodass die Grünerkennung auch bei schwierigen Lichtverhältnissen und bei Nacht funktioniert.

Die erfassten Gleisbereiche werden in Sektoren unterteilt. Übersteigt der Pflanzenbedeckungsgrad in einem solchen Planquadrat einen Schwellenwert, so wird ein Sensorsignal erzeugt. Es aktiviert je nach ermitteltem Bedarf eine oder mehrere der acht beweglichen Spritzdüsen. Sowohl die Größe der Sektoren als auch der Schwellenwert für den Bedeckungsgrad sind individuell einstellbar. Bei der Messung des Bedeckungsgrads werden zusätzlich GNSS-Informationen zur exakten Lokalisierung erfasst. Die Ergebnisse können grafisch oder tabellarisch ausgegeben werden.

### Bildauswertung und Signalverarbeitung innerhalb einer Sekunde

Eine besondere Herausforderung bei der Systementwicklung war die geforderte Geschwindigkeit bei Bildverarbeitung, Signalauswertung und Signalweiterleitung an bereits vorhandene Spritzdüsenteknik im Zug: Der mögliche Abstand



Die Vegetation ist auf dem Messbild detailliert zu erkennen (violett dargestellt). Zur automatisierten Erkennung lebender Pflanzen nutzt das optische System aus RGB- und NIR-Kameras das spezifische Verhältnis von Absorption und Reflexion in bestimmten Spektralbereichen.

zwischen dem Kamerasystem und den Düsen der Spritzanlage ist durch die Länge des Zuges und die Anordnung der einzelnen Wagen in einer bestimmten Fahrtrichtung auf zirka 30 bis 50 m begrenzt. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h legt der Spritzzug jede Sekunde 22,2 m zurück. Aufgrund technisch-physikalischer Trägheit arbeitet die Spritzanlage mit einer gewissen Verzögerung. Die Zeitspanne zwischen Bildaufnahme und Auslösen des Spritzbefehls darf also insgesamt eine Sekunde nicht überschreiten. Die Kamerabilder werden zeilenweise ausgelesen und mithilfe eines FPGA (Field Programmable Gate Array) analysiert.



## GESCHÄFTSFELD GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

# »Wir entwickeln maßgeschneiderte Messsysteme für die Gas- und Prozessüberwachung.«

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

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



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

### Gruppe **Integrierte Sensorsysteme**

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

### Gruppe **Spektroskopie und Prozessanalytik**

- ▶ spektroskopische Analytik
- ▶ optische Systeme
- ▶ Auswerteverfahren

### Gruppe **Thermische Messtechnik und Systeme**

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

### Gruppe **Nichtlineare Optik und Quantensensorik**

- ▶ nichtlineare Optik
- ▶ neue spektroskopische Messverfahren
- ▶ Quantensensorik

*< Die Industrie benötigt robuste und präzise Messsysteme. Mit unseren maßgeschneiderten Systemen tragen wir zu einer sicheren Gas- und Prozessüberwachung bei.*



# GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung gassensitiver Materialien, mikrooptischer Infrarot-Komponenten und kompakter Gassensorsysteme. Kompetenzen in der Mikrosystemtechnik ermöglichen uns die Auslegung miniaturisierter Systemkomponenten und Sensorsysteme als MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) bzw. MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems). Dabei stehen Robustheit, Zuverlässigkeit und Energieeffizienz der modularen Gassensorsysteme im Vordergrund. Die Einsatzgebiete reichen von der Umweltmesstechnik bis zum Personenschutz, von der Detektion weniger ppm bis einige Prozent. Von Fraunhofer IPM entwickelte maßgeschneiderte Gassensoren helfen zum Beispiel, optimale Luftqualität sicherzustellen oder toxische Gase frühzeitig zu erkennen.



Gruppenleiterin: Dr. Marie-Luise Bauersfeld

## GASSENSITIVE MATERIALIEN

- ▶ Materialsynthese und -verarbeitung: Schichtdicken von wenigen nm bis mehreren  $\mu\text{m}$ , Beschichtung auf mikrostrukturierten Substraten (MEMS)
- ▶ Halbleiter-Gassensoren: Metalloxidschichten wie  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  oder  $\text{Cr}_2\text{-xTi}_x\text{O}_{3+z}$  mit katalytischen Zusätzen für die Spurengasdetektion
- ▶ kolorimetrische Gassensoren: Komplexverbindungen wie ein Rhodium-Komplex für die selektive CO-Detektion und Porphyrine für die  $\text{NO}_2$ -Detektion

## MIKROOPTISCHE KOMPONENTEN

- ▶ mikrooptische Komponenten für den Wellenlängenbereich von 3 bis 20  $\mu\text{m}$
- ▶ IR-Strahler: z. B. modulierbar bis zu einer Frequenz von 10 Hz (bis 750 °C)
- ▶ IR-Detektoren: z. B. PbSe-Fotodioden für den Wellenlängenbereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$
- ▶ diffraktive Optiken: z. B. Fresnel-Linsen für das mittlere Infrarot

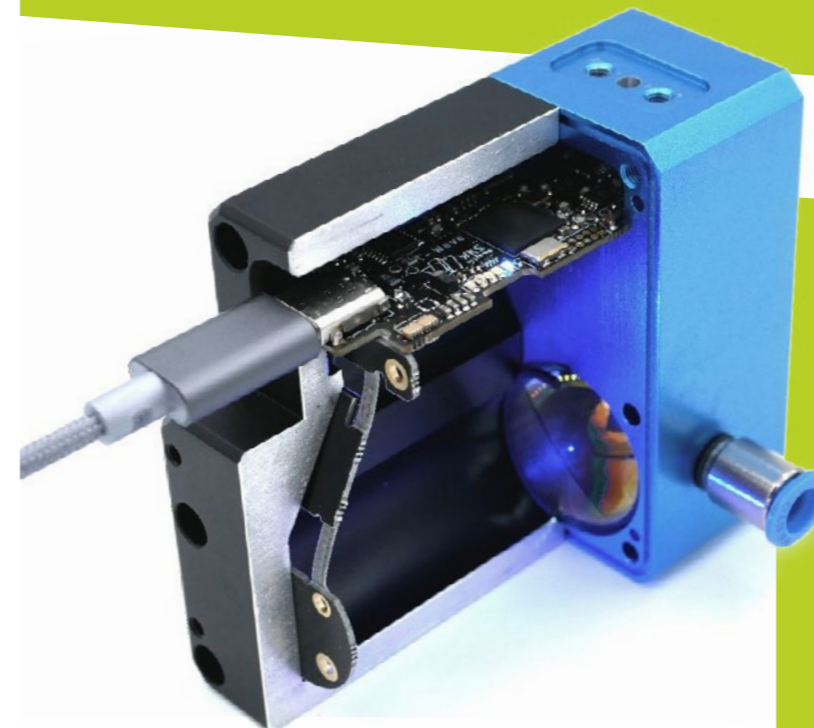
## MINIATURISIERTE GASSENSORSYSTEME

- ▶ Integration gassensitiver Materialien und/oder optischer Komponenten in energieeffiziente Gassensorsysteme
- ▶ Modularer Aufbau mit anwendungsspezifischer Sensorik, Auswerte- und Ansteuerungselektronik
- ▶ photoakustische Systeme, z. B. miniaturisiert für die selektive  $\text{CO}_2$ -Detektion oder UV-basiert für die  $\text{SO}_2$ -Detektion
- ▶ Filterphotometer: z. B. für die Ethylen-Detektion



## Sensor für die Überwachung von Intensivpatienten

Im Aktionsprogramm »Fraunhofer vs. Corona« entwickeln wir einen nicht-invasiven transkutanen Sensor für die Echtzeit-Überwachung des arteriellen  $\text{CO}_2$ -Wertes von Intensivpatienten. Der Sensor wird auf die Haut aufgebracht und hat die Größe und das Gewicht eines In-Ear-Kopfhörers. Die Konzentrationsbestimmung erfolgt über den photoakustischen Effekt.

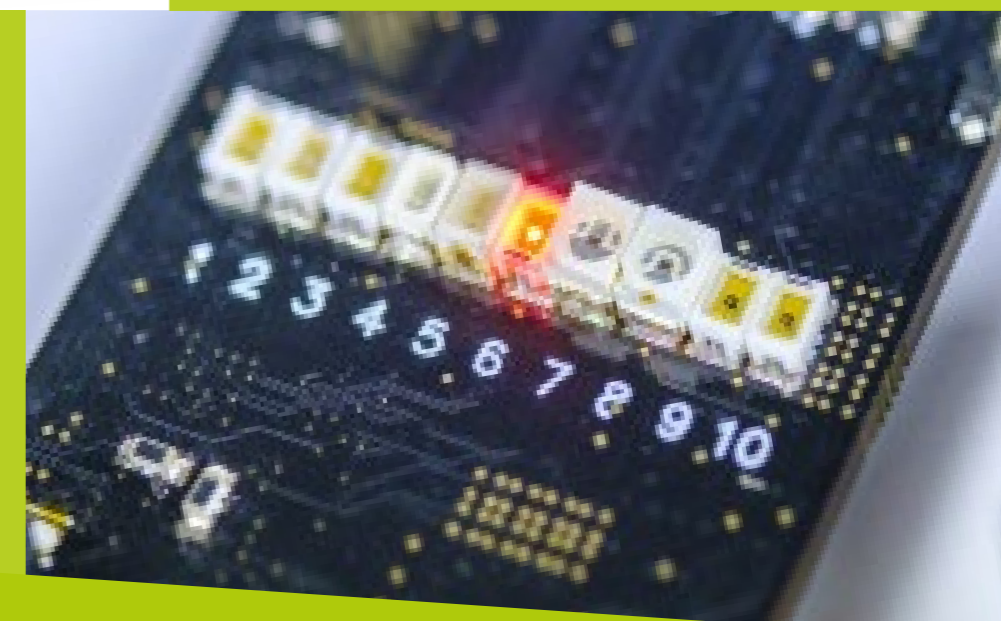


## Exzellente $\text{NO}_2$ -Detektoren für die Integration in Messsysteme

In der resonanten Low-Cost-Photoakustik erzielen wir herausragende Ergebnisse: So entstanden Detektormodule für Gase wie  $\text{NO}_2$ , die sich u. a. durch eine Nachweisgrenze im niedrigen ppb-Bereich (parts per billion) sowie durch hohe Selektivität und Langzeitstabilität bei hoher Kosteneffizienz auszeichnen. Damit übertrifft die Technologie viele bestehende Messverfahren in ihrer Leistungsfähigkeit.

## Frühe und sichere Detektion von Brandgasen

Uns gelang die Entwicklung neuer Gassensorsysteme, die brandtypische Gase wie CO,  $\text{NO}_2$  und  $\text{NH}_3$  sicher und frühzeitig detektieren. Die eingesetzten Materialien reagieren mit einem spezifischen Farbumschlag auf Brandgase (bis in den ppb-Bereich). Die Auslesung erfolgt über Leuchtdioden und Photodetektoren. In Kombination mit entsprechender Elektronik entstehen so kostengünstige und robuste Systeme.





# GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

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

Der Fokus der Gruppe liegt auf der Entwicklung spektroskopischer Systeme zur Detektion und Analyse von Gasen und Flüssigkeiten. Hier nutzen wir schwerpunktmäßig Laserspektroskopie, aber auch Methoden wie Raman-, FTIR- und ATR-Spektroskopie. Für die Entwicklung optischer Komponenten und Systeme stehen neben vielseitigen Simulationstools auch geeignete Analysemethoden wie z. B. Fourier- oder Röntgenspektroskopie zur Verfügung. Die Gruppe verfügt über langjährige Erfahrung in der Abgasmesstechnik und Brennwertanalytik. Dazu zählen schnelle Gasanalysatoren für Abgasprüfstände bei der Motorenentwicklung und Systeme zur Brennwertkontrolle in Erdgasleitungssystemen. Unsere Systeme zur Gasferndetektion orten Leckagen mithilfe von Laserspektroskopie und bildgebender Infrarot-Messtechnik. Dies ermöglicht die Sicherheitsüberwachung von Industrieanlagen oder Gasleitungen aus der Distanz. In der Flüssigkeitsanalyse entwickeln wir ATR-Prozessspektrometer zur Qualitätskontrolle bei der Getränkeherstellung oder in Fermenterprozessen.



