



# Fraunhofer

IPM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK IPM

Messen · Kontrollieren · Optimieren

2013  
2014

Messen · Kontrollieren · Optimieren

**Titel** Mit Geschwindigkeiten von 10 Metern pro Sekunde schießt der Drahtrohling aus dem Ziehstein. Ein optisches Inspektionssystem erkennt dabei Mikrodefekte auf der Drahtoberfläche.

- PRODUKTIONSKONTROLLE
- MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG
- OBJEKT- UND FORMERFASSUNG
- GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE
- ENERGIESYSTEME



Prof. Dr. Karsten Buse  
Institutsleiter

#### Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

anspruchsvolle Messaufgaben mit schlüsselfertigen und zertifizierten Geräten zu adressieren, ist weiter die besondere Stärke unseres Instituts. Oft stehen genaue Messtechnik und widrige Einsatzbedingungen vermeintlich unvereinbar im Gegensatz zueinander. Erst die richtige Auswahl des Verfahrens und eine optimale Integration von Optik, Elektronik und Mechanik ermöglichen es, diese Gegensätze zu vereinbaren.

Messsysteme, die bei der High-Throughput-Metallverarbeitung eine 100-Prozent-Kontrolle auf Defekte im Mikrometerbereich ermöglichen, sind keine Selbstverständlichkeit. Gleiches gilt für Laserscanner, die Signale von nur wenigen 100 Photonen von Lokomotiven aus über Jahre zuverlässig messen – in der brasilianischen Sonne ebenso wie in sibirischer Kälte. Dies gelingt nur, wenn Systemkompetenz und Know-how zur passenden physikalischen Messmethode zusammenkommen. Passend heißt hier: Das System löst nicht nur das Messproblem, sondern berücksichtigt auch die spezifischen Anforderungen des Kunden. Ein Beispiel: Im Jahr 2013 haben wir erstmals – und sofort erfolgreich – Ultraschallmesstechnik zur Verschleißmessung in einer Umgebung mit viel Sand, Lehm und Gestein eingesetzt.

Darüber hinaus konnten wir abermals Messmethoden weiterentwickeln, bei denen wir eine Alleinstellung haben: Die kontaktfreie Online-Mehrschicht-Dickenbestimmung ist ein Meilenstein beim Markteintritt der Tera-

hertz-Technologie. Auch haben wir gezeigt, dass Terahertz-Wellen hervorragend geeignet sind, um Höchstfrequenz-Elektronik-Bauteile zu charakterisieren. Unsere integrierten Sensorsysteme haben durch die Kombination von Dünnschichttechnologie mit optischen Ausleseverfahren deutliche Fortschritte gemacht; und die thermoelektrischen Messgeräte wurden so stark integriert, dass sie sogar als hochempfindliches Breitbandradiometer dienen können.

Für spezielle Aufgaben, bei denen der Einsatz von Standardmaterialien nicht ausreicht, erforschen und entwickeln wir neue Materialien. Bei der Thermoelektrik gibt es hier sehr erfreuliche Fortschritte: nicht nur in Bezug auf die thermoelektrischen Materialien selbst, sondern auch bei der Aufbau- und Verbindungstechnik, um Module kostengünstiger zu fertigen. Auch unser neues Feld »Technologie Optischer Materialien« nimmt Fahrt auf: Die hochsensitiven photoakustischen und photothermischen Absorptionsmessungen haben sich als »Renner« entpuppt, der sowohl von externen Partnern zur Qualifizierung eigener Bauteile gefragt ist, als auch intern genutzt wird – hier insbesondere zum Aufbau optisch-parametrischer Oszillatoren, also Synthesizern für Laserlicht.

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

Ihr

Karsten Buse



# INHALTSVERZEICHNIS

|       |                                                                |
|-------|----------------------------------------------------------------|
| 5     | Editorial                                                      |
| 8     | Nachrichten                                                    |
| 11    | Betriebshaushalt   Personal                                    |
| 12    | Lehrstühle in Freiburg und Kaiserslautern                      |
| 13    | Kuratorium   Partner   Netzwerke                               |
| 14    | Organisation   Ansprechpartner                                 |
| <hr/> |                                                                |
| 16    | PRODUKTIONSKONTROLLE                                           |
| 18    | Draht ohne Makel: Dokumentierte Qualität in Echtzeit           |
| 19    | Saubere Bauteile: Reinheitsprüfung mit Laserscannern           |
| <hr/> |                                                                |
| 20    | MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG                         |
| 22    | Schicht um Schicht: Zerstörungsfreie Mehrschichtanalyse        |
| 23    | Messgerät mit Potenzial: Netzwerk-Analyse mit Terahertz-Wellen |
| <hr/> |                                                                |
| 24    | OBJEKT- UND FORMERFASSUNG                                      |
| 26    | Was steckt in der Punktwolke? Neue Algorithmen erkennen mehr   |
| <hr/> |                                                                |
| 28    | GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE                                    |
| 30    | Gassensoren von der Rolle: Brandgase schnell erkennen          |
| 31    | Ultraschall im Schlamm: Verschleißmessung unter Tage           |
| 32    | Laserlicht von blau bis rot: Wellenlängen auf Knopfdruck       |
| <hr/> |                                                                |
| 34    | ENERGIESYSTEME                                                 |
| 36    | Flexibel messen: Sensoren auf biegsamen Trägermaterialien      |
| 37    | Kontaktfreudig: Hightech am Lötplatz                           |
| <hr/> |                                                                |
| 38    | Die Fraunhofer-Gesellschaft                                    |
| 39    | Fraunhofer-Standorte   Adressen                                |
| 40    | Publikationen                                                  |
| 43    | Publikationen   Doktorarbeiten                                 |
| 44    | Messen                                                         |
| 45    | Tagungen   Workshops                                           |
| 46    | Impressum                                                      |

## AUS FREIBURG UND KAISERSLAUTERN

### 40 Jahre Fraunhofer IPM

Rund 250 geladene Gäste feierten im Juli 2013 das 40-jährige Institutsjubiläum. Die Gastredner Wirtschaftsminister Nils Schmid, Fraktionsvorsitzende von Bündnis 90/Die Grünen im Landtag Baden-Württemberg Edith Sitzmann, Oberbürgermeister Dieter Salomon, Universitätsrektor Hans-Jochen Schiewer und Fraunhofer-Vorstandsmitglied Alexander Kurz würdigten die Leistungen des Instituts und prophezeiten ihm eine aussichtsreiche Zukunft. Die Institutsgeschichte begann im Jahr 1963, als Professor Karl Rawer in Freiburg eine Arbeitsgruppe gründete, die sich der Weltraumforschung widmete. Im Jahr 1973 ging daraus das Fraunhofer-Institut für Physikalische Weltraumforschung IPW hervor. In den 1980er Jahren verlagerte und erweiterte das Institut sein Forschungsspektrum und trägt seither den Namen Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM. Noch heute widmet sich ein Teil des Instituts der Weltraumforschung, auch wenn der

Forschungsschwerpunkt inzwischen auf der industriellen Messtechnik liegt. Höhepunkte der Veranstaltung waren das Interview mit dem heute 100-jährigen Professor Karl Rawer, in dem er aus seinem Leben und von den Anfängen des Instituts berichtete, sowie der Vortrag »Verheizen wir unser Klima?« des Klimaforschers Prof. Dr. Mojib Latif.

### Neubau in Freiburg und Kaiserslautern

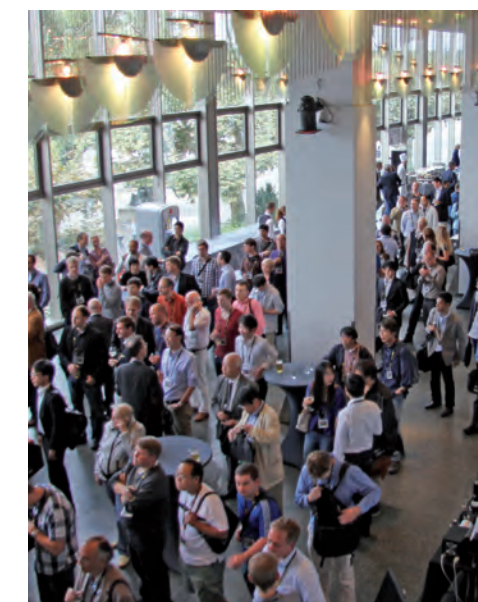
Das Institutsgebäude am Standort Freiburg ist der steigenden Zahl an Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und dem Bedarf an neuen Test- und Laborräumen nicht mehr gewachsen. Daher ist ein Neubau in direkter Nachbarschaft zur Technischen Fakultät der Universität Freiburg in Planung. Der Neubau ist Teil eines Leuchtturmprojekts des Landes Baden-Württemberg und der Fraunhofer-Gesellschaft zur Stärkung der Forschung und Entwicklung auf den Gebieten nachhaltige Erzeugung und Nutzung von Ressourcen und Energie. Das gemeinsame Vorhaben von Fraunhofer IPM und Fraunhofer ISE soll das »Sustainable Energy Valley« in Freiburg werden. Für die Erweiterung von Fraunhofer IPM stehen 54 Millionen Euro zur Verfügung. Auch am Standort Kaiserslautern geht es mit dem Neubau für die Abteilung Materialcharakterisierung und -prüfung voran! Am 30. Januar 2014 wurde bereits Richtfest gefeiert. Schon im Dezember 2014 sollen die neuen Räume bezogen werden. Das Gebäude wird zukünftig Raum für 50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bieten.



*Vertreter aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gratulierten Institutsleiter Karsten Buse (links) und Institutsgründer Karl Rawer (3.v.r.) zum Jubiläum: Wirtschaftsminister Nils Schmid (2.v.l.), Fraktionsvorsitzende von Bündnis 90/Die Grünen im Landtag Baden-Württemberg Edith Sitzmann (3.v.l.), der Rektor der Universität Freiburg Hans-Jochen Schiewer (2.v.r.) und Fraunhofer-Vorstandsmitglied Alexander Kurz (rechts).*

### Fraunhofer IPM richtet Tagung zu Infrarot- und Terahertz-Forschung aus

Anfang September 2013 begrüßte Fraunhofer IPM gemeinsam mit der Technischen Universität Kaiserslautern in der Mainzer Rheingoldhalle Experten aus aller Welt zur »38. International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)«. Die weltweit bedeutendste Fachtagung zum Thema langwelliges Licht findet jährlich statt und wird abwechselnd in Asien, Europa und Nordamerika ausgerichtet. Über 650 Experten diskutierten über wissenschaftliche Aspekte von Infrarot-, Millimeter- und Terahertz-Wellen. Auch die Nutzung dieser langwelligen Lichtstrahlen zur Materialcharakterisierung und ihre Anwendung in der Sicherheitstechnologie, Kommunikation oder Biotechnologie wurden thematisiert. Zusätzlich präsentierten 34 Unternehmen im Rahmen einer Industrieausstellung ihre innovativen Produkte.



*Bild oben rechts: André Eberhardt (links) belegte mit seiner Diplomarbeit den ersten Platz des Nachwuchspreises »Green Photonics«. Dr. Tobias Weiler (rechts), Geschäftsführer von SPECTARIS, überreichte den Preis im Rahmen der Hannover Messe.*

*Bild rechts: Auf der internationalen Fachtagung IRMMW-THz präsentierten Unternehmen ihre innovativen Produkte. Dies sorgte für regen Austausch zwischen den Experten.*

### Nachwuchspreis »Green Photonics« für Fraunhofer IPM-Diplomand

André Eberhardt belegte mit seiner am Fraunhofer IPM entstandenen Diplomarbeit den mit 1500 Euro dotierten ersten Platz des Nachwuchspreises »Green Photonics«. Der Preis



wird jährlich vom Fraunhofer-Innovationscluster »Green Photonics« an insgesamt acht junge Forscherinnen und Forscher verliehen, die sich in ihren Abschlussarbeiten mit der nachhaltigen Nutzung von Licht befassen. Eberhardt entwickelte einen photometrischen Gassensor zur Bestimmung des CO/CO<sub>2</sub>-Gleichgewichts in der Roheisenherstellung. Durch gezielte Gaszufuhr wird dabei eine für den Schmelzprozess optimale Zusammensetzung der Gase erreicht. Der Sensor soll Energie- und Rohstoffeinsparungen ermöglichen und den Kohlendioxid-Ausstoß bei der Eisenherstellung verringern. Das Messsystem ist eine preisgünstige Alternative zu den üblicherweise verwendeten Massenspektrometern. Betreut wurde die Arbeit von Prof. Jürgen Wöllenstein, der am Fraunhofer IPM die Gruppe Integrierte Sensorsysteme leitet.

### Fraunhofer IPM räumt zwei »Prism Awards« ab

Gleich zwei optische Systeme, die Fraunhofer IPM gemeinsam mit dem Kasseler Systemanbieter HÜBNER GmbH & Co. KG entwickelt hat, wurden mit dem renommierten »Prism Award 2014« ausgezeichnet. Der Wissenschaftspreis für neuartige Photonik-Anwendungen wird jährlich auf der weltweit wichtigsten Photonik-Messe »Photonics West« in Kalifornien verliehen. In der Kategorie Sicherheit überzeugte das Terahertz-Spektrometer »T-COGNITION«, das innerhalb weniger Sekunden verborgene Drogen oder Sprengstoffe in Postsendungen identifiziert. Damit trägt »T-COGNITION« zur Sicherheit in Poststellen, Justizvollzugsanstalten oder anderen sensiblen Einrichtungen wie etwa Botschaften bei. Der optisch-parametrische Oszillator »C-WAVE« gewann in der Kategorie der wissenschaftlichen Laser. Mit »C-WAVE« steht erstmals ein optisch-parametrischer Oszillator zur Verfügung, der Laserlicht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich kontinuierlich emittiert. Eine Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Optische Systeme an der Universität Freiburg, Fraunhofer IPM und der HÜBNER GmbH & Co. KG hat es ermöglicht, dass aus einem Laboraufbau innerhalb eines Jahres das preisgekrönte Produkt »C-WAVE« geworden ist.

