



**2016**  
**2017**  
JAHRESBERICHT

<< **Titelbild** Prozessmesstechnik für die Getränkeindustrie: Abgeschwächte Totalreflexion (Attenuated Total Reflection ATR) eignet sich als Verfahren zur Inline-Analytik von Flüssigkeiten. Das in den ATR-Kristall eingekoppelte Licht wird an der Kristallgrenzfläche, die mit der Flüssigkeit in Kontakt ist, total reflektiert. Über das dabei entstehende evaneszente Feld an der Kristalloberfläche wechselwirkt die Strahlung mit der Flüssigkeit. Ein IR-Detektor nimmt die vollständigen Spektralverläufe in ausgewählten Bereichen auf (mehr ab Seite 42).



## »Stark vernetzt am Wissenschaftsstandort Freiburg – zum Vorteil für unsere Kunden«

< Prof. Dr. Karsten Buse,  
Institutleiter

### Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

gemeinsam ist man stärker – dieses Motto wird bei Fraunhofer IPM gelebt: Unsere jüngste Mitarbeiterbefragung hat ergeben, dass außergewöhnlich hohe Motivation und Einsatzbereitschaft vorhanden sind, um im Team die bestmögliche Lösung und Leistung für unsere Partner und Kunden zu erbringen. Dieses »gemeinsam« gilt auch über die Grenzen unseres Instituts hinaus: In Freiburg treiben wir die Vernetzung aller Akteure auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung voran. Das gilt insbesondere für die Kooperation mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Fraunhofer IPM hat mittlerweile drei Professuren mit Leitungsfunktion gemeinsam mit der Universität Freiburg ins Leben gerufen und besetzt. Dabei erstattet die Fraunhofer-Gesellschaft der Universität die Personalaufwendungen; umgekehrt hat der Berufene ein deutlich reduziertes Lehrdeputat, jedoch sämtliche Rechte eines Universitätsprofessors. Diese Konstruktion hilft beiden Partnern: An der Universität werden Lehre und Forschung durch die Arbeitsgruppen der Fraunhofer-Professoren verstärkt. Auch werden exzellente Studierende durch neue Angebote und Spezialisierungsmöglichkeiten angezogen. Für unser Institut ergeben sich vielfältige, enge Kooperationsmöglichkeiten mit angesehenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Kontakte zu hervorragenden Nachwuchskräften.

### Drei Professuren an der Universität Freiburg

Neu eingerichtet haben wir die unbefristete W3-Professur »Monitoring von Großstrukturen« am neuen »Institut für Nachhaltige Technische Systeme« an der Technischen Fakultät. Auf diese Professur wurde Dr. Alexander Reiterer berufen, der bei Fraunhofer IPM die Abteilung »Objekt- und Formerfassung« leitet. In seiner Universitätsarbeitsgruppe wird es insbesondere um die Datenverarbeitung bei Infrastrukturmessen-

sungen gehen. Sie helfen unter anderem, den Unterhalt von Bahnstrecken, Straßen, Tunneln und Brücken zu optimieren und Risiken frühzeitig zu erkennen.

Im Rahmen der Professur »Gassensoren« werden neue Sensorprinzipien und -materialien erforscht und entwickelt. Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein leitet diese Arbeiten am »Institut für Mikrosystemtechnik« der Technischen Fakultät und ist gleichzeitig Leiter der Abteilung »Gas- und Prozesstechnologie« bei Fraunhofer IPM. Ich freue mich sehr, dass wir diese erfolgreiche Zusammenarbeit jetzt auf W3-Niveau heben konnten und nun ohne Befristung fortführen. Und natürlich gibt es auch meine Professur für »Optische Systeme«, ebenfalls am »Institut für Mikrosystemtechnik«. Neuartige nichtlinear-optische durchstimmbare Laserlichtquellen und auch Sensoren stehen hier im Fokus. An der Technischen Fakultät ist zudem Dr. Albrecht Brandenburg als Privatdozent in der Lehre engagiert, und dies bereits seit gut 15 Jahren. Außerdem plant Fraunhofer IPM, sich am neuen Master-Studiengang »Applied Physics« mit Praktikumsversuchen und einer Lehrveranstaltung, getragen durch unseren Kollegen Priv.-Doz. Dr. Frank Kühnemann, zu beteiligen. Fraunhofer IPM hat sich in den vergangenen Jahren immer stärker mit diversen Instituten der Universität Freiburg vernetzt. Kooperationspartner in den Ingenieurwissenschaften, der Informatik, der Physik, der Mathematik, der Chemie, der Hydrologie und in den Forstwissenschaften sind zu nennen. So gelingt es uns, technische Vorsprünge zu halten und unseren Kunden aus der Wirtschaft auch künftig global wettbewerbsfähige Spitzenleistungen zu bieten. Ausgewählte Projekte, wie sie in diesem Bericht beschrieben werden, stehen hierfür beispielhaft.

Viel Freude beim Lesen und einen anregenden Austausch mit Fraunhofer IPM wünscht Ihnen Ihr

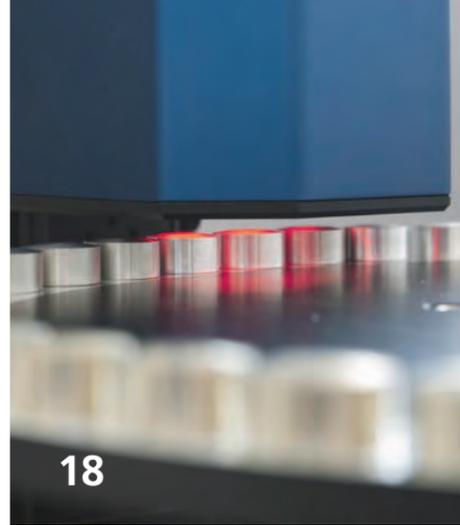
Karsten Buse

- ▶ PRODUKTIONSKONTROLLE
- ▶ OBJEKT- UND FORMERFASSUNG
- ▶ GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE
- ▶ THERMISCHE ENERGIEWANDLER





9



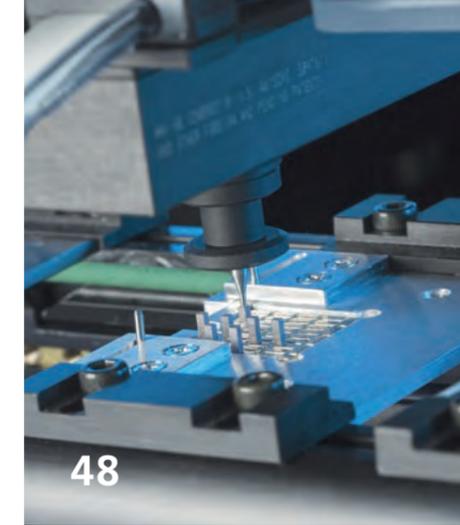
18



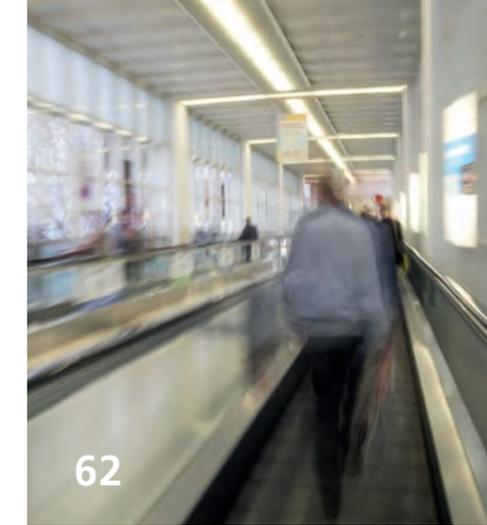
28



34



48



62

# INHALT

- 3 EDITORIAL
- 6 ORGANISATION
- 8 BETRIEBSHAUSHALT | PERSONAL
- 9 INTERN
- 12 MAGAZIN
- 16 INTERVIEW

## 18 PRODUKTIONSKONTROLLE

---

- 20 **INLINE-MESSTECHNIK**  
Die Gruppe im Überblick
- 22 **INLINE-MESSTECHNIK**  
Identifizieren ohne zu markieren – eindeutig und fälschungssicher
- 24 **OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK**  
Die Gruppe im Überblick
- 26 **OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK**  
Bildgebende Beölungsmessung – automatisch und in Echtzeit

## 28 OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

---

- 30 **LASER SCANNING**  
Die Gruppe im Überblick
- 32 **LASER SCANNING**  
Rein rechnerisch: Objekte automatisiert erkennen

## 34 GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

---

- 36 **INTEGRIERTE SENSORSYSTEME**  
Die Gruppe im Überblick
- 38 **INTEGRIERTE SENSORSYSTEME**  
Schwefel-Messsystem für den Einsatz auf hoher See
- 40 **SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK**  
Die Gruppe im Überblick
- 42 **SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK**  
Prozessmesstechnik für die Getränkeindustrie
- 44 **THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME**  
Die Gruppe im Überblick
- 46 **THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME**  
Materialien charakterisieren bei hohen Temperaturen

## 48 THERMISCHE ENERGIEWANDLER

---

- 50 **KALORIK UND THERMOELEKTRIK**  
Die Gruppe im Überblick
- 52 **KALORIK UND THERMOELEKTRIK**  
Effiziente elastokalorische Wärmepumpen
- 54 **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT**
- 56 **PARTNER | NETZWERKE**
- 57 **PUBLIKATIONEN**
- 61 **DOKTORARBEITEN | PATENTE**
- 62 **MESSEN | VORSCHAU**
- 64 **VERANSTALTUNGEN UND WORKSHOPS**
- 65 **IMPRESSUM**

# ORGANISATION

## INSTITUTSLEITUNG



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



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

## REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEIT SARBEIT



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



**Kompetenz- und Geschäftsfeldentwicklung**  
Dr. Armin Lambrecht  
T +49 761 8857 - 122  
armin.lambrecht@ipm.fraunhofer.de



**Qualitätsmanagement**  
Dr. Arno Feißt  
T +49 761 8857 - 288  
arno.feisst@ipm.fraunhofer.de



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

## PRODUKTIONSKONTROLLE



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



**Stellv. Abteilungsleiter**  
PD Dr. Albrecht Brandenburg  
T +49 761 8857 - 306  
albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de



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



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

## OBJEKT- UND FORMERFASSUNG



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



**Stellv. Abteilungsleiter**  
Harald Wölfelschneider  
T +49 761 8857 - 161  
harald.woelfelschneider@ipm.fraunhofer.de



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

## GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE



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



**Stellv. Abteilungsleiter**  
Gerd Sulz  
T +49 761 8857 - 293  
gerd.sulz@ipm.fraunhofer.de



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



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



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

## THERMISCHE ENERGIEWANDLER



**Abteilungsleiter**  
N.N.



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



**Kalorik und Thermoelektrik**  
Dr. Kilian Bartholomé  
T +49 761 8857 - 238  
kilian.bartholome@ipm.fraunhofer.de

## TECHNISCHE DIENSTE



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



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



**Materialien**  
Dr. Karina Tarantik  
T +49 761 8857 - 730  
karina.tarantik@ipm.fraunhofer.de



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

## VERWALTUNG UND IT



**Verwaltungsleiter**  
(ab 1. Juli 2017)  
Wolfgang Oesterling  
T +49 761 8857 - 120  
wolfgang.oesterling@ipm.fraunhofer.de



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



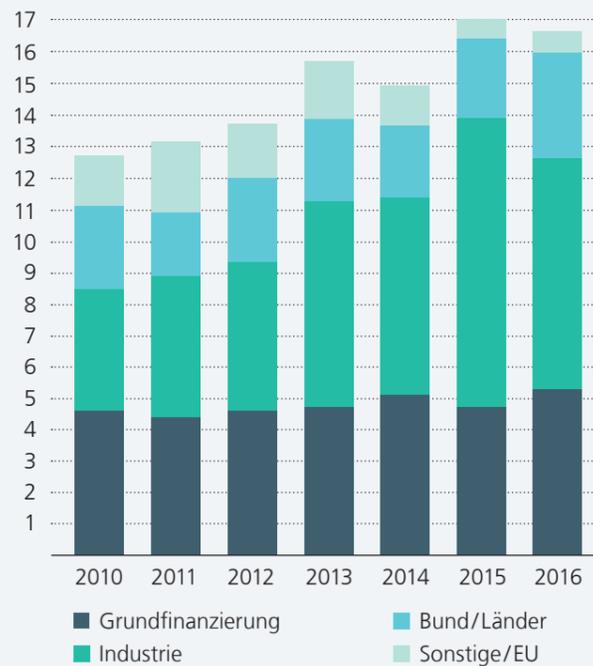
**IT**  
Gerd Kühner  
T +49 761 8857 - 226  
gerd.kuehner@ipm.fraunhofer.de



**Personal**  
Anneliese Macalister-Smith  
T +49 761 8857 - 112  
anneliese.macalister-smith@ipm.fraunhofer.de



Betriebshaushalt 2010 bis 2016 in Mio. Euro

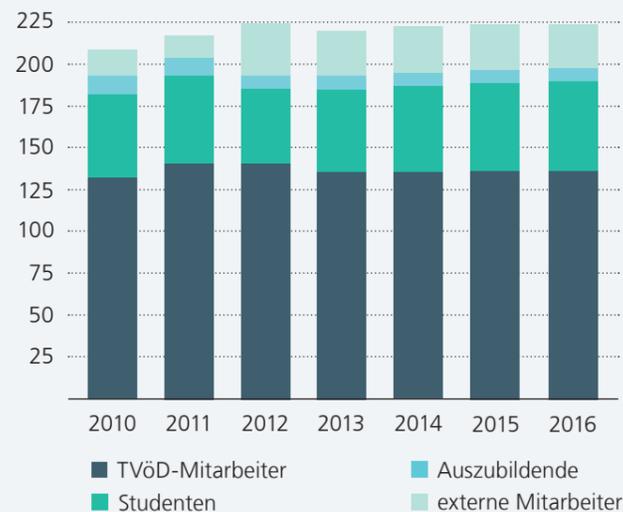


## DIE ZAHLEN

### Betriebshaushalt

Im Jahr 2016 betrug der Betriebshaushalt von Fraunhofer IPM 16,7 Millionen Euro und ist damit weiter auf hohem Niveau. Der Betriebshaushalt setzt sich zusammen aus Industrieerlösen, öffentlich geförderten Projekten und der Grundfinanzierung. Der Anteil externer Finanzierungsgelder, bestehend aus externen öffentlichen Geldern und Industrieerlösen, lag 2016 bei 69,1 Prozent bzw. 11,6 Millionen Euro. Die Industrieerlöse machen mit 7,4 Millionen Euro einen Anteil von 44 Prozent am Betriebshaushalt aus.

Personalentwicklung 2010 bis 2016



### Personal

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich die Mitarbeiterzahl nicht verändert. Insgesamt 139 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren 2016 bei Fraunhofer IPM in Festanstellung beschäftigt. Am Institut arbeiten rund 55 Studenten und Berufseinsteiger, davon 45 Diplomanden, Master- und Bachelorstudenten sowie 9 Auszubildende. Zusätzlich sind etwa 20 externe Mitarbeiter sowie zahlreiche Praktikanten und Hilfskräfte am Fraunhofer IPM tätig. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verteilen sich auf drei grundlegende Bereiche: Rund 50 Prozent der Beschäftigten arbeiten als wissenschaftliche Mitarbeiter, 35 Prozent als Ingenieure und technische Mitarbeiter sowie 15 Prozent als Angestellte im Bereich Infrastruktur und Werkstatt.

*Abschied nach 32 Jahren: Dr. Heinrich Höfler (rechts) erhält den Fraunhofer-Taler von Institutsbetreuer Dr. Patrick Hoyer.*

### VERABSCHIEDUNG VON DR. HEINRICH HÖFLER

Mit einem Ehrensymposium am 19. Januar 2017 wurde der langjährige stellvertretende Institutsleiter Dr. Heinrich Höfler in den Ruhestand verabschiedet.

Als wissenschaftlicher Mitarbeiter kam der promovierte Physiker 1984 ans Institut. Fünf Jahre später wurde er Abteilungsleiter, 1995 dann stellvertretender Institutsleiter. In beiden Positionen prägte er maßgeblich den Charakter des Instituts und der von ihm geleiteten Geschäftsfelder. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Laserscanner wurde Heinrich Höfler 2012 mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis ausgezeichnet. Institutsleiter Karsten Buse erläuterte in einem Vortrag die »Höflerschen Regeln«, auf denen letztendlich der Erfolg von Fraunhofer IPM basiert. Ehemalige Weggefährten aus der Industrie und Vertreter der Fraunhofer-Gesellschaft illustrierten in ihren Vorträgen die Relevanz von Höflers Wirken. Institutsbetreuer Dr. Patrick Hoyer überreichte ihm im Namen des Fraunhofer-Vorstands den Fraunhofer-Taler und dankte für sein erfolgreiches Wirken über mehr als drei Jahrzehnte bei Fraunhofer IPM.

### NEUES »ZENTRUM FÜR MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG« IN KAISERSLAUTERN

Die Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung« ist mit Beginn des Jahres 2017 Teil des Fraunhofer ITWM.

Im neuen »Zentrum für Materialcharakterisierung und -prüfung« sollen künftig Kompetenzen auf den Gebieten Messtechnik und Datenanalyse gebündelt werden. Die Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung« mit dem Forschungsschwerpunkt Terahertz-Messtechnik war 2005 von Fraunhofer IPM in Kaiserslautern gegründet worden. Seither wurde dort die noch junge Terahertz-Technologie zur Industriereife entwickelt, unter

anderem mit Systemen zur Schichtdickenmessung. Kernkompetenz des Fraunhofer ITWM sind hocheffiziente Algorithmen zur numerischen Lösung physikalischer Fragestellungen. Die Integration ins Fraunhofer ITWM am Standort Kaiserslautern ist sinnvoll aufgrund der räumlichen Nähe und weil neben der Messtechnik die Dateninterpretation eine zunehmend große Rolle spielt. Das Land Rheinland-Pfalz, die Fraunhofer-Gesellschaft und Fraunhofer IPM unterstützen den Integrationsprozess in den nächsten drei Jahren zusätzlich durch ein Förderprojekt in Höhe von 1,6 Millionen Euro.

### MATERIALTECHNOLOGIEN GEBÜNDELT

In der neu geschaffenen Gruppe »Materialien« sind ab 2017 sämtliche Kompetenzen auf dem Gebiet der Entwicklung, Prozessierung und Charakterisierung von Materialien gebündelt.