Gruppenleiter: Dr. Raimund Brunner

## SPEKTROSKOPISCHE ANALYTIK

- ▶ optische Spurengasanalysatoren auf Basis von Laserspektroskopie: Empfindlichkeit im ppb-Bereich bei  $N_2O$  oder  $NH_3$  und im ppm-Bereich bei  $O_2$
- ▶ Raman-Spektroskopie: Analyse von Flüssigkeiten, biologischen Proben, Festkörpern oder Gasen
- ▶ ATR-Spektroskopie: Messen gelöster Stoffe in Flüssigkeiten bis in den ppm-Bereich
- ▶ photoakustische Messmethoden, individuelle Anpassung von akustischen Resonatoren

## OPTISCHE SYSTEME

- ▶ Simulationen: Optik, Mechanik, Strömung
- ▶ Detektion optischer Rückstreuung, bildgebende Systeme
- ▶ laserspektroskopische Systeme im NIR und MIR auf Basis von Spiegeloptiken
- ▶ Spezialoptiken: Langweg-Absorptionszellen, Laserpackage inkl. Kollimation, Referenzsysteme
- ▶ In-situ-Messmethoden

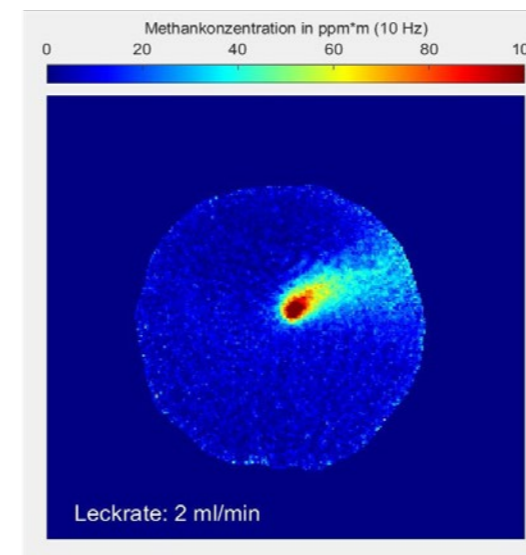
## AUSWERTEVERFAHREN

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



## Brennwert-Messsystem für Erdgas

Im Auftrag der RMA Mess- und Regeltechnik GmbH wurde ein infrarot-spektroskopischer Gasanalysator entwickelt und über acht Monate an einer Power-to-Gas-Einspeisestelle getestet. Mit einer Genauigkeit bis in den 100-ppm-Bereich erkennt das System die Zusammensetzung von Erdgas und den darin enthaltenen Wasserstoffanteil.

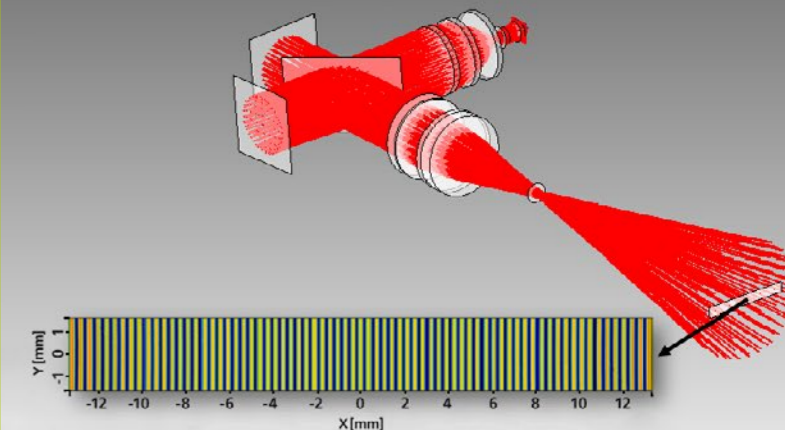


## Bildgebendes Verfahren detektiert minimale Leckagen

Uns gelang die Optimierung der bildgebenden Laserspektroskopie für die empfindliche Gasferndetektion von Leckagen. Mittels schneller Gaskamera im Infrarot werden Gasaustritte sichtbar, eine adaptive Auswertung ermöglicht die kontrastreiche Darstellung von Leckflüssen unter 1 ml/min. Ein hinterlegtes Modell für die direkte Absorptionsspektroskopie erlaubt die quantitative Konzentrationsbestimmung in ppm\*m.

## Modell der Wellenoptik erweitert Simulationsmöglichkeiten

Für die Entwicklung optischer Messsysteme führen wir nun nicht nur geometrische, sondern auch wellenoptische Simulationen des Strahlengangs durch. Einflüsse auf das Detektorsignal lassen sich so realitätsnäher simulieren und spektral analysieren. Im Bild wird Laserlicht in ein Michelson-Interferometer mit Beugungsgitter eingekoppelt, es entsteht ein räumliches Interferogramm.





# GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

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

Die Kompetenzen der Gruppe umfassen die Mikrosystemtechnik, Sensorik, Messsystementwicklung und Multiphysik-Simulation. Wir haben jahrelange Erfahrung in der Entwicklung von MEMS-basierten Reinraum-Fertigungstechnologien für die Produktion von Sensoren und thermoelektrischen Modulen. Mikrostrukturen und Mikrosysteme zur temperaturabhängigen Bestimmung von Materialparametern – wie z. B. Thermopiles – entwickeln wir exakt zugeschnitten auf die jeweilige Anwendung.

Die Arbeiten in der Gruppe umfassen die Modellierung, die Layout- und Prozessentwicklung, sowie die Material-, Bauteil- und Systemcharakterisierung. Unsere Kompetenz wächst stetig mit dem Einsatz neuer Verfahren, Materialien und Messtechniken.



Gruppenleiter: Martin Jäggle

## MASSGESCHNEIDERTE MIKROSTRUKTUREN

- ▶ elektrische und thermische Vermessung von Analyten oder funktionellen Materialien
- ▶ Charakterisierung flüssiger Betriebsstoffe (z. B. Öle, Kühlmittel)
- ▶ Detektion von Belägen (z. B. Verkalkungen, Fouling oder Scaling)
- ▶ Untersuchung von Festkörpern
- ▶ Sensoren für brennbare Gase

## THERMISCHE MESSSYSTEME

- ▶ Messsysteme zur temperaturabhängigen Materialcharakterisierung über große Temperaturbereiche (–200 bis 1000 °C), z. B. Messung von Seebeck- oder Hall-Koeffizienten oder Messung thermischer und elektrischer Wärmeleitfähigkeiten (inkl. Service und Wartung)
- ▶ robuste elektronische Systeme für raue Umgebungen

## SIMULATION PHYSIKALISCHER PROZESSE

- ▶ Multiphysik-Simulationen für gekoppelte elektrische, thermische, mechanische und fluidische Effekte vom Mikrosystem bis hin zum kilometergroßen Energiespeicher



### Neuer Druckteststand in Betrieb genommen

Ein neu installierter Druckteststand ermöglicht den Test und die Vermessung von Bauteilen bis zu einer Länge von einem Meter und 10 cm Durchmesser bei Drücken bis zu 2000 bar und Temperaturen bis 200 °C. Über elektrische Zugänge in den Probenraum können Messsysteme im Druckstand betrieben werden und zusätzliche Sensoren mit eingebaut werden.

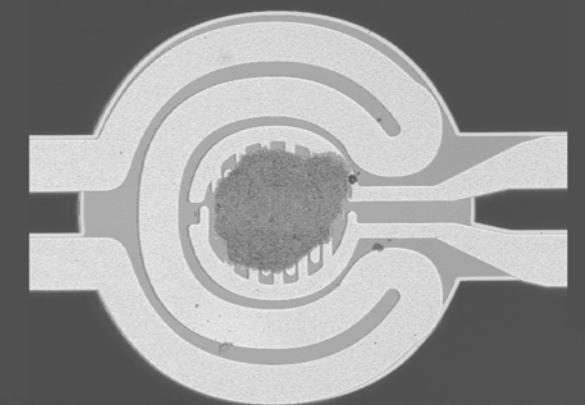


### Kompakter Wasserstoffsensoren

Ein kompakter H<sub>2</sub>-Sensor, hier als Demonstrator in Form eines USB-Sticks, misst den Wasserstoffgehalt in der Umgebung und warnt vor gefährlichen Konzentrationen. Die Wichtigkeit derartiger Sensoren für den Explosionsschutz steigt mit der zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff als Alternative zu fossilen Energieträgern.

### MEMS-Pellistoren für sichere Brenngasmessungen

Die Gruppe entwickelte MEMS-Pellistoren mit neuartigen, druckbaren Katalysatoren, deren Betriebstemperatur um bis zu 100 °C niedriger sein soll als bisher. Die niedrigere Betriebstemperatur und die geringe Größe der Sensoren ermöglichen eine sparsame und sichere Messung brennbarer Gase.





# GRUPPE NICHTLINEARE OPTIK UND QUANTENSENSORIK

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

Neuartige Messtechniken bilden das zentrale Forschungsthema der Gruppe: Welche Art von Sensorik werden wir morgen nutzen? Und welche Möglichkeiten werden sich dadurch eröffnen? Zusammen mit Partnern aus der Grundlagenforschung arbeiten wir an innovativen laserbasierten Messprinzipien und -verfahren für die Spektroskopie. Entwickelt werden auch die dafür nötigen Werkzeuge, vor allem auf Basis nichtlinear-optischer Frequenzkonversion: Dazu gehören Dauerstrich- (cw-) Laserlichtquellen mit maßgeschneiderten Wellenlängen für die Spektroskopie, bei denen die Gruppe weltweit führend ist, sowie Wellenlängen-Konverter für eine effiziente Infrarot-Detektion. Sie erweitern die Möglichkeiten der Messtechnik, z. B. bei der Gasspektroskopie zur Untersuchung von Verbrennungsprozessen, bei der Charakterisierung von Komponenten für Hochleistungslaser, in der Quantenoptik-Forschung und in der interferometrischen Holographie. Ein anderes Beispiel nichtlinear-optischer Lichtquellen sind Frequenzkämme, auf deren Basis neue Verfahren der Infrarot-Spektroskopie entwickelt werden.

Ein weiteres Forschungsfeld der Gruppe ist die Quantensensorik: So bilden Paare aus Photonen verschiedener Wellenlängen, die in ihren Eigenschaften »verschränkt« sind, die Grundlage des Quanten-Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometers, mit dem besonders empfindliche Messungen möglich werden sollen. Alkali-Atome in speziell präparierten Spin-Quantenzuständen eignen sich zum Beispiel als hochempfindliche Magnetfeld-Sensoren, für die das Team neue Einsatzfelder in der industriellen Prozessmesstechnik erkundet.



Gruppenleiter: PD Dr. Frank Kühnemann

## NICHTLINEARE OPTIK

- ▶ optisch-parametrische Oszillatoren: von 450 nm bis 5 µm durchstimbar, Ausgangsleistungen 10 mW bis viele Watt (wellenlängenabhängig), Linienbreiten kleiner als 1 MHz
- ▶ Frequenzverdopplung: über 50 Prozent Konversionseffizienz
- ▶ MIR-NIR-Konversion: Aufnahme von MIR-Prozessdaten mit mehr als 5000 Spektren pro Sekunde
- ▶ spontane parametrische Fluoreszenz für die Quantensensorik

## NEUE SPEKTROSKOPISCHE MESSVERFAHREN

- ▶ photothermische Verfahren für die hochempfindliche Absorptionsspektroskopie in Feststoffen und Gasen
- ▶ Doppelkamm-Infrarot-Gasspektroskopie
- ▶ Spektroskopie in VIS, NIR und MIR
- ▶ Spektroskopie von Restabsorptionen in Materialien bis 1 ppm

## QUANTENSENSORIK

- ▶ Spektroskopie mit verschränkten Photonenpaaren: Quanten-Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer
- ▶ Magnetfeld-Sensorik mit optisch gepumpten Magnetometern: NMR bei kleinsten Magnetfeldern



## Neue Generation des optisch-parametrischen Oszillators »C-WAVE«

Im Herbst brachte Hübner Photonics den gemeinsam mit Fraunhofer IPM entwickelten optisch-parametrischen Oszillator »C-WAVE GTR« auf den Markt. Mit neuen Wellenlängen und einem verbesserten Aufbau eignet sich die Lichtquelle nun für noch mehr Anwendungen in Forschung und Industrie.