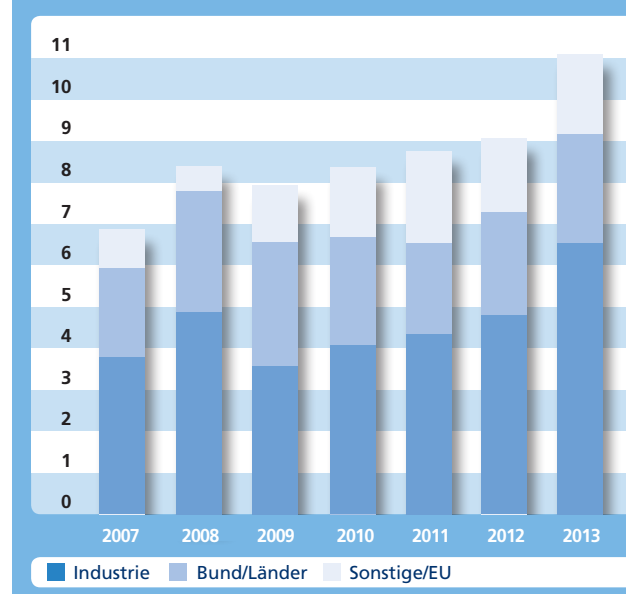
### Forschung zum Anfassen auf dem Wissenschaftsmarkt

Im Juli 2013 fand auf dem Münsterplatz der Freiburger Wissenschaftsmarkt unter dem Motto »Wissen – Staunen – Mitmachen« statt. Über 10 000 Besucher erlebten an 60 Ständen der Albert-Ludwigs-Universität, des



Universitätsklinikums Freiburg und der regionalen Hochschulen und Forschungseinrichtungen Wissenschaft hautnah. Auch die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute präsentierten Beispiele aus ihrer Forschung. Fraunhofer IPM demonstrierte mit der »Thermoelektrischen Eisenbahn« und der »Sprechenden Kaffeekanne«, wie sich Abwärme in elektrischen Strom umwandeln lässt. Dies geschieht mit thermoelektrischen Modulen, die am Fraunhofer IPM entwickelt werden. Die »Sprechende Kaffeekanne« beispielsweise erzeugt aus der Abwärme des Kaffees genug Strom, um die Kaffeetemperatur und den Füllstand der Kanne zu messen, diese Informationen an ein Notebook zu senden und so bei Bedarf neuen Kaffee zu ordern.

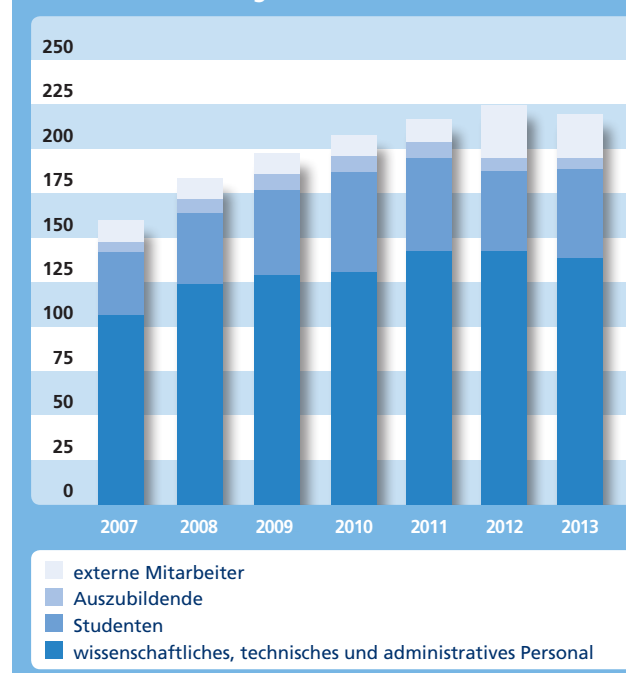
Struktur eingeworbene Erlöse 2007 bis 2013 in Mio EUR



### Betriebshaushalt

Im Jahr 2013 betrug der Betriebshaushalt von Fraunhofer IPM 15,3 Millionen Euro und ist damit um 1,6 Millionen Euro höher als im Jahr 2012. Der Betriebshaushalt setzt sich zusammen aus Industrierlösen, öffentlich geförderten Projekten und der Grundfinanzierung. Dabei liegt der Anteil externer Finanzierungsgelder, bestehend aus externen öffentlichen Geldern und Industrierlösen, bei 72,2 Prozent bzw. 11,1 Millionen Euro (Abb. links). Die Industrierlöse machen mit 6,5 Millionen Euro einen Anteil von 42,6 Prozent am Betriebshaushalt aus. Das entspricht einer Steigerung um über 7 Prozentpunkte gegenüber dem Vorjahr (35,3 Prozent bzw. 4,8 Millionen Euro).

Personalentwicklung 2007 bis 2013



### Personal

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich die Mitarbeiterzahl kaum verändert. Insgesamt 136 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind bei Fraunhofer IPM in Festanstellung beschäftigt, davon 13 am Standort Kaiserslautern. Am Institut arbeiten rund 54 Studenten und Berufseinsteiger, davon 46 Diplomanden, Master- und Bachelorstudenten, 8 Auszubildende, Praktikanten und Hilfskräfte. Zusätzlich sind etwa 25 externe Mitarbeiter am Fraunhofer IPM tätig (Abb. links). Prozentual verteilen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter 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.

*Hervorragende Stimmung bei der Verleihung der »Prism Awards« auf der Photonics West in Kalifornien. Mitarbeiter von Fraunhofer IPM, der Universität Freiburg und dem Industriepartner HÜBNER GmbH & Co. KG feiern den doppelten Erfolg von »T-COGNITION« und »C-WAVE«.*

## BESTENS VERNETZT

Fraunhofer IPM ist durch assoziierte Lehrstühle mit den lokalen Universitäten in Freiburg und Kaiserslautern bestens vernetzt. So stehen wir in direktem Kontakt zur Grundlagenforschung und können auf neuste Forschungsergebnisse zurückgreifen. An den Lehrstühlen sind insgesamt etwa 45 Post-Doktoranden, Doktoranden und Masterstudenten tätig.

### Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

#### Lehrstuhl für Optische Systeme

##### Prof. Dr. Karsten Buse

Forschungsschwerpunkte sind nichtlinear-optische Materialien und Flüstergalerieresonatoren. Ein Ziel ist die Miniaturisierung optisch-parametrischer Oszillatoren. Gemeinsam mit weiteren Optik-Lehrstühlen wurde ein Optik-Kolloquium ins Leben gerufen und die Spezialisierungsmöglichkeit »Photonics« im Masterstudiengang Mikrosystemtechnik geschaffen. Gruppenleiter Dr. Ingo Breunig betreut die Forschungsarbeiten am Lehrstuhl.

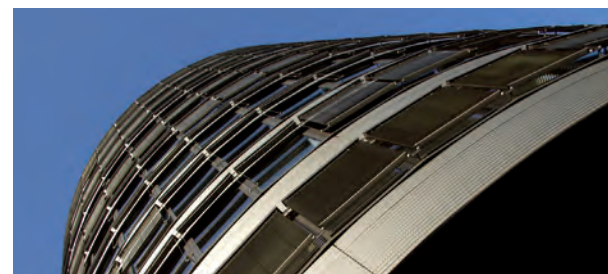
#### Lehrstuhl für Gassensoren

##### Prof. Dr. Jürgen Wöllein

Am Lehrstuhl werden gassensitive Materialien, Sensoren und Sensorsysteme entwickelt. Im Zentrum der Forschung stehen miniaturisierte, energiesparende Gassensysteme.



### Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Physik



Verwaltungsgebäude der TU Kaiserslautern.

#### Lehrstuhl für Optische Technologien und Photonik

##### Prof. Dr. Georg von Freymann

Die Arbeitsgruppe studiert die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Ziel ist unter anderem die Erzeugung dreidimensionaler Mikro- und Nanostrukturen als Grundlage funktionaler Materialien für die Photonik. Als zentrale Technologie zur Herstellung solcher Strukturen wird die dreidimensionale Laserlithographie genutzt.

#### Lehrstuhl für Ultraschnelle Photonik und THz-Physik

##### Prof. Dr. René Beigang

Im Zentrum der Arbeiten stehen Verfahren zur Erzeugung und zum Nachweis von THz-Strahlung, die Terahertz-Zeitbereich-Spektroskopie sowie Anwendungen der Terahertz-Technologie.

Campus der Technischen Fakultät der Universität Freiburg.

#### Unser Kuratorium

- Reinhard Hamburger, Vorsitzender des Kuratoriums, C-FOR-U Business Coaching
- Arno Bohn, Bohn Consult Unternehmerberatung GmbH
- Wolfgang Bay, Sick AG
- Dr. Bernd Dallmann, Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe GmbH & Co. KG
- Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Prof. Dr. Maximilian Fleischer, Siemens AG
- Prof. Dr. Thomas Graf, Direktor des Instituts für Strahlwerkzeuge IFSW der Universität Stuttgart
- Siegfried Groß, Agilent Technologies Deutschland GmbH
- Dr. Ehrentraud Graw, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
- Prof. Dr. Jan G. Korvink, Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg, IMTEK
- Prof. Dr. Gunther Neuhaus, Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg, Prorektor für Forschung
- Dr. Volker Nussbaumer, Deutsche Telekom AG
- Dr. Christian Schmitz, Geschäftsführer der TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
- Dr. Knut Siercks, Geschäftsführer vom Hexagon Technology Center (CH-Heerbrugg)
- Prof. Dr. Michael Totzeck, Carl Zeiss AG
- Dr. Carola Zimmermann, Referatsleiterin Abt. Forschung und Technologie, Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (MBWWK) des Landes Rheinland-Pfalz

#### Partner und Netzwerke

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

#### Fraunhofer-Gesellschaft

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

#### Deutschland

- AMA Fachverband für Sensorik
- Arbeitskreis Prozessanalytik der Dechema
- Biovalley
- BBA – Batterie- und Brennstoffzellenallianz BW
- CAST – Competence Center for Applied Security
- Clusterplattform für Bahntechnik, Center for Transportation & Logistics
- DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
- DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft
- DTG – Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft
- DTZ – Deutsches Terahertz-Zentrum e.V.
- FAIM IMTEK – Forum Angewandte Informatik und Mikrosystemtechnik
- GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker
- Green City Freiburg Regional Cluster
- LRBW – Forum Luft- und Raumfahrt BW
- MSTBW – Mikrosystemtechnik BW
- Optence e.V.
- Photonics BW
- SPECTARIS – Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V.
- VDI OPTAM – Optische Analysenmesstechnik
- VDI/VDE – GMA Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
- VDMA – Photovoltaik-Produktionsmittel; E-Batterie
- VDSI – Verband Deutscher Sicherheitsingenieure

#### International

- ACS – American Chemical Society
- ETS – European Thermoelectric Society
- ITS – International Thermoelectric Society
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- LIA – Laser Institute of America
- MRS – Material Research Society
- OSA – Optical Society of America
- SPIE – International Society for Optical Engineering



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



**Stellvertretender Institutsleiter**  
Dr. Heinrich Höfler  
Telefon +49 761 8857-173  
heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de



**Referentin der Institutsleitung**  
Dr. Rosita Sowade  
Telefon +49 761 8857-222  
rosita.sowade@ipm.fraunhofer.de



**Verwaltung und IT**  
Jörg Walter  
Telefon +49 761 8857-120  
joerg.walter@ipm.fraunhofer.de



**Technische Dienste**  
Clemens Faller  
Telefon +49 761 8857-214  
clemens.faller@ipm.fraunhofer.de



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



**Neue Technologien und Patente**  
Holger Kock  
Telefon +49 761 8857-129  
holger.kock@ipm.fraunhofer.de

**Produktionskontrolle**



**Abteilungsleiter**  
Dr. Heinrich Höfler  
Telefon +49 761 8857-173  
heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de



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



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



**Optische Oberflächen-analytik**  
PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg  
Telefon +49 761 8857-306  
albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de

**Materialcharakterisierung und -prüfung**



**Abteilungsleiter**  
Prof. Dr. Georg von Freymann  
Telefon +49 631 205-5225  
georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de



**Stellvertretender Abteilungsleiter**  
Dr. Joachim Jonuscheit  
Telefon +49 631 205-5107  
joachim.jonuscheit@ipm.fraunhofer.de



**Industrielle Terahertz-Messtechnik**  
Dr. Frank Ellrich  
Telefon +49 631 205-5109  
frank.ellrich@ipm.fraunhofer.de



**Terahertz-Opto-Elektronik**  
Prof. Dr. Georg von Freymann  
Telefon +49 631 205-5225  
georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de

**Objekt- und Formerfassung**



**Abteilungsleiter**  
Dr. Heinrich Höfler  
Telefon +49 761 8857-173  
heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de



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



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

**Gas- und Prozesstechnologie**



**Abteilungsleiter**  
Dr. Armin Lambrecht  
Telefon +49 761 8857-122  
armin.lambrecht@ipm.fraunhofer.de



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



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



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



**Technologie Optischer Materialien**  
Dr. Frank Kühnemann  
Telefon +49 761 8857-457  
frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