Das Team unter der Leitung von Dr. Karina Tarantik bietet den vier Fachabteilungen und unseren Industriekunden umfangreiche Services bei der Synthese, Bearbeitung, Charakterisierung und Analyse funktionaler Materialien. Dem Team steht neben chemischen Laboren mit erstklassiger Ausstattung ein 400 m<sup>2</sup> großer Rein-



*Ein fünfköpfiges Team um Dr. Karina Tarantik entwickelt, prozessiert und charakterisiert funktionale Materialien.*

raum bis Klasse 100/ISO 5 zur Verfügung. Organisatorisch ist die Gruppe Teil der Technischen Dienste.



## PROFESSUREN AN DER UNIVERSITÄT FREIBURG

Fraunhofer IPM ist bereits seit Jahren mit zwei Professuren am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg vertreten. Im April 2017 trat zusätzlich Dr. Alexander Reiterer am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) die von Fraunhofer IPM zusammen mit der Universität Freiburg neu eingerichtete Professur für das »Monitoring von Großstrukturen« an. Im Rahmen dieser Professuren werden Forschungsarbeiten durchgeführt, deren Ergebnisse zusammen mit Fraunhofer IPM der Anwendung zugeführt werden.

### INSTITUT FÜR MIKROSYSTEMTECHNIK – IMTEK

#### Professur für Optische Systeme Prof. Dr. Karsten Buse

Forschungsschwerpunkte sind nichtlinear-optische Materialien und optische Resonatoren. Ein Ziel ist die Miniaturisierung durchstimmbarer Laserlichtquellen, vom ultravioletten bis zum mittelinfraroten Spektralbereich. Die gemeinsam mit weiteren Optik-Professuren ins Leben gerufene Spezialisierungsmöglichkeit »Photo-

nics« wurde in den Studienplan für den Masterstudiengang Mikrosystemtechnik aufgenommen.

#### Professur für Gassensoren Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

Im Rahmen der Professur werden gassensitive Materialien, Sensoren und Sensorsysteme entwickelt. Im Zentrum der Forschung stehen miniaturisierte,

energiesparende Gasmesssysteme. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung preisgünstiger und energiesparender mikrosystemtechnischer Sensoren.



### INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME – INATECH

#### Professur für Monitoring von Großstrukturen Prof. Dr. Alexander Reiterer

Forschungsschwerpunkt sind die Inspektion und Überwachung künstlicher und natürlicher Objekte wie etwa Ingenieurbauwerke, Rutschhänge oder

großflächige Vegetation. Dazu werden neuartige Sensorkonzepte erarbeitet und implementiert. Die Forschungsaktivitäten umfassen Strategien zur Datenanalyse und -interpretation inklusive der Verknüpfung von Einflussparametern, verursachenden Kräften und gemessenen Veränderungen sowie die

Entwicklung und Umsetzung kompletter Systemketten – von der Datenakquisition bis zur Datenauswertung.



## UNSER KURATORIUM

Ein engagiertes, kompetentes und breit aufgestelltes Kuratorium berät und unterstützt Fraunhofer IPM bei strategischen Fragen und Weichenstellungen für die Zukunft.

#### Vorsitzender

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

Prof. Dr. Thomas Graf  
Institut für Strahlwerkzeuge IFSW  
der Universität Stuttgart

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

#### Mitglieder

Dr. Bernd Dallmann  
Freiburg Wirtschaft Touristik und  
Messe GmbH & Co. KG

Dr. Ehrentraud Graw  
Ministerium für Finanzen und  
Wirtschaft Baden-Württemberg

Dr. Volker Nussbaumer  
Deutsche Telekom AG

Dr. Christian Schmitz  
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

Dr. Hans Eggers  
Bundesministerium für Bildung  
und Forschung

Siegfried Groß  
Keysight Technologies  
Deutschland GmbH

Dr. Knut Siercks  
Karl-Storz GmbH & Co. KG

Gerhard Kleinpeter  
BMW AG

Prof. Dr. Michael Totzeck  
Carl Zeiss AG



## NEUBAU: GRUNDSTEINLEGUNG 2017

Bei der Planung des Institutsneubaus auf dem Campus der Technischen Fakultät wurden 2016 einige wichtige Hürden genommen. Die Genehmigungsplanung als Grundlage für den Bauantrag wurde

*Der 6500 m<sup>2</sup> große Institutsneubau entsteht auf dem Campus der Technischen Fakultät der Universität Freiburg.*

fertiggestellt und bei den Zuwendungen eingereicht. Die Genehmigung des Bauantrags erfolgte im ersten Quartal 2017. Derzeit laufen die Arbeiten an der Ausführungsplanung auf Hochtouren. Der Beginn der Erd- und Rohbauarbeiten ist für April bzw. Mai 2017 geplant. Die Grundsteinlegung wird am 4. Juli 2017 stattfinden. Das Gebäude soll voraussichtlich im ersten Quartal 2020 bezogen werden.

## MOLAS-WORKSHOP: ERFOLGREICHE NEUAUFLAGE

Im November 2016 besuchten mehr als einhundert Teilnehmerinnen und Teilnehmer den Technologie-Workshop zum Thema mobiles Laserscanning.

Damit gelang dem Team um Prof. Dr. Alexander Reiterer eine erfolgreiche Neuauflage der Veranstaltung, die erstmalig 2014 stattfand. Neben wissenschaftlichen Vorträgen zu den Themenbereichen Kalibrierung, Anwendungen, Datenverarbeitung und Visualisierung richteten zwei Keynote-Vorträge den Blick auf die Erwartungen und Anforderungen der Industrie: Welche Rolle Laserscanner beim Thema autonomes Fahren spielen werden und welche Herausforderungen zu

bewältigen sind, erläuterte Dr. Matthias Butenuth von der IAV GmbH, einem weltweit tätigen Dienstleister für Automotive Engineering. Dr. Jürgen Sturm von Google Deutschland gab Einblick in Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Messdaten anhand der Technologie-Plattform Google-Tango. Der nächste MoLaS-Workshop ist für 2018 geplant.

*Mehr als 100 Teilnehmer lauschten den insgesamt dreizehn Vorträgen zum Thema »Mobiles Laserscanning«. Zwischen-durch war Zeit für Diskussionen zwischen Vertretern von Forschung und Industrie.*



## MESSTECHNIK IN DER INDUSTRIE 4.0



*Messtechnik spielt eine wichtige Rolle in der Industrie 4.0.*

Gemeinsam mit dem Spitzencluster microTEC Südwest organisierte Fraunhofer IPM im September 2016 einen Workshop zu den Themen Messtechnik und 100-Prozent-Kontrolle im Hinblick auf Industrie 4.0.

Wie lassen sich Produktionsprozesse intelligent vernetzen? Welche Rolle kommt dabei der Messtechnik zu? Fragen wie diese erörterten rund 40 Teilnehmer aus Industrie und Forschung im Rahmen des Workshops. Ein am Fraunhofer IPM entwickeltes markierungsfreies Track & Trace-Verfahren stand dabei beispielhaft für ein auf die Anforderungen der Industrie 4.0 zugeschnittenes Messsystem. Das Verfahren wurde im Rahmen des Wettbewerbs »100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg« ausgezeichnet, der von Workshops und Veranstaltungen begleitet wird.

## OPTISCHE SENSORIK IN DER MEDIZINTECHNIK

An die 40 Expertinnen und Experten waren im Januar 2016 am Institut zu Gast, um über optische Analyseverfahren in der Medizintechnik zu diskutieren. Acht Referenten gaben einen Überblick über technologische Trends in der Medizintechnik – mit Themen aus der Endoskopie, der Oberflächenanalytik und der spektroskopischen Diagnostik. Erörtert wurden innovative Medizintechnik-Produkte, Möglichkeiten der optischen Diagnostik, neue Geschäftsmodelle und mögliche Kooperationen. Die Veranstaltung war Teil der Reihe »Spectaris Wissensraum« und wurde gemeinsam mit dem Industrieverband SPECTARIS sowie der Fachgruppe Photonics der schweizerischen Netzwerk-Plattform SwissMEM organisiert.



*Die Medizintechnik profitiert von der optischen Analyse, so die einhellige Meinung der Workshop-Teilnehmer.*

## SCHÜLERPROJEKT: 3D-MIKROSKOPIE FÜR ZUHAUSE



Fraunhofer IPM und Schülerinnen und Schüler des »Freiburg Seminars« entwickeln gemeinsam ein digital-holographisches Mikroskop für Open Science.

Im Rahmen des auf drei Jahre angelegten Projekts »HolMOS« entsteht ein preisgünstiges Mikroskop für den privaten Gebrauch, das 3D-Darstellungen von Objekten ermöglicht. Basis

### OPEN INNOVATION

HolMOS beruht auf dem Konzept einer »Open Innovation«. Dabei tauschen sich Nutzer über eine Internetplattform aus und arbeiten an der Weiterentwicklung des Produkts mit. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme »Open Photonik« gefördert.

*Schülerinnen und Schüler arbeiten aktiv am Aufbau und an der Weiterentwicklung eines digital-holographischen 3D-Mikroskops mit.*

ist ein herkömmliches Schüler-Mikroskop, das durch eine Digitalkamera und eine einfache Laserquelle ergänzt wird. Die Schülerinnen und Schüler testen das Mikroskop, erarbeiten eine Bauanleitung und entwickeln eine Anwenderplattform im Internet. Der Spieleverlag Kosmos ist assoziierter Projektpartner und prüft die Integration in seine Produktreihe von Experimentierkästen. Zum Projektauftritt waren im Oktober rund 25 Schülerinnen und Schüler des »Freiburg Seminars« zu Gast am Institut. Das »Freiburg Seminar« ist eine Einrichtung für besonders befähigte und interessierte Schülerinnen und Schüler im Regierungsbezirk Freiburg.

## GIRLS' DAY



Einen Computer selber bauen, im Chemielabor mit Nanopartikeln hantieren oder Leiterbahnen auf einen Chip aufbringen – Tätigkeiten wie diese standen auf dem Programm beim Girls' Day im April 2016.

Zum 16. Mal in Folge gab Fraunhofer IPM 15 Mädchen ab der 8. Klasse Gelegenheit, aktiv an altersgerecht formulierten Fragestellungen mitzuarbeiten und so Einblick in Labore und Werkstätten eines Forschungsinstituts zu erhalten. Rund zehn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler stellten das Programm zusammen und begleiteten die Schülerinnen durch den Tag.



Im Reinraum erstellten die Schülerinnen Mikrostrukturen für einen Chip – in reinraumtauglicher Kleidung.

## REGIOWIN: FORSCHUNG ZU »VERNETZTEN ENERGIEEFFIZIENTEN INDUSTRIEPARKS«



**Insgesamt 1,4 Mio. Euro erhalten Fraunhofer IPM und ISE für drei Projekte zur Erforschung der technologischen Grundlagen zukünftiger Energiesysteme.**

Im Rahmen des RegioWIN-Leuchtturmprojekts »Vernetzte energieeffiziente Industrieparks« werden drei Teilprojekte gefördert: Im Projekt »Thermoelektrik-BHKW« werden Blockheizkraftwerke mit thermoelektrischen Generatoren und Wärmetauschern ausgerüstet, um Abwärme effizienter zu nutzen. Im Fokus des Projekts »Gas-Effizienz« steht Online-Messtechnik zur Analyse regenerativ erzeugter Gase. Der »SmartBaden-Monitor« von Fraunhofer ISE soll

Staatsekretärin Katrin Schütz überreicht die Förderbescheide für das RegioWIN-Projekt an Prof. Karsten Buse (r.) und Dr. Andreas W. Bett vom Fraunhofer ISE (l.).

Gebäudeeffizienz optimieren und automatisierte Lastprognosen ermöglichen. Der Wettbewerb startete im Februar 2013 mit dem Ziel, die Regionalentwicklung in Baden-Württemberg voranzutreiben. Katrin Schütz, Staatssekretärin im Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau, übergab die Förderbescheide im Rahmen eines Besuchs bei Fraunhofer IPM im September 2016.

## KONZEPT FÜR BRANDGASSENSOREN AUSGEZEICHNET

Für ihre Grundlagenforschung zu Brandgasensoren wurde Dr.-Ing. Carolin Pannek mit dem Hugo-Geiger-Preis 2016 ausgezeichnet. In ihrer Doktorarbeit entwickelte sie ein neuartiges Konzept für gasochrome Brandgasensoren, das die Jury als zweitbeste Abschlussarbeit innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft auszeichnete. Mit ihrer Arbeit legte die Wissenschaftlerin die Grundlagen für einen wellenleiter-basierten gasochromen Sensor. Damit stellt sie erstmalig eine Alternative zu herkömmlichen Halbleiter-Gassensoren in Aussicht, die als Brandgasensoren ungeeignet sind. Sensoren nach diesem Prinzip wären nicht nur hochempfindlich

und selektiv, sondern auch äußerst energieeffizient, sodass Betriebszeiten von bis zu fünf Jahren ohne Batteriewechsel möglich sind. Das Sensordesign erlaubt eine kostengünstige Herstellung. Im Unterschied zu Rauchmeldern erkennen Brandgasensoren Brände deutlich früher, da sie typische Gase messen, die sehr früh im Brandverlauf entstehen.

Fraunhofer-Vorstand Prof. Georg Rosenfeld (l.) und Dr. Ulrike Wolf, Ministerialdirigentin im Bayerischen Staatsministerium (r.) überreichten den Hugo-Geiger-Preis an Dr.-Ing. Carolin Pannek im Rahmen der 16. Münchner Wissenschaftstage.

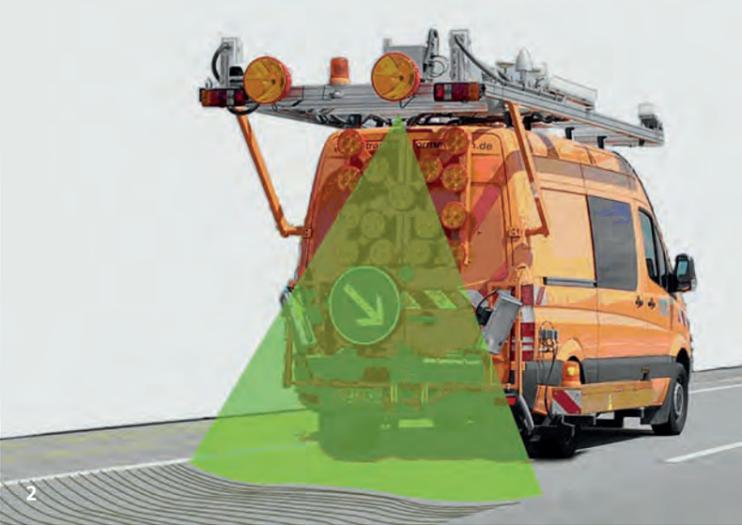


## AUSZEICHNUNG FÜR »TRACK &amp; TRACE FINGERPRINT«



**Fraunhofer IPM wurde für ein neuartiges markierungsfreies Track & Trace-Verfahren als einer der »100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg« ausgezeichnet.**

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts »Track-4-Quality« entstand ein Verfahren, das es ermöglicht, Bauteile allein anhand ihrer Oberflächenstruktur zu erkennen und im Produktionsprozess eindeutig zu identifizieren. Das Konzept kommt ohne zusätzliche Markierungen aus und eignet sich daher auch für preiswerte Massenbauteile. Die lückenlose Rückverfolgung über den gesamten Produkt-Lebensdauerzyklus ist insbesondere für Branchen mit hohen Qualitätsstandards wie etwa die Automobil- oder Medizintechnikindustrie interessant. In dem Wettbewerb zeichnet die »Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg« innovative Konzepte aus, die Produktions- und Wertschöpfungsprozesse intelligent miteinander vernetzen. Neben dem Innovationgrad geht auch die Praxisrelevanz in die Bewertung ein.



## »Lasst es uns probieren!«

Fraunhofer IPM hat für die LEHMANN + PARTNER GmbH einen Laserscanner entwickelt, der die Oberfläche von Straßen erfasst. Seit 2012 ist der »Pavement Profile Scanner« der einzige Laserscanner, der von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für solche Messungen zugelassen ist. Dr. Dirk Ebersbach ist Technischer Geschäftsführer der LEHMANN + PARTNER GmbH.

### Herr Ebersbach, wie kam es zur Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

Im Jahr 2010 waren wir beide Aussteller auf der Messe »Intergeo«. Fraunhofer IPM hatte zu der Zeit den »Pavement Profile Scanner« in der Entwicklung, und wir waren auf der Suche nach innovativen Produkten. Bis dahin waren wir mit Messfahrzeugen auf der Straße unterwegs, die zur Erfassung der Fahrbahnoberfläche einen drei Meter vierzig breiten Querbalken benötigten. Das war gerade im Stadtverkehr extrem unhandlich. Dann kam Fraunhofer IPM und hat gesagt: »Wir können das mit Laserscannern messen – auf der Schiene geht das heute schon.« Und da haben wir gesagt: »Okay, lasst es uns probieren!«

### Hatten Sie zu dem Zeitpunkt schon Kunden?

Wir haben schon immer den Service angeboten, Spurrillen von Straßen zu erheben. Dazu haben wir ein Messsystem eingesetzt, das diesen breiten Querbalken benötigt. Solche Fahrten musste man frühzeitig anmelden, man brauchte eine spezielle Sicherung, und wenn etwas im Weg stand, musste man das ganze Messsystem einklappen. Auch die Messdaten waren nicht so gut wie gewünscht. Daher hatten wir schon seit Langem nach einem alternativen System gesucht und dann bei Fraunhofer IPM gelernt: Mit einem Laserscanner hätte man nicht mehr diesen störenden Querbalken am Fahrzeug, sondern nur noch einen kleinen Schuhkarton. Wenn das funktioniert, ist das der Weg, den wir gehen sollten.

### Erfassen Sie mit dem Laserscanner heute mehr Straßenkilometer pro Tag als früher?

Nein, die Kilometerleistung ist in etwa gleich. Aber mit der neuen Technologie ist ein völlig neuer Markt entstanden: Jetzt können wir auch im innerstädtischen Bereich messen und haben neue Kunden gewonnen: die Kommunen.