## NMR-Messverfahren mit niedrigen Magnetfeldstärken

Die Gruppe nahm ein neues Labor für die Quantensensorik in Betrieb. Hier werden neue Messverfahren für die Kernspin-Resonanz-Messtechnik (NMR) bei besonders niedrigen Magnetfeldstärken entwickelt. Möglich wird das durch den Einsatz von optisch gepumpten Magnetometern als hochempfindliche Sensoren.

## »Sensing with Quantum Light« bricht Teilnehmerrekord

Mit der dritten Auflage zeigte die jährlich von der Gruppe mitorganisierte Veranstaltung »Sensing with Quantum Light« ihre weltweite Bedeutung als wichtigstes Treffen für Experten der Quantenbildgebung und -spektroskopie: Die Hybrid-Veranstaltung verzeichnete eine verdreifachte Anzahl an Teilnehmenden. Wir präsentierten hier die ersten Gasmessungen mit dem von uns entwickelten »Quanten-Fourier-Transform-Spektrometer«.







Die Primärkämme bei 1,5 µm werden in einem faseroptischen Aufbau erzeugt.

# Spurengasanalyse mit Frequenzkämmen – breitbandig und sensitiv

Fraunhofer IPM hat ein neues Messgerät für die Spurengasanalytik entwickelt. Es basiert auf der Doppel-Frequenzkamm-Spektroskopie. Mit diesem Verfahren lassen sich große Wellenlängenbereiche im mittleren Infrarot nicht nur schnell, sondern auch mit sehr hoher spektraler Auflösung und mit hoher Empfindlichkeit untersuchen. Dieses neuartige Werkzeug schließt damit die Lücke zwischen breitbandiger FTIR-Spektroskopie und hochsensitiver QCL/ICL-basierter Spektroskopie. Es eignet sich besonders zur Analyse von Gasgemischen mit komplexen Spektren.

Die Molekülspektroskopie im mittleren Infrarot-Spektralbereich ist ein sensitives Analysewerkzeug für die Gassensorik oder Materialcharakterisierung. Heutige Systeme nutzen Quanten- oder Interband-Kaskaden-Laser (QCL/ICL) für die hochempfindliche Spektroskopie, während Fourier-Transform-IR-Spektrometer (FTIR) sich durch ihre spektrale Bandbreite auszeichnen. Fraunhofer IPM hat jetzt ein Spektrometer für den hochempfindlichen Spurengasnachweis auf Basis von Frequenzkämmen entwickelt, das die Lücke zwischen klassischer FTIR und QCL/ICL-basierten Spektrometern schließt und die Vorteile beider Domänen vereinen kann.

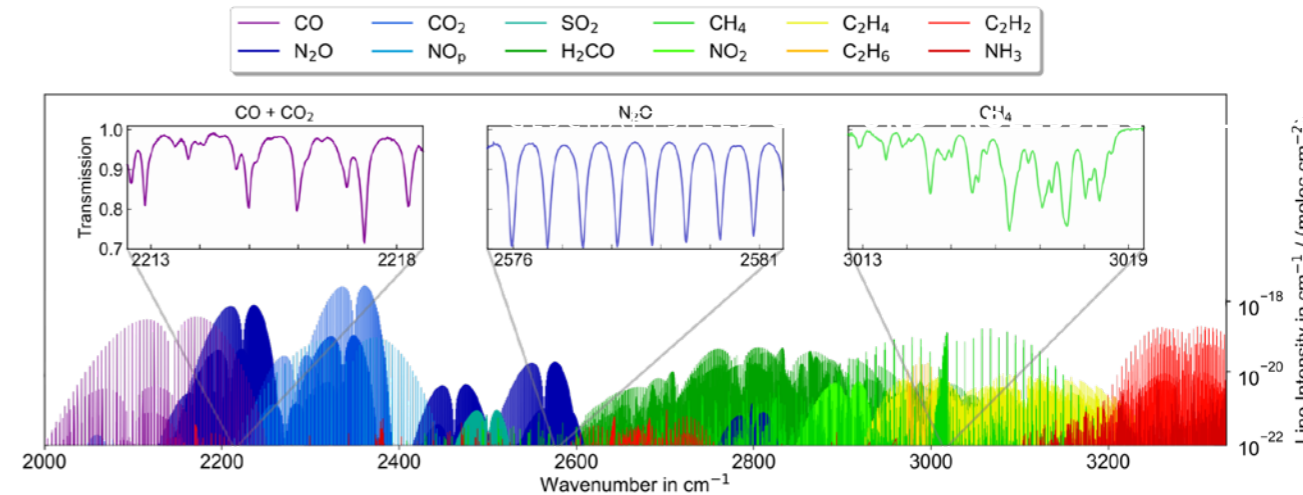
## Das Prinzip der Doppel-Frequenzkamm-Spektroskopie

Frequenzkämme sind Laser, die sehr viele kohärente Moden mit konstantem Frequenzabstand gleichzeitig emittieren. Im Frequenzspektrum erinnert das an die Zinken eines Kammes, daher der Name: Frequenzkamm. Um die spektrale Information aller Kammzinken gleichzeitig detektieren zu können, verwendet man einen zweiten, synchronisierten Frequenzkamm mit etwas größerem Zinkenabstand. Überlagert man nun beide Signale auf einem Detektor, so wird die gesamte optische Information, die von den Kämmen abgetastet wird, in ein einziges, leicht auszuwertendes Hochfrequenzsignal kodiert.

Heute sind Frequenzkämme vor allem im nah-infraroten Spektralbereich (NIR) bereits kommerziell verfügbar. Im spektroskopisch besonders interessanten mittleren Infrarotbereich (MIR), in dem die meisten Moleküle starke Schwingungsbanden aufweisen, fehlten bisher jedoch Frequenzkämme, die insbesondere für den hochempfindlichen Spurengasnachweis geeignet sind. Ein naheliegender Ansatz, um das mittlere Infrarot zu erschließen, ist der Transfer eines NIR-Kamms in das MIR mittels nichtlinearer Frequenzkonversion – eine Technik, die von Fraunhofer IPM seit vielen Jahren erfolgreich für die Entwicklung von Laserlichtquellen wie optisch-parametrischen Oszillatoren (OPO) eingesetzt wird.

## Flexibel im mittleren Infrarot

Diesem Konzept entsprechend besteht das Doppel-Frequenzkamm-Spektrometer von Fraunhofer IPM aus zwei Modulen: dem Doppel-Frequenzkamm-Generator und dem MIR-Konverter. Zur Frequenzkammgenerierung wird ein bewährtes Verfahren eingesetzt: Ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge bei 1,55 µm wird in zwei Strahlen aufgeteilt, in denen durch elektrooptische Modulation (EOM) die beiden Kämmen mit leicht unterschiedlichen Frequenzabständen erzeugt und anschließend auf die endgültige Breite mit mehreren hundert bis zehntausend Kammzinken verbreitert werden. Dank des gemeinsamen Ursprungslasers sind die beiden Kämmen intrinsisch kohärent



Typische Gase, die im Abgas oder in der Luft vorkommen, haben charakteristische Banden im mittleren Infrarot-Spektralbereich (hier in einer Simulation gezeigt). Das Doppel-Frequenzkamm-Spektrometer von Fraunhofer IPM deckt den gesamten relevanten Frequenzbereich breitbandig ab.

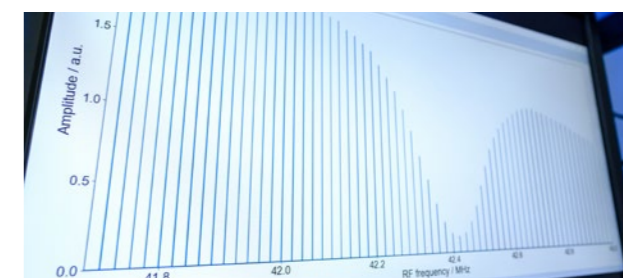
Ein **FREQUENZKAMM** (frequency comb, FC) ist eine Laserlichtquelle, die Licht mit einer Vielzahl sehr eng benachbarter Spektrallinien emittiert, deren Frequenzabstand immer gleich und genau bekannt ist; daher der Name Frequenzkamm. Deckt der Frequenzkamm einen Frequenzbereich von mindestens einer Oktave ab, so lassen sich die Frequenzen der einzelnen Kammzinken mit extremer Genauigkeit bestimmen. Man spricht daher auch von einem »optischen Lineal«. Die Entwicklung von Frequenzkämmen begann vor mehr als 20 Jahren und gilt als bahnbrechend. Für das Konzept und die Entwicklung der Frequenzkämme als Werkzeug für die Präzisionspektroskopie wurden Theodor Hänsch vom Max-Planck-Institut für Quantenphysik und sein US-Kollege John Hall im Jahr 2005 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

und die elektrooptische Modulation erlaubt es, den Abstand der Kammzinken an die Struktur der zu untersuchenden Spektren anzupassen. Die Komplexität ist deutlich geringer als bei herkömmlichen Doppelkamm-Systemen, und der Einsatz faseroptischer Standardkomponenten erlaubt einen robusten Aufbau. Die verfügbare Zahl an Kammzinken (und damit die spektrale Abdeckung) ist zwar geringer als bei anderen Kammtypen. Dafür besitzen die EOM-basierten Kämmen entscheidende Vorteile beim Signal-zu-Rausch-Verhältnis auf den einzelnen Zinken. Das ist eine extrem wichtige Voraussetzung, um überhaupt hochempfindliche Spurengasmessungen durchführen zu können. Der NIR-Doppelkamm wird nun im zweiten Schritt mittels Differenz-Frequenzmischung in das MIR übertragen. Hier spielt Fraunhofer IPM seine Stärken auf dem Gebiet der nichtlinear-optischen Frequenzkonversion aus: Mit einem selbst entwickelten OPO, der inzwischen als Produkt unter dem Namen C-WAVE GTR auf dem Markt ist (s. S. 55), kann die Pumpwellenlänge zwischen 1,0 und 1,3 µm variiert werden. Damit lässt sich die Zentralwellenlänge der MIR-Kämme flexibel zwischen 3 und 5 µm abstimmen und so genau auf die spektrale Region einstellen, die für den Spurengasnachweis von Interesse ist.