**Energiesysteme**



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



**Stellvertretender Abteilungsleiter**  
Martin Jäggle  
Telefon +49 761 8857-345  
martin.jaeggle@ipm.fraunhofer.de



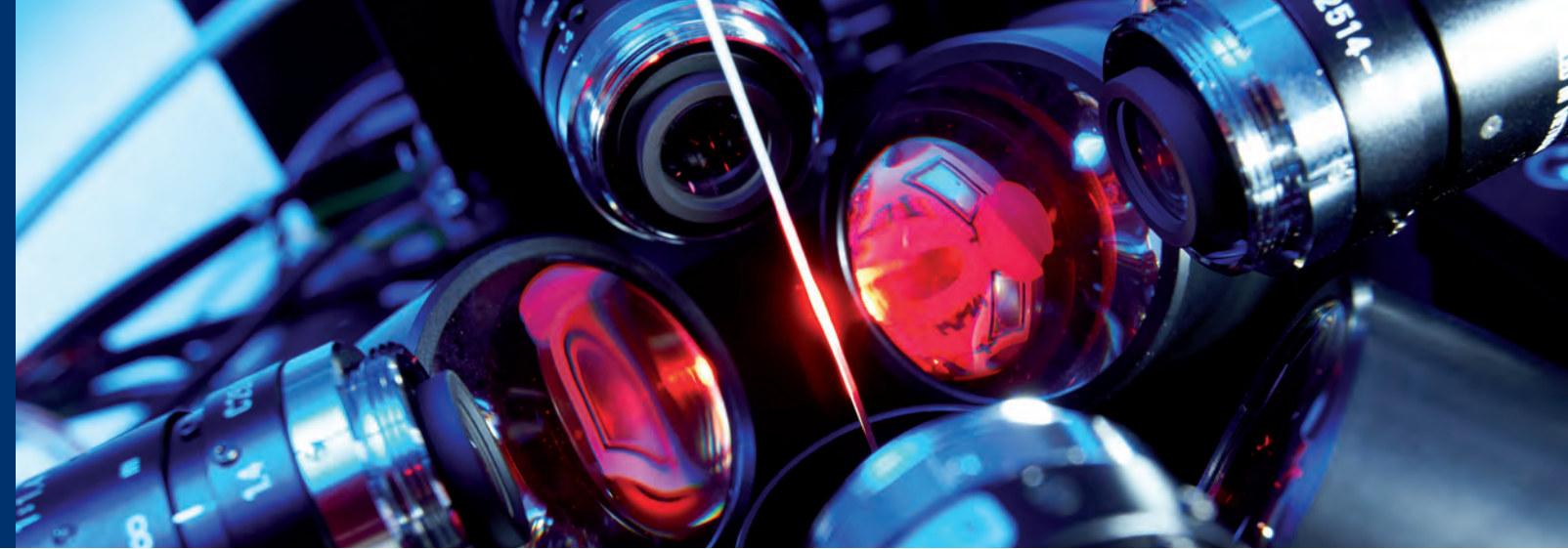
**Stellvertretender Abteilungsleiter**  
Dr. Jan König  
Telefon +49 761 8857-329  
jan.koenig@ipm.fraunhofer.de



**Energieautarke Systeme und Thermoelektrische Messtechnik**  
Martin Jäggle  
Telefon +49 761 8857-345  
martin.jaeggle@ipm.fraunhofer.de



**Thermoelektrische Energiewandler**  
Dr. Jan König  
Telefon +49 761 8857-329  
jan.koenig@ipm.fraunhofer.de



## THEMEN

- ▶ Oberflächenanalytik
- ▶ 100-Prozent-Qualitätsprüfung
- ▶ Inline-Produktionsüberwachung und -regelung

## KOMPETENZEN

- ▶ bildgebende Fluoreszenzmesstechnik
- ▶ bildgebende 3D-Verfahren
- ▶ digitale Holographie
- ▶ Inline-Mikroskopie
- ▶ schnelle Bildverarbeitung

## KONTAKT

Dr. Heinrich Höfler, Abteilungsleiter  
Telefon +49 761 8857-173, [heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de](mailto:heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de)

Inline-Messtechnik  
Dr. Daniel Carl  
Telefon +49 761 8857-549, [daniel.carl@ipm.fraunhofer.de](mailto:daniel.carl@ipm.fraunhofer.de)

Optische Oberflächenanalytik  
PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg  
Telefon +49 761 8857-306, [albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de](mailto:albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de)

## PRODUKTIONSKONTROLLE »Wir messen so schnell, wie Sie produzieren«

*Dr. Heinrich Höfler*

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-Kontrolle in der Produktion

möglich. Eingesetzt wird eine große Bandbreite an Verfahren, darunter digitale Holographie, Infrarot-Reflexions- und Fluoreszenzverfahren, kombiniert mit sehr schneller hardwarenaher Bild- und Datenverarbeitung. Die Systeme werden beispielsweise in der Umformtechnik und im Automobilbereich eingesetzt.

### Inline-Messtechnik

Schwerpunkt der Gruppe sind industrietaugliche Messsysteme, die ausgewertete Daten in Echtzeit bereitstellen, z. B. zur Regelung empfindlicher Herstellungsprozesse. Dies gelingt durch die Kombination optischer Messtechniken mit extrem schnellen Auswerteverfahren.

### Optische Oberflächenanalytik

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

## INLINE-MESSTECHNIK

### DRAHT OHNE MAKEL: DOKUMENTIERTE QUALITÄT IN ECHTZEIT

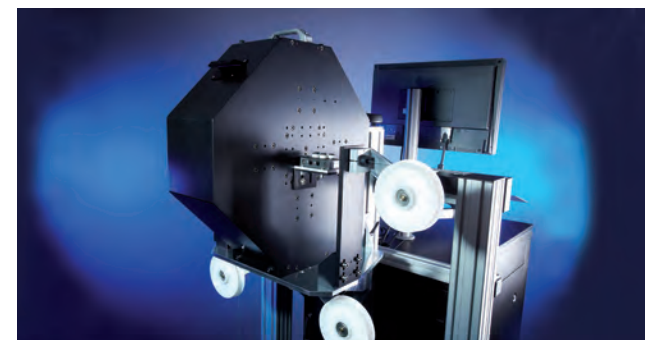
Draht wird in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt – in der Automobilindustrie, im Maschinenbau ebenso wie in der Telekommunikation. Oft muss er dabei genaue Spezifikationen einhalten. Denn schon geringste Fehler an einem noch so kleinen Stückchen des Metalls können große Schäden an Fahrzeugen oder Maschinen verursachen. Das bildgebende Oberflächeninspektionssystem WIRE-AOI macht es möglich, solche Fehler oder Schäden bereits während der Produktion zu erkennen und damit Ausschuss und zusätzliche Kosten zu vermeiden.

Fehler an der Drahtoberfläche sind keine Seltenheit: Während der industriellen Herstellung von Draht wird ein gewalzter Rohling mit vielen Metern pro Minute durch sich verjüngende Öffnungen von Ziehsteinen gezogen. Diese sind dabei starkem Verschleiß unterworfen und können in der Folge die Drahtoberfläche beschädigen. Es entstehen Schäden wie Querriefen, Ziehriefen oder Rattermarken. Die Strukturgrößen dieser Defekte bewegen sich im Bereich von einigen Millimetern bis hin-

unter zu 100 Mikrometern. Doch bereits kleinste Oberflächen-defekte führen mitunter zu großen Problemen in nachfolgenden Fertigungsschritten – oder später sogar zum Versagen komplexer Baugruppen.

Mit WIRE-AOI bietet Fraunhofer IPM erstmals ein produktions-taugliches Inspektionssystem an, das Drahtoberflächen auch bei Zieh-Geschwindigkeiten von bis zu 600 m/min. inspiziert und dabei selbst winzige Fehler in Echtzeit erkennt. Bisherige Bildverarbeitungssysteme versagen bei der vollständigen Detektion dieser Mikrodefekte auf der sich schnell bewegenden Drahtoberfläche. WIRE-AOI dagegen erkennt Fehler zuverlässig dank der kamerainternen pixelparallelen Bildverarbeitung und einer extrem leistungsstarken, gepulsten LED-Beleuchtung. Mit dem Herzstück des Systems, der CNN-Kamera, ist eine Echtzeit-Verarbeitung von bis zu 10 000 Bildern pro Sekunde möglich. Die Belichtungszeit, und damit die Grenze für scharfe Aufnahmen, beträgt etwa 5 µs. Dies entspricht mehr als einer Million Zeilen pro Sekunde.

Eine besondere Herausforderung ist es, eine solch anspruchsvolle Messtechnik an die jeweilige Produktionsumgebung anzupassen. Ob Stahl, Aluminium oder Kupfer, beschichtet oder blank, zylindrisch oder konisch – WIRE-AOI entdeckt an allen Drahtarten selbst kleinste Oberflächenfehler, klassifiziert diese und dokumentiert sie in einer Datenbank. Der Kunde kann dann selbst bestimmen, bei welchem Fehler z.B. die Produktion gestoppt werden soll. Mit WIRE-AOI sind somit vielfältige Inspektionsaufgaben an Bahnwaren wie Drähten, Rohren oder Profilen erstmals lösbar.



*Ob aus Stahl oder Kupfer, konisch oder zylindrisch: WIRE-AOI sorgt für 100-prozentige Drahtqualität, indem es selbst kleinste Oberflächenfehler bereits während der Produktion erkennt.*

## OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

### SAUBERE BAUTEILE: REINHEITSPRÜFUNG MIT LASERSCANNERN

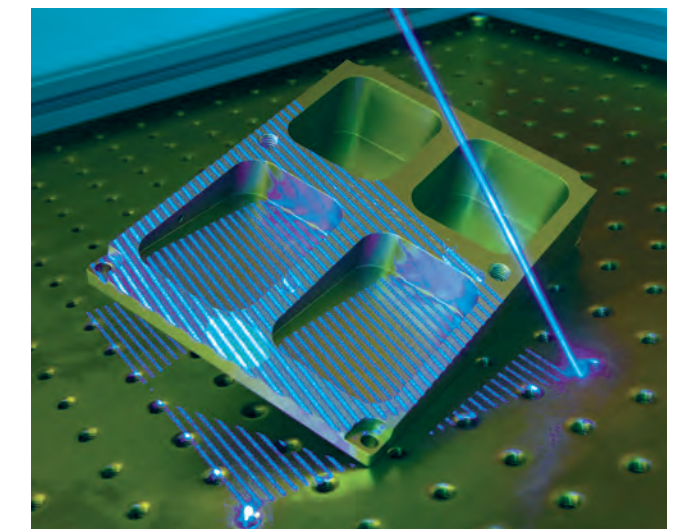
Schon ein Kleinkind macht die Erfahrung beim Basteln: Versucht es, zwei Teile zusammenzukleben, die staubig oder schmutzig sind, fallen sie im nächsten Augenblick wieder auseinander. Bei der Fertigung von Komponenten im Maschinenbau, der Automobilindustrie oder der Medizintechnik muss ebenfalls »sauber« gearbeitet werden: Besonders Bauteile, die später verklebt werden, können bei Verschmutzungen an der Oberfläche oft nur fehlerhaft zusammengefügt werden – denn nur reine Oberflächen lassen sich dauerhaft beschichten, elektrisch kontaktieren oder verbinden.

Fraunhofer IPM hat ein bildgebendes Fluoreszenz-Detektionssystem für die industrielle Oberflächenprüfung entwickelt. Das System detektiert sehr empfindlich organische Verunreinigungen wie Öle, Fette und Silikone, indem deren Eigenfluoreszenz mit geeigneten UV-Wellenlängen angeregt wird. Auch Reinigungsmittel-Rückstände sind mit diesem System gut erkennbar. Das Fluoreszenz-Messsystem misst innerhalb kürzester Zeit Form, Position und Menge der Verunreinigung. Die Bildgebung ermöglicht dabei die genaue Erkennung der »Problembereiche« direkt auf dem Werkstück. Die Nachweisgrenzen sind abhängig vom nachzuweisenden Stoff. Im Fall stark fluoreszierender Medien wie z.B. Maschinenölen werden auch geringe Spuren von Verunreinigungen auf der Oberfläche detektiert.

Durch den Einsatz eines Laserscanners wird eine Lokalisierung störender Verunreinigungen auf Oberflächen im Quadratmeterbereich möglich. Bisher konnten in der bildgebenden Fluoreszenz-Detektion nur kleine Flächen erfasst werden. Die Größenbeschränkung der maximal untersuchbaren Fläche ergab sich aus der Beleuchtung mit LEDs sowie der parallelen Detektion der gesamten Oberfläche mit Hilfe einer CCD-Kamera. Zur Untersuchung größerer Flächen wurde nun erstmals

ein scannendes System aufgebaut: Der Strahl eines UV-Lasers wird mithilfe von Spiegeln über einen Scanbereich von  $\pm 20^\circ$  abgelenkt. Bei einem Abstand zur zu untersuchenden Fläche von 60 cm können somit Bauteile auf einer Fläche von 50 cm  $\times$  50 cm untersucht werden. Die auf der Oberfläche angeregte Fluoreszenz wird dann detektiert. Eine Software setzt die so gewonnenen Daten der einzelnen Messpunkte zu einem Bild der Oberfläche zusammen. Dieses Bild wird so weiterverarbeitet, dass z.B. Bereiche hoher Intensität – also mit starker Verunreinigung – automatisch erkannt und ausgewertet werden.

Durch den Einsatz dieses neuartigen scannenden Verfahrens können nicht nur plane Bauteile (Platten), sondern auch Bauteile mit komplexen Geometrien wie beispielsweise Zahnräder oder Karosserieteile untersucht werden.