### Welche Erwartungen hatten Sie und wurden diese am Ende auch erfüllt?

Wir wollten das Querbalkensystem ersetzen. Das ist zu 100 % gelungen. Die größte Einstiegshürde war für uns die Systemzulassung bei der BASt. Deren Regelwerk war eigentlich so ausgelegt, dass man nur Querbalken zulassen konnte. Und dann kamen wir und sagten: »Wir haben da so einen Kasten, der misst genau das gleiche nur anders.« Und nach viel intensiver Überzeugungsarbeit hat die BASt am Ende gesagt: »Wir wollen auch so einen Scanner.«

### War es schwierig, eine gemeinsame Sprache zwischen Forschung und Industrie zu finden?

Das ist ein Lernen von beiden Seiten. Wir sind Bauingenieure, die Partner am Fraunhofer IPM Messtechniker und Physiker. Da redet man natürlich auch mal aneinander vorbei. Aber durch gute und langjährige Zusammenarbeit steigt das Verständnis – auf beiden Seiten. So entwickelt sich im Lauf der Zeit nicht nur eine gemeinsame Sprache, sondern auch ein partnerschaftliches Vertrauen.

### Was ist als nächste Entwicklung geplant?

Wir haben es geschafft, den Pavement Profile Scanner zu etablieren. Aber wir haben immer noch zwei riesige Kamerasysteme mit einer großen Blitzleinheit am Messfahrzeug. Die wollen wir als nächstes ersetzen. Wir wollen nur noch mit dem »kleinen Schuhkarton« fahren.

### Warum ist diese Kompaktheit so wichtig?

Wir haben zwei Geschäftsfelder: Zum einen den reinen Service, den wir hauptsächlich in Deutschland und Europa anbieten. Und zum anderen den Equipment-Vertrieb. D. h. wir verkaufen die Systeme weltweit. Dafür ist es extrem wichtig, dass das System einfach und flexibel ist. Ein kompaktes Gerät muss ich nur einmal montieren und bin dann schon fertig.

### Wie entscheiden Sie, in welche Innovation Sie investieren?

Der Anstoß zur Innovation kommt selten vom Kunden. Frei nach Henry Ford »Der Kunde schreit nach schnelleren Pferden. Nicht nach dem Auto.« versuchen wir immer von uns aus, neue Produkte am Markt zu platzieren. Der »Pavement Profile Scanner (PPS)« ist nicht einfach nur ein »schnelleres Pferd«: Er ist eine komplett neue Lösung.

### Wie entscheiden Sie, welche Entwicklungen Sie als Produkt anbieten?

Wir haben eine Roadmap, wo wir hin wollen. Da stehen vor allen Dingen Dienstleistungen und Produkte drin. Danach entscheiden wir, mit welchen Entwicklungen wir unser Ziel erreichen könnten. Am Ende muss man aber immer aus dem Bauch heraus entscheiden: Ich nehme das Geld in die Hand. Ich glaube an die Technologie. Eine reine Sensorentwicklung werden wir nie alleine machen. Dafür sind wir zu klein. Und wir haben auch nicht die entsprechende Kompetenz. Eine enge Partnerschaft mit einem Entwicklungspartner wie Fraunhofer IPM macht für uns also auf jeden Fall Sinn.

### Vielen Dank für das Gespräch!

Die 1990 in Erfurt gegründete LEHMANN + PARTNER GmbH bietet mit ihren rund 200 Mitarbeitern Vermessungs- und Beratungsdienstleistungen zum Erhalt der Verkehrsinfrastruktur. Das mittelständische Ingenieurbüro nutzt modernste Messtechnik, um den Zustand von Straßen, Rad- oder Gehwegen zu erfassen. Die Daten dienen als Grundlage für Verwaltung, Erhalt und Ausbau von Verkehrsinfrastruktur. Als Mitglied der französischen VECTRA Gruppe ist die LEHMANN + PARTNER GmbH auch international tätig.

1 Dirk Ebersbach: »Henry Ford hat Pferde nicht durch schnellere Pferde ersetzt, sondern durch das Auto.«

2 Der »Pavement Profile Scanner (PPS)« erfasst die Fahrbahnoberfläche mit einer Präzision im Millimeterbereich, und das bei bis zu 100 Kilometern pro Stunde.

3 Fraunhofer IPM arbeitet derzeit am »PPS plus« – einem Scanner, der zusätzlich zu 3D-Profilen auch Strukturmerkmale wie etwa Risse zuverlässig erfasst.



4 »Eine Sensorentwicklung werden wir nie alleine machen«, ist sich Dirk Ebersbach sicher.

# »Wir schauen ganz genau hin – und schnell.«

Für die Produktionskontrolle entwickelt Fraunhofer IPM optische Systeme und bildgebende Verfahren, mit denen sich Oberflächen und 3D-Strukturen in der Produktion analysieren und Prozesse regeln lassen. Die Systeme messen so schnell und so genau, dass kleine Defekte oder Verunreinigungen auch bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten erkannt werden. Damit wird eine 100-Prozent-Echtzeitkontrolle in der Produktion im Sinne von Industrie 4.0 möglich.

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

#### **Gruppe Inline-Messtechnik**

- ▶ Oberflächeninspektion
- ▶ Maßhaltigkeitsprüfung
- ▶ markierungsfreie Bauteilidentifikation

#### **Gruppe Optische Oberflächenanalytik**

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

*< Optische Systeme erfassen  
Bauteiloberflächen –  
zur Qualitätssicherung und  
zur Rückverfolgung.*



#### **KONTAKT**

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

# GRUPPE INLINE-MESSTECHNIK

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

Schwerpunkt der Gruppe sind industrietaugliche 2D- und 3D-Messsysteme, die hochpräzise Echtzeit-Messungen unter harten Produktionsbedingungen ermöglichen, zum Beispiel zur Regelung empfindlicher Herstellungsprozesse. Dies gelingt durch die Kombination optischer Messtechniken mit extrem schnellen Auswerteverfahren.

>> Auch preiswerte Bauteile mit komplexen Geometrien lassen sich heute inline vermessen und markierungsfrei rückverfolgen.

## KOMPETENZEN

Echtzeit-Inspektionssysteme mit maßgeschneiderter Bildverarbeitung | Robuste holographische 3D-Sensoren mit submikrometer Genauigkeit | Algorithmen zur Auswertung mikroskopisch kleiner Oberflächenstrukturen

## ANWENDUNGEN

Kundenspezifische Systemlösungen erfassen und prüfen die Qualität komplex geformter Bauteile | Holographische Systeme vermessen Verzahnungsgeometrien genau und berührungslos in der Linie | Lesesysteme identifizieren einzelne Bauteile ohne zusätzliche Markierung

## SPEZIFIKATIONEN

### OBERFLÄCHENINSPEKTION

- ▶ 100%-Oberflächenkontrolle von Drähten bei 30 m/s Produktionsgeschwindigkeit
- ▶ vollständige Prüfung komplex geformter Schmiede- und Gussteile
- ▶ kundenspezifische Systeme für raue Produktionsumgebungen
- ▶ Inline-Prüfung von Geometrie und Oberfläche

### MASSHALTIGKEITSPRÜFUNG

- ▶ 100 Millionen 3D-Punkte pro Sekunde
- ▶ Arbeitsabstand bis ca. 300 mm realisierbar
- ▶ 30 x 30 mm<sup>2</sup> Messfeldgröße
- ▶ absolute Höhenmessgenauigkeit, < 1 µm
- ▶ laterale Auflösung, < 10 µm

### MARKIERUNGSFREIE BAUTEILIDENTIFIKATION

- ▶ keine Markierung der Bauteile nötig
- ▶ robust gegenüber lokalen Beschädigungen und Verunreinigungen
- ▶ sichere Identifikation in großen Chargen
- ▶ kurze Lesezeiten, < 100 ms
- ▶ Erkennung im Produktionstakt, < 500 ms





## GRUPPE INLINE-MESSTECHNIK

# Identifizieren ohne zu markieren – eindeutig und fälschungssicher

Wer Produktionsdaten auf ein individuelles Bauteil zurückführen oder die Echtheit einer Komponente überprüfen will, muss diese eindeutig identifizieren können. Im Produktionsumfeld von Industrie 4.0 ist daher eine exakte Zuordnung von Kenndaten zu einem Bauteil essentiell. Fraunhofer IPM hat ein neuartiges Rückverfolgungsverfahren entwickelt, das Massenbauteile ganz ohne zusätzliche Markierungen erkennt – anhand der individuellen Bauteiloberfläche.

Die Qualität komplexer Industrieprodukte hängt von der Qualität vieler – manchmal sehr kleiner – Komponenten ab. Versagt nur ein kleines Teil einer großen Baugruppe, so ist die gesamte Charge potenziell fehlerhaft und muss aussortiert oder zurückgerufen werden. Der Grund: Meist fehlt die entscheidende Datenkorrelation von Prozessdaten zu individuellem Bauteil. Sie ist nur möglich, wenn jedes noch so kleine Bauteil und Halbzeug mit einer individuellen Signatur verknüpft ist. Das markerfreie Verfahren »Track & Trace Fingerprint« von Fraunhofer IPM erfasst Strukturparameter der Oberfläche und wandelt diese in eine individuelle digitale Signatur um (Abb. 1). Dies gewährleistet die für alle Industrie-4.0-Prozesse so wichtige Rückverfolgbarkeit und liefert gleichzeitig einen intrinsischen Produktfälschungsschutz – ganz ohne zusätzliche Markierung.

## Keine stückzahlabhängigen Kosten

Die Rückverfolgung von Massenbauteilen muss nicht nur sicher, sondern auch günstig sein. Etablierte Markierungsmethoden erfordern zusätzliche Produktionsschritte wie etwa das Eingravieren einer Seriennummer, Aufbringen von RFID-Labels oder Data-Matrix-Codes. Auf Dichtflächen,

dekorativen Oberflächen oder bei sehr kleinen Bauteilen ist dies mitunter unmöglich. »Track & Trace Fingerprint« verursacht keine stückzahlabhängigen Kosten. Genutzt wird, was ohnehin vorhanden ist: die Mikrostruktur der Bauteiloberfläche. Sie macht jedes Massenbauteil zum Unikat. Daher liefert das Verfahren auch ein Echtheitszertifikat, z. B. für Sicherheitsbauteile oder für Luxusgüter.

## Auch Massenbauteile sind einzigartig

Unter dem Mikroskop weisen nahezu alle technischen Oberflächen zufällige Merkmale wie Mikrostrukturen oder Farbtexturen auf, die das zugehörige Bauteil auf einzigartige Weise kennzeichnen. Jedes Massenbauteil, jeder Stecker, jede einzelne Schraube ist damit so einzigartig wie ein Fingerabdruck. Durch den Datenabgleich der erfassten Signatur mit den vom Hersteller in der Datenbank hinterlegten Signaturen lässt sich so auch nach Jahren noch eindeutig nachweisen »die fehlerhafte Komponente wurde am Tag X mit diesen Produktionsparametern hergestellt«. Selbst bei glatten Kunststoffoberflächen kann das Sensorsystem Mikrostrukturen erfassen (Abb. 2). Aus der Bildaufnahme an definierter Stelle der Bauteiloberfläche mit ihren

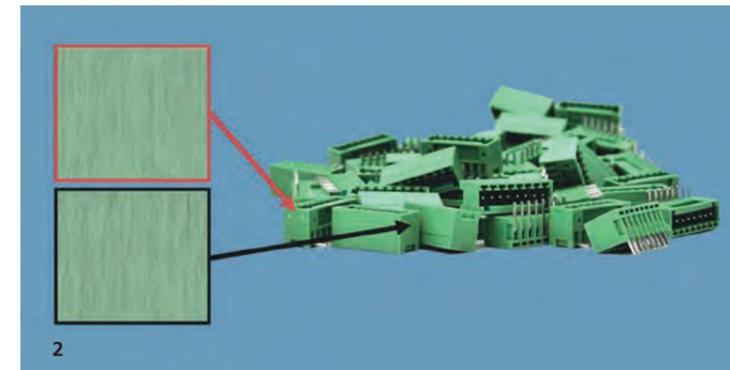
**UNTER INDUSTRIE 4.0** versteht man eine nahezu selbstorganisierte Produktion – basierend auf intelligenten und digital vernetzten Systemen. Nach der Mechanisierung, der Massenfertigung und der Automatisierung steht nun mit der Vernetzung die vierte industrielle Revolution in den Startlöchern. In Zukunft kommunizieren und kooperieren Menschen, Maschinen, Anlagen und Produkte direkt miteinander. Erst die jederzeit mögliche Rückverfolgbarkeit aller Teile erlaubt es, nicht nur einzelne Produktionsschritte, sondern auch die Wertschöpfungskette als Ganzes zu optimieren.

1 »Track & Trace Fingerprint« nutzt die individuelle Oberflächen-Mikrostruktur von Bauteilen zur Identifizierung und kommt so ohne Markierungen aus.

2 Auch Massenbauteile sind Unikate: Selbst einfache Stecker haben einzigartige Oberflächen, die sich zur markierungsfreien Bauteilidentifizierung eignen.

spezifischen Strukturverläufen und deren Positionen zueinander wird die Signatur errechnet. Zur Identifizierung des Bauteils zu einem späteren Zeitpunkt im Produktionsverlauf wird der gesamte Vorgang an derselben Bauteilposition wiederholt und die neu ermittelte Signatur mit allen bereits in der Datenbank hinterlegten Signaturen verglichen. Wird eine Übereinstimmung festgestellt, ist das gesuchte Bauteil identifiziert und die ID wird zurückgeliefert.

Die Verwechslung von Teilen kann auch bei sehr großen Losgrößen ausgeschlossen werden, da der Algorithmus beim Abgleich mit der Signaturdatenbank gleichzeitig einen Qualitätsparameter generiert, der die Güte der Wiedererkennung quantifiziert. Das Verfahren überwacht sich also selbst. Der Sensor ist dabei so ausgelegt, dass eine große Bandbreite an Materialien mit ein und derselben Hardware im Produktionstakt erfasst werden kann – von Kunststoffen über präzisionsbearbeitetes Aluminium und Eisenguss bis hin zu lackierten Oberflächen.



## Identifizierung ohne Zeitverlust

Bauteil-Rückverfolgung darf in der Produktion keine Zeit kosten. Das markerfreie Track & Trace-Verfahren nutzt daher ein kamerabasiertes Sensorsystem, das die Mikrostruktur mit einem CMOS-Bildsensor im Bruchteil einer Sekunde aufzeichnet und daraus nach einem speziellen Algorithmus in Echtzeit die Signatur des jeweiligen Bauteiles erzeugt. Diese wird, gepaart mit einer ID, in einer Datenbank hinterlegt. Die Reduzierung der Bilddaten auf eine simple Bit-Folge mit geringem Speicherbedarf macht »Track & Trace Fingerprint« zu einem inline-fähigen System. Eventuelle Lagetoleranzen aufgrund von Handling werden softwareseitig durch geometrische Bezugspunkte kompensiert, sodass das Verfahren auch unter rauen Fertigungsbedingungen zuverlässig funktioniert.

# GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

PD Dr. Albrecht Brandenburg, albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de

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

## KOMPETENZEN

Schnelle, ortsauflösende Fluoreszenzmesstechnik mit kundenspezifisch entwickelten Beleuchtungssystemen | Laserinduzierte Plasmaspektroskopie zur Oberflächenanalytik nichttransparenter Medien | Entwicklung endoskopischer Techniken unter Nutzung spektraler Informationen | Inline-Mikroskopiesysteme mit Gerätesteuerung und Datenauswertung | »Shortwave-Infrared«-Analyse: Nutzung spektraler Abhängigkeit von Absorptions- und Streueigenschaften zur Materialanalyse

## ANWENDUNGEN

Inline-Reinheitskontrolle – Verunreinigungen auf Bauteilen sichtbar machen | Erkennung von Defekten und Beschichtungen an Oberflächen | Echtheitsprüfung durch Analyse fluoreszierender Pigmente | Mikroskopie im Produktionstakt z. B. 100%-Prüfung von Schlüsselkomponenten in Medizinprodukten | Stoffspezifische Erkennung von Materialien an Oberflächen

>> Fälschungssichere Tickets dank Fluoreszenz-Messtechnik: Eine Kamera erfasst die zufällige Verteilung von Marker-Pigmenten.

## SPEZIFIKATIONEN

### REINHEITSKONTROLLE UND BESCHICHTUNGSPRÜFUNG

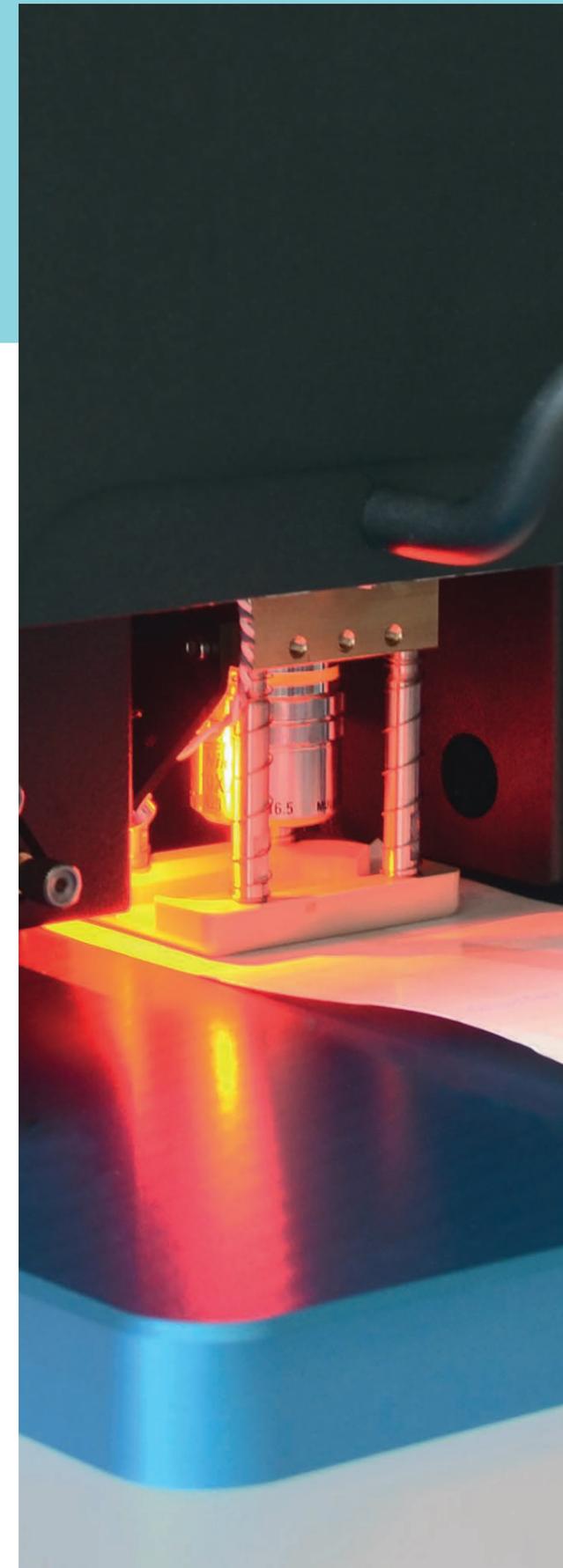
- ▶ Auswertung von Position, Form und Menge filmischer Verunreinigungen im Produktionstakt
- ▶ Prozesshilfsstoffe wie Öle, Fette oder Reinigungsmittel bildgebend messbar (Nachweisgrenze bei Standardölen: 0,01 g/m<sup>2</sup>)
- ▶ Kamerasystem: Sichtfeld einige cm<sup>2</sup>, Auflösung 20 µm
- ▶ Scannersystem: Sichtfeld einige m<sup>2</sup>, Auflösung 250 µm

### INLINE-MIKROSKOPIE

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

### LASERINDUZIERTES PLASMASPEKTROSKOPIE

- ▶ Berührungslose Materialanalyse an Oberflächen
- ▶ Schichtdickenmessung mikrometerdicker funktionaler Schichten
- ▶ Charakterisierung nanometerdünner Korrosionsschutzschichten in der Produktionslinie
- ▶ Nachweis von Beschichtungsbestandteilen bis ppm





## GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

# Bildgebende Beölungsmessung – automatisch und in Echtzeit

Dünne Ölfilme erfüllen bei der Blechherstellung drei wichtige Aufgaben: Sie schützen Bleche vor Korrosion, sie verhindern mechanische Beschädigungen und sie verbessern das Reibverhalten der Bleche bei der Umformung. Um die optimale Qualität von Ölfilmen zu gewährleisten, erfassen bildgebende Fluoreszenz-Messsysteme deren Dicke und Homogenität in Echtzeit – auf ebenen Blechen genauso wie auf komplexen 3D-Stanzteilen.