## Vielseitiger Demonstrator für die Anwendung

Komplettiert wird das System durch eine Betriebssoftware zur Steuerung, Datenerfassung und Datenverarbeitung. So gelingen kontinuierliche Messungen, eine effiziente Datenkompressi-

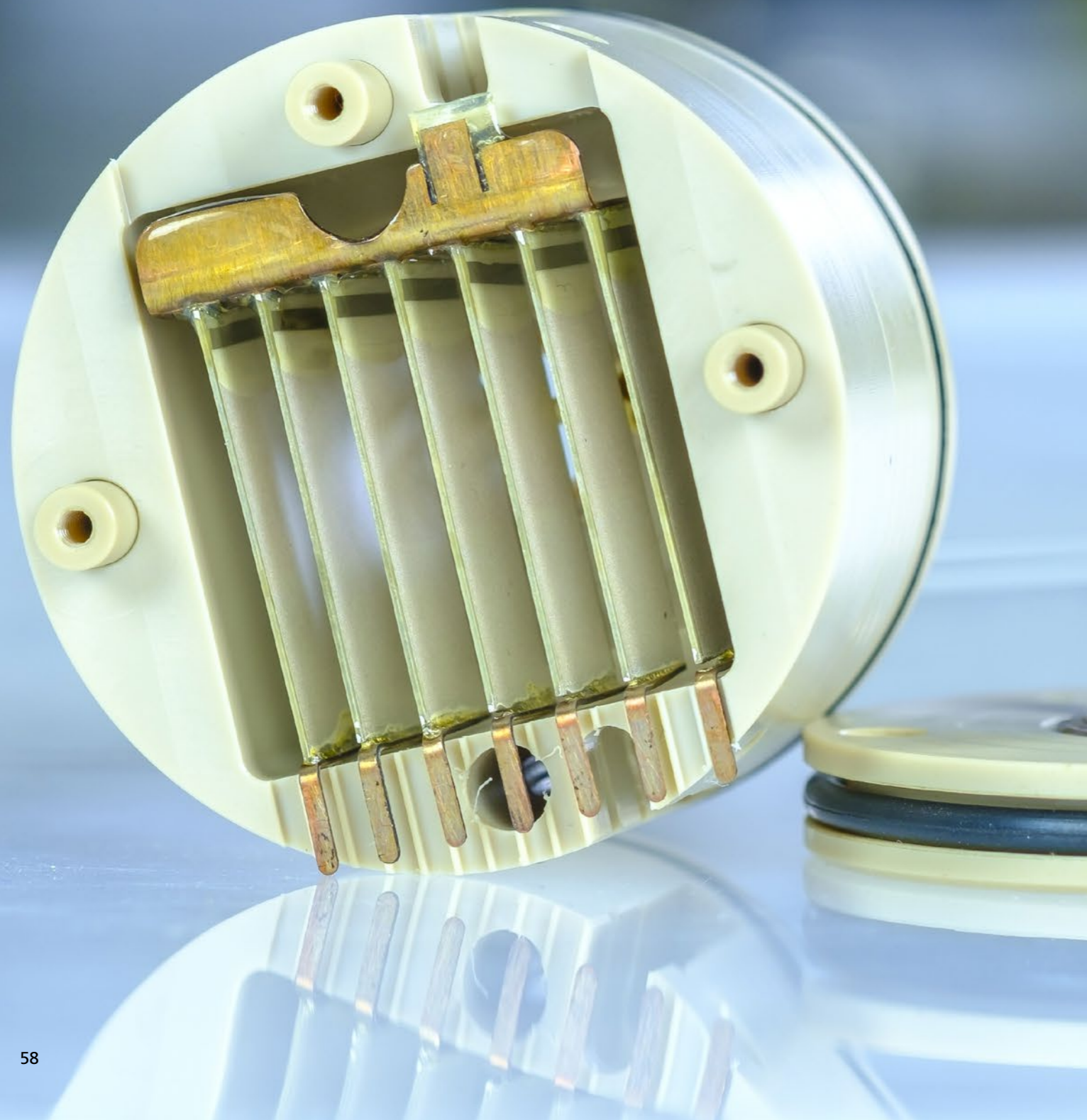
on und eine Analyse in Echtzeit. Die volle Kontrolle über die Messparameter erlaubt eine maßgeschneiderte Anpassung an die Anforderungen unterschiedlichster Messaufgaben: schnelle Spektrenaufnahme mit bis zu 20 kHz, eine instantane spektrale Abdeckung bis zu 20 cm<sup>-1</sup> oder eine spektrale Auflösung bis zu 250 MHz (< 0,01 cm<sup>-1</sup>) für den Nachweis bei verringertem Gasdruck. Die möglichen Anwendungen erstrecken sich über ein weites Feld: von der schnellen Verbrennungsanalyse und der fein abgestimmten Prozesskontrolle über die Zertifizierung von Gasgemischen bis hin zur Abgasanalyse (N<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub>, siehe Abb. oben) oder der Bestimmung des Verhältnisses stabiler Kohlenstoffisotope (<sup>12</sup>C und <sup>13</sup>C) in den Treibhausgasen CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>. Weitere potenzielle Anwendungen sind das Multikomponenten-Atmosphärenmonitoring (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, ...) und die Charakterisierung und Quantifizierung von Verunreinigungen in Wasserstoff (H<sub>2</sub>).



Die Absorptionslinie eines Gases wird mithilfe vieler eng benachbarter Laserlinien gleichzeitig abgetastet.



## GESCHÄFTSFELD THERMISCHE ENERGIEWANDLER



»Wir entwickeln Systeme für die Kühlung und das Pumpen, Wandeln, Leiten und Schalten von Wärme.«

Schwerpunkt der Forschung im Geschäftsfeld »Thermische Energiewandler« sind Technologien zum Pumpen, Wandeln, Leiten und Schalten von Wärme. Für unsere Arbeit greifen wir auf mehr als 20 Jahre Erfahrung und weitreichendes Know-how zu spezieller Messtechnik, Simulation, Materialentwicklung und Systemintegration zurück.

Zu unseren Kompetenzen gehören Entwicklung, Konzeption und Aufbau effizienter kalorischer Wärmepumpen und Kühlsysteme auf Basis magneto-, elektro- oder elastokalorischer Materialien sowie die Entwicklung thermoelektrischer Module und Systeme. Darüber hinaus erforschen wir neuartige Konzepte für den effizienten Wärmetransport auf Basis von Heatpipes und Heatpipe-basierte Wärmeschalter für das gezielte Regulieren von Wärmeströmen.



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

### Gruppe **Thermoelektrische Systeme**

- ▶ Entwicklung thermoelektrischer Module und Systeme
- ▶ Abwärmeverstromung mit elektrischen Leistungen im Bereich von Milliwatt bis Kilowatt
- ▶ direkte Abwärmennutzung von Feuerungsanlagen für den netzunabhängigen Betrieb von Verbrauchern
- ▶ innovative Peltier-Kühlung
- ▶ strukturelle, thermische und elektrische Analytik von Bauteilen und Materialien

### Gruppe **Kalorische Systeme**

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

*< Bauteile eines elektrokalorischen Segments bestückt mit mehreren elektrisch parallel geschalteten Keramik-Komponenten. Neben dem Segment ist ein speziell für die kalorische Heatpipe entwickeltes Rückschlagventil gezeigt. Das elektrokalorische Material stammt von Fraunhofer IKTS.*



# GRUPPE THERMOELEKTRISCHE SYSTEME

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe sind thermoelektrische Module und Systeme, auch für Hochtemperaturprozesse. Die Arbeiten reichen vom Systembau für Demonstratoren über Funktionserprobungen auf eigenen Prüfständen oder im Feld bis zu Simulationsrechnungen und Validierungsmessungen für optimal ausgelegte thermoelektrische Module. Das Team greift dabei auf langjährige Erfahrung in Material- und Modulentwicklung, Messtechnik, Simulationsverfahren, Systembau und Materialanalyse zurück.

Eine Kernkompetenz ist die Entwicklung und halbautomatische Fertigung thermoelektrischer Module. Die Module werden als Thermogeneratoren zur Abwärmeverstromung z. B. in Kleinf Feuerungsanlagen verwendet. Darüber hinaus werden sie als Peltier-Module vor allem in solchen Kühlanwendungen eingesetzt, bei denen es auf eine sehr präzise und schnelle Temperaturkontrolle ankommt.



Gruppenleiter: Dr. Olaf Schäfer-Welsen

#### ABWÄRMEVERSTROMUNG

- ▶ thermoelektrische Module für den Hochtemperatureinsatz
- ▶ thermoelektrische Module zur Steigerung der elektrischen Effizienz von BHKW
- ▶ Verstromung ungenutzter Abwärme in Verbrennungskraftmaschinen und industriellen Prozessen

#### ABWÄRMENUTZUNG AN FEUERUNGSANLAGEN

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

#### PELTIER-KÜHLUNG

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

#### ANALYTIK FÜR BAUTEILE UND MATERIALIEN

- ▶ zerstörungsfreie strukturelle, thermische und elektrische Analytik von Bauteilen und Materialien
- ▶ innovative 3D-Computertomographie: Analytikketten, Versagensanalyse, »live« und »in-situ«-Untersuchungen (auch von Fluiden in Bauteilen)



#### Energieautarke Abgasreinigung bei Kleinf Feuerungsanlagen

Uns gelang die Entwicklung eines Demonstrators als Nachrüstlösung für Holzfeuerungsanlagen: Der luftgekühlte thermoelektrische Generator mit Heatpipe-Wärmeübertrager wandelt einen Teil der im Abgasstrom enthaltenen Wärme um – so können aus 12kW Heizleistung nun 20W elektrische Leistung generiert werden. Je nach Betriebspunkt deckt diese Leistung z. B. den Strombedarf eines zusätzlichen Verbrauchers für die Abgasreinigung (z. B. elektrostatischer Feinstaubabscheider).



#### Hochpräzise und schnelle Temperierung von Rohren

Im Zuge des Projekts »HochPerForm« entwickelten wir ein ringförmiges Peltiermodul zur Temperierung eines Hohlzylinders. Mit zehn thermoelektrischen Streifen kann das Rohrstück mit einer Heizrate von 18 K/s homogen aufgeheizt und mit 10 K/s gekühlt werden. So lässt sich die Temperatur des Rohrs in einem Temperaturbereich von 0 bis 120 °C schnell und präzise einstellen.



# GRUPPE KALORISCHE SYSTEME

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

Innovative kalorische Systeme zum Heizen und Kühlen bilden den Forschungsschwerpunkt der Gruppe. Unsere Arbeiten umfassen Entwicklung, Konzeption und Aufbau effizienter Wärmepumpen und Kühlsysteme ohne schädliche Kältemittel auf Basis magneto-, elektro- oder elastokalorischer Materialien. Dabei greifen wir auf mehr als 20 Jahre Erfahrung im Bereich funktionaler Materialien zurück, insbesondere bezüglich ihrer Charakterisierung, Simulation und Systemintegration.

Neuartige Konzepte für den effizienten Wärmetransport auf Basis pulsierender Heatpipes (PHP) bilden ein weiteres Arbeitsgebiet der Gruppe. PHP transportieren Wärme um ein Vielfaches effizienter als beispielsweise Kupfer und haben einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Wärmerohren. Von uns entwickelte PHP werden zur Entwärmung elektronischer Bauteile und für ein gezieltes Thermomanagement eingesetzt. Darüber hinaus forschen wir an Heatpipe-basierten Wärmeschaltern für das gezielte Regulieren von Wärmeströmen.



Gruppenleiter: Dr. Kilian Bartholomé

## EFFIZIENTES KÜHLEN UND HEIZEN

- ▶ reduzierter Energiebedarf dank effizienter Technologie
- ▶ Kühlen und Heizen ohne schädliche Kältemittel
- ▶ geräusch- und wartungsarme Systeme

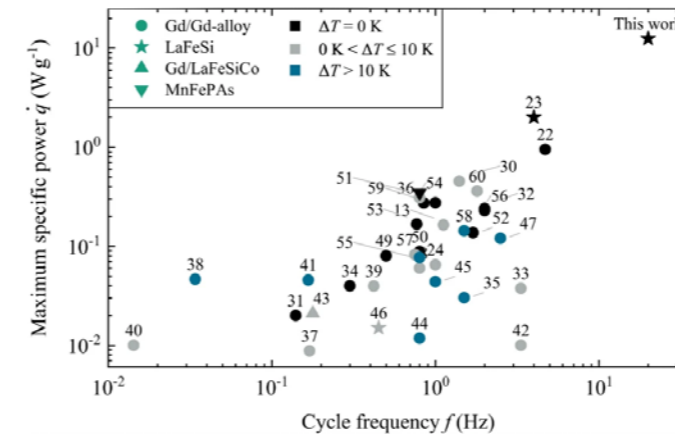
## THERMISCHES MANAGEMENT

- ▶ schnelle und exakte Temperaturregelung mit Peltierelementen
- ▶ passive Kühlung elektronischer Bauteile mittels Heatpipes
- ▶ effiziente Wärmeverteilung durch pulsierende Heatpipes
- ▶ effektive Wärmeleitfähigkeit von über 3000 W/mK
- ▶ thermische Schalter mit Schaltfaktoren von über 20

## EFFIZIENTER WÄRMETRANSPORT MITTELS

### LATENTER WÄRME

- ▶ Wärmeübertrag mittels Verdampfung und Kondensation
- ▶ hohe Wärmeübertragungskoeffizienten von über  $10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- ▶ sehr schneller und effizienter Wärmeübertrag für Systemfrequenzen bis 20 Hz



## Meilenstein in der Entwicklung kalorischer Kühlsysteme

Erstmals gelang es der Gruppe, ein kalorisches Kühlsystem zu entwickeln, das eine um eine Größenordnung höhere spezifische Leistung erreicht als alle bisher entwickelten Systeme. Das Herzstück des Systems sind aktive magnetokalorische Heatpipes. Die Gruppe veröffentlichte diesen Durchbruch im Nature-Journal »Communications Physics«.