*Für den Menschen unsichtbare Verunreinigungen auf Oberflächen verraten sich durch Eigenfluoreszenz. Ein Laserscanner macht sie sichtbar – jetzt auch auf großen Flächen.*



## THEMEN

- ▶ zerstörungsfreie Materialprüfung
- ▶ Schichtdickenmessung
- ▶ chemische Analyse (Pharmazeutika, Gefahrstoffe)
- ▶ Sicherheitsanwendungen

## KOMPETENZEN

- ▶ Herstellung von Terahertz-Komponenten
- ▶ Spektroskopie-Systeme
- ▶ Terahertz-Imaging
- ▶ ultraschnelle elektro-optische Hochfrequenz-Messtechnik

## KONTAKT

**Prof. Dr. Georg von Freymann, Abteilungsleiter**  
Telefon +49 631 205-5225, georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de

**Dr. Frank Ellrich**  
Industrielle Terahertz-Messtechnik  
Telefon +49 631 205-5109, frank.ellrich@ipm.fraunhofer.de

**Prof. Dr. Georg von Freymann**  
Terahertz-Opto-Elektronik  
Telefon +49 631 205-5225, georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de

▶ Charakterisierung und Prüfung  
von Materialien online beauftragen

**ServiceLab**  
Materialcharakterisierung und -prüfung



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

# MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

## »Mit der Terahertz-Technik können wir Sprengstoff in Briefen identifizieren«

*Prof. Dr. Georg von Freymann*

Fraunhofer IPM entwickelt anwendungstaugliche Messsysteme zur Materialcharakterisierung und -prüfung, die mit Terahertz- und Mikrowellen arbeiten. Dabei greifen die Wissenschaftler auf Kompetenzen in der optischen System- und Messtechnik, der Spektroskopie und der Entwicklung von Kristall- und Halbleiterkomponenten zurück. Die Terahertz- oder Mikrowellen-Messtechnik ist eine interessante Alternative zu Ultraschallmessungen, wenn kein mechanischer Kontakt möglich ist, aber auch zu Röntgenmessungen, wenn ionisierende Strahlen ein Problem darstellen. Mit den von Fraunhofer IPM entwickelten Messsystemen können Materialien durch Verpackungen

hindurch charakterisiert und versteckte Drogen oder Sprengstoffe gefunden werden. In der Materialprüfung lassen sich Defekte in Keramiken, Kunststoffen oder auch Kohle- und Glasfaserverbundstoffen zerstörungsfrei aufspüren. Besonders Interesse gilt der Schichtdickenmessung, z.B. in Lackierprozessen oder aber bei der Herstellung von Tabletten. Mit unserem Terahertz-Know-how sind wir in der Lage, das Verhalten von Materialien in sehr schnellen Wechselfeldern zu charakterisieren, was beispielsweise für elektro-optische Modulatoren relevant ist.

### Industrielle Terahertz-Messtechnik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung industrieller Terahertz-Systeme nach Kundenwunsch zur berührungslosen bzw. zerstörungsfreien Prüfung von Gegenständen oder zur spektroskopischen Identifizierung chemischer Substanzen.

### Terahertz-Opto-Elektronik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung von Messtechnik für die ultraschnelle Elektronik bis in den Terahertz-Frequenzbereich, z. B. zur Charakterisierung elektronischer Höchstfrequenz-Schaltkreise. Kombiniert werden extrem schnelle elektro-optische Wandler und ultraschnelle Optik.

## INDUSTRIELLE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

### SCHICHT UM SCHICHT: ZERSTÖRUNGSFREIE MEHRSCHICHTANALYSE

Mythos Silberpfeil: Wie die Legende besagt, wurde der gleichnamige Mercedes-Rennwagen einst vor einem Wettkampf als zu schwer befunden. Kurzerhand kratzten die Mechaniker den weißen Lack in einer Nacht-und-Nebel-Aktion ab, um das vorgeschriebene Gewicht zu erreichen. Zu sehen war am Ende nur noch das blanke Aluminiumblech: Der Silberpfeil war geboren. Auch 80 Jahre später spielt das Thema Gewichtsreduzierung noch eine große Rolle im Automobilbau oder in der Luftfahrt. Wird beim Lackieren der Fahrzeuge zu viel Farbe aufgetragen, können die überschüssigen Lackschichten als ungewollte Kilos negativ ins Gewicht fallen. Eine frühzeitige Kontrolle ist daher von großer Bedeutung für eine effiziente und ressourcenschonende Produktion.

Terahertz-Wellen sind in der Lage, bereits während der Lackierung die Schichtdicke jeder einzelnen Lackschicht berührungs-



Mit Terahertz-Wellen lassen sich Schichtdicken berührungslos, zerstörungsfrei und substratunabhängig messen.

los, zerstörungsfrei und substratunabhängig zu messen. Fehler werden schon im Prozess erkannt und die Lackieranlage kann so gesteuert werden, dass keine überflüssige Farbe aufgetragen wird.

Bislang war es nicht möglich, einzelne, dünne Farb- oder Lackschichten auf nichtmetallischen Substraten wie kohlefaserverstärkten Kunststoffen zuverlässig zu messen und dadurch Fehler frühzeitig zu erkennen. Herkömmliche Lackdicken-Messgeräte, die zum Beispiel mit einem Wirbelstromverfahren arbeiten, können nur die Gesamtdicke aller Lackschichten auf einem Bauteil messen, und das auch nur auf Metallen. Fraunhofer IPM setzt mit der Terahertz-Messtechnik erstmals ein Verfahren ein, das eine zuverlässige Schichtdickenmessung auch bei Mehrschichtlackierungen ermöglicht – und das nicht nur auf Metallen, sondern auch auf Kunststoffen oder Verbundwerkstoffen, wie sie etwa im Automobilbau zunehmend Verwendung finden.

Terahertz-Wellen, die im Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen liegen, werden an Grenzflächen, bei denen es einen Sprung im Brechungsindex gibt, teilweise reflektiert. Misst man die Laufzeitunterschiede der reflektierten Teilwellen, lässt sich daraus die jeweilige Schichtdicke bestimmen. Terahertz-Wellen sind im Gegensatz zu Röntgenstrahlen nicht ionisierend und daher gesundheitlich unbedenklich. Ein gesonderter Strahlenschutz ist deshalb nicht erforderlich.

## TERAHERTZ-OPTO-ELEKTRONIK

### MESSGERÄT MIT POTENZIAL: NETZWERK-ANALYSE MIT TERAHERTZ-WELLEN

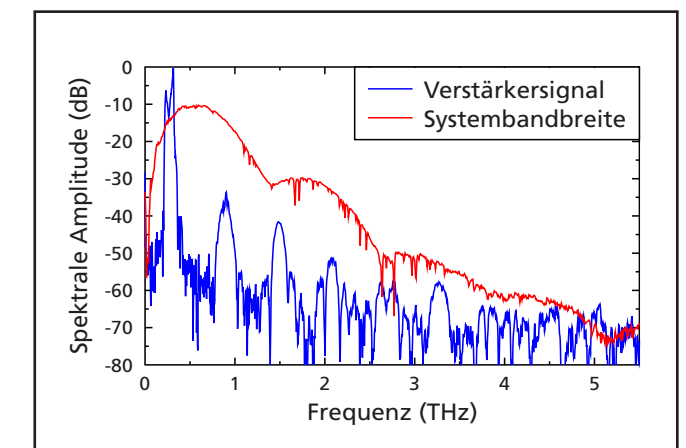
Seit Jahrzehnten gehen Ingenieure und Wissenschaftler bei der Weiterentwicklung der Hochfrequenzelektronik immer wieder an die Grenze des Machbaren. Ihr Ziel ist dabei stets dasselbe: bessere und leistungsfähigere Systeme für die Kommunikationstechnik. Mit dem Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« will Fraunhofer IPM Elektronikern nun Spielraum für neue Entwicklungen geben.

Zur optimalen Dimensionierung und Berechnung elektronischer Systeme benötigen Elektroniker verlässliche und möglichst exakte Angaben zu den so genannten Streuparametern (S-Parametern). Diese beschreiben das Verhalten linearer elektrischer Bauteile, Komponenten und Netzwerke mittels Wellengrößen. Bisher hat man diese Werte mit Netzwerk-Analysatoren im Frequenzbereich gemessen. Elektronische Bauteile arbeiten aber inzwischen mit solch hohen Frequenzen, dass herkömmliche Netzwerk-Analysatoren an ihre Grenzen stoßen. Mit der Entwicklung des »Tera-VNA« verdoppelt Fraunhofer IPM den erreichbaren Frequenzbereich.

Der »Tera-VNA« misst die gewünschten S-Parameter nicht mehr im Frequenzbereich, sondern im Zeitbereich. Die Forscher setzen für diese Messaufgabe auf die Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS). Das hat drei Vorteile: Die Anschaffungskosten reduzieren sich im Vergleich zu kommerziellen Netzwerk-Analysatoren um etwa einen Faktor fünf. Zudem müssen beim »Tera-VNA« für verschiedene Frequenzbänder nur die Hohlleitermodule bzw. Tastköpfe getauscht werden, bei elektronischen Netzwerkanalysatoren hingegen sind für unterschiedliche Frequenzbänder oft mehrere Geräte notwendig. Schließlich kann der Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« auch bei viel höheren Frequenzen messen als es kom-

merzielle Netzwerkanalysatoren heute können. Das eröffnet neue Möglichkeiten.

Forscher und Entwickler in Industrie und Wissenschaft können nun erstmals die S-Parameter hochfrequenter Systeme von 100 GHz bis über 2 THz analysieren. Die Anzahl der benötigten S-Parameter hängt dabei von der Anzahl der Tore des Netzwerks ab und ergibt sich aus dem Quadrat seiner Toranzahl. Ein Hochfrequenzverstärker mit einem Ein- und einem Ausgang lässt sich beispielsweise mithilfe von vier S-Parametern vollständig beschreiben: Gemessen werden Eingangs- und Ausgangs-Reflexionsfaktor sowie Vorwärts- und Rückwärts-Transmissionsfaktor. Der »Tera-VNA« wird erstmals selbst bei extrem hochfrequenten Bauteilen, wie sie zurzeit entwickelt werden, alle vier S-Parameter messtechnisch erfassen können.



Dank der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie erschließt der »Tera-VNA« für die Messtechnik einen weiten Spektralbereich – von 0,1 bis weit über 2 THz, hier am Beispiel eines H-Band-LNAs (low-noise amplifier).

## THEMEN

- ▶ Verkehr und Logistik
- ▶ 3D-Vermessung von Zügen und Bahnstrecken
- ▶ Untersuchung von Straßenoberflächen
- ▶ Sicherheitsanwendungen

## KOMPETENZEN

- ▶ 3D-Laserscanner, 3D-Kameras, 3D-Datenverarbeitung
- ▶ Erfassung bewegter Objekte auch bei hohen Geschwindigkeiten
- ▶ schnelle Bildauswertung
- ▶ robuste Systemtechnik

## KONTAKT

Dr. Heinrich Höfler, Abteilungsleiter

Telefon +49 761 8857-173, heinrich.hoefler@ipm.fraunhofer.de

PD Dr. Alexander Reiterer

Laser Scanning

Telefon +49 761 8857-183, alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de

## OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

**»Wir sind stark im mobilen Laserscanning – auch bei hohen Geschwindigkeiten«** *Dr. Heinrich Höfler*

Laserscanner und maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamera-Systeme, die Geometrie und Lage von Objekten in der Umgebung dreidimensional erfassen, sind der Schwerpunkt im Geschäftsfeld Objekt- und Formerfassung. Die Systeme messen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision insbesondere von bewegten Plattformen aus. Besonderes Augenmerk liegt auf der 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 10-Meter-Bereich. Die Messsysteme sind weltweit im Einsatz – im Bahnverkehr ebenso wie zur Vermessung von Straßenoberflächen. Hinzu kommen Spezialanwendungen in den Bereichen Sicherheit sowie Verkehr und Logistik.

### Laser Scanning

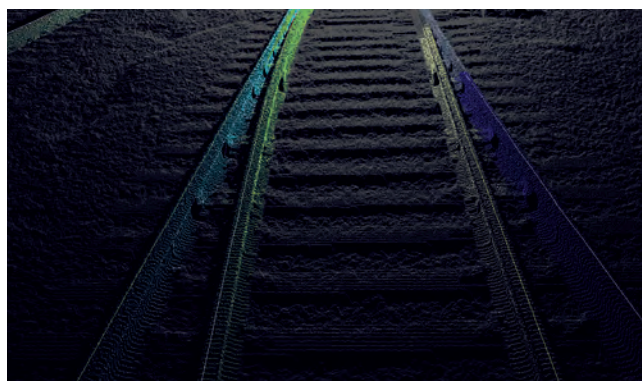
Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung optischer Messsysteme basierend auf Lichtlaufzeitmessung, die es erlauben, mit hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision Abstand und Geometrie von Objekten zu vermessen. Die entwickelten Systeme werden weltweit und in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt.

### LASER SCANNING

## WAS STECKT IN DER PUNKTWOLKE? NEUE ALGORITHMEN ERKENNEN MEHR

Die Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland kostet jährlich mehrere Milliarden Euro. Doch der Bereich ist chronisch unterfinanziert. Das Resultat: Straßenschäden, marode Eisenbahnbrücken und Langsamfahrstrecken im Bahnnetz. Auf Bahnstrecken werden zunehmend Automatisierungstechniken zur Instandhaltung eingesetzt. Dadurch können Kosten gesenkt werden, ohne die Sicherheit im Verkehr zu gefährden. »Intelligente Fahrzeuge«, ausgerüstet mit 3D-Laserscannern, erfassen die Umgebung hochauflösend und beschreiben diese in Form sogenannter 3D-Punktwolken. Mit möglichst automatisierten Algorithmen lassen sich aus diesen 3D-Bildern Schäden an der Schieneninfrastruktur automatisiert erkennen.