Aus Feinblechen werden in Presswerken Stanz- und Formteile hergestellt – z. B. für den Automobilbau. Um die Bahnen verarbeiten zu können, ist es notwendig, das Material vor der Umformung zu beölen. Dabei ist die exakte Dosierung der Ölmenge entscheidend für die Qualität der Formteile. Auf Basis schneller bildgebender Fluoreszenzmesstechnik hat Fraunhofer IPM ein Verfahren entwickelt, das die Ölverteilung auf dem gesamten Blech genau bestimmt und kontrolliert. Schnelle Laserscanner messen hierfür mit bis zu 200 Linien pro Sekunde. Bei einem Vorschub der Metallbahn von mehreren Metern pro Sekunde wird so die gesamte Oberfläche lückenlos unmittelbar in der Produktion analysiert.

## Ölverteilung auf Feinblechen

Kaltgewalzte Feinbleche und veredelte Bleche werden zum Schutz vor Korrosion und mechanischen Schäden standardmäßig mit Korrosionsschutzölen versehen. Auch die Verarbeiter von Feinblechen erwarten eine gleichmäßige Beölung – sowohl über die Länge als auch über die Breite der Bleche. Dafür werden gerne etwas dickere Ölfilme eingesetzt. Doch auch zu viel Öl ist schlecht – und zwar für ölempfindliche Folgeprozesse wie z. B. Kleben, Lackieren, Schweißen

oder elektrisches Kontaktieren. Denn oft findet zwischen Kaltumformung und Folgeprozess keine Reinigung bzw. nur eine nicht auf die Ölmenge abgestimmte Reinigung statt. Die Folge: Qualitätsprobleme. Zur Sicherung der Qualität müssen Feinblechhersteller und -verarbeiter daher sowohl die Homogenität als auch die Dicke der Ölaufgabe messtechnisch erfassen – und das am besten flächig auf dem gesamten Blech.

## Bildgebende Messung des Ölfilms

Beim Beölungsmesssystem »F-Scanner« von Fraunhofer IPM rastert ein Laserscanner die Oberfläche des Blechs punktwise mit UV-Licht ab. Im UV-Wellenlängenbereich zeigen die meisten zur Blechbeölung verwendeten Substanzen eine starke Fluoreszenzaktivität, d. h. die Öle wandeln einen Teil des UV-Lichts in sichtbares Licht um. Im Gegensatz dazu zeigen die meisten anorganischen Materialien – insbesondere die unbeölte Blechoberfläche – dieses Verhalten nicht. Die Fluoreszenz der Öle lässt sich mittels einer spektralen Filterung auswerten, sodass kontrastreiche und eindeutige Messbilder zur Dicke und Homogenität der Ölschicht auf der gesamten Blechoberfläche entstehen. Bereits einige Milli-

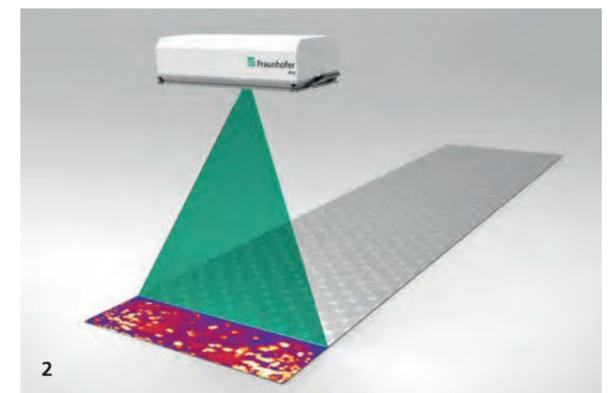
**FLUORESCENZLICHT** ist Licht, das kurz nach Anregung eines geeigneten Materials spontan emittiert wird. Es ist in der Regel energieärmer als das vorher absorbierte Anregungslicht. Viele organische Verbindungen wie Öle liefern ein starkes Fluoreszenzsignal, das sich hervorragend zur Messung von Dicke und Homogenität dünner Filme eignet. Führt man das Anregungslicht mithilfe eines Scanners gerastert über eine Oberfläche, so kann man Beölungen bildgebend messen und die Qualität des Ölfilms eindeutig charakterisieren – selbst auf komplexen Formen und größeren Flächen.

gramm pro Quadratmeter lassen sich mit dem »F-Scanner« sicher detektieren. Eventuelle Beölungsfehler werden zuverlässig erkannt und können durch eine gezielte Nachbeölung oder durch Waschen behoben werden.

## Schnelles Abrastern der Oberfläche

Der Einsatz eines sehr schnellen Laserscanners im »F-Scanner« macht erstmals eine bildgebende Beölungsmessung auf Basis von Fluoreszenz möglich. Das System zeichnet 200 Linien pro Sekunde auf, bei einer Auflösung von ca. 500 µm und einer Blechbreite von bis zu zwei Metern. Diese Werte erlauben einen hohen Flächendurchsatz bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit. Die detektierten Signale werden zu einem orts aufgelösten Gesamtbild zusammengestellt. Dank des kollimierten Laserstrahls besitzt das System eine hohe Tiefenschärfe. Zusätzlich zur Überwachung von Bandware können so auch Bauteile mit komplexen 3D-Freiformflächen vollständig inspiziert werden. Der UV-Laserstrahl scannt dazu über das gesamte Objekt.

Neben der Sensorik ist bei den Fluoreszenz-Messsystemen von Fraunhofer IPM immer auch die automatisierte Bildverarbeitung ein wesentlicher Bestandteil. Nur so kann das Fluoreszenzbild mittels Mustererkennung in Echtzeit ausgewertet werden. Wird der definierte Grenzwert einer Ölbelegung über- oder unterschritten, so kann der nächste



1 Als Korrosionsschutz und zur Umformung von Feinblechen wird deren Oberfläche definiert beölt. Lagerung und Wicklung der Feinbleche führt jedoch nicht selten zu einer inhomogenen Ölverteilung.

2 Der »F-Scanner« lässt sich individuell an die jeweilige Produktionsumgebung anpassen. Er besteht aus modular aufgebauter bildgebender Scannereinheit und Messdatenauswertung, welche die unterschiedliche Ölbelegung anzeigt.

Prozessschritt angepasst werden: Das Bauteil wird aussortiert, die Stelle markiert oder die Beölungsmenge angepasst. Auf diese Weise hilft die orts aufgelöste Auswertung, die Qualität der Beölung in der Linie zu prüfen, zu dokumentieren und dadurch dauerhaft zu optimieren.



GESCHÄFTSFELD **OBJEKT- UND FORMERFASSUNG**

## »Wir entwickeln mobile Laserscanner.«

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« erfassen wir die dreidimensionale Geometrie und Lage von Objekten. Dazu entwickeln wir nicht nur Laserscanner, sondern auch maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamera-Systeme. Diese Geräte messen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision insbesondere von bewegten Plattformen aus.

Besonderes Augenmerk liegt auf der Geschwindigkeit, Robustheit und langen Lebensdauer der Systeme sowie einer effizienten Datenauswertung. Objekte und Formen werden über einen weiten Größenbereich erfasst: von zehntel Millimetern 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, unter Wasser oder mit handgehaltenen Systemen.

### **Gruppe Laser Scanning**

- ▶ Systeme für die Bahn
- ▶ Systeme für die Straße
- ▶ Autonome Systeme

*< Für den Einsatz auf fliegenden Plattformen müssen Laserscanner besonders leicht und kompakt sein.*



### **KONTAKT**

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

# GRUPPE LASER SCANNING

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

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung optischer Messsysteme basierend auf Lichtlaufzeitmessung. Die Systeme bestimmen mit hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision Abstände zu Objekten. Kombiniert mit einer Scaneinheit erfassen sie dreidimensionale Objekt-Geometrien. Mobiles Laserscanning erfordert eine präzise Positions- und Lageerkennung des Messsystems. Die Gruppe entwickelt hierfür spezielle, kamerabasierte Verfahren, die – eigenständig oder in Kombination mit konventioneller Inertialsensorik – eine Zuordnung der Daten zu einem festen lokalen Koordinatensystem ermöglichen.

## KOMPETENZEN

Lichtlaufzeit-Messsysteme erfassen Distanzen auf Submillimeter genau | Schnelle Laserscanner ermöglichen das Abtasten der Umgebung | Kleine und leichte Laserscanner-Messsysteme für mobile Plattformen

## ANWENDUNGEN

Scanner- und Kamerasysteme vermessen und überprüfen Bahninfrastruktur wie Gleise, Bahnsteige und Oberleitungen | Systeme auf mobilen Plattformen und autonomen Fahrzeugen erkunden schwer zugängliche Objekte, z. B. unter Wasser und aus der Luft | »Deep-Learning«-Algorithmen analysieren 3D-Punktwolken automatisiert zur Klassifizierung von Objekten, z. B. im Straßenverkehr

>> Laserscanner erzeugen detailreiche Punktwolken.

## SPEZIFIKATIONEN

### SYSTEME FÜR DIE BAHN

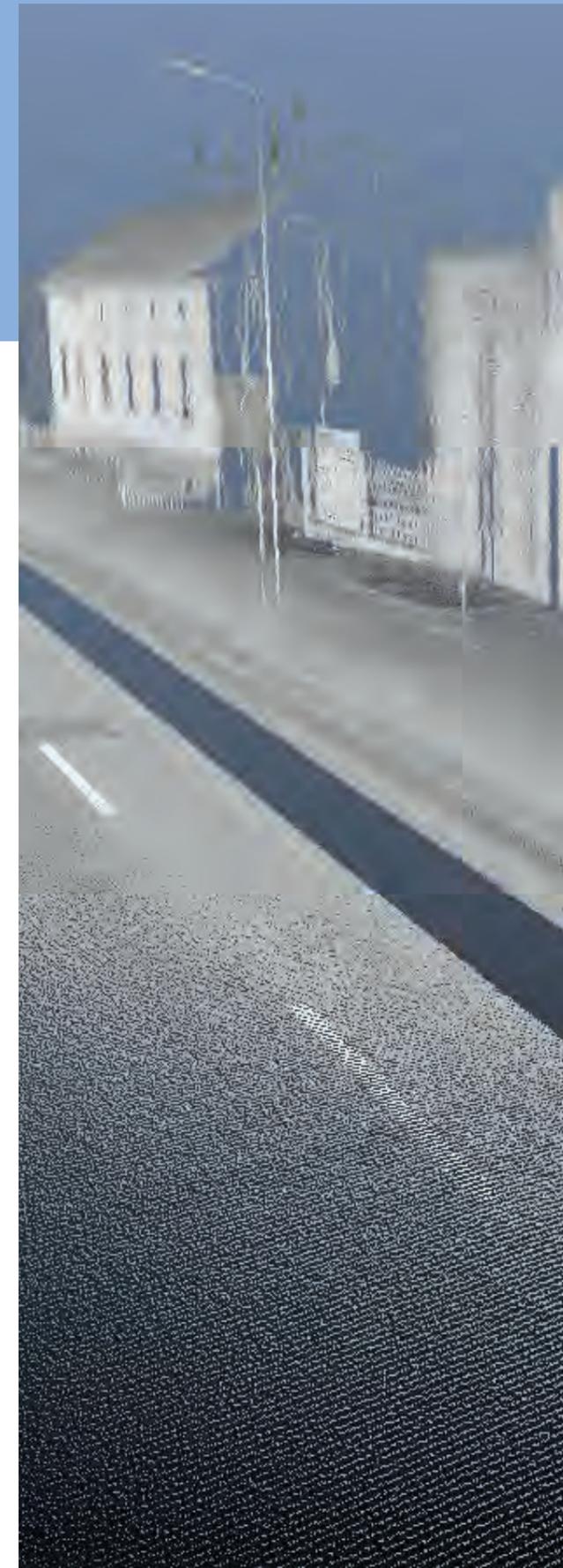
- ▶ Bahnoberleitungsinfrastruktur erfassen bei Geschwindigkeiten bis 250 km/h
- ▶ Lichtraum von Bahnstrecken überwachen mit einer Präzision von 3 mm
- ▶ Umgebung abtasten mit bis zu 800 Profilen pro Sekunde
- ▶ Schienenprofil messen mit einer Präzision von 0,3 mm

### SYSTEME FÜR DIE STRASSE

- ▶ 2 Millionen Messpunkte pro Sekunde aufnehmen
- ▶ Querebenheit der Straße messen mit einer Präzision von 0,3 mm
- ▶ Straßenkorridore erfassen bis 300 m Breite mit einer Präzision von 3 mm
- ▶ Risse in Straßenoberflächen detektieren bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h mit einer Präzision von 1 mm

### AUTONOME SYSTEME

- ▶ Distanzen in trüben Medien erfassen
- ▶ 3D-Messdaten interpretieren, u. a. durch »Deep Learning«
- ▶ komplexe Messsysteme miniaturisieren für den Einsatz auf autonomen Fahrzeugen: Gesamtgewicht unter 1 kg
- ▶ Position mobiler Messsysteme bestimmen mit visueller Odometrie, Positionierungs- und Orientierungssystemen





GRUPPE LASER SCANNING

# Rein rechnerisch: Objekte automatisiert erkennen

Was der Mensch in einer belebten Straße wahrnimmt, gleicht einem Wimmelbild: Autos, Schilder, Bäume, Personen und Gebäude, die einander teilweise verdecken. Das Gehirn klassifiziert und lokalisiert all diese Objekte mühelos. Wie komplex dieser Vorgang ist, zeigt sich beim Versuch ihn zu automatisieren. In einem Forschungsprojekt entwickelt Fraunhofer IPM Algorithmen, mit denen sich Straßenbestandsobjekte automatisch erkennen und klassifizieren lassen. Die Basis für die Mustererkennung bilden künstliche neuronale Netze.

Für die Vermessung von Infrastruktur werden heute leistungsfähige Kameras oder Laserscanner eingesetzt, die hochaufgelöste Bilder bzw. sehr präzise, georeferenzierte Messdaten liefern. Moderne Laserscanner nehmen mehrere Millionen Messpunkte pro Sekunde auf, die als 3D-Punktwolke ein detailreiches Abbild der Umgebung ergeben. Die Auswertung geschieht in der Regel manuell durch Sichten von sehr umfangreichen Daten (Punktwolken und Bilddaten). Diesen zeitaufwändigen Prozess zumindest teilweise zu automatisieren, ist das Ziel eines Forschungsprojekts, das Fraunhofer IPM im Auftrag der Lehmann + Partner GmbH für die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchführt. Dabei werden Algorithmen entwickelt, die einzelne Straßeninfrastrukturelemente in 3D-Messdaten automatisiert erkennen, klassifizieren und lokalisieren.

Für die Auswertung von Straßenszenen setzen die Wissenschaftler auf komplexe Lernalgorithmen, die auf dem Konzept des »Deep Learning« mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN) basieren und klassischen Methoden der Objekterkennung inzwischen überlegen sind. Letztere nutzen vom Entwickler vorgegebene Merkmalsätze; KNN

hingegen erlernen die relevanten Merkmale anhand von Trainingsdaten. In KNN durchläuft die eingespeiste Information eine Vielzahl miteinander verknüpfter künstlicher Neuronen, wird verarbeitet und an weitere Neuronen weitergegeben. Mithilfe manuell annotierter Trainingsdaten werden für bestimmte Eingangsmuster zugehörige Ausgabemuster erlernt. Auf Basis dieser »Erfahrungswerte« können neuartige Eingangsdaten dann in Echtzeit analysiert werden. Dabei erweisen sich KNN als sehr robust gegenüber Variationen von charakteristischen Farben, Kanten oder Formen.