## Forschung an Heatpipes mit funktionalen Materialien

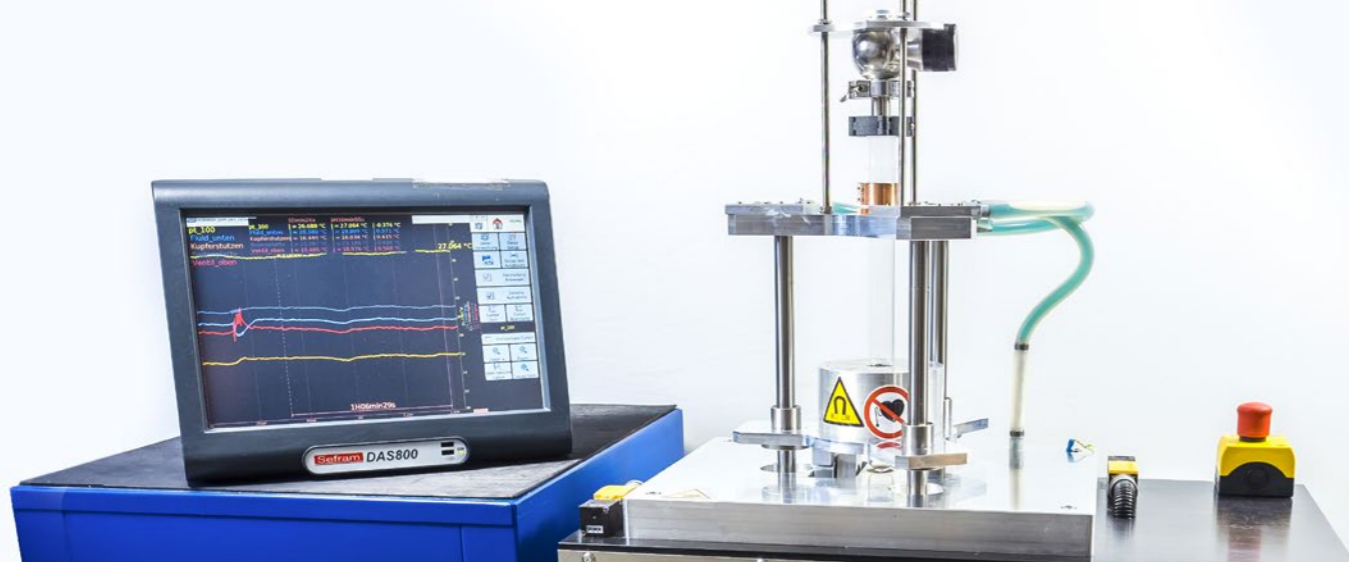
Die Gruppe erschloss sich ein neues Arbeitsfeld: Über die Integration funktionaler Materialien in Heatpipes sollen thermische Schalter entwickelt werden, die ihren Schalterpunkt bei einer programmierten Temperatur haben. Damit wird die Wärme ab einer bestimmten Temperatur um einen Faktor 20 besser transportiert als unterhalb dieser Schaltertemperatur.

## Proof of Concept für elektrokalorische Wärmepumpen

Im Projekt »EiKaWe« konnten wir zeigen, dass die Integration elektrokalorischer Materialien in Heatpipes möglich ist und so Wärme transportiert werden kann. Damit ist die Grundlage für die Entwicklung elektrokalorischer Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen im Fraunhofer-Leitprojekt gelegt. Hieran sind insgesamt sechs Fraunhofer-Institute beteiligt.







< In aktiven magnetokalorischen Heatpipes werden alle Systemkomponenten im Zweiphasengebiet (flüssiges und gasförmiges Fluid) charakterisiert und optimiert. Das Verdampfen und Kondensieren einer Flüssigkeit im Zweiphasengebiet wird auch in herkömmlichen Heatpipes genutzt. Daher kommt auch der Name »aktive magnetokalorische Heatpipe«.

# Magnetokalorische Heatpipes: Kältetechnik neu gedacht

Alternative Formen des Kühlens und Heizens werden weltweit diskutiert. Doch die Anforderungen an eine nachhaltige Kälte- und Klimatechnik sind groß: Um mit gängigen Technologien konkurrieren zu können, sind kostengünstige und hocheffiziente Systeme gefragt. Fraunhofer IPM forscht seit einigen Jahren an der Entwicklung magnetokalorischer Kühlsysteme, die gänzlich ohne schädliche Kältemittel auskommen. Ein neuartiger Ansatz verspricht, bisherige magnetokalorische Systeme im Hinblick auf Kühlleistung, Kosten und Effizienz deutlich zu übertreffen. Das Herzstück sind aktive magnetokalorische Heatpipes.

Kühlschränke, Klimaanlage, Wärmepumpen – seit mehr als hundert Jahren dominiert die Kompressortechnologie die Kältetechnik. Doch Kompressoren sind laut, vergleichsweise wenig effizient und arbeiten mit oft problematischen Kältemitteln. Einige dieser Mittel sind brennbar oder giftig, andere umweltschädlich und werden daher stark reguliert. Magnetokalorische Kühlsysteme benötigen keine flüssigen Kältemittel, hier wird der Kühleffekt direkt über das magnetokalorische Material erzielt. Ein von unserer Forschungsgruppe entwickeltes System übertrifft bisherige kalorische Systeme nun in der Kühlleistungsdichte um eine ganze Größenordnung – das könnte die Kältetechnik nachhaltig verändern.

## Nutzung latenter Wärme durch aktive magnetokalorische Heatpipes

Die bisherige Forschung zu magnetokalorischen Systemen basiert auf dem Prinzip der aktiven magnetokalorischen Regeneration (AMR-Systeme). Hierbei wird die thermische Energie der magnetokalorischen Materialien über das Pumpen eines Fluids zu den Wärmetauschern transportiert. Solche Systeme ermöglichen zwar hohe Kühlleistungen und große Temperaturspannen – die Reibung kann jedoch

signifikante Verluste verursachen. Das ist schlecht für die Effizienz und die Leistungsdichte.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von Fraunhofer IPM setzen daher auf ein anderes Prinzip: aktive magnetokalorische Heatpipes. Das magnetokalorische Material befindet sich in mehreren kreisförmig angeordneten Kammern. Ein rotierender Magnet in der Mitte sorgt für die abwechselnde Erwärmung (Magnetisierung) und Abkühlung (Entmagnetisierung) des Materials. Der Wärmeübertrag erfolgt hier ausschließlich über Verdampfen und Kondensieren des Fluids (z. B. Methanol), Rückschlagventile dienen als thermische Dioden. So kann die latente Wärme genutzt werden und der reibungsbedingte Wärmeverlust wird minimiert.

Dem Team gelang es erstmals, in Messungen die Überlegenheit dieses Systemansatzes zu demonstrieren. Die erzeugte Kühlleistungsdichte ist um eine Größenordnung höher als in allen bisherigen Systemen. Eine hohe Zyklusfrequenz führt zu einer Steigerung der Kühlleistungsdichte. So kann eine hohe Kühlleistung bei geringem Materialeinsatz erreicht werden – ein entscheidender Faktor für kostengünstige

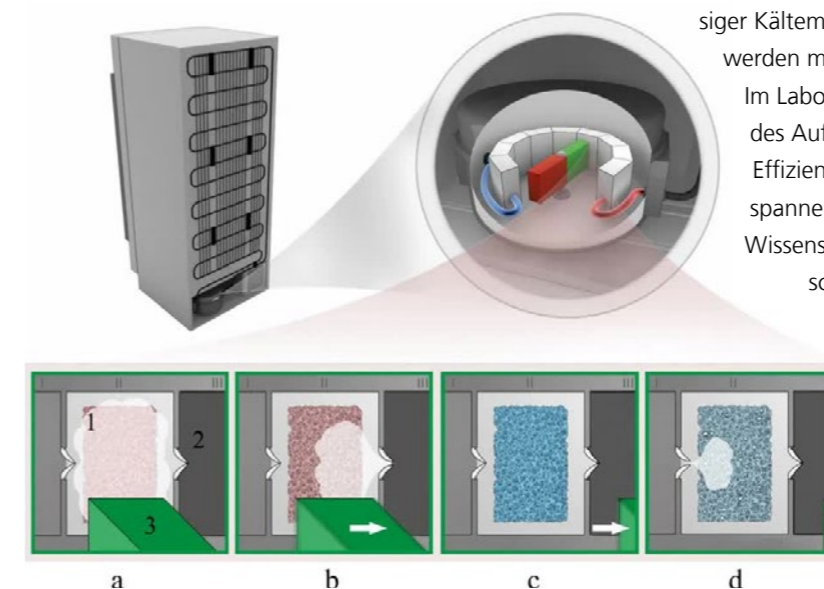
Der **MAGNETOKALORISCHE EFFEKT** ist seit 1917 bekannt: Magnetokalorische Materialien erwärmen sich, wenn ein Magnetfeld angelegt wird. Durch abwechselndes Magnetisieren und Entmagnetisieren lässt sich so ein Kühlzyklus realisieren. Erst in den 1990er Jahren gelang die Entwicklung von Legierungen, die auch bei Raumtemperatur eine deutliche Temperaturänderung zeigen. Seitdem rückt die Forschung an kalorischen Kühlsystemen weltweit mehr und mehr in den Vordergrund. Aufgrund der guten magnetokalorischen Eigenschaften, der hohen Umweltverträglichkeit, der hohen Verfügbarkeit und des niedrigen Preises arbeitet die Gruppe mit Lanthan-Eisen-Silizium-Verbindungen.

Systeme. Die Ergebnisse wurden 2020 im Nature-Journal »Communications Physics« veröffentlicht. Erste Simulationen zeigen zudem eine deutlich größere Effizienz: Bei einer Zyklusfrequenz von 20 Hz und einer mittleren Temperaturspanne können so etwa 60 Prozent von Carnot, der maximal möglichen Effizienz, erreicht werden.

## Auf dem Sprung in die Anwendung

Die Wettbewerbsfähigkeit magnetokalorischer Kühlsysteme wird durch das von Fraunhofer IPM entwickelte Prinzip enorm gesteigert. Die neue Technologie hat das Potenzial, mit der mehr als hundert Jahre alten Kompressortechnologie zu konkurrieren – beispielsweise für die Kühlung von Schaltschränken, für industrielle Tiefkühlsysteme und andere Anwendungen, in denen bisher große Mengen flüssiger Kältemittel verwendet und regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

Im Labor arbeitet das Team nun an der Optimierung des Aufbaus, um auch experimentell die gesteigerte Effizienz messen zu können und die Temperaturspanne weiter zu erhöhen. Für einen frühzeitigen Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung schuf die Gruppe mit »InnoCool – Konsortialstudie Kalorik« zudem ein Gremium aus Forschenden, Anwendern und Herstellern von Kühlsystemen. In Workshops und Diskussionsrunden sollen hier frühzeitig die Weichen für einen Markteintritt der Technologie gestellt werden. Weitere Infos zur Studie finden Sie auf Seite 20.



(a) Durch Magnetisierung erwärmt sich das magnetokalorische Material (MKM) und die kondensierte Flüssigkeit verdampft. (b) Das Verdampfen führt zu einem Druckanstieg, das rechte Ventil öffnet sich und das gasförmige Fluid transportiert die Wärme zum nächsten Segment. (c) Durch Rotieren des Magneten wird das MKM entmagnetisiert. Das MKM kühlt bis unter die Ausgangstemperatur ab. Das gasförmige Fluid kondensiert auf dem MKM, der Druck fällt ab. (d) Das linke Ventil öffnet sich, das gasförmige Fluid aus dem linken Segment tritt ein. Es entsteht ein Wärmetransport.