Fraunhofer IPM hat für den Bereich Bahninfrastruktur ein neuartiges Softwaresystem zum Erkennen von Weichen und Gleisen entwickelt, das hochauflösende Punktwolken nutzt. Ziel ist die Detektion von Weichenbestandteilen aus 3D-Laserscandaten sowie die Bestimmung der Befahrungs- und Abbiege-



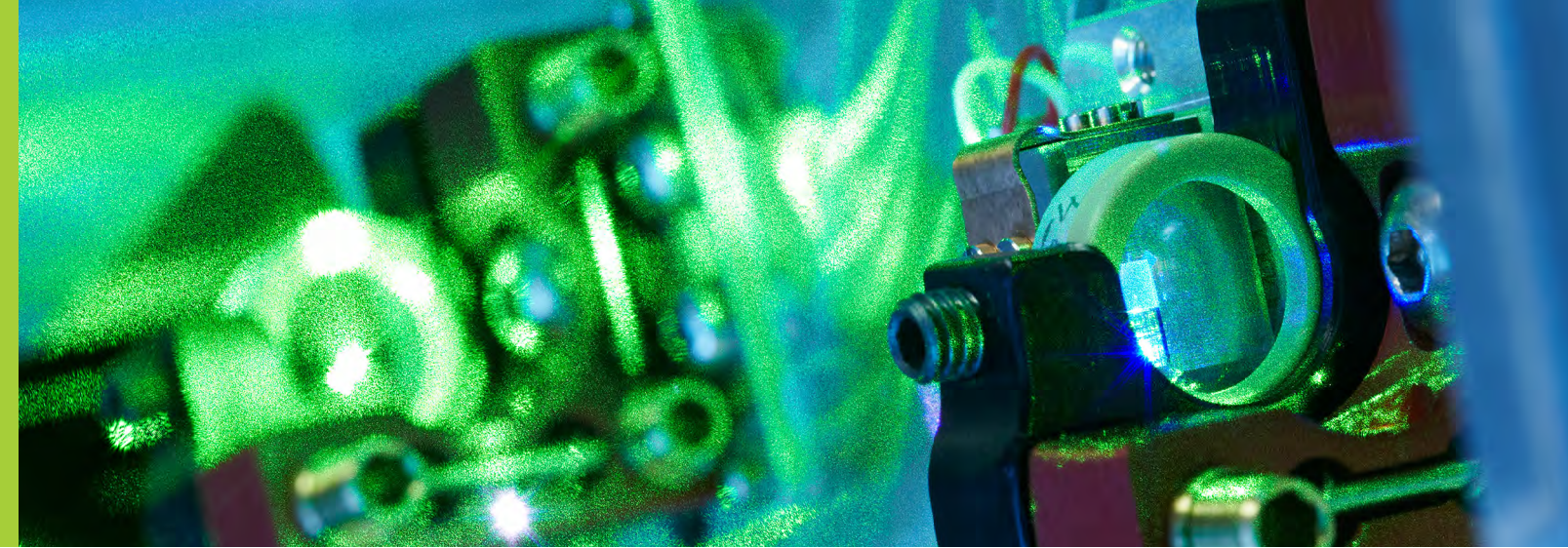
*Laserscanner liefern immer genauere Messdaten: Mit neuen Algorithmen lassen sich daraus mehr Informationen gewinnen – z. B. über Weichen oder Gleise.*

richtung an Weichen. Verschiedene Detektoren wurden für das System entwickelt: Neben dem Schienendetektor kommen auch Gleis- und Herzstückdetektoren zum Einsatz. Der wichtigste unter ihnen – der Schienendetektor – nutzt eine Vielzahl von Merkmalen, um Schienen zu beschreiben und zu erkennen. Diese Merkmale umfassen neben der Geometrie und Topologie der Schienen beispielsweise auch verdeckende Kanten. Um diese Kanten in Punktwolken mit stark variierenden Distanzen zu erkennen, wurde ein eigener Kantendetektor mit adaptiven Schwellwerten entwickelt.

Bisherige Ansätze nutzen meist nur primitive Merkmale um Schienen zu beschreiben, z. B. die typische Höhendifferenz zwischen der Schienenoberkante und -unterkante. Diese Ansätze weisen in der Regel eine hohe Fehlerrate auf. Dagegen verwenden die von Fraunhofer IPM entwickelten Schienendetektoren eine deutlich höhere Zahl an Beschreibungsmerkmalen – ein Grund für die niedrigere Fehlerrate. Sie sind daher sogar in der Lage, Nachbargleise zu erkennen.

Neben der Vielzahl der detektierbaren Parameter eröffnet der gewählte Ansatz Möglichkeiten, die Auslastung im Schienenverkehr zu optimieren: Vorstellbar wäre beispielsweise, die aktuelle Position fahrender Züge mithilfe der 3D-Daten zu ermitteln. Dazu könnten Regelzüge mit einfachen Scannern ausgestattet werden; über einen Abgleich der erzeugten Punktwolke mit den zuvor hochgenau aufgenommenen 3D-Daten des Schienennetzes ließe sich der Zug genau lokalisieren. Eine Ortung per GPS ist im Bahnverkehr aufgrund der Vielzahl von Tunnels nur bedingt möglich. Zudem erfordert GPS aufwändiges Postprocessing, das auf diese Weise elegant umgangen werden könnte.





## THEMEN

- ▶ Gasanalytik
- ▶ Partikelmess technik
- ▶ »Food Chain Management«

## KOMPETENZEN

- ▶ Spektroskopie von EUV bis MIR
- ▶ Gassensorik
- ▶ robuste Gesamtsysteme
- ▶ Lichtquellenentwicklung

## KONTAKT

**Dr. Armin Lambrecht, Abteilungsleiter**

Telefon +49 761 8857-122, armin.lambrecht@ipm.fraunhofer.de

**Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein**

Integrierte Sensorsysteme

Telefon +49 761 8857-134, juergen.woellenstein@ipm.fraunhofer.de

**Dr. Raimund Brunner**

Spektroskopie und Prozessanalytik

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

**Dr. Frank Kühnemann**

Technologie Optischer Materialien

Telefon +49 761 8857-457, frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

▶ Messungen zur Gas- und  
Prozesstechnologie online beauftragen

**ServiceLab**  
Gas- und Prozesstechnologie



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

## GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

»Wir messen draußen, was andere nur  
im Labor messen können«

*Dr. Armin Lambrecht*

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 anderen laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Partikelmess-techniken zur Feinstaubanalyse, Prozessmesstechnik und die

Charakterisierung von Lasermaterialien. Die Bandbreite an Anwendungen ist groß: Geräte zur Abgasanalyse, Sensornetzwerke für die Überwachung der Lebensmittel-Transportkette, EUV-Spektrometer für Messungen in der Ionosphäre, Anlagen zur In-situ-Verschleißmessung von Werkzeugen und optisch- parametrische Oszillatoren als durchstimmbare Laserlichtquelle wurden realisiert.

### Integrierte Sensorsysteme

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung, Konzeptionierung, Charakterisierung und Herstellung funktionaler Oberflächen, miniaturisierter Gassensoren und kompakter Gasmesssysteme. Dazu werden Gassensortechnologie und Elektronik in kompakten und kostengünstigen Mikrosystemen kombiniert.

### Spektroskopie und Prozessanalytik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung spektroskopischer Systeme zur Detektion und Analyse von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Dabei nutzt die Gruppe ihre langjährige Erfahrung in der Abgas- und Partikelmessstechnik.

### Technologie Optischer Materialien

Schwerpunkt der Gruppe ist die Untersuchung der optischen Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten mittels innovativer spektroskopischer Verfahren wie photothermischen und photoakustischen Methoden. Langjährige Erfahrung im Umgang mit nichtlinear-optischen Materialien ermöglicht den Aufbau leistungsstarker optischer Systeme.

## INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

# GASSENSOREN VON DER ROLLE: BRANDGASE SCHNELL ERKENNEN

Jährlich werden in Deutschland über 200 000 Brände gemeldet. Herkömmliche Brandmelder detektieren in der Regel nur Rauchpartikel und haben dadurch viele Nachteile: So lösen sie häufig Fehlalarm aus, etwa wenn gekocht wird und harmloser Wasserdampf entsteht. Oder – was bei weitem gefährlicher ist – sie reagieren nicht auf giftige Gase.

Das frühzeitige Erkennen dieser meist geruchlosen Gase durch zuverlässige Brandgasmelder ist jedoch für einen wirkungsvollen Brandschutz von großer Bedeutung. Insbesondere die De-



*Klein, kolorimetrisch und kostengünstig: Gassensoren, gefertigt in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren, messen giftige Brandgase wie Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.*

tektion von Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffdioxid ist in diesem Zusammenhang entscheidend. Beide Gase sind sehr giftig, das Einatmen kann beim Menschen innerhalb weniger Minuten zum Tod führen.

Fraunhofer IPM hat zur Brandprävention zwei kolorimetrische Low-power-Gassensoren entwickelt, die auf dem Prinzip des Farbumschlags basieren. Ein Farbstoff in Kombination mit einem Polymer reagiert in Kontakt mit dem Zielgas und ändert dabei seine Farbe. Diese Farbänderung korreliert mit der Konzentration des Gases. Der Sensor, der zur Erkennung von Kohlenstoffmonoxid zum Einsatz kommt, basiert auf einem binuklearen Rhodiumkomplex; für die Detektion von Stickstoffdioxid wird das Chinonimin Tetramethylphenylendiamin eingesetzt. Durch den Einsatz eines Wellenleiters kann die Gasreaktion optisch ausgelesen werden. Sobald eine Farbänderung messbar ist, wird ein akustisches Brandsignal ausgelöst.

Die neu entwickelten Gassensoren können aufgrund ihres einfachen Aufbaus mit einem speziell entwickelten Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt werden. Die MIDs (Moulded Interconnected Devices) werden in Trägerplatten geklipst und zu einer 15 m langen Rolle verbunden. Alle Komponenten können über Endlosspritzguss gefertigt werden. Die Sensoren durchlaufen auf der Rolle nacheinander alle Prozessschritte wie die Laserstrukturierung, Galvanisierung und SMD-Bestückung der elektronischen Bauteile. Der Wellenleiter wird in einem Backend-Prozess auf den Träger geklipst.

Durch dieses kostengünstige Herstellungsverfahren können die Sensoren preislich mit herkömmlichen Streulichtmeldern konkurrieren – messen dabei aber neben Rauchpartikeln auch gefährliche Gase.

Carolin Peter, Telefon +49 761 8857-731, carolin.peter@ipm.fraunhofer.de

## SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

# ULTRASCHALL IM SCHLAMM: VERSCHLEISSMESSUNG UNTER TAGE

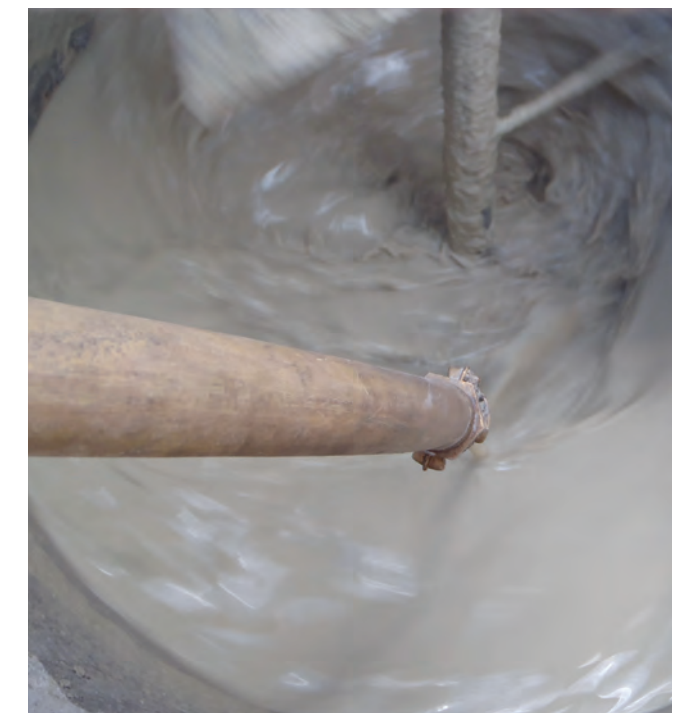
Wasser, Schlamm, Gestein: Maschinen, die im Berg- oder Tunnelbau zum Einsatz kommen, arbeiten unter extremen Bedingungen. Der Verschleiß in einem solch rauen Umfeld ist hoch, und die Materialien müssen dementsprechend robust sein. Hier ist es von großer Bedeutung, entstehende Schäden oder Fehlfunktionen an wichtigen Bauteilen frühzeitig zu erkennen, um den Prozess und die Sicherheit nicht zu gefährden.

Fraunhofer IPM hat auf der Basis robuster Ultraschallsensoren ein System zur Abstandsmesstechnik in schwierigen Umgebungen entwickelt. Damit kann der Grad der Abnutzung von Bauteilen wie z. B. Antriebswellen oder Schneidflächen von Tunnelbohrern auch in Schlamm- oder Bentonit-Suspensionen millimetergenau erfasst werden. Datenaufnahme und Auswertung – Elektronik und Software – wurden speziell für den Bereich der Überwachung kritischer Bauteile in flüssigen Medien entwickelt. Die aktuellen Messbereiche liegen bereits bei 70 bis 350 Millimeter, und das bei einer Auflösung von zirka 0,2 mm.

Ultraschallmesstechnik eignet sich besonders gut für den Einsatz in schwierigen Umgebungen, denn sie arbeitet berührungsfrei. Das macht sie attraktiv für Messungen in flüssigen Medien wie Bohrschlämmen und Suspensionen. So wird die Ultraschallmesstechnik bereits erfolgreich in der Pipelinetchnik oder der Vertikalitätsmessung für Bohrungen eingesetzt. Dass sie auch unter extremen Bedingungen noch zuverlässig messen kann, konnte Fraunhofer IPM überzeugend demonstrieren.

Hohe Anforderungen werden in rauen Umgebungen auch an die jeweiligen Ultraschallsensoren gestellt: Sie müssen selbst in Schlammlösungen mit Gesteinsanteilen noch funktionsfähig bleiben. Besonders die Anwendung im Tunnelbau erfordert einen sehr robusten Aufbau des Sensors: So muss er Tempera-

turen bis zu 60 Grad Celsius sowie einem hohen Arbeitsdruck von bis zu 15 bar standhalten. Dazu kommen abrasive Bedingungen, starke Vibrationen und Druckschwankungen. Mit dem von Fraunhofer IPM entwickelten Ultraschall-Messsystem werden Defekte im Millimeterbereich an wichtigen Bauteilen zuverlässig berührungsfrei detektiert. Und das unter widrigen Bedingungen. Dadurch lassen sich Prozesse sicherer und damit auch effizienter gestalten, was insbesondere auf Großbaustellen im Tunnel- und Bergbau von großer Bedeutung ist.