**Datenfusion: Scannerdaten plus Kamerabilder bilden Datenbasis**

Je detaillierter die Informationen im Datensatz, desto besser gelingen Objekterkennung und -klassifizierung. Grundlage im Projekt sind Kamera- und Scandaten, die mit einem Messfahrzeug des Projektpartners Lehmann + Partner aufgenommen wurden, das mit von Fraunhofer IPM entwickelten Laserscannern ausgerüstet ist. Fusionierte Scanner- und Kameradaten erweisen sich als geeignete Ausgangsbasis für die automatisierte Objekterkennung. Ein Ansatz sieht vor,

**DEEP LEARNING** ist als Methode des »Machine Learning« ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz, die auf lernende Algorithmen setzt. Das Erkennen von Objekten in einem Bild beispielsweise erfolgt anhand von Trainingsdatensätzen. »Deep Learning« basiert auf künstlichen neuronalen Netzen und erweist sich im Vergleich zu klassischen Methoden der Objekterkennung als robuster gegenüber variierenden Formen, Verdeckungen, Beschädigungen oder Ausbleichungen, wie sie in Straßenszenen typisch sind.

die georeferenzierten Punkte der Scannerdaten zunächst in ein Rasterformat zu überführen, das Tiefeninformationen enthält, und dann mit den RGB-Kameradaten zu verknüpfen. Dieser pixelbasierte RGB-D(epth)-Datensatz enthält zu jedem RGB-Kamerabild ein entsprechendes Tiefenbild und bildet ein ideales Eingabeformat für KNN. Die Wissenschaftler gehen davon aus, dass die Tiefenwerte die Separierung sich überlagernder Objekte unterstützen und für eine insgesamt noch robustere Klassifikation und Lokalisierung sorgen können.

**Georeferenzierte Objekte in 3D durch semantische Segmentierung**

Die Architektur des Netzes, also die Anzahl der Netzschichten und die Art der hierarchischen Verknüpfungen, ist an die jeweilige Aufgabe angepasst. Für das Trainieren des Netzes wird ein Trainingsdatensatz erstellt. Dazu erfolgt zunächst eine manuelle semantische Segmentierung der Bilder, bei der jedes Pixel einer bestimmten Objektklasse zugeordnet wird. Ein mit diesen Daten trainiertes Netz kann mithilfe eines neuen Trainingsdatensatzes jederzeit um weitere Objektklassen erweitert werden. Anhand der Pixelkoordinaten der in den Bilddaten erkannten Objekte lässt sich die Segmentierung in die Punktwolke zurückprojizieren. Dazu müssen Kamera und Laserscanner exakt zueinander ausgerichtet sein und die entsprechenden Kalibrationsparameter einmalig in einem entsprechenden Prozess bestimmt werden. Mit der Segmentierung der Punktwolke lassen sich dann georeferenzierte Objekte in 3D identifizieren.

Das Thema automatisierte Objekterkennung ist überall dort von Interesse, wo große Datenmengen ausgewertet werden müssen. Noch höhere Anforderungen als die Bestandserfassung von Infrastruktur stellt in Zukunft die Automobilindustrie, die für das autonome Fahren ebenfalls auf die Technologie setzt. Hier müssen bewegte Objekte in Echtzeit erkannt werden – noch sind dabei die natürlichen neuronalen Netze des menschlichen Gehirns überlegen.



**1** Straßenobjekte in Messdaten erkennen, klassifizieren und lokalisieren ist aufwändig. Mustererkennung auf Basis künstlicher neuronaler Netze automatisiert den Prozess.

**2** Kamerabild und ausgewertetes Messbild: Farbige Segmentierungsmasken markieren die Form der erkannten Objekte.

# »Wir entwickeln Messtechnik – vom Sensor bis zum System.«

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

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

#### Gruppe Integrierte Sensorsysteme

- ▶ Gassensitive Materialien
- ▶ Mikrooptische Komponenten
- ▶ Miniaturisierte Gassensorsysteme

#### Gruppe Spektroskopie und Prozessanalytik

- ▶ Spektroskopische Analytik
- ▶ Optische Systeme
- ▶ Nichtlineare Optik

#### Gruppe Thermische Messtechnik und Systeme

- ▶ Maßgeschneiderte Mikrostrukturen
- ▶ Thermische Messsysteme
- ▶ Simulation physikalischer Prozesse

*< Spektroskopische Sensoren analysieren die Getränkequalität in der Produktion – ohne den Umweg über ein Labor.*



#### KONTAKT

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

# GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

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

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung funktionaler, gassensitiver Materialien und Oberflächen sowie miniaturisierter Gassensorsysteme. Dazu werden Sensortechnologie und Elektronik in kompakten und kostengünstigen Mikrosystemen kombiniert.

## KOMPETENZEN

Anwendungs- und kundenspezifische Synthese sowie Verarbeitung gassensitiver Materialien | Mikrostrukturierte IR-Strahler als Lichtquellen in mikrooptischen Sensoren (MOEMS) | Einbetten energieeffizienter Gassensorsysteme in drahtlose Sensornetzwerke

## ANWENDUNGEN

Effiziente Lüftungstechnik durch den selektiven Nachweis von Gasen wie  $\text{CO}_2$  | Frühzeitige Detektion von Brandgasen wie  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{NH}_3$  | Qualitätskontrolle von Lebensmitteln im Lager oder auf dem Transportweg

>> Kolorimetrische Brandgasensensoren, die auf Kohlenstoffmonoxid und Stickoxide reagieren, sollen künftig Brände frühzeitig erkennen.

## SPEZIFIKATIONEN

### GASSENSITIVE MATERIALIEN

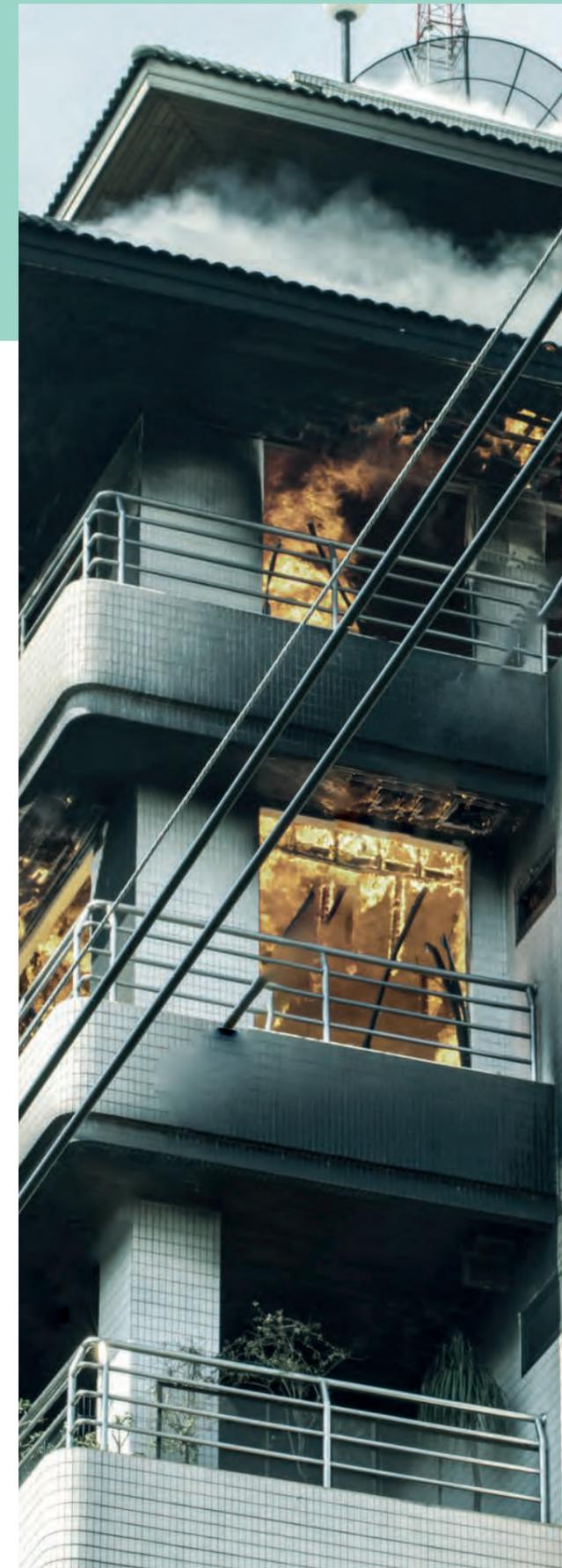
- ▶ Materialsynthese und -verarbeitung, Schichtdicken von wenigen nm bis mehreren  $\mu\text{m}$ , Beschichtung auf mikrostrukturierten Substraten (MEMS)
- ▶ Halbleiter-Gassensoren: Metalloxidschichten wie  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{WO}_3$  oder  $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_{3+z}$  mit katalytischen Zusätzen
- ▶ kolorimetrische Gassensoren: u. a. Farbumschlagmaterialien für  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{NH}_3$

### MIKROOPTISCHE KOMPONENTEN

- ▶ Infrarot-Strahler für einen Wellenlängenbereich von 5 bis 12  $\mu\text{m}$ , z. B. modulierbar
- ▶ Infrarot-Detektoren für einen Wellenlängenbereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$ , z. B. aus  $\text{PbSe}$
- ▶ diffraktive Optiken, z. B. Fresnel-Linsen aus Silizium oder Komponenten für IR-Emitter

### MINIATURISIERTE GASSENSORSYSTEME

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



## GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

# Schwefel-Messsystem für den Einsatz auf hoher See

Schiffsabgase belasten die maritimen Ökosysteme und die Gesundheit von Menschen in Hafen-gebieten erheblich. Neben Kohlendioxid und Stickstoffoxiden stoßen Schiffe vor allem große Mengen an Schwefeloxiden aus. Ein photoakustisches Sensorsystem soll maritime  $\text{SO}_x$ -Emissionen zukünftig kontinuierlich messen. Es wird um ein Vielfaches kostengünstiger sein als verfügbare  $\text{SO}_x$ -Messsysteme mit vergleichbarer Leistung.

Schwefeloxide können Lungen- und Herzkreislauf-Erkrankungen auslösen, als wasserlösliches Gas tragen sie zur Versauerung von Gewässern und Böden bei. Schwefel-reduzierte Schiffskraftstoffe jedoch sind um ein Vielfaches teurer als Schweröl. Trotz strengerer Grenzwerte ab 2020 setzen Schiffseigner daher auch in Zukunft auf Schweröl als Treibstoff. An Bord installierte Gaswäscher sollen das Abgas von schädlichen Schwefeloxiden reinigen, sodass die Emissionen denen des schwefelarmen Treibstoffs entsprechen.

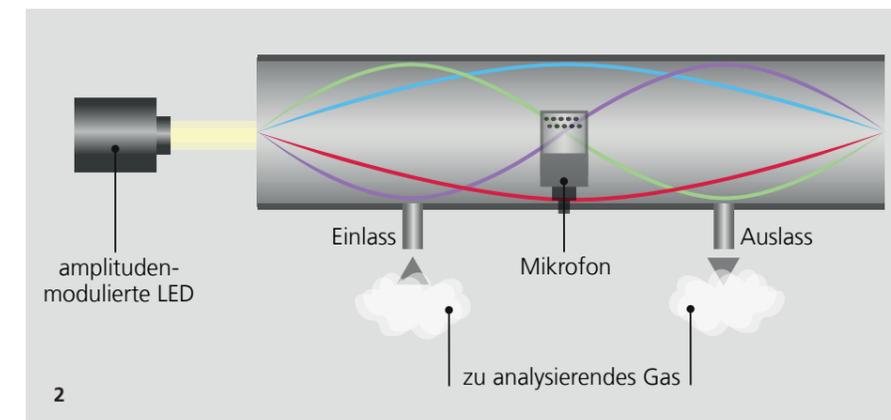
## Tatsächliche Emissionen messen

Maßstab der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation für die Emissionskontrolle ist der tatsächliche Ausstoß von  $\text{SO}_x$ , unabhängig vom eingesetzten Kraftstoff. Spezielle Abgasmess-technik, die die Emissionswerte im 4-Minutentakt bestimmt, ist daher ab 2020 verpflichtend. Fraunhofer IPM arbeitet gemeinsam mit Industriepartnern an der Entwicklung eines kostengünstigen, photoakustischen Schwefeloxid-Sensorsystems für den maritimen Einsatz. Am Markt verfügbare Schwefeloxid-Messsysteme kosten zwischen 50 und 150 Tausend Euro – die Umrüstung einer ganzen Flotte bedeutet für Schiffseigner also eine stattliche Investition.

## Photoakustik: hohe Messgenauigkeit mit preiswerten Komponenten

Photoakustische Sensoren basieren auf der Umwandlung von Lichtenergie in Schall. Die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Gasmoleküle wird dabei mithilfe eines Druckumformers direkt über die aus der Absorption resultierende Druckerhöhung detektiert. Heute verfügbare photoakustische  $\text{SO}_2$ -Messsysteme arbeiten mit vergleichsweise teuren Lasern. Das neue Sensorsystem hingegen setzt auf preiswerte, kommerziell verfügbare UV-LEDs und Mikrofone als Lichtquellen bzw. Detektoren. Die erwarteten Kosten für einen solchen Sensor liegen daher mit 5000 Euro um das mehr als Zehnfache unter den heutigen Kosten. Ein weiterer Vorteil ist die vergleichsweise unkomplizierte Handhabung. Laserbasierte photoakustische Sensoren sind, besonders unter rauen Messbedingungen, nur mit hohem Aufwand zu stabilisieren. Für ihren Sensor verwenden die Wissenschaftler high-power UV-LEDs im Wellenlängenbereich von 270 bis 310 nm, was exakt einem Absorptionspeak von  $\text{SO}_2$  im UV entspricht. So werden Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen verhindert. Ziel ist eine Messgenauigkeit im Bereich von 0,1 ppm. Das photoakustische System kommt je nach Verfahren fast

**STRENGERE ABGAS-GREZWERTE FÜR DIE INTERNATIONALE SCHIFFFAHRT** Ab 2020 verschärft die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO) die globalen Grenzwerte für Schwefelemissionen. Beim Schweröl liegt der Grenzwert für den Schwefelgehalt heute bei 3,5 Prozent – und damit um bis zu 3500 Mal höher als der für Kfz-Treibstoffe zugelassene Wert. Zukünftig sollen die  $\text{SO}_x$ -Emissionen im Schiffsverkehr einem Schwefelanteil im Treibstoff von lediglich 0,5 Prozent entsprechen. In den sogenannten »Emission Control Areas« der EU und USA gilt bereits heute ein Grenzwert von 0,1 Prozent.



1 Messtechnik an Bord von Schiffen soll die Einhaltung von Grenzwerten für Luftschadstoffe sicherstellen.

2 Licht wird durch ein Fenster in die Messzelle geleitet. Ein Mikrofon nimmt ein photoakustisches Signal im Gasstrom auf, aus dem sich Rückschlüsse auf die Konzentration verschiedener Gase ziehen lassen.

ohne mechanische Teile aus, sodass ein wartungsfreier Betrieb über einen Zeitraum von mindestens 12 Monaten möglich ist.

Herzstück des resonanten photoakustischen Sensorsystems ist die Messzelle. Licht der UV-LED wird durch die seitlich eingearbeiteten Fenster in die Zelle geleitet. Der Gasaustausch erfolgt durch eine Ein- und Ausströmungsöffnung. Ein kommerzielles Mikrofon misst das photoakustische Signal. Erste Messungen mit  $\text{CO}_2$  zeigen, dass Messungen unter Gasfluss möglich sind, sodass zusätzliche Ventile und Pumpen zur Extraktion der Gasproben entfallen können.

Die Arbeiten im Projekt »E-MASUM: Marine Sulfur Monitor«, gefördert im Rahmen des Eurostars-Programms,

konzentrieren sich auf die Messung von  $\text{SO}_2$ , welches 95 Prozent der Schwefeloxid-Emissionen ausmacht. Der spätere Schwefel-Monitor wird um einen  $\text{CO}_2$ -Sensor ergänzt, sodass die Schwefelkonzentration ins Verhältnis zum Treibstoffverbrauch gesetzt werden kann. Um die Sensoren von Beginn an auf den Einsatz in maritimer Umgebung abzustimmen, arbeiten die Projektpartner eng mit Herstellern von Gaswäschern und Sensorsystemen für den maritimen Einsatz zusammen. Bis zum Abschluss des Projekts 2018 soll ein Demonstrator im Feldtest zeigen, dass kostengünstige photoakustische Messsysteme an Bord zuverlässig arbeiten. Ein Großteil der an die 90 000 Frachtschiffe, die auf den Weltmeeren kreuzen, wird zukünftig Gaswäscher mit entsprechender Messtechnik installieren – das Marktpotenzial ist also gewaltig.

# GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

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

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung spektroskopischer Systeme zur Detektion und Analyse von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Dabei nutzen die Wissenschaftler ihre langjährige Erfahrung in der Abgas-, Brenngas- und Partikelmesstechnik. Zum Einsatz kommen Methoden wie Raman-, ATR- oder Laserspektroskopie. Die Leistungen der Gruppe reichen von Laboruntersuchungen über die Entwicklung von Prototypen bis hin zur Produktentwicklung und Unterstützung bei der Aufnahme der Serienfertigung.

## KOMPETENZEN

Infrarot- und Laserspektrometer als Grundlage für Messsysteme in der Gas- und Flüssigkeitsanalytik | Simulationen und Analysemethoden für die Entwicklung optischer Spezialbaugruppen und Elektronikmodule | Bau und Entwicklung durchstimmbarer Laserlichtquellen für bislang nicht abgedeckte Spektralbereiche

## ANWENDUNGEN

Gasanalysatoren zur Brennwert-Kontrolle in Erdgas-Leitungssystemen | Schnelle Prozessspektrometer für Abgasprüfstände zur Motorenentwicklung | Bildgebende Infrarot-Messtechnik zur Sicherheits- und Leckagenüberwachung von Industrieanlagen

>> Branchen wie die chemische Industrie benötigen robuste Prozessmesstechnik.

## SPEZIFIKATIONEN

### SPEKTROSKOPISCHE ANALYTIK

- ▶ optische Spurengasanalytoren auf Basis von Quantenkaskadenlasern (QCL): Empfindlichkeit 10 ppb bei N<sub>2</sub>O oder NH<sub>3</sub> und 10 ppm bei O<sub>2</sub>
- ▶ Raman-Spektroskopie: Analyse von Flüssigkeiten, biologischen Zellen oder Gasen
- ▶ ATR-Spektroskopie: Gaskonzentrationen in Flüssigkeiten bis in den ppm-Bereich messen
- ▶ Laser-Absorptionsspektroskopie: Restabsorptionen in Materialien bis 1 ppm bestimmen
- ▶ Chemometrische Methoden zur Analyse von Messdaten

### OPTISCHE SYSTEME

- ▶ Langweg-Absorptionszellen: 0,1 bis 15 m Lichtweg, bis zu 200 °C
- ▶ Spiegeloptiken: White-, Herriott- und Single-Pass-Anordnungen, UV-Optiken
- ▶ Resonatorsysteme: breitbandige Ring- und Linearresonatoren
- ▶ Simulationen: Optik, Mechanik, Strömung, Elektronik

### NICHTLINEARE OPTIK

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





## GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

# Prozessmesstechnik für die Getränkeindustrie

Zur Qualitätssicherung in der Getränkeherstellung gehört es, den Gehalt von CO<sub>2</sub>, Alkohol oder Zucker während der Produktion regelmäßig zu messen. Ein online-fähiger Sensor auf Basis der ATR-Spektroskopie soll diese Werte in Zukunft permanent ermitteln – ohne den Umweg über ein Labor.