## MESSEN | VERANSTALTUNGEN 2020

Aufgrund der Corona-Pandemie wurden für das Jahr 2020 nahezu alle Fachmessen abgesagt oder verschoben. Einige Messen wurden im Online-Format angeboten.

### EIGENE VERANSTALTUNGEN

#### Online-Forum #produktionskontrolle

Digitale Veranstaltung, 16.12.2020

Mit dem Thema »Messtechnik für die Umformung« als Auftakt haben wir im Dezember 2020 die neue Veranstaltungsreihe »Online-Forum« ins Leben gerufen. Rund 50 Gäste aus Forschung und Industrie nahmen daran teil. Die Veranstaltung setzt im Monatsrhythmus klar umgrenzte Themen aus der Produktionskontrolle auf die Agenda und bietet die Gelegenheit zum Austausch zwischen Wissenschaftlern und Anwendern – fachlich fundiert, in ungezwungener Atmosphäre.

### MESSETEILNAHME

#### SQL20 – Sensing with Quantum Light, Internationaler Workshop

Berlin, 06.–09.09.2020, Hybridveranstaltung

Das Institut stellte aktuelle Ergebnisse bei der Entwicklung seines Quanten-Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometers (Q-FTIR) vor. Das Q-FTIR wird in neuen Infrarot-Spektroskopieverfahren für die Gasanalytik zum Einsatz kommen.

#### Chillventa eSpecial

Digitale Veranstaltung, 15.10.2020

Dr. Kilian Bartholomé erläuterte in seinem Vortrag »Caloric Materials for Thermal Compression«, wie thermische Kompression mithilfe kalorischer Materialien eine hohe Leistungsfähigkeit in kalorischen Kühlsystemen gewährleisten kann.

#### Fraunhofer Solution Days 2020

Digitale Veranstaltung, 26.10.2020

Im Rahmen der Fraunhofer Solution Days 2020 präsentierte die Fraunhofer-Gesellschaft Innovationen aus den Themenfeldern Gesundheit, digitale Wirtschaft, Anlagen- und Maschinenbau und Mobilität. Fraunhofer IPM nahm als Mitglied des Fraunhofer Geschäftsbereichs Vision unter dem Leitmotiv »Inline Quality Inspection Checkup« an der Veranstaltung teil. Digital vorgestellt wurden die Themen Partikeldetektion und präzise 3D-Vermessung großer Funktionsflächen in Kombination mit markierungsfreier Bauteilrückverfolgung.

#### Parts2clean

Digitale Veranstaltung, 27.10.2020

Fraunhofer IPM stellte optische Messsysteme zur automatisierten 100-Prozent-Kontrolle von Oberflächen vor. Basierend auf verschiedenen Bildgebungsverfahren, u. a. der bildgebenden Fluoreszenzanalyse, erkennen und quantifizieren die Systeme sowohl partikuläre als auch filmische Verunreinigungen.

#### EuroBLECH Digital Innovation Summit

Digitale Veranstaltung, 27.–30.10.2020

Auf der internationalen Technologiemesse für Blechbearbeitung präsentierte Fraunhofer IPM den F-Scanner zur flächigen Inline-Inspektion der Beölungsmenge und -verteilung auf großen Blechen.

## MESSEN | VERANSTALTUNGEN GEPLANT FÜR 2021

Auch wenn für das Jahr 2021 weiterhin Unsicherheit herrscht, laufen die Planungen weiter: Wo möglich und sinnvoll, werden wir uns an den digitalen Formaten der Messeveranstalter beteiligen.

### EIGENE VERANSTALTUNGEN

#### 9. Gassensor-Workshop

Digitale Veranstaltung, 18.03.2021

#### Girls' Day

Digitale Veranstaltung, 22.04.2021

#### Online-Forum #produktionskontrolle

Digitale Veranstaltungsreihe

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

#### Online-Forum #LiDAR und #MobileMapping

Digitale Veranstaltungsreihe

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

Weitere Veranstaltungen in Planung:

[www.ipm.fraunhofer.de/online-forum](http://www.ipm.fraunhofer.de/online-forum)

### GEPLANTE TEILNAHME AN MESSEN

#### Sensor+Test

Digitale Veranstaltung, 04.–06.05.2021

#### Freiburger Wissenschaftsmarkt

Digitale Veranstaltung, 07.–26.06.2021

#### VDI regio Career

Freiburg, 09.10.2021

#### World of Photonics Congress

Digitale Veranstaltung, 20.–24.06.2021

#### parts2clean

Stuttgart, 05.–07.10.2021

#### 13. Fraunhofer Geschäftsbereich Vision Technologietag

Fürth, Datum für 2021 noch in Planung

#### Blechexpo

Stuttgart, 26.–29.10.2021

#### MEDICA

Düsseldorf, 15.–18.11.2021

#### Laser World of Photonics (verschoben von 2021)

München, 26.–29.04.2022



## PUBLIKATIONEN 2020

Negassi, M.; Parupalli, U.; Suarez-Ibarrola, R.; Schmitt, A.; Hein, S.; Miernik, A.; Reiterer, A.

**3D-Reconstruction and Semantic Segmentation of Cystoscopic Images**

Su, R. [Ed.]: Medical Imaging and Computer-Aided Diagnosis (MICAD). Proceedings MICAD 2020, 46-55 (2020)

Maier, L. M.; Corhan, P.; Barcza, A.; Vieyra, H.; Vogel, C.; König, J. D.; Schäfer-Welsen, O.; Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

**Active magnetocaloric heat pipes provide enhanced specific power of caloric refrigeration**

Communications Physics 3, 186 (2020)

Negassi, M.; Suarez-Ibarrola, R.; Hein, S.; Miernik, A.; Reiterer, A.

**Application of artificial neural networks for automated analysis of cystoscopic images: A review of the current status and future prospects**

World Journal of Urology 38, 2349-2358 (2020)

Saum, N.; Schmid-Schirling, T.

**Bauteilrückverfolgung mit Track & Trace Fingerprint**

Digital Manufacturing 5, 42-43 (2020)

Merkle, D.; Schmitt, A.; Reiterer, A.

**Concept of an autonomous mobile robotic system for bridge inspection**

Erbertseder, T. [Ed.]: Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments V. Proceedings of SPIE 11535, Paper 115350A (2020)

Waldbillig, F.; Hein, S.; Grüne, B.; Suarez-Ibarrola, R.; Liatsikos, E.; Salomon, G.; Reiterer, A.; Gratzke, C.; Miernik, A.; Kriegmair, M.; Ritter, M.

**Current European Trends in Endoscopic Imaging and Transurethral Resection of Bladder Tumors**

Journal of Endourology 34, 312-321 (2020)

Lambrecht, A.; Bolwien, C.; Erb, J.; Fuhr, H.; Sulz, G.

**Cylindrical IR-ATR Sensors for Process Analytics**

Sensors. Online journal 20, 2917 (2020)

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

**Electro-optic based adiabatic frequency conversion in a non-centrosymmetric microresonator**

Kudryashov, A. V. [Ed.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII. Proceedings of SPIE 11266, Paper 1126606 (2020)

Szabados, J.; Werner, C.; Herr, S. J.; Breunig, I.; Buse, K.

**Electro-optic eigenfrequency tuning of potassium tantalate-niobate microresonators**

APL Photonics 5, 016106 (2020)

Ersoez, B.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Electrolyte-gated transistor for CO<sub>2</sub> gas detection at room temperature**

Sensors and Actuators. B 317, 128201 (2020)

Becker, D.; Stemmler, S.; Reiterer, A.

**Entwicklung und Evaluierung eines kompakten Multisensor-systems für den Einsatz auf Drohnen**

Wunderlich, T. A. [Ed.]: Ingenieurvermessung 20; Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München 2020, 99-108 (2020)

Eberhardt, A.; Bauersfeld, M.-L.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Filterrotationspektrometer für den Nachweis von Ethen im ppb-Bereich**

Technisches Messen 87, 164-176 (2020)

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

**Fourier transform infrared spectroscopy with visible light**

Optics Express 28, 4426-4432 (2020)

Szabados, J.; Breunig, I.; Buse, K.

**Frequency comb generation in non-centrosymmetric optical microresonators**

Kudryashov, A. V. [Ed.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII. Proceedings of SPIE 11266, Paper 112660G (2020)

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

**Frequency comb generation threshold via second-harmonic excitation in  $\chi^{(2)}$  optical microresonators**

APL Photonics 5, 116102 (2020)

Szabados, J.; Puzyrev, D. N.; Minet, Y.; Reis, L.; Buse, K.; Villois, A.; Skryabin, D. V.; Breunig, I.

**Frequency Comb Generation via Cascaded Second-Order Non-linearities in Microresonators**

Physical Review Letters 124, 203902 (2020)

Podivilov, E.; Sturman, B.; Breunig, I.

**Frequency comb solutions for driven  $\chi^{(2)}$  optical microresonators**

Journal of the Optical Society of America. B 37, 3316-3324 (2020)

Eberhardt, A.; Weber, C.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.

**FT-IR Coupled Goniometer Setup for Characterization of the Spatial and Spectral Emission of IR-Sources**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 177-178 (2020)

Reiterer, A.; Wäschle, K.; Störk, D.; Leydecker, A.; Gitzen, N.

**Fully automated segmentation of 2D and 3D mobile mapping data for reliable modeling of surface structures using deep learning**

Remote Sensing 12, 2530 (2020)

Kneis, S.; Straub, E.; Walz, I. D.; Olshausen, P. v.; Wehrle, A.; Gollhofer, A.; Bertz, H.

**Gait Analysis of Patients after Allogeneic Hematopoietic Cell Transplantation Reveals Impairments of Functional Performance**

Integrative Cancer Therapies 19, 1-10 (2020)

Conrad, F.; Blug, A.; Kerl, J.; Fehrenbach, J.; Regina, D. J.; Bertz, A.; Kontermann, C.; Carl, D.; Oechsner, M.

**GPU-based digital image correlation system for uniaxial and biaxial crack growth investigations**

Procedia Structural Integrity 28, 2195-2205 (2020)

Pannek, C.; Vetter, T.; Oppmann, M.; Weber, C.; Eberhardt, A.; Dold, M.; Bauersfeld, M.-L.; Henfling, M.; Trupp, S.; Schug, B.; Wöllenstein, J.; Mandel, K.

**Highly sensitive reflection based colorimetric gas sensor to detect CO in realistic fire scenarios**

Sensors and Actuators. B 306, 127572 (2020)

Beckmann, T.

**Holographie-Mikroskop mit Raspberry Pi**

C't. Make 2, 62-67 (2020)

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

**HoloPort – design and integration of a digital holographic 3-D sensor in machine tools**

Journal of Sensors and Sensor Systems 9, 33-41 (2020)

Seyler, T.; Engler, J.; Fuchs, M.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Bertz, A.; Carl, D.; Grün, V.; Börret, R.; Ströer, F.; Seewig, J.

**HoloPort – Submikrometergenau 3D-Messen in der Werkzeugmaschine**

Technisches Messen 87, 210-221 (2020)

Wätzel, J.; Blättermann, A.; Schulz, D.; Chiang, C.; Berakdar, J.

**Imprinting photon orbital angular momentum during laser-assisted photoemission from quantum wells**

Optics Letters 45, 5970-5973 (2020)

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

**Inline Quality Monitoring of Diesel Exhaust Fluid (AdBlue) by Using the 3 $\Omega$ -Method**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 79-80 (2020)

Breunig, I.; Buse, K.

**Juggling with light: Powerful second-order nonlinear optical effects in whispering gallery resonators**

Kudryashov, A. V. [Ed.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII. Proceedings of SPIE 11266, Paper 1126609 (2020)

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

**Low Temperature Methane Combustion Catalysts for Pellistors Investigated by Simultaneous Thermal Analysis**

Electrochemical Society. ECS Meeting Abstracts 1, 2438 (2020)

Maier, L. M.; Hess, T.; Corhan, P.; Schmitz, S.; Bachmann, N.; Schäfer-Welsen, O.; Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

**Magnetokalorische Wärmepumpen mit hohen Zyklusfrequenzen**

Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019. CD-ROM, Paper II.1.07 (2020)

Reiterer, A.