*Auch unter schwierigen Bedingungen genau messen – das ist die Stärke des von Fraunhofer IPM entwickelten Systems zur berührungslosen Prüfung wichtiger Bauteile im Berg- und Tunnelbau.*

Gerd Sulz, Telefon +49 761 8857-293, gerd.sulz@ipm.fraunhofer.de

TECHNOLOGIE OPTISCHER MATERIALIEN

## LASERLICHT VON BLAU BIS ROT: WELLENLÄNGEN AUF KNOPFDRUCK

»Licht auf Knopfdruck« – was für den Normalverbraucher selbstverständlich ist, stellt sich für die Wissenschaft ungleich komplizierter dar. Laserlicht als wichtigstes Werkzeug der Photonik muss je nach Anwendung bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Für die Spektroskopie beispielsweise sollte sich die Emissionswellenlänge auf kontrollierte Art ändern, also durchstimmen lassen. Wie bei jedem Werkzeug ist dabei eine möglichst unkomplizierte Handhabung gewünscht. Dem sind Wissenschaftler von Fraunhofer IPM und dem Lehrstuhl für Optische Technologien der Universität Freiburg nun ein großes Stück näher gekommen: Im Auftrag der Kasseler HÜBNER GmbH & Co. KG entwickelten sie den optisch-parametrischen Oszillator »C-Wave« – eine Lichtquelle, die erstmals kontinuierliches Laserlicht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich emittiert, und zwar auf Knopfdruck.



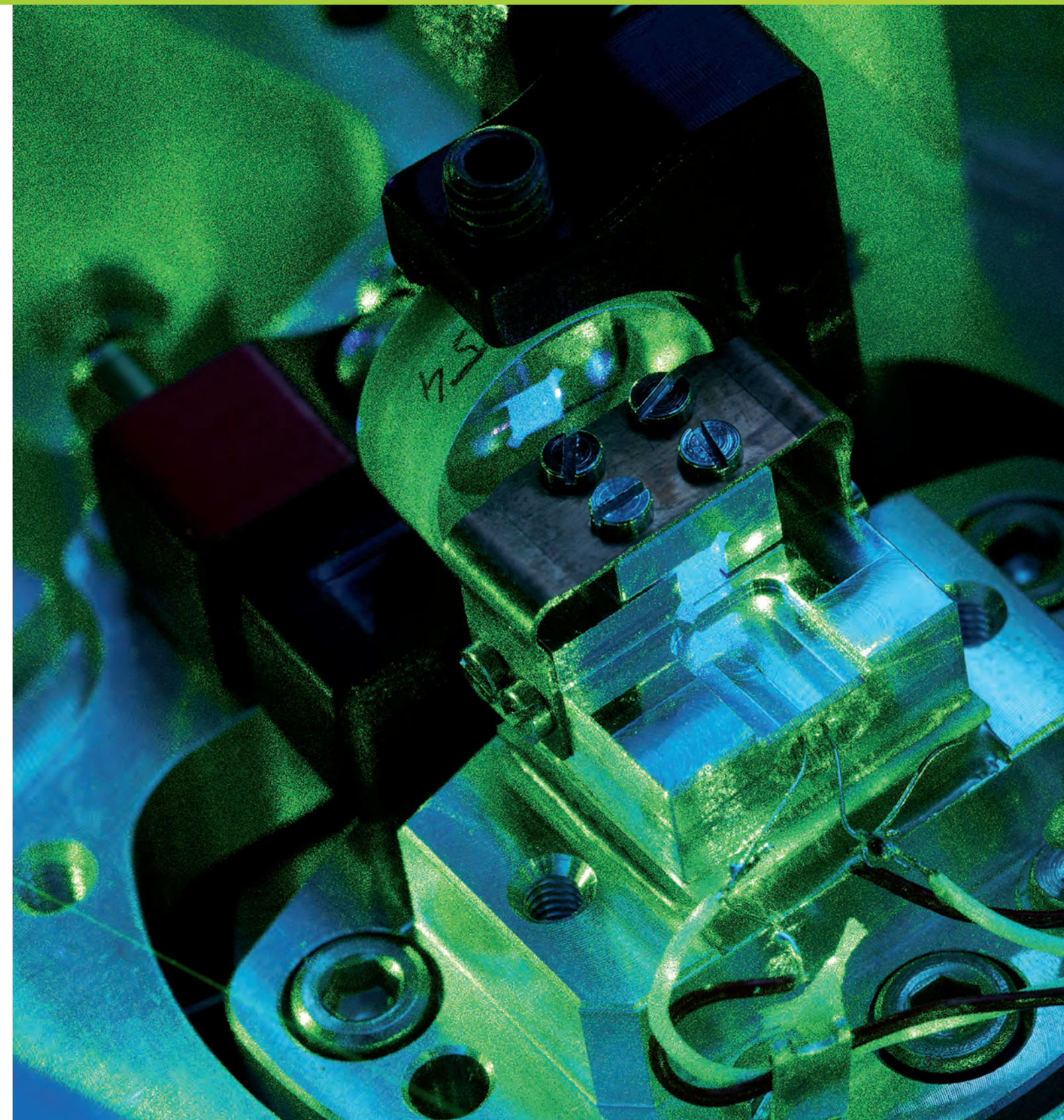
»C-Wave« ist die erste Laserlichtquelle, die kontinuierliches Licht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich erzeugt. Ohne den lästigen Wechsel von Farbstoffen.

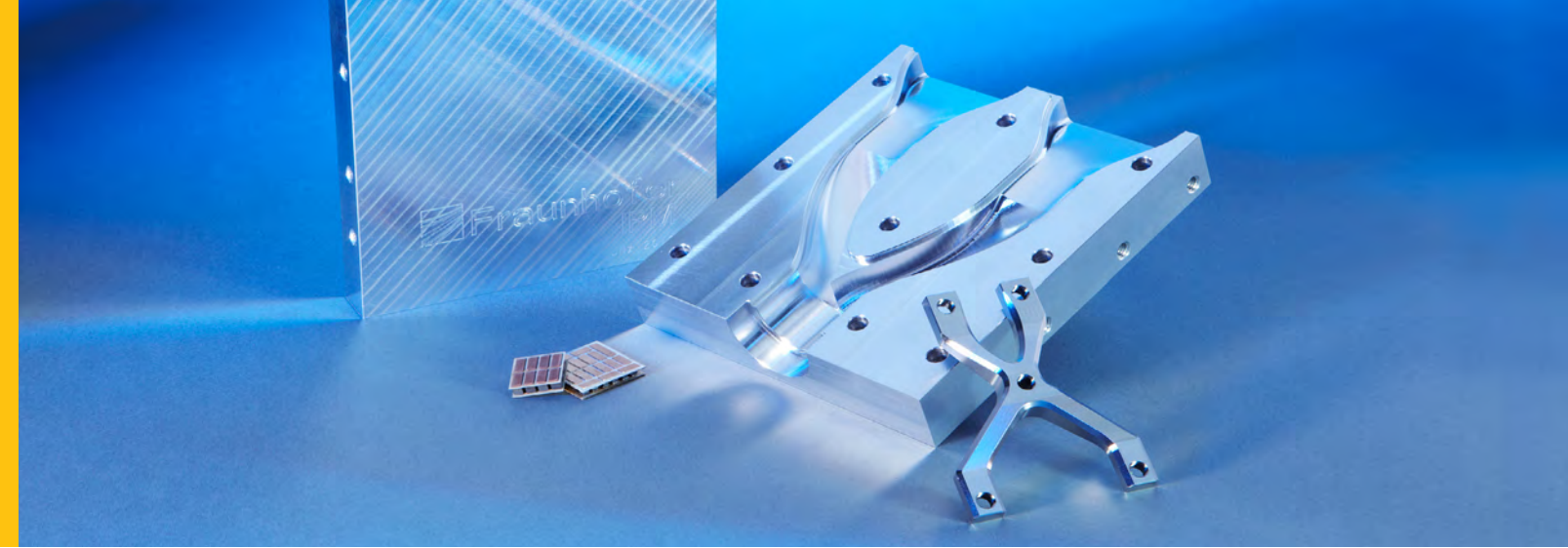
Optisch-parametrische Oszillatoren (OPO) sind weit durchstimmbare Lichtquellen mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. In einem optisch nicht-linearen Kristall wird das Licht eines Pumpasers in zwei neue Lichtwellen umgewandelt. Bei diesem optisch-parametrischen Prozess lässt sich prinzipiell Licht beliebiger Wellenlängen erzeugen. Für den sichtbaren Spektralbereich waren bisher lediglich gepulste OPO erhältlich. Manche Anwendungen in der Präzisionsspektroskopie, der Atomphysik oder der Quantenoptik erfordern jedoch kontinuierliches Laserlicht, das deutlich schmalbandiger sein kann. Entsprechende Dauerstrich-Lichtquellen waren bis dato nur für begrenzte Wellenlängenbereiche verfügbar; so etwa der Titan-Saphir-Laser, der vor allem das nahinfrarote Spektrum abdeckt. Als Einzellichtquelle, die Dauerstrich-Licht über den gesamten sichtbaren Spektralbereich erzeugt, schließt »C-Wave« diese Lücke.

Für die Anwendung hat dies praktische Vorteile: In der Spektroskopie zeigen Atome und Moleküle charakteristische Absorptionslinien in verschiedenen Frequenzbereichen. Bisher konnten nur Farbstofflaser einen größeren Teil des gesamten sichtbaren Spektralbereichs im Dauerstrichbetrieb abdecken. Die einzelnen Farbstoffe erzeugen Wellenlängen in Frequenzbereichen von typischerweise 20 bis 50 nm, was einen häufigen Farbstoffwechsel nötig macht. Mit »C-Wave« entfällt dieser lästige »Boxenstopp« – und damit auch die Risiken beim umständlichen Hantieren mit den oft giftigen Chemikalien.

Übrigens: Die Flexibilität des »C-Wave«-Konzepts bezüglich Wellenlänge, Leistung und Abstimm-Modi überzeugte auch die Jury des Photonics Prism Award. »C-Wave« erhielt den renommierten Preis auf der Photonics West 2014 in Kalifornien.

In einem optisch nicht-linearen Kristall wird das Licht eines Pumpasers in zwei neue Lichtwellen umgewandelt. Bei diesem optisch-parametrischen Prozess lässt sich Licht beliebiger Wellenlängen erzeugen.





## THEMEN

- ▶ Umwandlung von Wärme in elektrischen Strom
- ▶ metrologische Systeme
- ▶ energieautarke Sensorik und kabellose Sensornetzwerke
- ▶ Magnetokalorische Kühlung

## KOMPETENZEN

- ▶ Materialsynthese und -optimierung
- ▶ Dünnschichttechnologie
- ▶ Entwicklung von thermoelektrischen Modulen und Konvertern
- ▶ Systemdesign, -integration und -optimierung

## KONTAKT

**Dr. Kilian Bartholomé, Abteilungsleiter**

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

**Martin Jäggle**

Energieautarke Systeme und Thermoelektrische Messtechnik

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

**Dr. Jan König**

Thermoelektrische Energiewandler

Telefon +49 761 8857-329, jan.koenig@ipm.fraunhofer.de

▶ Messungen von Materialparametern für  
die Thermoelektrik online beauftragen



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

## ENERGIESYSTEME

### »Höhere Energieeffizienz geht nicht ohne schlaue Abwärmenutzung«

*Dr. Kilian Bartholomé*

Verlorene Wärmeenergie in Strom verwandeln – das leistet Fraunhofer IPM mithilfe der Thermoelektrik: Thermoelektrisches »Energy Harvesting« wird in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur effizienteren Nutzung von Energie leisten. Das künftige Nutzungsspektrum thermoelektrischer Bauelemente zur Wandlung thermischer Energie erstreckt sich dabei vom Mikrowatt-Bereich zum Betrieb energieautarker Sensorsysteme bis in den Kilowatt-Bereich zur Nutzung von Abwärme in Kraftfahrzeugen, Blockheizkraftwerken und industriellen Großanlagen.

Fraunhofer IPM forscht seit mehr als 15 Jahren, um die Technologie der Thermoelektrik in zukunftsfähige Energiesysteme zu integrieren. Heute umfasst das Forschungsspektrum die Materialforschung, die Entwicklung thermoelektrischer Module, deren Simulation und die thermoelektrische Messtechnik. Ziel ist es, die Wandlungseffizienz zu steigern, langzeitstabile Materialien und Module sowie kostengünstige, umweltfreundliche Herstellungsprozesse zu entwickeln. Für die Anwendung konzipieren und realisieren wir Systeme, bei denen thermoelektrische Generatoren optimal in komplexe Anlagen integriert werden.

### Energieautarke Systeme und Thermoelektrische Messtechnik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung metrologischer Systeme zur Charakterisierung thermoelektrischer Rohmaterialien, Module und Gesamtsysteme. Des Weiteren werden Sensorsysteme entwickelt, die sich selbst mit Energie versorgen.

### Thermoelektrische Energiewandler

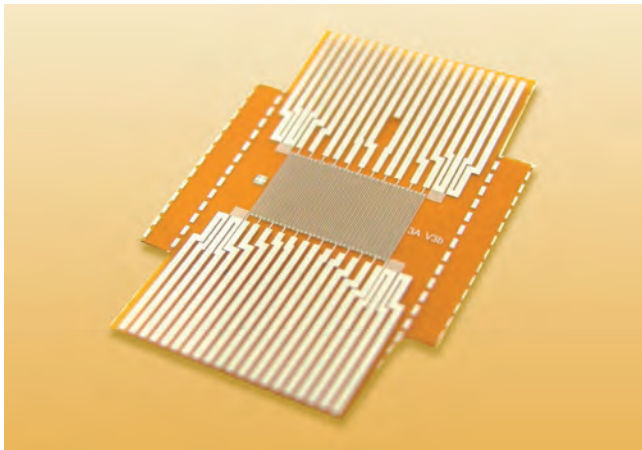
Schwerpunkt der Gruppe ist das »Energy Harvesting«. Für die Umwandlung von Wärme in Strom entwickelt die Gruppe effiziente thermoelektrische Materialien, Module und Systeme und optimiert Produktionsverfahren für Konverter.

## ENERGIEAUTARKE SYSTEME UND THERMOELEKTRISCHE MESSTECHNIK

## FLEXIBEL MESSEN: SENSOREN AUF BIEGSAMEN TRÄGERMATERIALIEN

Die neue Flexibilität in der Sensorik gilt im doppelten Sinn: Anpassungsfähig, was die Messaufgabe betrifft, und biegsam sollen Sensoren der neuen Generation sein. Fraunhofer IPM arbeitet in verschiedenen Projekten an der Entwicklung elektronischer Sensoren auf flexiblen Substraten wie Kapton- oder PET-Folie. Diese »Messpflaster« sind grundsätzlich in der Lage, eine große Bandbreite an physikalischen Größen zu bestimmen: Von einfachen Temperaturmessungen über die Messung elektrischer oder thermischer Leitfähigkeit, Wärmekapazität bis hin zur Bestimmung von Parametern wie Seebeck-Koeffizient, Lorentz-Zahl oder Strahlungsintensität.