Wer am Ende des Tages sein Feierabendbier genießt, verlässt sich darauf, dass es so schmeckt wie gewohnt. Bei der alkoholischen Gärung etwa erfolgt ein komplexer biologischer Abbau von Kohlenhydraten zu Alkohol und Kohlendioxid. Wie und wann genau dieser Abbau erfolgt, ist wichtig für die Qualität des Bieres. Während der Produktion von Bier, aber auch Wein, Spirituosen oder alkoholfreien Getränken werden daher regelmäßig Proben genommen und im Labor analysiert. Messungen direkt im Prozess würden diese Vorgehensweise deutlich vereinfachen. Gemeinsam mit der Centec Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH entwickelt Fraunhofer IPM ein optisches Infrarot-Messsystem für die Flüssigkeitsanalyse, welches nach dem Prinzip der abgeschwächten Totalreflexion (Attenuated Total Reflection ATR) arbeitet und neben gelöstem Kohlendioxid- und Alkoholgehalt auch Zucker in seinen verschiedenen Erscheinungsformen in situ misst.

## Kompakte, spektral abstimmbare Pyrodetektoren

Inline-Systeme zur Flüssigkeitsanalyse sind bereits vereinzelt am Markt verfügbar. Sie messen Dichte, Schall, Trübung oder den optischen Brechungsindex der Flüssigkeit, um daraus über Kalibrierung und einen Abgleich mit hinterleg-

ten Laborvergleichsdaten auf relevante Größen wie Extrakt, Alkohol oder Stammwürze zu schließen. Die ermittelten Summenparameter liefern jedoch keine spezifischen Informationen über Inhaltsstoffe und deren Konzentration. Diese aber sind notwendig, denn die Zusammensetzung der natürlichen Grundstoffe variiert, was zu Schwankungen in der Produktqualität führen kann.

Für den neuen Flüssigkeitssensor setzen die Wissenschaftler auf ATR-Spektroskopie im mittleren Infrarot. Das in den ATR-Kristall eingekoppelte Licht wird an der Kristallgrenzfläche, die mit der Flüssigkeit in Kontakt ist, total reflektiert. Über das dabei entstehende evaneszente Feld an der Kristalloberfläche wechselwirkt die Strahlung mit der darüber strömenden Flüssigkeit. Nach Durchlaufen des gesamten Kristalls gelangt das Licht zum Detektor. Eingesetzt werden Pyrodetektoren mit spektralen Filterelementen. Sofern nur die Konzentration von CO<sub>2</sub> bestimmt werden soll, werden spektrale Bandpassfilter verwendet, die auf dessen charakteristische Absorptionsbanden bei ca. 4,3 µm angepasst sind. Für die Bestimmung gleich mehrerer Komponenten mit einem Sensor kommen erstmals Pyrodetektoren in Kombination mit spektral abstimmbaren Fabry-Perot-Filtern zum Einsatz. Sie nehmen vollständige Spektralverläufe in

**ATR-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE** Bei der ATR-IR-Spektroskopie wird die Strahlung in einem Reflexionselement in Totalreflexion zu einem Detektor geführt. Dabei bildet sich an der Grenzfläche des Elements ein optisches Nahfeld aus – das sogenannte evaneszente Feld, das in die Probe eindringt. Das Feld wechselwirkt mit der Probe und wird in bestimmten stoffspezifischen Frequenzbereichen absorbiert. Die absorbierten Bereiche im Spektrum des mehrfach totalreflektierten Strahls werden entsprechend abgeschwächt und liefern ein Maß für die Konzentration der gesuchten Stoffe.



1 Messungen direkt im Prozess würden die Qualitätskontrolle in der Getränkeproduktion deutlich erleichtern.

2 Der Sensor ermittelt die Konzentrationen von CO<sub>2</sub>, Alkohol oder Zucker in der strömenden Flüssigkeit direkt im Prozess.

auch Ethanol) liegt dieser spektroskopische Fingerabdruck zwischen 8 und 10,5 µm. Die kompakten Detektoren funktionieren wartungsfrei ohne mechanische Teile und werden in einem hermetisch abgeschlossenen Sensorkopf integriert. In Verbindung mit weiteren Messgrößen, z. B. der Temperatur, werden nach einer chemometrischen Datenanalyse die Konzentrationswerte der ausgewählten Komponenten ermittelt und ausgegeben. Erste Versuchsreihen mit verschiedenen Flüssigkeiten bestätigen, dass der Sensor für CO<sub>2</sub> und Ethanol ausreichend genaue, reproduzierbare Messwerte liefert.

## Besonders raue Messumgebung

Eine Herausforderung stellen die harschen Bedingungen bei der Getränkeherstellung dar: Hohe Temperatur- und Druckschwankungen, Schall oder Erschütterungen beeinflussen ATR-Element, Lichtquelle und Detektor. Geeignete miniaturisierte Sensorik sorgt dafür, dass diese Einflussfaktoren gemessen werden, um so mögliche Messfehler zu korrigieren. Um eine konstante Schutzgasatmosphäre im Messkopf aufrecht zu erhalten, muss der Sensorkopf verlässlich dicht sein. Eigens gefertigte lebensmittelverträgliche Dichtungen mussten erprobt werden. Die weiteren Arbeiten richten sich auf die Konzentrationsbestimmung der Zucker sowie die Optimierung der chemometrischen Auswertung.

# GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

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

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

>> Simulationen geothermischer Prozesse sind die Basis für neuartige Energiespeicherkonzepte.

## KOMPETENZEN

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

## ANWENDUNGEN

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

## SPEZIFIKATIONEN

### MASSGESCHNEIDERTE MIKROSTRUKTUREN

- ▶ Mikrostrukturen für organische Elektronik, Heizer und Mikrofluidik mit Strukturgrößen von typischerweise 1  $\mu\text{m}$
- ▶ Thermopile-Sensoren, Fouling-Sensoren, kalorimetrische Sensoren
- ▶ thermische Sensoren zur Bestimmung von Materialparametern, insbesondere Wärmeleitfähigkeit
- ▶ elektronische Zungen

### THERMISCHE MESSSYSTEME

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

### SIMULATION PHYSIKALISCHER PROZESSE

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





## GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

# Materialien charakterisieren bei hohen Temperaturen

Zur Charakterisierung von Halbleitern und anderen Festkörpern muss man Materialproben oft sehr gezielt und sehr genau temperieren. Fraunhofer IPM hat seinen Hochtemperatur-Hall-Messplatz IPM-HT-Hall so optimiert, dass bis zu vier Materialparameter gleichzeitig bei Temperaturen von etwa 20 bis 800 °C charakterisiert werden können.

Kommerziell verfügbare Hall-Messgeräte – sogenannte »Physical Property Measurement Systems« – basieren auf Kryostatsystemen und sind daher für tiefe Temperaturen von etwa 4 K bis maximal 400 K ausgelegt. In dem für thermoelektrische Materialien und Hochtemperatur-Halbleitern besonders interessanten Bereich von Raumtemperatur bis 800 °C gibt es bisher nur wenige kommerzielle Systeme. Fraunhofer IPM hat daher speziell für die Hall-Messung von 20 bis 800 °C einen neuartigen Messaufbau entwickelt, der schnelle, einfache und zuverlässige Messungen erlaubt. Der IPM-HT-Hall-Messplatz wurde erfolgreich bis 800 °C getestet. Neben der Bestimmung der elektrischen Eigenschaften kann der Messplatz auch dazu genutzt werden, thermische oder magnetische Eigenschaften bei verschiedenen Geometrien sehr exakt zu messen – über einen weiten Temperaturbereich und bei bis zu fünf verschiedenen Magnetfeldstärken.

## Funktionelle Materialien optimieren

Heutige Halbleiter-Bauelemente arbeiten oft bei Temperaturen deutlich über Raumtemperatur. Um deren Funktion – z. B. durch Dotieren – optimal einstellen zu können, müssen charakteristischen Materialeigenschaften auch

am späteren Arbeitspunkt des Bauelements gemessen werden – z. B. bei hohen Temperaturen. »Dotieren« bezeichnet den Vorgang einer gezielten Zugabe von Fremdatomen in einen Halbleiter mit dem Ziel, die Anzahl, die Mobilität und die Art der Ladungsträger zu beeinflussen. Aber nicht nur die Dotierung, sondern auch die Umgebungstemperatur hat einen Einfluss auf die Anzahl der Ladungsträger. Je höher die Temperatur im Material, desto mehr Ladungsträger werden aktiviert. IPM-HT-Hall erkennt den Einfluss der Dotierung bei unterschiedlichen Temperaturen. Das System misst sehr sensitiv und erfasst bereits minimale Änderungen der Ladungsträgerkonzentration. Darüber hinaus lassen sich neben dem üblichen Standardmesskopf zur Hall-Messung auch eigene Messköpfe und selbstentwickelte Messelektronik in den Messplatz integrieren.

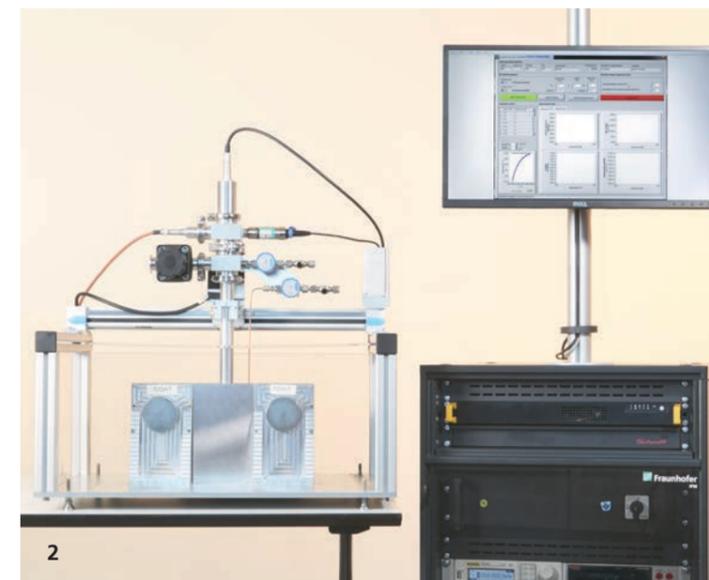
## Universell und variabel – für viele spezielle Aufgaben

Für die Entwicklung moderner Materialien sind Hall-Messungen mittlerweile ein nahezu unentbehrliche Hilfsmittel. Der Hochtemperatur-Hall-Messplatz von Fraunhofer IPM eignet sich hervorragend zur Optimierung sehr spezieller Materialien wie z. B. thermoelektrischer Halbleiter oder Halbleiter-Gassensoren.

**HALL-EFFEKT** Edwin Herbert Hall entdeckte 1879 den nach ihm benannten Hall-Effekt. Er beobachtete, dass der Strom in einem Leiter durch das Anlegen eines Magnetfeldes beeinflusst werden kann. Die dabei entstehende Spannung ermöglicht tiefe Einblicke in das untersuchte Leitermaterial. Messen kann man diesen Effekt über die Spannung, die senkrecht zum Strom wie auch dem Magnetfeld am Leiter abgegriffen wird.

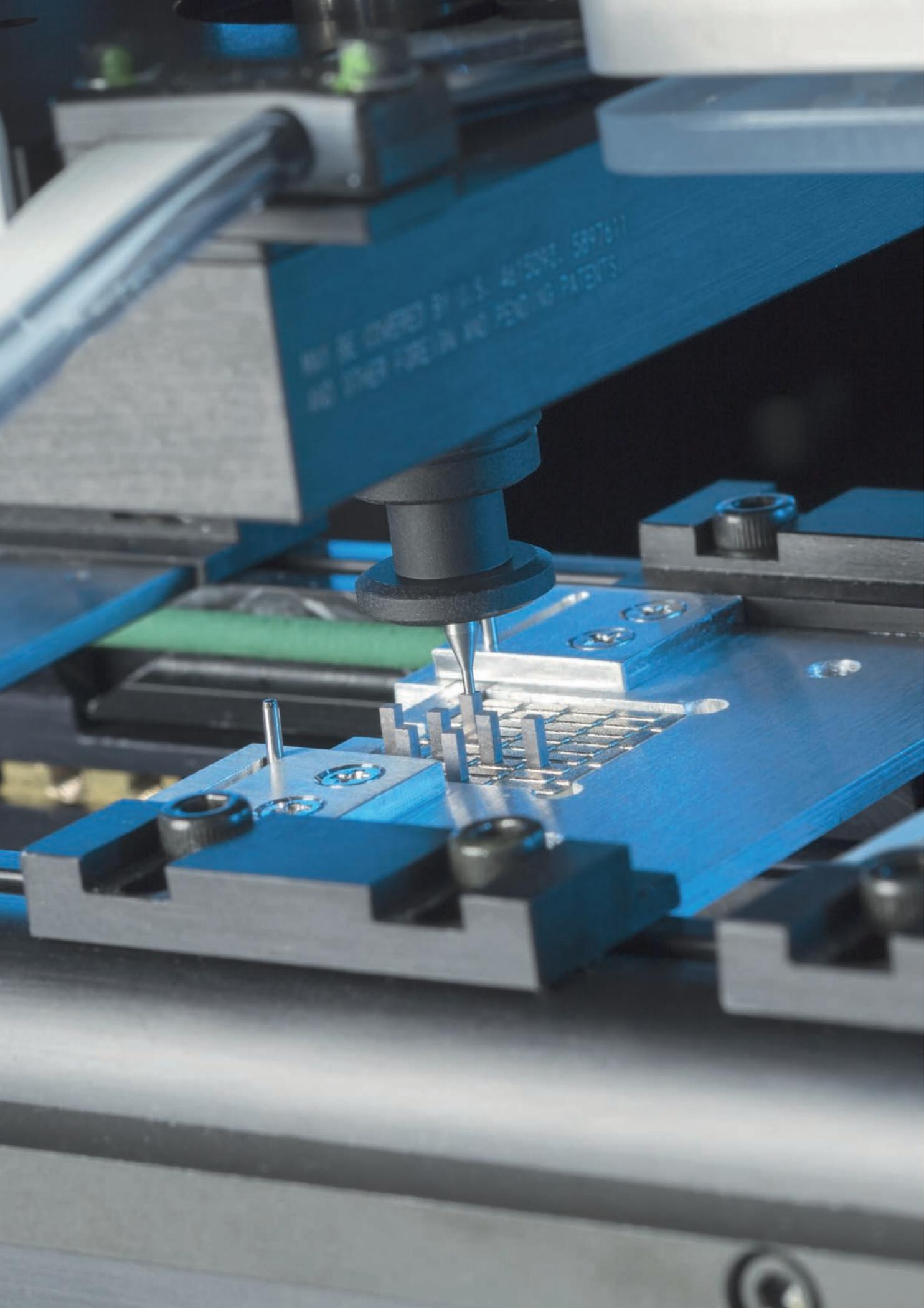
Optimierung thermoelektrischer Halbleiter: Auch bei diesen Materialien lässt sich die Ladungsträgerkonzentration gezielt durch Dotieren erhöhen. Damit einher geht die Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit. Durch die Dotierung sinkt jedoch ungewollt auch der Seebeck-Koeffizient. Letzterer gibt die durch eine Temperaturdifferenz entstehende elektrische Spannung im thermoelektrischen Material an. Um eine optimale Effizienz des thermoelektrischen Materials zu erreichen, müssen beide Parameter beachtet werden: Ladungsträgerkonzentration und Seebeck-Koeffizient. Da in der Regel weniger als ein Dotieratom auf 1 000 000 thermoelektrische Materialatome kommt, ist es offensichtlich, dass es hier auf die exakte Dotierung ankommt. Diese lässt sich mit mittels Hall-Messungen exakt überprüfen.

Entwicklung von Halbleiter-Gassensoren: Bei der Charakterisierung von Gassensor-Materialien ist es wichtig, die charakteristischen Materialeigenschaften bei exakt definierten hohen Temperaturen ebenso wie bei exakt eingestellten Gaskonzentrationen messen zu können. Hier bietet der neue Hall-Messplatz die Möglichkeit, nach erreichter Stabilität der gewünschten Bedingungen, die Messung automatisch zu starten oder nach Kontrolle durch den Messtechniker.



1 Mit dem neuen Hochtemperatur-Hall-Messplatz können Halbleitermaterialien bei Temperaturen bis über 800 °C charakterisiert und optimiert werden.

2 Neben dem üblichen Standardmesskopf zur Hall-Messung kann weitere Sensorik oder Messelektronik integriert werden.



GESCHÄFTSFELD THERMISCHE ENERGIEWANDLER

## »Wir übertragen herausragende Materialeigenschaften in Systeme.«

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

Durch Einsatz dieser Materialien in Wärmepumpen, Kühlsystemen und Generatoren entstehen besonders umweltfreundliche, kostengünstige und langlebige Systeme. Für unsere Arbeit greifen wir auf mehr als 20 Jahre Erfahrung in der Materialsynthese und weitreichendes Know-how zu spezieller Messtechnik, Simulation, Modulbau und Systemintegration zurück.

### Gruppe Kalorik und Thermoelektrik

- ▶ Kühlen und Heizen
- ▶ Thermisches Management
- ▶ Abwärme verstromen



### KONTAKT

Dr. Kilian Bartholomé  
Abteilungsleiter  
(kommissarisch)  
T +49 761 8857-238  
kilian.bartholome@  
ipm.fraunhofer.de

*< Auf dem Weg zur industriellen Produktion: Setzroboter für die teilautomatisierte Fertigung thermoelektrischer Hochtemperatur-Module.*

# GRUPPE KALORIK UND THERMOELEKTRIK

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

Die Entwicklung effizienter und umweltfreundlicher Kühlsysteme, Wärmepumpen oder thermoelektrischer Generatoren auf Basis neuartiger funktioneller Materialien ist vorrangiges Ziel der Gruppe. Fragen der Umweltverträglichkeit, Einsetzbarkeit in der industriellen Fertigung, Integrierbarkeit in Systeme und nicht zuletzt der Verfügbarkeit von Rohstoffen spielen dabei eine gewichtige Rolle. Bei der Materialentwicklung steht die jeweilige Anwendung im System stets im Vordergrund: von thermoelektrischen Hochtemperatur-Generatoren zur Abwärmenutzung über Peltier-Module zum Temperaturmanagement bis hin zu umweltfreundlichen Kühlsystemen auf Basis magneto-, elektro- oder elastokalorischer Materialien, die ohne schädliche Kältemittel auskommen.