**Mapping the underground maze**

GeoConnexion 19 (6), 32-33 (2020)

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

**Measurement of <sup>13</sup>C and <sup>18</sup>O Ratio in CO<sub>2</sub> using Quantum Cascade Laser based Tunable Absorption Spectroscopy**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 175-176 (2020)

Naumann, F.; Lorenz, G.; Bernasch, M.; Boettge, B.; Schischka, J.; Ziesche, S.; Pernau, H.-F.; Jaegle, M.; Klengel, S.; Kappert, H.

**Mechanical and microstructural characterization of LTCC and HTCC ceramics for high temperature and harsh environment application**

CIPS 2020, 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Proceedings (CD-ROM), 449-454 (2020)

Maier, L. M.; Hess, T.; Kaube, A.; Corhan, P.; Fitger, A.; Bachmann, N.; Schäfer-Welsen, O.; Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

**Method to characterize a thermal diode in saturated steam atmosphere**

Review of Scientific Instruments 91, 065104 (2020)

Coutard, J.-G.; Berthelot, A.; Glière, A.; Lhermet, H.; Scherer, B.; Strahl, T.; Teulle, A.; Verdot, T.

**Micro PA detector: Pushing the limits of mid IR photoacoustic spectroscopy integrated on silicon**

Reed, G. T. [Ed.]: Silicon Photonics XV. Proceedings of SPIE 11285, Paper 1128513 (2020)

Kainz, C.; Schalk, N.; Tkadletz, M.; Winkler, M.; Czettl, C.

**Microstructure, mechanical and thermo-physical properties of CVD TiC<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> coatings on cemented carbide substrates grown with C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> as C feeding precursor**

Surface and Coatings Technology 394, 125868 (2020)

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

**A Mid-Infrared Dual-Comb Spectrometer for High Sensitivity Multi-Component Trace Gas Detection**

Frontiers in Optics (FiO). Part of Frontiers in Optics + Laser Science APS/DLS, Paper FW7B.2 (2020)

Lambrecht, A.; Schmitt, K.

**Mid-infrared gas-sensing systems and applications**

Tournié, E. [Ed.]: Mid-Infrared Optoelectronics, 661-715 (2020)

El-Safoury, M.; Weber, C.; Kiesewetter, O.; Hespos, Y.; Eberhardt, A.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Miniaturized photoacoustic detection of organofluorine-based refrigerants**

Journal of Sensors and Sensor Systems 9, 89-97 (2020)



Weber, C.; El-Safoury, M.; Pannek, C.; Engel, L.; Eberhardt, A.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.

**Multispectral Readout System for Detecting Tiny Color Changes of Gas Sensitive Colorimetric Dyes**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 205-206 (2020)

Reiterer, A.

**Multispektraler Laserscanner für die Tunnelinspektion im laufenden Betrieb**

Verkehr und Technik 73, 71-72 (2020)

Reiterer, A.; Dimopoulos, N.; Frey, S.; Stemmler, S.; Werner, C.

**Nachhaltige Vegetationskontrolle: Herbizide bis zum kompletten Ausstieg aus ihrer Verwendung gezielter einsetzen**

Der Eisenbahningenieur 10, 32-34 (2020)

Lyu, X.; Gao, H.; Diehle, P.; Schmitt, K.; Tarantik, K.; Wöllenstein, J.

**Niedertemperatur-Pellistoren mit Au-Pd imprägniertem mesopösem Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> als katalytische Schicht**

Technisches Messen 87, 514-522 (2020)

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

**Nonlinear interferometers for broadband mid-infrared spectroscopy**

Schunemann, P. G. [Ed.]: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XIX. Proceedings of SPIE 11264, Paper 112641D (2020)

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

**Nonlinear solutions for  $\chi^{(2)}$  frequency combs in optical microresonators**

Physical Review. A 101, 023815 (2020)

El-Safoury, M.; Weber, C.; Wöllenstein, J.; Kiesewetter, O.

**The Optimization of a Photoacoustic Refrigerant Sensor System Using a Three-Chamber Concept**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 204-204 (2020)

Hess, T.; Vogel, C.; Maier, L. M.; Barcza, A.; Vieyra, H.;

Schäfer-Welsen, O.; Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

**Phenomenological model for a first-order magnetocaloric material**

International Journal of Refrigeration 109, 128-134 (2020)

Wolf, S.; Trendle, T.; Catalan, N.; Kießling, J.; Wöllenstein, J.;

Kühnemann, F.

**Photothermal Common-Path Interferometry for Trace Gas Detection**

OSA Optical Sensors and Sensing Congress, Paper LTu3C.3 (2020)

Minet, Y.; Reis, L.; Szabados, J.; Werner, C.; Zappe, H.; Buse, K.;

Breunig, I.

**Pockels-effect-based adiabatic frequency conversion in ultrahigh-Q microresonators**

Optics Express 28, 2939-2947 (2020)

Engel, L.; Benito-Altamirano, I.; Tarantik, K.; Dold, M.; Pannek, C.;

Prades, J. D.; Wöllenstein, J.:

**Printable Colorimetric Sensors for the Detection of Formaldehyde in Ambient Air**

Electrochemical Society. ECS Meeting Abstracts 1, 2029 (2020)

Holz, P.; Pönisch, C.; Brandenburg, A.

**Quantitative Measurement of Fluorescent Layers with Respect to Spatial Thickness Variations and Substrate Properties**

Applied Spectroscopy 74, 439-451 (2020)

Tkadletz, M.; Lechner, A.; Schalk, N.; Sartory, B.; Winkler, M.;

Mitterer, C.

**Reactively sputtered TiN/SiO<sub>2</sub> multilayer coatings with designed anisotropic thermal conductivity – From theoretical conceptualization to experimental validation**

Surface and Coatings Technology 393, 125763 (2020)

Seyler, T.; Bienkowski, L.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Bertz, A.;

Carl, D.

**Robust multiwavelength digital holography using cascaded data evaluation**

OSA Imaging and Applied Optics Congress, Paper HF3G.6 (2020)

Beckmann, T.

**Schnelle optische Vermessung von Mikrostrukturen auf teller-großen Flächen**

JOT. Journal für Oberflächentechnik 60 (12), 48-51 (2020)

Trofymchuk, K.; Glembockyte, V.; Grabenhorst, L.; Close, C.;

Pfeiffer, M.; Yadaav, R.; Lalkens, B.; Behrendt, V.; Hauer, B.;

Brandenburg, A.; Acuna, G. P.; Tinnefeld, P.

**Self-Assembled Plasmonic DNA Origami Nanoantennas for Diagnostics Applications with Low-Tech Devices**

FNANO 2020, 17th Annual Conference on Foundations of Nanoscience. Self-Assembled Architectures and Devices, 96-97 (2020)

Merkle, D.; Schmitt, A.; Reiterer, A.

**Sensor evaluation for crack detection in concrete bridges**

Paparoditis, N. [Ed.]: XXIV ISPRS Congress. ISPRS Archives XLIII-B2, 1107-1114 (2020)

Winkler, M.; Rapp, D.; Mahlke, A.; Zunftmeister, F.; Vergez, M.;

Wischerhoff, E.; Clade, J.; Bartholomé, K.; Schäfer-Welsen, O.

**Small-Sized Pulsating Heat Pipes/Oscillating Heat Pipes with Low Thermal Resistance and High Heat Transport Capability**

Energies 13, 1736 (2020)

Mesaritis, G.; Symeou, E.; Delimitis, A.; Constantinou, M.;

Constantinides, G.; Jäggle, M.; Tarantik, K.; Kyratsi, T.

**Synthesis, characterization and thermoelectric performance of Mg<sub>2</sub>(Si,Sn,Ge) materials using Si-kerf waste from photovoltaic technology**

Journal of Alloys and Compounds 826, 153933 (2020)

Yurchenko, O.; Pernau, H.-F.; Engel, L.; Bierer, B.; Jäggle, M.;

Wöllenstein, J.

**Systematic Investigations on the Reaction Potential of Catalytic Sensor Materials**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 201-202 (2020)

Hess, T.; Maier, L. M.; Bachmann, N.; Corhan, P.; Schäfer-Welsen, O.;

Wöllenstein, J.; Bartholomé, K.

**Thermal hysteresis and its impact on the efficiency of first-order caloric materials**

Journal of Applied Physics 127, 075103 (2020)

Kainz, C.; Schalk, N.; Tkadletz, M.; Saringer, C.; Winkler, M.;

Stark, A.; Schell, N.; Julin, J.; Czettel, C.

**Thermo-physical properties of coatings in the Ti(B,N) system grown by chemical vapor deposition**

Surface and Coatings Technology 384, 125318 (2020)

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

**Tunable single-frequency lasing in whispering gallery resonators**

Kudryashov, A.V. [Ed.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXII. Proceedings of SPIE 11266, Paper 112660Q (2020)

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

**Ultra-fast gas spectroscopy with a dual-comb spectrometer**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 123-124 (2020)

Haupt, S.; Edler, F.; Bartel, M.; Pernau, H.-F.

**Van der Pauw device used to investigate the thermoelectric power factor**

Review of Scientific Instruments 91, 115102 (2020)

Reiterer, A.; Störk, D.; Wäschle, K.; Leydecker, A.

**Vollautomatisierte Auswertung von Mobile-Mapping-Daten mithilfe von Machine Learning**

Wunderlich, T. A. [Ed.]: Ingenieurvermessung 20. Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München 2020, 141-147 (2020)

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

**Walk-off controlled self-starting frequency combs in  $\chi^{(2)}$  optical microresonators**

Optics Express 28, 18006-18017 (2020)

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

Reindl, L. M.; Grgic, D.

**Wireless low-power warning system for the detection of flammable gases**

SMSI 2020 - Sensor and Measurement Science International. Proceedings, 121-122 (2020)

## BERICHTE 2020

Schweizer, C.; Reichenbach, R.; Butz, A.; Lienhard, J.; Herrmann, T.; Preußner, J.; Hartrott, P. von; Friedmann, V.; Wessel, A.; Thomas, A.; Augenstein, E.; Oesterlin, H.; Tlatlik, E.; Bader, B.; Graf, M.; Baumann, S.; Grau, G.; Schindler, S.; Dauner, M.; Bullinger, F.; Tiberto, D.; Klotz, U.; Basler, C.; Bertz, A.; Blug, A.; Becker, A.; Goranov, A.; Burkhardt, C.; Hartman, H.; Körte, F.

**Abschlussbericht zu »MaterialDigital«**

Schlussbericht; Laufzeit: 01.07.2018 - 30.06.2020. Feiburg/Brsg., 2020, 131 S.

Pannek, C.; Schaufelberger, B.

**Gasochrome Sensoren - Optische Gassensoren für den Einsatz in Brandmeldern zur Brandgasfrüherkennung (GAS-O-CHROM); Teilprojekt: Simulation der Brandentstehung und -ausbreitung sowie Umsetzung in ein gasochromes Sensorelement**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 15.10.2016 - 14.10.2019 Feiburg/Brsg., 2020, 62 S.

El-Safoury, M.; Weber, C.

**Gassensor-basiertes Analysesystem zur Bestimmung des Reinheitsgrades von Kältemitteln (CONNECT-R); Teilvorhaben: Design und Charakterisierung eines photoakustischen Detektors zum Nachweis von Kältemitteln**

Schlussbericht; Berichtszeitraum 01.11.2016 - 31.07.2019 Feiburg/Brsg., 2020, 37 S.

Bauersfeld, M.-L.; Seiberlich, I.; Hespos, Y.

**Messung und Kontrolle der Reifezustände frischer Früchte in Lagerhallen (E! 9860 FRESHFRUITLAB); Teilprojekt: Entwicklung und Charakterisierung von low-power Gassensorarrays für die Lebensmittelüberwachung**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.11.2015 - 31.07.2019 Feiburg/Brsg., 2020, 26 S.