Für biologische und chemische Anwendungen entstand ein mechanisch flexibler Kalorimeter-Chip zur Messung der Wärmekapazität von Flüssigkeiten, der in Mikrofluidik-Systeme integriert werden kann. Ein extrem empfindlicher Temperaturdifferenzsensor aus Wismut-Tellurid wurde dazu auf der Polyimid-Folie Kap-



*Biegsame Sensoren ermöglichen Messungen auf gekrümmten Oberflächen und sind flexibel, was die Messaufgaben betrifft.*

ton abgeschieden und verschaltet. Durch seine geringe thermische Leitfähigkeit erreicht das Mini-Kalorimeter eine hohe Sensitivität. Der Chip mit einer Größe von nicht einmal 10 mm × 10 mm wird in Dünnschicht-Technologie auf einer 4-Zoll-Folie hergestellt. So entsteht ein preisgünstiger Sensor, der als Einweg-Produkt konzipiert ist, und vor allem für Screening-Messungen in Lab-on-Chip-Verfahren zum Einsatz kommen soll. Die Messauflösung von 15 mV/K kann bei gleicher Chipgröße durch eine höhere Anzahl an Thermoelementen noch um ein Mehrfaches gesteigert werden. Kombiniert mit einem Absorber lässt sich das Kalorimeter als Radiometer nutzen. Bei Raumtemperatur kann so beispielsweise die Erhöhung der Chiptemperatur durch die Wärmestrahlung einer Hand gemessen werden.

Ein weiterer flexibler Sensorchip ist speziell für die schnelle Messung thermoelektrischer Materialien ausgelegt. Ohne Probenvorbereitung bestimmt der Chip die thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie den Seebeck-Koeffizienten gleichzeitig; lediglich die Oberfläche der Probe muss hinreichend glatt sein. So lässt sich die thermoelektrische Güte des Materials – eine entscheidende Größe für die Effizienz thermoelektrischer Module – schneller als bisher im Screening-Verfahren bestimmen. Für die Messung wird das flexible »Sensorpflaster« mit einem Kunststoffstempel an die Materialoberfläche gedrückt und passt sich so der Probenoberfläche an. Diese sollte glatt, muss aber nicht eben sein. Die Messstruktur des Chips wird in einem waferbasierten Dünnschichtverfahren auf eine Kapton-Folie aufgebracht.

Das Chip-Design lässt sich grundsätzlich auch zur Charakterisierung von Flüssigkeiten nutzen. Durch einfaches Eintauchen in eine Flüssigkeit kann eine solche »elektronische Zunge« viele Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, pH-Wert oder Strömungsgeschwindigkeit messen.

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

## THERMOELEKTRISCHE ENERGIEWANDLER

## KONTAKTFREUDIG: HIGHTECH AM LÖTPLATZ

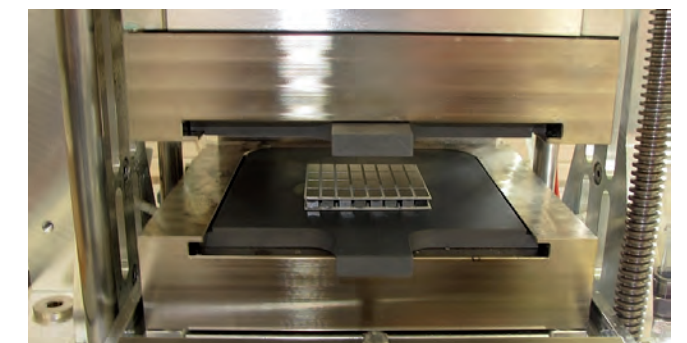
Elektrische und thermische Kontakte spielen eine entscheidende Rolle für die Performance und Langzeitstabilität elektronischer Bauteile. In diesem Bereich hat sich Fraunhofer IPM über die vergangenen Jahrzehnte hinweg herausragende Kompetenzen angeeignet. Beispielhaft hierfür sind die am Institut entwickelten Kontaktierungstechnologien für unterschiedlichste Materialien wie Silizide oder Sonderlegierungen wie Chalcogenide oder Halbheusler-Verbindungen auf Basis von Ni-Sn-Ti, die vor allem in der thermoelektrischen Abwärmeverstromung Anwendung finden.

Die Thermoelektrik stellt extreme Anforderungen an elektrische und thermische Kontakte, da diese – wie zum Beispiel beim Einsatz in Automobilen – sehr schnellen Temperaturwechseln unterliegen. Zusätzlich müssen die Kontakte aufgrund der komplexen Bauweise thermoelektrischer Generatoren thermisch und mechanisch besonders stabil aufgebaut sein. Die Generatoren bestehen aus verschiedenen Keramik-Metall-Halbleiter-Verbindungen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, die bei einer Bauhöhe von wenigen Millimetern in der Anwendung einem großen Temperaturgradienten ausgesetzt sind. Daneben darf das Kontaktmaterial das thermoelektrische Halbleitermaterial nicht durch Diffusion »vergiften« und die thermoelektrischen Eigenschaften dadurch negativ beeinflussen.

Um all diese Anforderungen zu erfüllen, wurden unterschiedliche Verbindungstechniken und Kontaktmaterialien sowie spezielle Analysemethoden entwickelt. Als besonders erfolgreich haben sich zwei Kontaktierungsmethoden erwiesen: Bei der Methode der Platten- bzw. Modullötung wird die Wärme großflächig von zwei Seiten für den Lötvorgang eingebracht und ein zeitlich präziser und geregelter Druck beaufschlagt. Durch ein

Monitoring wird das Aufschmelzen des Lotes überwacht; so kann der Lötvorgang gezielt gesteuert werden. Bei der Punktverbindungstechnik können Bereiche kleiner als 10 mm × 10 mm sehr schnell bis zur Verbindungsbildung aufgeheizt werden. Diese Methode eignet sich nicht nur für Lotverbindungen, sondern auch für das Diffusionsschweißen, denn hier kann die Wärme über eine regulierbare Dauer im Millisekunden- bis Minutenbereich räumlich sehr präzise eingebracht werden.

So ist es gelungen, mechanisch und thermisch zyklenstabile Kontakte mit niedrigen elektrischen Kontaktwiderständen zwischen Halbleiter und Metallen zu entwickeln und neuartige thermoelektrische Generatoren aufzubauen.



*Bei der Modullötung wird die Wärme großflächig von zwei Seiten für den Lötvorgang eingebracht.*

Dr. Jan König, Telefon +49 761 8857-329, jan.koenig@ipm.fraunhofer.de

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 67 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 23 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2 Milliarden Euro. Davon entfallen rund 1,7 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 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

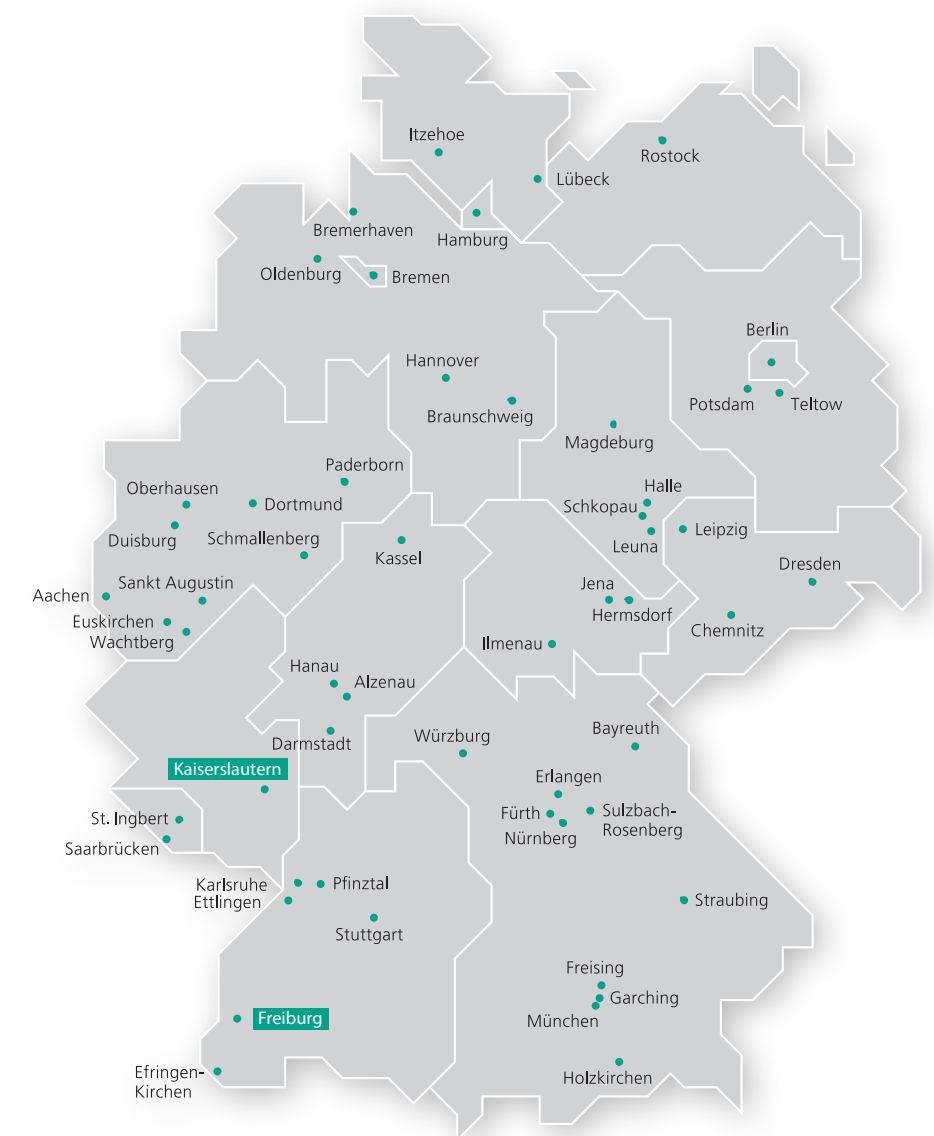
### Freiburg

Fraunhofer-Institut für  
Physikalische Messtechnik IPM  
Heidenhofstraße 8  
79110 Freiburg  
Telefon +49 761 8857-0  
Fax +49 761 8857-224  
[info@ipm.fraunhofer.de](mailto:info@ipm.fraunhofer.de)

### Kaiserslautern

Fraunhofer-Institut für  
Physikalische Messtechnik IPM  
Abteilung Materialcharakterisierung  
und -prüfung  
Gebäude 56  
Erwin-Schrödinger-Straße  
67663 Kaiserslautern  
Telefon +49 631 205-5100  
Fax +49 631 205-5102  
[info@ipm.fraunhofer.de](mailto:info@ipm.fraunhofer.de)

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



### IEEE Microwave Theory and Tech- niques Society; Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg/Brsg.

38th International Conference on  
Infrared, Millimeter and Terahertz Waves,  
IRMMW-THz 2013: Mainz, Germany, 1 - 6  
September 2013

Revel, G.M.; Arnesano, M.; Pietroni, F.;  
Frick, J.; Reichert, M.; Krüger, M.; Schmitt,  
K.; Huber, J.; Ebermann, M.; Pockele, L.;  
Khanlou, A.; Ekonomakou, A.; Balau, J.;  
Pascale, C.; Falco, F. de; Lando, R.; Battista,  
U.; Stuart, J.

### Advanced tools for the monitoring and control of indoor air quality and comfort

Environmental engineering and manage-  
ment journal 12 (Supplement 11), 229  
(2013)

Ospald, F.; Zouaghi, W.; Beigang, R.;  
Matheis, C.; Jonuscheit, J.; Recur, B.; Guil-  
let, J.-P.; Mounaix, P.; Vleugels, W.; Bosom,  
P.; Gonzalez, L.; Lopez, I.; Martinez, R.;  
Sternberg, Y.; Vandewal, M.

### Aeronautics composite material inspec- tion with a terahertz time-domain spec- troscopy system

Optical engineering 53 (3), Art. 031208,  
15 (2013)

Jacquot, A.; Rull, M.; Moure, A.; Fernandez-  
Lozano, J.F.; Martin-Gonzalez, M.; Saleemi,  
M.; Toprak, M.S.; Muhammed, M.; Jaegle, M.  
**Anisotropy and inhomogeneity meas-  
urement of the transport properties of  
spark plasma sintered thermoelectric  
materials**

MRS online proceedings library. Online  
resource 1490

Brook, A.; Cristofani, E.; Becquaert, M.;  
Lauwens, B.; Jonuscheit, J.; Vandewal, M.  
**Applicability of compressive sensing**

### on three-dimensional terahertz image- ry for in-depth object defect detection anand recognition using a dedicated semisupervised image processing methodology

Journal of electronic imaging 22 (2),  
Art.021004 (2013)

Peranio, N.; Winkler, M.; Dürschnabel, M.;  
Konig, J.; Eibl, O.

### Assessing antisite defect and impurity concentrations in Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> based thin films by high-accuracy chemical analysis

Advanced Functional Materials 23 (39),  
4969 (2013)

Miernik, A.; Eilers, Y.; Bolwien, C.; Lambre-  
cht, A.; Hauschke, D.; Rebentisch, G.; Loss-  
in, P.S.; Hesse, A.; Rassweiler, J.J.; Wetter-  
auer, U.; Schoenthaler, M.  
**Automated analysis of urinary stone  
composition using raman spectroscopy:  
Pilot study for the development of a  
compact portable system for immedi-  
ate postoperative ex vivo application**

The journal of urology 190 (5), 1895 (2013)

König, Jan D.