## KOMPETENZEN

Magneto-, elektro- und elastokalorische Systeme zum effizienten Kühlen und Heizen | Pulsierende »Heatpipes« für den effizienten Abtransport thermischer Energie aus »Hot-Spots« | Kostengünstige Herstellung thermoelektrischer Module

## ANWENDUNGEN

Klimatisierung im Kfz auf Basis kalorischer Systeme: effizient und ohne schädliche Kältemittel | Optimierte, thermisches Management zur Minimierung des Ausfallrisikos elektronischer Bauteile | Thermoelektrische Generatoren zur Steigerung der elektrischen Effizienz in BHKWs

>> Thermoelektrische Generatoren steigern die elektrische Effizienz von Blockheizkraftwerken und damit deren Wirtschaftlichkeit.

## SPEZIFIKATIONEN

### KÜHLEN UND HEIZEN

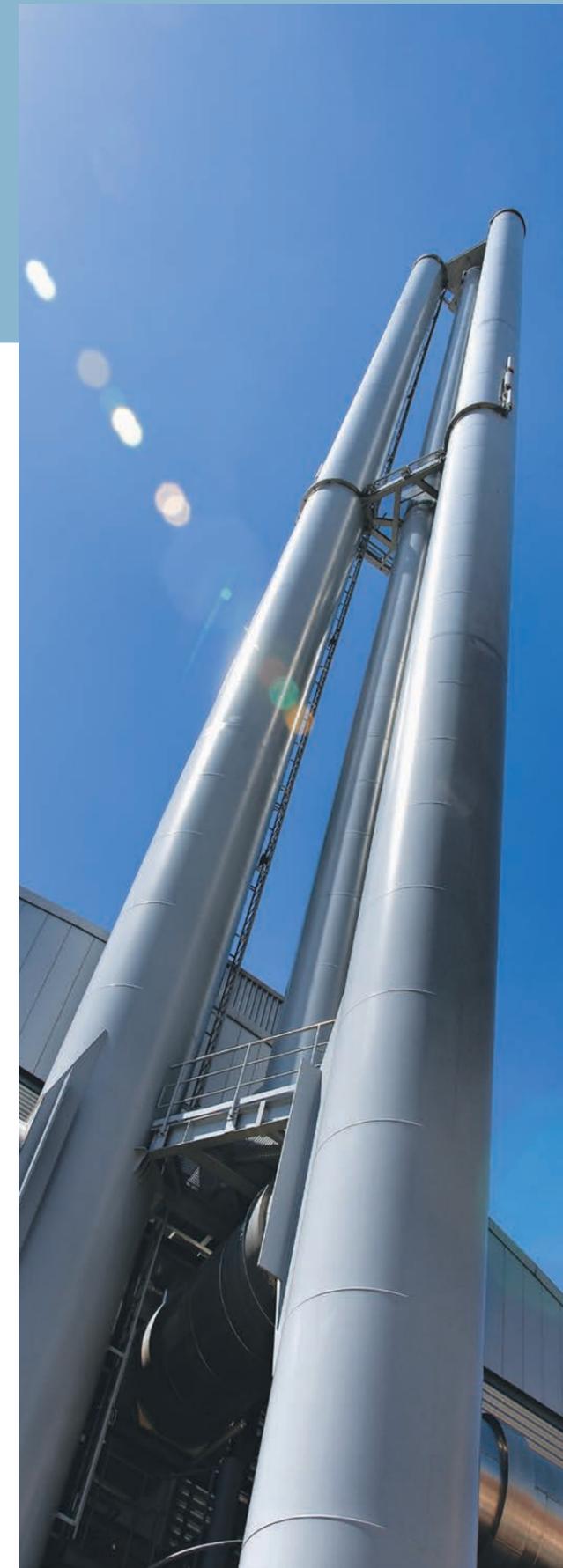
- ▶ reduzierter Energiebedarf dank effizienter Technologie
- ▶ Kühlen ohne schädliche Kältemittel
- ▶ kompakte Bauweise durch die hohe Energiedichte kalorischer Materialien
- ▶ wartungsarme Systeme

### THERMISCHES MANAGEMENT

- ▶ schnelle und exakte Temperaturregelung mit Peltierelementen
- ▶ passive Kühlung elektronischer Bauteile mittels »Heatpipes«
- ▶ effiziente Wärmeverteilung durch pulsierende »Heatpipes«

### ABWÄRME VERSTROMEN

- ▶ thermoelektrische Module für den Hochtemperatureinsatz
- ▶ elektrische Effizienz von BHKWs mit thermoelektrischen Modulen steigern
- ▶ ungenutzte, thermische Energie verstromen: im Automobil und in industriellen Prozessen





1 Druck erzeugt Wärme:  
Werden elastokalorische Materialien verformt, erwärmen sie sich. Dieser reversible Effekt lässt sich für den Aufbau von Wärmepumpen nutzen.

GRUPPE KALORIK UND THERMOELEKTRIK

# Effiziente elastokalorische Wärmepumpen

Wärmepumpen arbeiten fast ausschließlich mit Kompressoren – unabhängig davon, ob sie zur Kühlung oder als Heizung eingesetzt werden. Sie belasten die Umwelt mit Kältemitteln und erreichen eine vergleichsweise geringe Effizienz. Fraunhofer IPM entwickelt effiziente elastokalorische Wärmepumpen als Alternative zur Kompressor-Technologie – zentrale Innovation ist ein neuartiges Konzept zum Wärmeübertrag.

Klimageräte im Haus und Auto, Kühlschränke oder Erdwärmehelzungen – sie alle arbeiten mit Wärmepumpen. Die darin eingesetzten Kältemittel sind zumeist schädlich oder gefährlich, sodass die EU die Nutzung ab 2020 mehr und mehr reglementiert. Neue Technologien für den milliardenschweren Wärmepumpen-Markt sind also dringend gefragt. Festkörperbasierte kalorische Systeme auf Basis magneto-, elektro- oder elastokalorischer Materialien werden seit einigen Jahren als eine vielversprechende Alternative gehandelt, an der auch Fraunhofer IPM intensiv forscht.

Elastokalorische (EK)-Materialien können zwei verschiedene Kristallstrukturen annehmen. Unter Druck kommt es zu einer kristallinen Phasenumwandlung, wobei sich das Material von der Ausgangstemperatur  $T_0$  auf  $T_0 + \Delta T$  erwärmt. Über eine Wärmesenke wird die entstandene Wärme abgeführt und die Temperatur des Materials fällt auf die Temperatur  $T_0$  zurück. Entfernt man die mechanische Spannung, so kühlt sich das Material auf eine Temperatur unterhalb des Ausgangsniveaus ( $T_0 - \Delta T$ ) ab. Verbindet man das Material mit einer zu kühlenden Stelle, so nimmt es Wärme auf, bis die Ausgangstemperatur erreicht ist. Durch zyklische Be- und Entlastung des Materials und entsprechende Wärmeabfuhr lässt sich ein

Kreisprozess herstellen. So entsteht eine effiziente, Wärmepumpe zum Kühlen oder Heizen – ohne schädliche Kältemittel. Formgedächtnislegierungen wie etwa die kommerziell verfügbare Nickel-Titan-Legierung Nitinol zählen zu den Materialien mit einem ausgeprägten elastokalorischen Effekt, der einen großen Temperaturhub ermöglicht.

**Latenter Wärmeübertrag erhöht Effizienz**

In einem Versuchsaufbau erzielten Wissenschaftler am Fraunhofer IPM bei Anlegen eines Drucks von 750 MPa an Nitinol-Stäben eine Temperaturdifferenz von 15 K. Einzelne Forscherteams erreichen einen vergleichbaren Temperaturhub. Entscheidend für die Gesamteffizienz einer elektrokalorischen Wärmepumpe ist jedoch der Wärmeübertrag zwischen EK-Material und Wärmeübertragereinheit. Gängige Konzepte realisieren diesen durch aktives Pumpen eines Fluids. Der Nachteil: Das Pumpen verringert die Systemeffizienz und limitiert die Zyklusfrequenz des Systems auf wenige Hertz. Mit dem Konzept des latenten Wärmeübertrags verfolgt Fraunhofer IPM erstmalig einen passiven Ansatz, der bereits in Heatpipes oder Thermosiphons genutzt wird. Der Wärmeübertrag wird dabei über Verdampfen und

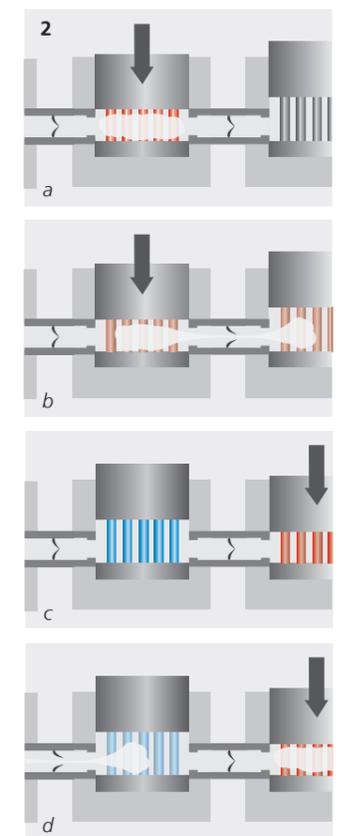
**DER ELASTOKALORISCHE EFFEKT** wurde bereits im frühen 19. Jahrhundert beim schnellen Dehnen und Loslassen von indischem Gummi beobachtet. Etwa fünfzig Jahre später berichtete der Physiker J.P. Joule von kleinen reversiblen Temperaturänderungen in Metallen und Holz, hervorgerufen durch Krafteinwirkung. Erst in den 1980er Jahren wurden Studien zu latenter Wärmeentwicklung und damit verbundenen Temperaturänderungen in NiTi und Cu-basierten Materialien durchgeführt.

Kondensieren eines Fluids, z. B. Wasser oder Ethanol, (latent) realisiert. Das Fluid befindet sich in einem hermetisch abgeschlossenen, von allen Fremdgasen befreiten Rohr und liegt sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Form vor. Der Wärmeübergangskoeffizient beim Verdampfen erreicht Werte bis  $100 \text{ kW} / (\text{m}^2 \text{K})$  und ist somit um Größenordnungen höher als bei klassischen Systemen. Einzelne elastokalorische Segmente werden in Reihe geschaltet und als thermische Dioden konzipiert, sodass Wärme segmentweise in eine Richtung transportiert und jeweils eine Seite des Segments gekühlt und die andere erwärmt wird. Erste Abschätzungen zeigen, dass der Transport von einem Segment zum nächsten innerhalb von Millisekunden erfolgen kann, sodass das System mit einer Frequenz von über 10 Hz betrieben werden kann. Die patentierte Kombination von latentem Wärmeübertrag und thermischer Diode in einer elastokalorischen Wärmepumpe verspricht eine hohe Pumpleistung sowie eine hohe Effizienz.

**Erste Prototypen realisiert**

Bisher haben die Wissenschaftler in einem ersten System einen Temperaturhub von 10 K mit kommerziellen verfügbaren EK-Materialien realisiert. Nächstes Ziel ist der Bau einer EK-Wärmepumpe als Demonstrator, der eine Pumpleistung von 100 Watt und einen Temperaturhub von 35 K bei einer Leistungszahl von über 5 realisiert. Dafür sind noch eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen: Das Material muss seine Zyklusstabilität beweisen. Die angestrebte Leistungszahl ist nur bei größtmöglicher

2 Funktionsweise eines elektrokalorischen Segments:  
Phase 1 – Komprimierung:  
(a) Das EK-Material wird durch eine externe Kraft komprimiert und erwärmt sich, die vorhandene Flüssigkeit verdampft. (b) Dadurch steigt der Dampfdruck im Segment, das Ventil nach rechts öffnet sich, das gasförmige Fluid entweicht und überträgt latente Wärme ins nächste Segment.  
Phase 2 – Entspannung:  
(c) Die externe Kraft wird entfernt, das EK-Material kühlt ab. (d) Der Dampfdruck sinkt, es entsteht ein Unterdruck gegenüber dem vorangehenden Segment. Gasförmiges Fluid strömt nach, Wärme wird aus dem vorangehenden Segment aufgenommen.



Rekuperation der elastischen Verformung möglich. Ein entsprechendes Konzept zur Energierückgewinnung mittels Exzenter soll dafür entwickelt werden. Auch hier sind umfangreiche Simulationen und Designoptimierung notwendig.

## FORSCHEN FÜR DIE PRAXIS

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 69 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen 1,9 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

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

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

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

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

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



### Fraunhofer IPM

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

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

## UNSERE PARTNER

Wir engagieren uns in Verbänden, Fachorganisationen und Netzwerken – fraunhoferweit, deutschlandweit und international.

### Fraunhofer-Gesellschaft

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

### International

- AAAS – American Association for the Advancement of Science
- ACS – American Chemical Society
- ETS – European Thermoelectric Society
- ITS – International Thermoelectric Society
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- MRS – Material Research Society
- OSA – Optical Society of America

### Deutschland

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

## PUBLIKATIONEN 2016

Hering, J.; Waller, E. H.; Freymann, G. von  
**Automated aberration correction of arbitrary laser modes in high numerical aperture systems**  
Optics Express 24 (25), 28500-28508, 2016

Brandenburg, A.; Holz, P.  
**Bildgebende Inline-Oberflächeninspektion von Verschmutzungen und Defekten**  
Sackewitz, M.; Fraunhofer-Allianz Vision [Hrsg.]: Leitfaden zur Inspektion und Charakterisierung von Oberflächen mit Bildverarbeitung. Fraunhofer Verlag, 110-112, 2016

Meisenheimer, S.-K.; Fürst, J. U.; Schiller, A.; Buse, K.; Breunig, I.  
**Broadband wavelength control for optical parametric oscillation in radially-poled whispering gallery resonators**  
Vodopyanov, K. L.; Schepler, K. L. [Hrsg.]: Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XV. Proceedings of SPIE 9731, Paper 97310U, 2016

Saleemi, M.; Tafti, M. Y.; Jacquot, A.; Jäggle, M.; Johnsson, M.; Toprak, M. S.  
**Chemical synthesis of iron antimonide (FeSb<sub>2</sub>) and its thermoelectric properties**  
Inorganic Chemistry 55 (4), 1831-1836, 2016

Schmitt, K.; Tarantik, K.; Pannek, C.; Sulz, G.; Wöllenstein, J.  
**Colorimetric gas sensing with enhanced sensitivity**  
Procedia Engineering 168, 1237-1240, 2016

Jacobi, C.; Jakowski, N.; Schmidtke, G.; Woods, T. N.  
**Delayed response of the global total electron content to solar EUV variations**  
Advances in Radio Science 14, 175-180, 2016

Skomedal, G.; Homgren, L.; Middleton, H.; Eremin, I. S.; Isachenko, G. N.; Jäggle, M.; Tarantik, K.; Vlachos, N.; Manoli, M.; Kyratsi, T.; Berthebaud, D.; Dao Truong, Nhi Y.; Gascoin, F.  
**Design, assembly and characterization of silicide-based thermoelectric modules**  
Energy Conversion and Management 110, 13-21, 2016

Boerman, J. K.; Bauersfeld, M.-L.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.  
**Detection of gaseous ethanol by the use of ambient temperature platinum catalyst**  
Procedia Engineering 168, 201-205, 2016

Rosenberger, M.; Dellner, M.; Kluge, M.; Tarantik, K.  
**Fahrzeugintegration eines thermoelektrischen Generators**  
Motortechnische Zeitschrift 77 (4), 38-45, 2016

Schreiner, N. S.; Baccouche, B.; Sauer-Greff, W.; Urbansky, R.; Friederich, F.  
**Fast thickness measurements with frequency modulated continuous wave terahertz radiation**  
41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016. IEEE, Art. 7758594, 2016

Pannek, C.  
**Gasdetektion: Sensorkonzept für effiziente Brandgasmelder**  
GIT Labor-Fachzeitschrift 4, 30-31, 2016

Fratz, M.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.  
**Geprüfte Oberflächen. Sub-µm Inline-3D-Oberflächenprüfung im Sekundentakt**  
InVision 2, 74-75, 2016

Krimi, S.; Klier, J.; Jonuscheit, J.; Freymann, G. von; Urbansky, R.; Beigang, R.  
**Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology**  
Applied Physics Letters 109 (2), 021105, 2016

Baccouche, B.; Mohammadzadeh, S.; Keil, A.; Kahl, M.; Haring Bolivar, P.; Loeffler, T.; Jonuscheit, J.; Sauer-Greff, W.; Urbansky, R.; Friederich, F.  
**Illumination aspects of sparse line arrays for 3D terahertz imaging**  
41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016. IEEE, Art. 7758825, 2016

Leidinger, M.; Werner, C. S.; Yoshiki, W.; Buse, K.; Breunig, I.  
**Impact of the photorefractive and pyroelectric-electro-optic effect in lithium niobate on whispering-gallery modes**

Optics Letters 41 (23), 5474-5477, 2016

Leidinger, M.; Buse, K.; Breunig, I.

**Influence of dry-oxygen-annealing on the residual absorption of lithium niobate crystals in the spectral range from 500 to 2900 nanometers**

Optical Materials Express 6 (1), 264-269, 2016

Moumen, S.; Raible, I.; Krauß, A.; Wöllenstein, J.

**Infrared investigation of CO<sub>2</sub> sorption by amine based materials for the development of a NDIR CO<sub>2</sub> sensor**

Sensors and Actuators B 236, 1083-1090, 2016

Molter, D.; Trierweiler, M.; Ellrich, F.; Jonuscheit, J.; Freymann, G. von

**Interferometry-aided delay lines for high-precision terahertz time-domain spectroscopy**

41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016. IEEE, Art. 7758584, 2016

Ziolkowski, P.; Boor, J. de; Stiewe, C.; Druschke, I.; Zabrocki, K.; Edler, F.; Haupt, S.; König, J. D.; Mueller, E. R.  
**Iron disilicide as high-temperature reference material for traceable measurements of Seebeck coefficient between 300 K and 800 K**

Journal of Electronic Materials 46 (1), 51-63, 2016

Brandenburg, A.; Holz, P.