Engel, L.; Tarantik, K.; Wöllenstein, J.

**Smartphone-Dosimeter zur Detektion toxischer Gase (E! 11453 SnapGas); Teilprojekt: Druckbare, kolorimetrische Indikatoren für die Detektion toxischer Gase**

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.11.2017 - 31.10.2019 Feiburg/Brsg., 2020, 29 S.

**Bauersfeld, M.-L.; Hespos, Y.**

Verbundvorhaben: Miniaturisiertes IR-Spektrometer zur schnellen Erkennung explosiver Gase bei unbekannter Gefahrenlage (MIREX); Teilvorhaben: Schnelle Halbleiter-Fotodiode für den mittleren Infrarot-Bereich

Schlussbericht; Berichtszeitraum: 01.06.2016 - 31.08.2019 Feiburg/Brsg., 2020, 17 S.



## ERTEILTE PATENTE 2020

Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Jetter, V.; Schütz, J.

**Vorrichtung zur Partikelanalyse**

DE 102017104801 B4

Kießling, J.; Leidinger, M.; Wolf, S.; Kühnemann, F.; Trendle, T.

**Vorrichtung und Verfahren zum Nachweisen eines Stoffes**

DE 102018115420 B4

Bartholome, K.; König, J.

**Klimatisierungseinrichtung mit zumindest einem Wärmerohr, insbesondere Thermosiphon**

CN 3723767

Brandenburg, A.

**Vorrichtung und Verfahren zum Erfassen von Ablagerungen an einer Innenseite einer Wand eines Behältnisses oder Rohres**

DE 102016109819 B4

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

**Verfahren und Vorrichtung zum optischen Vermessen eines ersten Oberflächenabschnitts eines Prüflings**

DE 102018114022 B4

Rojtberg, P.; Gorschlüter, F.; Bockholt, U.; Bertz, A.; Carl, D.

**System und Verfahren zum Prüfen der Form eines Prüfobjekts**

EP 3640582 B1

Fetzner, S; Ulmer, U.

**Vorrichtung und Verfahren zur Bestimmung der Konzentration zumindest eines Gases in einem Probengasstrom mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie**

DE102014102050 B4

Reiterer, A.; Schwarzer, S.

**Bildgebende Vorrichtung mit flugfähiger Tragevorrichtung**

DE 102014211050 B4

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

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

EP 3443378 B1

## DOKTORARBEITEN 2020

Seyler, T.

**Digitale Holographie in der Werkzeugmaschine**

Norderstedt, Books on Demand, 2020  
[Kaiserslautern, TU, Diss., 2020]

Schiller, A.

**Messung der Topographie bewegter Objekte mittels digitaler Holographie**

Norderstedt, Books on Demand, 2020  
[Freiburg, Univ., Diss., 2020]

Hess, T.

**Modellierung einer magnetokalorischen Wärmepumpe mit thermischen Dioden**

Aachen, Shaker-Verlag, 2020  
[Freiburg, Univ., Diss., 2020]

Holz, P.

**Quantitative bildgebende Oberflächenanalyse mittels Multiparameter-Fluorometrie**

[Ilmenau, TU, Diss., 2020]

## UNSERE PARTNER

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

### Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces

Der Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces bündelt die wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen der Fraunhofer-Gesellschaft in den Themenfeldern Optik, Photonik, Laser- und Oberflächentechnik. In den Instituten des Verbunds forschen über 1900 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf exzellentem wissenschaftlichen Niveau, um komplexe technologische Fragen aus Industrie und Wirtschaft mit Blick auf die konkrete Anwendung zu lösen.

Für die Industrie sind die Institute nicht nur Innovationspartner, sondern in Kooperation mit Universitäten auch eine Quelle für den wissenschaftlich-technischen Nachwuchs und damit eine Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Vorsitzender des Verbunds ist Prof. Dr. Karsten Buse, die Geschäftsstelle leitet Dr. Heinrich Stülpnagel.  
[www.light-and-surfaces.fraunhofer.de](http://www.light-and-surfaces.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Gesellschaft

- Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces
- Fraunhofer-Allianz Bau
- Fraunhofer-Allianz Food Chain Management
- Fraunhofer-Allianz Verkehr
- Fraunhofer Geschäftsbereich Reinigung
- Fraunhofer Geschäftsbereich Vision

### Deutschland

- AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V.
- Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA
- CNA Center für Transportation & Logistics Neuer Adler e.V., Cluster Bahntechnik
- Competence Center for Applied Security Technology e.V. (CAST)
- Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO)
- Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF)
- Deutscher Hochschulverband (DHV)
- Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V. (DHyG)

- Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)
- Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V. (DTG)
- Draht-Welt Südwestfalen – netzwerkdraht e.V.
- Forum Angew. Informatik und Mikrosystemtechnik e.V. (FAIM)
- Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh)
- Green City Cluster Freiburg
- microTEC Südwest e.V.
- Nano-Zentrum Euregio Bodensee e.V. (NEB)
- Photonics BW e.V. – Innovations-Cluster für Optische Technologien in Baden-Württemberg
- Strategische Partner – Klimaschutz am Oberrhein e.V.
- VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)
- VDSI – Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e.V.

### International

- ETS – European Thermoelectric Society
- ITS – International Thermoelectric Society
- OSA – The Optical Society



## FORSCHEN IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

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

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

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 75 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 29 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon fallen 2,4 Milliarden Euro auf den Leistungsbe- reich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwi-

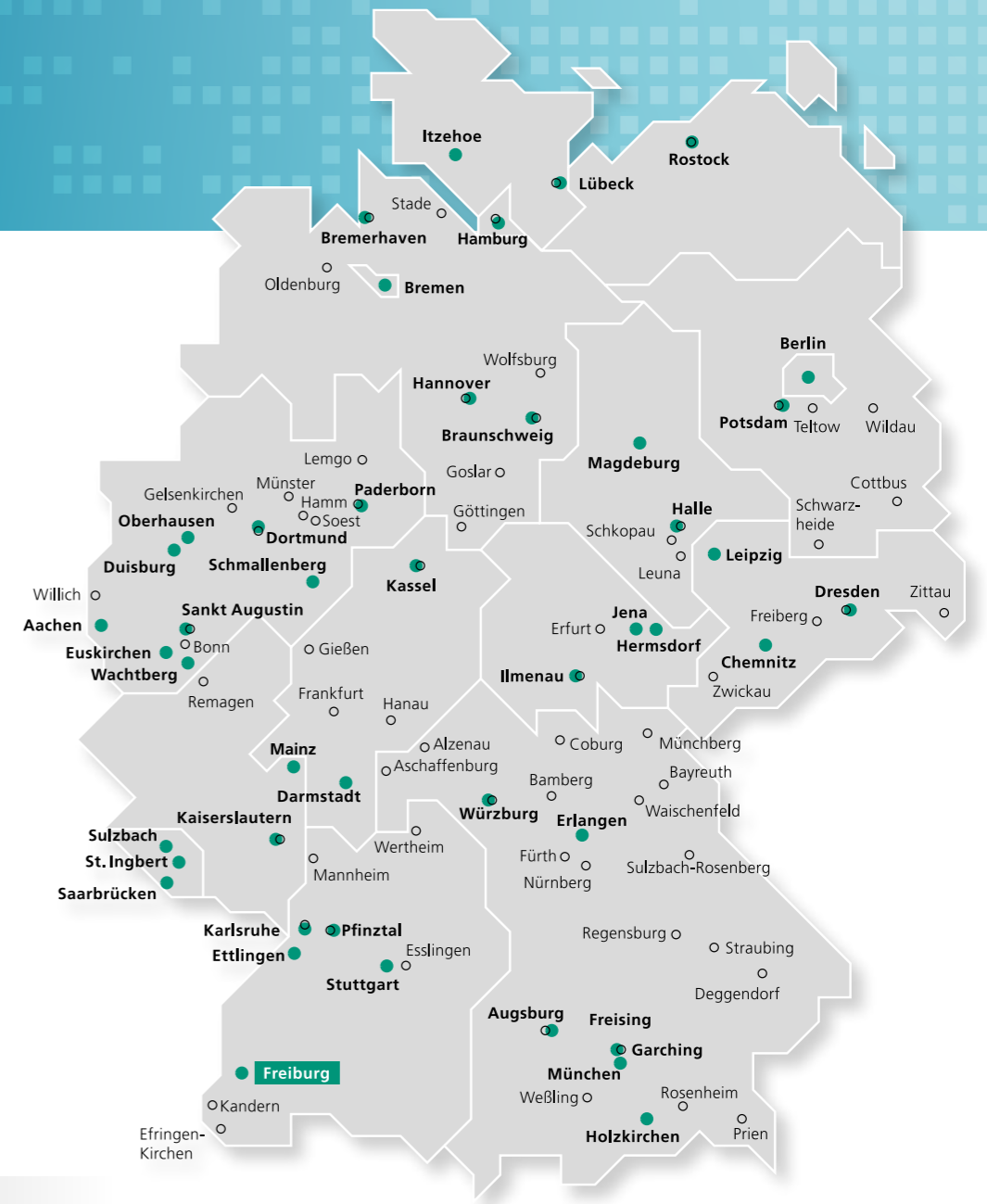
ckeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft wichtig werden.

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

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

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)



### Fraunhofer IPM

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

Telefon +49 761 8857-0  
Fax +49 761 8857-224  
info@ipm.fraunhofer.de

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

**Hauptstandorte** ●  
Nebenstandorte ○



### **Anschrift der Redaktion**

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

Telefon + 49 761 8857 - 0  
Fax + 49 761 8857 - 224  
info@ipm.fraunhofer.de

### **Verantwortlicher Redakteur**

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

### **Redaktion**

Mirja Eschermann, Holger Kock, Anja Strobel

### **Layout und Gestaltung**

Adam Lipinski

### **Druck**

safer-print GbR, 97340 Marktbreit

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

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der Redaktion  
erforderlich.

### **Bleiben Sie in Kontakt**

Besuchen Sie unsere Homepage:  
**[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)**

Melden Sie sich für unseren Newsletter an:  
**[www.ipm.fraunhofer.de/info](http://www.ipm.fraunhofer.de/info)**

Folgen Sie uns auf:



### **Bildquellen**

Marc Müller (4 Mitte, 22 oben und Mitte)  
Christoph Werner/Fraunhofer IPM (5 links, 44)  
Marc Verguez, Roland Binniger/Fraunhofer IPM (5 rechts,  
61 unten)  
Kai-Uwe Wudtke/Fraunhofer IPM (13)  
peterschreiber.media/shutterstock.com (14 unten)  
Andreas Blug/Fraunhofer IPM (15 unten, 33 unten)  
Uwe Moosburger/Bayernwerk AG (21 oben)  
Deutsche Telekom Technik GmbH (24 unten)  
Yanfeng Zhang/Jier North America (29 Mitte)  
Aksenenko Olga/Shutterstock.com (31 Mitte)  
Tobias Seyler/Fraunhofer IPM (33 oben und unten)  
stockphoto mania/Shutterstock.com (39 oben)  
Rainer Bez/Fraunhofer IPA (Foto) und Stefanie Irrler/  
Fraunhofer IMW (Grafik) (39 unten)  
shutterstock.com/Bearbeitung: Fraunhofer IPM (41 oben)  
Andi11/shutterstock.com (41 unten)  
christian42/Fotolia.com (46)  
Christian Weber/Fraunhofer IPM (49 Mitte)  
Thomas Strahl/Fraunhofer IPM (51 Mitte)  
Eric Maier/Fraunhofer IPM (51 unten)  
Miguel Dufner/Fraunhofer IPM (53 oben)  
Benedikt Bierer/Fraunhofer IPM (53 unten)  
Metamaterial Inc. (55 oben)  
Martin Bogner/Humboldt-Universität zu Berlin (55 unten)  
Fraunhofer IPM (alle anderen Bilder und Grafiken)

Dieser Bericht wurde mit mineralölfreien Druckfarben  
auf Recycling-Papier gedruckt.

ISSN 2570-1916