**Kleinste Verunreinigungen werden sichtbar: Inline-Fluoreszenz-Messsystem für die Oberflächeninspektion Qualität und Zuverlässigkeit 61 (1), 48-49, 2016**

Reiterer, A.; Frey, S.; Koch, B.; Stemmler, S.; Weinacker, H.; Hoffmann, A.; Weiler, M.; Hergarten, S.

**Laser- and multi-spectral monitoring of natural objects from UAVs**

Geophysical Research Abstracts 18, Paper EGU2016-1462, 2016

Bessas, D.; Winkler, M.; Sergueev, I.; König, J. D.; Böttner, H.; Hermann, R. P.

**Lattice dynamics in elemental modulated Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films**

Physica Status Solidi A 213 (3), 694-698, 2016

Hentschel, M.; Metzger, B.; Knabe, B.; Buse, K.; Giessen, H.

**Linear and nonlinear optical properties of hybrid metallic-dielectric plasmonic nanoantennas**

Beilstein Journal of Nanotechnology 7, 111-120, 2016

Knobelspies, S.; Bierer, B.; Ortiz Perez, A.; Wöllenstein, J.; Kneer, J.; Palzer, S.

**Low-cost gas sensing system for the reliable and precise measurement of methane, carbon dioxide and hydrogen sulfide in natural gas and biomethane**

Sensors and Actuators B 236, 885-892, 2016

Pietsch, T.; Egle, S.; Keller, M.; Pernau, H.-F.; Strigl, F.; Scheer, E.

**Microwave-induced direct spin-flip transitions in mesoscopic Pd/Co heterojunctions**

New Journal of Physics 18 (9), 093045, 2016

Lambrecht, A.; Weng, B.; Shi, Z.

**Molecular Beam Epitaxy of IV-VI Compounds**

Hashmi, S. [Hrsg.]: Reference module in materials science and materials engineering. Online resource. Elsevier, 11 S.

Schiller, A. F.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Belzer, D.; Bertz, A.; Carl, D.; Buse, K.

**Multiwavelength digital holography with spatial phase shifting on moving objects**

Imaging and Applied Optics 2016. OSA Technical Digest Series, Paper DM31.6, 2016

Wolf, S.

**MWIR upconversion detection for infrared gas spectroscopy**

Imaging and Applied Optics 2016. OSA Technical Digest Series, Paper JW1F.6, 2016

Dankwort, T.; Hansen, A.-L.; Winkler, M.; Schürmann, U.; König, J. D.; Johnson, D. C.; Hinsche, N.; Zahn, P.; Mertig, I.; Bensch, W.; Kienle, L.

**Nanostructure, thermoelectric properties, and transport theory of V<sub>2</sub>VI<sub>3</sub> and V<sub>2</sub>VI<sub>3</sub>/IV-VI based superlattices and nanomaterials**

Physica Status Solidi A 213 (3), 662-671, 2016

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

**NDIR-Photometer zum Nachweis von Ethylen während der Reifung klimakterischer Früchte**

18. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016. AMA Service, 546-550, 2016

Lambrecht, A.; Bolwien, C.; Herbst, J.; Kühnemann, F.; Sandfort, V.; Wolf, S.

**Neue Methoden der laserbasierten Gasanalytik**

Chemie – Ingenieur – Technik 88 (6), 746-755, 2016

Farsadpour, S.; Taghizadeh G. L.; Kaiser, C.; Freymann, G. von  
**New class of hyperpolarizable push-pull organic chromophores by applying a novel and convenient synthetic strategy**

Dyes and Pigments 127, 73-77, 2016

Kneer, J.; Knobelspies, S.; Bierer, B.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.

**New method to selectively determine hydrogen sulfide concentrations using CuO layers**

Sensors and Actuators B 222, 625-631, 2016

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

**Nondispersive infrared photometer based on a rotating interference filter for investigation of climacteric fruit ripening**

Procedia Engineering 168, 1223-1226, 2016

Saum, N.; Förste, A.; Bertz, A.; Hofmann, A.; Carl, D.

**Oberfläche so einzigartig wie der Fingerabdruck: Markierungsfreie Verfolgung von Einzelteilen**

Qualität und Zuverlässigkeit 61 (4), 113-115, 2016

Graunke, T.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Organic membranes for selectivity enhancement of metal oxide gas sensors**

Journal of Sensors, Art. 2435945, 2016

Huber, J.; Weber, C.; Eberhardt, A.; Wöllenstein, J.

**Photoacoustic CO<sub>2</sub>-sensor for automotive applications**

Procedia Engineering 168, 3-6, 2016

Huber, J.; Enriquez, J. A.; Escobar, A.; Kolb, S.; Dehé, A.; Jost, F.; Wöllenstein, J.

**Photoakustischer Low-Cost CO<sub>2</sub>-Sensor für Automobilanwendungen**

Tille, T. [Hrsg.]: Automobil-Sensorik: Ausgewählte Sensorprinzipien und deren automobiler Anwendung. Springer Vieweg, 79-96, 2016

Klos, M.; Bartholdt, R.; Klier, J.; Lampin, J. F.; Beigang, R.  
**Photoconductive antennas based on low temperature grown GaAs on silicon substrates for broadband terahertz generation and detection**

Sadwick, L. P.; Yang, T. [Hrsg.]: Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications IX. Proceedings of SPIE 9747, Art. 974712, 2016

Meisenheimer, S.-K.; Fürst, J. U.; Schiller, A.; Holderied, F.; Buse, K.; Breunig, I.

**Pseudo-type-II tuning behavior and mode identification in whispering gallery optical parametric oscillators**

Optics Express 24 (13), 15137-15142, 2016

Pernau, H.-F.; Schmitt, K.; Huber, J.; Rademacher, S.; Eberhardt, A.; Wöllenstein, J.

**Resonant photoacoustic CO<sub>2</sub> spectroscopy with LED light source**

Procedia Engineering 168, 1325-1328, 2016

Hofmann, A.

**Rückverfolgung ohne Markierung: Track & Trace anhand von Oberflächen-Mikrostrukturen**

InVision 5, 900-901, 2016

Krimi, S.; Klier, J.; Jonuscheit, J.; Freymann, G. von; Urbansky, R.; Beigang, R.

**Self-calibrating approach for terahertz thickness measurements of ceramic coatings**

41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016. IEEE, Art. 775854, 2016

Huber, J.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

**Simulation model for the evaluation and design of miniaturized non-resonant photoacoustic gas sensors**

Journal of Sensors and Sensor Systems 5 (2), 293-299, 2016

Waller, E. H.; Freymann, G. von

**Spatio-temporal proximity characteristics in 3D  $\mu$ -printing via multi-photon absorption**

Polymers 8 (8), Art. 297, 2016

Leidinger, M.; Sturman, B.; Buse, K.; Breunig, I.

**Strong forward-backward asymmetry of stimulated Raman scattering in lithium-niobate-based whispering gallery resonators**

Optics Letters 41 (12), 2823-2826, 2016

Ellrich, F.; Klier, J.; Weber, S.; Jonuscheit, J.; Freymann, G. von  
**Terahertz time-domain technology for thickness determination of industrial relevant multi-layer coatings**

41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2016. IEEE, Art. 7758614, 2016

Jonuscheit, J.

**Terahertz waves for thickness analyses:**

**Non-destructive component analysis using terahertz time domain spectroscopy**

Optik & Photonik 11 (1), 30-33, 2016

Jäggle, M.; Pernau, H.-F.; Pfützner, M.; Benkendorf, M.; Li, X.; Bartel, M.; Herm, O.; Drost, S.; Rutsch, D.; Jacquot, A.; Wöllenstein, J.

**Thermal-electrical impedance spectroscopy for fluid characterisation**

Procedia Engineering 168, 770-773, 2016

Freymann, G. von; Jonuscheit, J.

**THz technology - from hype to market**

Photonik. Sonderheft LASER+PHOTONICS, 102-105, 2016

Graunke, T.; Schmitt, K.; Raible, S.; Wöllenstein, J.

**Towards enhanced gas sensor performance with fluoropolymer membranes**

Sensors 16 (10), Art. 1605, 2016

Holz, P.; Hauer, B.; Brandenburg, A.; Wadle, S.; Zehnle, S.; Keller, M.; Müller, R.; Koger, B.

**A universal platform for nucleic acid based point-of-care diagnostics**

Biomedizinische Technik 61 (s1), S33, 2016

Huber, J.; Catalan, N.; Wöllenstein, J.

**Untersuchungen zum Einsatz von Puffergasen in photoakustischen Detektoren zur Optimierung von CO<sub>2</sub>-Sensoren**

18. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2016. AMA Service, 449-454, 2016

Fürst, J. U.; Sturman, B.; Buse, K.; Breunig, I.

**Whispering gallery resonators with broken axial symmetry: Theory and experiment**

Optics Express 24 (18), 20143-20155, 2016

## DOKTORARBEITEN 2016

Hohmann, J.

**Influence of Direct Laser written 3D Topographies on Biological Cells**

Kaiserslautern, TU, Diss., 2016

Huber, J.

**Miniaturisierter photoakustischer Gassensor für den Nachweis von Kohlendioxid**

Der Andere Verlag, 2016 (Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2016)

Leidinger, M.

**Flüstergalerieresonatoren aus Lithiumniobat: lineare und nichtlineare Verlustkanäle und zeitliche Frequenzstabilität**

Books on Demand, 2017 (Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2016)

Rämer, J.-M.

**A terahertz time-domain spectroscopy-based vector network analyzer setup with integrated pulse shaping**

Verlag Dr. Hut, 2016 (Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2016)

Weber, S.

**Aufbau eines Zeitstrecksystems zur Detektion hochfrequenter Signale**

Verlag Dr. Hut, 2016 (Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2016)

## ERTEILTE PATENTE 2016

Blug, A.

**Method for assigning image points**

DE102009006089

Molter, D.

**Short-pulse laser system**

US9, 425, 578

Beckmann, T.; Fratz, M.

**Vorrichtung und Verfahren zur Vermessung eines Höhenprofils einer Oberfläche unter Verwendung zumindest eines dispersiven Elementes**

DE102014223748

Fratz, M.; Beckmann, T.

**Vorrichtung und Verfahren zur Vermessung eines Höhenprofils einer Oberfläche unter Verwendung einer länglichen Blende**

DE102014223747

Lambrecht, A.

**Multireflexionszellenanordnung**

DE102014104043

Kaiser, C.; Weber, S.; von Freymann, G.

**Optischer Analog-Digital-Wandler**

DE102014105139

Weber, S.; Kaiser, C.; von Freymann, G.

**Zeitaufgelöstes Spektrometer und Verfahren zum zeitaufgelösten Erfassen eines Spektrums einer Probe**

DE102014111309

Kießling, J.; Kühnemann, F.; Breunig, I.

**Vorrichtung und Verfahren zum Erzeugen elektromagnetischer Strahlung**

DE102014017931

Lambrecht, A.; Kühnemann, F.; Herbst, J.; Kießling, J.; Wolf, S.

**Optische Messvorrichtung und optisches Messverfahren**

DE102015109430



## MESSEN 2016

### wire

#### Internationale Fachmesse Draht und Kabel

Düsseldorf, 04.04.2016–08.04.2016

Fraunhofer IPM präsentierte eine Methode zur berührungslosen Schichtdickenmessung mittels Terahertz-Wellen sowie das System WIRE-HR zur Draht-Inspektion, das auch bei Geschwindigkeiten bis zu 30 m/s die Drahtoberfläche im Ziehprozess vollständig inspiziert.

### Hannover Messe

#### Digital Factory

Hannover, 25.04.2016–29.04.2016

BW-Gemeinschaftsstand Industrie 4.0

Auf der Hannover Messe 2016 stellte Fraunhofer IPM das »Track & Trace Fingerprint«-Verfahren zur markierungsfreien Bauteilidentifikation vor. Es ermöglicht eine lückenlose Rückverfolgung auch kleiner, preiswerter Bauteile.

### Control

#### Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung

Stuttgart, 26.04.2016–29.04.2016

Stand der Fraunhofer Allianz-Vision

Präsentiert wurden Systeme zur markierungsfreien Rückverfolgung von Bauteilen anhand ihrer Oberflächenstruktur, zur bildgebenden Inline-Detektion von Restverschmutzungen und Defekten sowie zur berührungslosen Inline-Schichtdickenmessung mittels Terahertz-Wellen.

### E-MRS Spring Meeting

#### European Materials Research Society

Lille, 02.05.2016–06.05.2016

Stand mit Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH

Beim Frühjahrstreffen der europäischen Gesellschaft für Materialforschung präsentierte Fraunhofer IPM gemeinsam mit der Firma Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH individuelle Messsysteme zur Materialcharakterisierung.

### Sensor+Test

#### Die Messtechnik-Messe

Nürnberg, 10.05.2016–12.05.2016

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer IPM präsentierte mechanisch flexible Gas-, Flüssigkeits-, und Festkörpersensoren für Anwendungen im Food Chain Management, Automobil, in der Prozesskontrolle oder Biotechnologie.

### parts2clean

#### Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung

Stuttgart, 31.05.2016–02.06.2016

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer IPM zeigte zwei Exponate zur Qualitätsüberwachung bzw. Defekterkennung von Bauteilen in Produktionsabläufen in der Automobilindustrie, Medizintechnik, im Anlagenbau und in Rolle-zu-Rolle-Prozessen.

### InnoTrans

#### Internationale Fachmesse für Bahn- und Verkehrstechnik

Berlin, 20.09.2016–23.09.2016

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Vorgestellt wurde das Contact Wire Inspection System CIS. Es bestimmt in einem einzigen Messvorgang Lage und Abnutzung von bis zu zehn Fahrdrähten gleichzeitig.

### Chillventa

#### Messe rund um Energieeffizienz, Wärmepumpen und Kältetechnik

Nürnberg, 11.10.2016–13.10.2016

Fraunhofer IPM demonstrierte ein neuartiges, patentiertes Systemkonzept für kalorische Kühlung basierend auf latentem Wärmeübertrag.

### electronica

#### Weltleitmesse für Komponenten, Systeme und Anwendungen der Elektronik

München, 08.11.2016–11.11.2016

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Auf der electronica 2016 stellte Fraunhofer IPM Systeme zur bildgebenden Reinheitsprüfung und Defekterkennung sowie zur Echtzeit-Messung von Mikrodeformation in elektrischen Bauteilen vor.

## MESSEN 2017: VORSCHAU

### Control

Stuttgart, 09.05.2017–12.05.2017

### Sensor+Test

Nürnberg, 30.05.2017–01.06.2017

### LASER World of PHOTONICS

München, 26.06.2017–29.06.2017

### INTERGEO

Berlin, 26.09.2017–28.09.2017

### DeburringEXPO

Karlsruhe, 10.10.2017–12.10.2017

### parts2clean

Stuttgart, 24.10.2017–26.10.2017

### Blechexpo

Stuttgart, 07.11.2017–10.11.2017

^ Im Rahmen der »Digital Factory« der Hannover Messe stellte Fraunhofer IPM »Track & Trace Fingerprint« vor, ein System zur markierungsfreien Rückverfolgung.

## VERANSTALTUNGEN UND WORKSHOPS AM FRAUNHOFER IPM



Angeregte Diskussionen während der Pausen beim MoLaS-Workshop: Zum zweiten Mal organisierte Fraunhofer IPM die Veranstaltung zum Thema mobiles Laserscanning.

### Spectaris Wissensraum: Moderne optische Analyseverfahren in der Medizintechnik

Fraunhofer IPM, Freiburg, 28.1.2016

Experten berichteten über aktuelle Anforderungen im Bereich der optischen Diagnostik und diskutierten unterschiedliche Lösungsansätze mit optischer Sensorik.

### Internationaler Terahertz-Workshop 2016

Fraunhofer IPM, Kaiserslautern, 15.3.2016 – 16.3.2016

Die Terahertz-Technologie ist ein sich schnell entwickelndes und spannendes Gebiet. Ziel des siebten Internationalen Terahertz-Workshops war es, den Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaftlern und Industrie zu fördern.

### Girls' Day

Fraunhofer IPM, Freiburg, 28.4.2016

Fraunhofer IPM beteiligte sich 2016 bereits zum 16. Mal am internationalen Girls' Day, um mehr Mädchen für wissenschaftliche Berufe zu begeistern. Schülerinnen ab der achten Klasse konnten im Rahmen ihres Besuchs die Labore und Werkstätten kennenlernen.

### MoLaS-Technology Workshop Mobile Laser Scanning

Fraunhofer IPM, Freiburg, 23.11.2016 – 24.11.2016

Mobiles Laserscanning hat sich zu einer Schlüsseltechnologie der 3D-Vermessung entwickelt. Beim »Mobile Laser Scanning Workshop« präsentierten internationale anerkannte Experten den mehr als einhundert Teilnehmern die neuesten technologischen Trends auf diesem Gebiet.

### Fraunhofer IPM

Fraunhofer-Institut für  
Physikalische Messtechnik IPM  
Heidenhofstraße 8  
79110 Freiburg  
T +49 761 8857-0  
F +49 761 8857-224  
info@ipm.fraunhofer.de  
[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)

### Anschrift der Redaktion

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

### Redaktion

Holger Kock, Anja Strobel

### Layout und Gestaltung

Sonja Weckerlin

### Bildquellen

ArTo / Fotolia (S. 32)  
christian42 / Fotolia (S. 41)  
Dominik Probst (S. 14)  
Fraunhofer IPM (S. 27,39,53)  
Holger Kock (S. 3,4,5,6,7,9,12,13,16,18,19,22,23,25,29,35,49,52)  
Kai-Uwe Wudtke (S. 4,5,28,34,43,46,47,48)  
Kai-Uwe Wudtke / Montage: Fraunhofer IPM (Titelbild)  
kister scheithauer gross architekten (S. 11)  
Klaus Polkowski (S. 11,12,17,64)  
Kushnirov Avraham / Fotolia (S. 45)  
Lehmann + Partner GmbH (S. 17,31,33)  
IOvE IOvE / Fotolia (S. 37)  
Marc Müller (S. 15)  
Matee Nuserm / Fotolia (S. 26)  
oYOo / Shutterstock (S. 21)  
PANORAMO / Fotolia (S. 42)  
Paul Vinten / Fotolia (S. 38)  
Petra Bork / pixelio.de (S. 51)  
Sabine Gabele (S. 14)  
Andreas Blug (S. 13)

### Druck

Druckerei Herbstritt GmbH, 79350 Sexau



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

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