### Beiträge zur Aufklärung des Einbaus von Titan in PbTe und (Pb,Ge)Te in Be- zug auf eine Optimierung der thermoe- lektrischen Gütezahl ZT 180 (2013)

Schamel, D.; Pfeifer, M.; Gibbs, J.G.;  
Miksch, B.; Mark, A.G.; Fischer, P.  
**Chiral colloidal molecules and observa-  
tion of the propeller effect**

Journal of the American Chemical Society

135 (33), 12353 (2013)

Huber, Jochen; Eberhardt, André; Wölle-  
nstein, Jürgen

### Compact, photoacoustic gas measuring system for methane in biogas plants Sensor + Test Conference 2013, 126 (2013)

### Sowade, Rosita; Kießling, Jens; Breunig, Ingo CW laser light tunable from blue to red: OPOs pave the way

Photonik international (2), 63 (2013)

Huber, J.; Binniger, R.; Schmitt, K.; Wölle-  
nstein, J.

### Detection of bad indoor environment with a miniaturized gas sensor system

Smart sensors, actuators and MEMS VI.  
Vol.2 , Paper 87632H (2013)

Ambrosi, R.M.; Williams, H.R.; Samara  
Ratna, P.; Jorden, A.; Slade, R.; Bannister,  
N.P.; Sykes, J.; Deacon, T.; Stephenson, K.;  
Simpson, K.; Reece, M.; Ning, H.; Stuttard,  
M.; Rice, T.; Tinsley, T.; Sarsfield, M.; Jaegle,  
M.; Koenig, J.; Edgington, A.; Lerman, H.

### Development and testing of an ameri- cium-241 radioisotope thermoelectric generator

Nuclear and emerging technologies for  
space, NETS 2013 , 450 (2013)

Sowade, Rosita; Kießling, Jens; Breunig,  
Ingo

### Durchstimmbares CW-Laserlicht von Blau bis Rot: OPOs machen es jetzt möglich

Photonik (2), 42 (2013)

Busch, S.; Ketterer, M.; Vinzenz, X.; Hoff-  
mann, C.; Wölleinstein, J.

### Efficient nanoparticle filtering using bioinspired functional surfaces

Smart sensors, actuators and MEMS VI.  
Vol.1 , Paper 87630Z (2013)

Tafti, M.Y.; Saleemi, M.; Jacquot, Alexandre;  
Jägle, Martin; Muhammed, M.; Toprak, M.S.

### Fabrication and characterization of nanostructured bulk skutterudites

Nanoscale thermoelectric materials:  
Thermal and electrical transport, and  
applications to solid-state cooling and  
power generation, 105 (2013)

Saleemi, M.; Tafti, M.Y.; Toprak, M.S.; Stin-  
gaciu, M.; Johnsson, M.; Jägle, M.; Jacquot,  
A.; Muhammed, M.

### Fabrication of nanostructured bulk Cobalt Antimonide (CoSb<sub>3</sub>) based skutterudites via bottom-up synthesis

MRS online proceedings library. Online  
resource 1490

Theuer, Michael; Ellrich, Frank; Molter,  
Daniel; Beigang, René

### Fiber-coupled terahertz time- domain spectroscopy (THz-TDS) systems

Handbook of terahertz technology for  
imaging, sensing and communications,  
295 (2013)

Rademacher, Sven

### Flächendeckend verteilte Sensoren erkennen die Gefahrenlage im Katastrophenfall

CP Crisis Prevention (4), 30 (2013)

### Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik -IPM-, Freiburg/Brsg.

Fraunhofer-Institut für Physikalische  
Messtechnik. Jahresbericht 2012/2013

Rämer, Jan-Martin; Ospald, Frank; Frey-  
mann, Georg von; Beigang, René

### Generation and detection of terahertz radiation up to 4.5 THz by low-temper- ature grown GaAs photoconductive antennas excited at 1560 nm

Applied Physics Letters 103 (2), Art.021119,  
4 (2013)

Rämer, Jan-Martin; Ospald, Frank; Frey-  
mann, Georg von; Beigang, René

### Generation and detection of THz radiation up to 4.5 THz using LTG- GaAs PCAs illuminated at 1560 nm

38th International Conference on Infrared,  
Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-  
THz 2013 , 2 (2013)

Wagner, Andreas; Stylianidis, Stratos;  
Smagas, Konstantinos; Trdlicka, Jiri; Paar,  
Gerhard; Huber, Ben; Reith, Christoph;  
Reiterer, Alexander

### Geo-monitoring by high-resolution optical sensors

Photogrammetrie, Laserscanning, optische  
3D-Messtechnik , 166 (2013)

Waasem, Niklas; Markosyan, Ashot;  
Fejer, Martin M.; Buse, Karsten

### Green-induced blue absorption in MgO-doped lithium niobate crystals

Optics Letters 38 (16), 2953 (2013)

Kiessling, Jens; Breunig, Ingo; Schunemann,  
P.G.; Buse, Karsten; Vodopyanov, K.L.

### High power and spectral purity contin- uous-wave photonic THz source tuna- ble from 1 to 4.5 THz for nonlinear molecular spectroscopy

New journal of physics. Online journal 15  
(10), Art. 105014, 11 (2013)

Waasem, Niklas; Buse, Karsten; Kühne-  
mann, Frank

### High-sensitivity photoacoustic absorp- tion spectroscopy of nonlinear optical materials

Optical Components and Materials X ,  
Paper 862109 (2013)

Volk, M.F.; Reinhard, B.; Neu, J.; Beigang,  
R.; Rahm, M.

### In-plane focusing of terahertz surface waves on a gradient index metamater- ial film

Optics Letters 38 (12), 2156 (2013)

Waller, E.H.; Freymann, G. von  
**Independent spatial intensity, phase  
and polarization distributions**

Optics Express 21 (23), 28167 (2013)

Pfeifer, Marcel; Ruf, Alexander;  
Fischer, Peer

### Indirect absorption spectroscopy using quantum cascade lasers: Mid-infrared refractometry and photothermal spec- troscopy

Optics Express 21 (22), 25643 (2013)

Krimi, S.; Klier, J.; Herrmann, M.; Jonu-  
scheit, J.; Beigang, R.

### Inline multilayer thickness sensing by using terahertz time-domain spectros- copy in reflection geometry

38th International Conference on Infrared,  
Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-  
THz 2013 , 2 (2013)

Blug, Andreas

### Industrielle Prozesskontrolle mittels räumlich-zeitlicher Bildverarbeitung auf Zellularen Neuronalen Netzwerken 157 (2013)

Blug, Andreas; Carl, Daniel; Höfler, Heinrich  
**Inspecting rapidly moving surfaces for  
small defects using CNN cameras**

Videometrics, Range Imaging, and Applica-  
tions XII, and Automated Visual Inspection ,  
Paper 87911D (2013)

### Huber, Jochen; Wölleinstein, Jürgen Kompaktes photoakustisches Gas- messsystem mit Potential zur weiteren Miniaturisierung

Technisches Messen : TM 80 (12), 448  
(2013)

Baulig, Claudia; Maindorfer, Ingo; Reiterer,  
Alexander; Wölfelschneider, Harald  
**Lichtraumerfassung mit Hilfe neuester  
Lasermesstechnik**

Eisenbahningenieur (6), 46 (2013)

Peter, Carolin; Schulz, S.; Barth, M.;  
Gempp, M.; Rademacher, Sven; Wölle-  
nstein, Jürgen

### Low-cost roll-to-roll colorimetric gas sensor system for fire detection

Transducers 2013, 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems , 2632 (2013)

Wehrspohn, R.B.; Schweizer, S.L.; Gese-  
mann, B.; Pergande, D.; Geppert, T.M.;  
Moretton, S.; Lambrecht, A.  
**Macroporous silicon and its application  
in sensing**  
Comptes rendus chimie 16 (1)

Reinheimer, Christoph; Weber, Stefan Frey-  
mann, Georg von  
**Magnification dependent dispersion  
penalty studied with resonator-based  
time-stretch oscilloscope**  
International Topical Meeting on Microwave  
Photonics, MWP 2013 , 294 (2013)

Reinhard, B.; Paul, O.; Rahm, M.  
**Metamaterial-based photonic devices  
for terahertz technology**  
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum  
Electronics 19 (1), Art. 8500912, 12 (2013)

Waller, E.H.; Freymann, G. von  
**Multi foci with diffraction limited reso-  
lution**  
Optics Express 21 (18), 21708 (2013)

Kießling, Jens  
**Nichtlinear-Optische Erzeugung von  
Dauerstrich-Terahertzwellen**  
100 (2013)

Sowade, Rosita; Kießling, Jens; Breunig, Ingo  
**One light source – all colors: Optical  
parametric oscillators generate tunable,  
continuous-wave light spanning the  
visible spectrum**  
Optik & Photonik 8 (1), 46 (2013)

Kneer, J.; Boxberg, M.; Wöllenstein, J.  
**Optical properties of copper oxide thin  
films as selective sensing principle for  
hydrogen sulfide detection**

Smart sensors, actuators and MEMS VI.  
Vol.1 , Paper 87630E (2013)

Fratz, Markus; Carl, Daniel; Zeiser, Rode-  
rich; Berndt, Michael  
**Optische Verformungsmessungen an  
Mikrosystemen bei extremen Tempe-  
raturdifferenzen**  
Photonik 45 (6), 34 (2013)

Waasem, Niklas; Fieberg, Stephan; Hauser,  
Janosch; Gomes, Gregory; Haertle, Daniel;  
Kühnemann, Frank; Buse, Karsten  
**Photoacoustic absorption spectrometer  
for highly transparent dielectrics with  
parts-per-million sensitivity**  
Review of scientific instruments 84 (02),  
Art.023109, 8 (2013)

Waasem, Niklas  
**Photoakustische Absorptionsspek-  
troskopie an hochtransparenten  
optischen Materialien**, 132 (2013)

Peter, Carolin; Kneer, Janosch; Schmitt,  
Katrin; Eberhardt, André; Wöllenstein, Jürgen  
**Preparation, material analysis, and  
morphology of  $\text{Cr}_2 - \text{xTi}_\text{x}\text{O}_3 + \text{z}$  for gas  
sensors**  
Physica status solidi. A 210 (2), 403 (2013)

Blug, Andreas; Abt, Felix; Nicolosi, Leonardo  
**Real-time closed-loop control by high-  
speed image processing optimises laser  
welding**  
Photonik international , 32 (2013)

Weber, Stefan; Reinheimer, Christoph; Frey-  
mann, Georg von  
**A resonator-based time-stretch oscillo-  
scope with variable magnification**  
CLEO: QELS Fundamental Science , Paper  
JTh2A.29 (2013)

Weber, Stefan; Reinheimer, Christoph; Frey-  
mann, Georg von

**A resonator-based time-stretch oscillo-  
scope with variable magnification and  
time-aperture**  
DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP  
2013 , Paper Q29.1 (2013)

Jonuscheit, Joachim; Molter, Daniel; Ellrich,  
Frank; Beigang, René; Platte, Frank; Nalpan-  
tidis, Konstantinos  
**Revealing the invisible – identifying  
concealed substances by means of  
terahertz spectroscopy**  
Photonik International (15.11.2013), 12 (2013)

Scherer, Benjamin  
**Spectroscopy inside the cavity of a two  
mode laser**  
186 (2013)

Reiterer, Alexander; Dambacher, Martin;  
Maindorfer, Ingo; Höfler, Heinrich; Ebers-  
bach, Dirk; Frey, Carsten; Scheller, Steffen;  
Klose, Dirk  
**Straßenzustandsüberwachung in  
Sub-Millimeter**  
Photogrammetrie, Laserscanning, optische  
3D-Messtechnik , 78 (2013)

Vandewal, M.; Cristofani, E.; Brook, A.;  
Vleugels, W.; Ospald, F.; Beigang, R.; Wohn-  
siedler, S.; Matheis, C.; Jonuscheit, J.;  
Guillet, J.-P.; Recur, B.; Manek-Hönniger,  
I.; Mounaix, P.; Venegas, P.; Lopez, I.; Mar-  
tinez, R.; Sternberg, Y.  
**Structural health monitoring using  
a scanning THz system**  
38th International Conference on Infrared,  
Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-  
THz 2013 , 2 (2013)

Breunig, I.; Sturman, B.; Bückle, A.; Werner,  
C.S.; Buse, K.  
**Structure of pump resonances during  
optical parametric oscillation in  
whispering gallery resonators**  
Optics Letters 38 (17), 3316 (2013)

Gupta, S.; Agarwal, D.C.; Tripathi, S.K.;  
Neeleshwar, S.; Panigrahi, B.K.;  
Jacquot, A.; Lenoir, B.; Avasthi, D.K.

**Superiority of ion irradiation over  
annealing for enhancing the thermo-  
power of PbTe thin films**  
Radiation physics and chemistry 86, 6  
(2013)

Kießling, Jens; Buse, Karsten; Breunig, Ingo  
**Temperature-dependent Sellmeier  
equation for the extraordinary refrac-  
tive index of 5 mol. % MgO-doped  
LiNbO<sub>3</sub> in the terahertz range**  
Journal of the Optical Society of America. B,  
Optical physics 30 (4), 950 (2013)

Reinhard, B.; Schmitt, K.; Fip, T.; Volk, M.;  
Neu, J.; Mahro, A.-K.; Beigang, R.; Rahm, M.  
**Terahertz sensing with meta-surfaces  
and integrated circuits**  
Terahertz and Ultrashort Electromagnetic  
Pulses for Biomedical Applications , Art.  
858507 (2013)

Winkler, M.; Liu, X.; Schürmann, U.; König,  
J.D.; Kienle, L.; Böttner, H.  
**Theoretical and experimental advances  
in Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> / Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> - based and related su-  
perlattice systems**  
MRS online proceedings library. Online  
resource 1490

Salvador, J.R.; Cho, J.Y.; Ye, Z.; Moczygem-  
ba, J.E.; Thompson, A.J.; Sharp, J.W.; König,  
J.D.; Maloney, R.; Thompson, T.; Sakamoto,  
J.; Wang, H.; Wereszczak, A.A.; Meisner, G.P.  
**Thermal to electrical energy conversion  
of skutterudite-based thermoelectric  
modules**  
Journal of Electronic Materials 42 (7), 1389  
(2013)

Rahm, M.; Li, J.-S.; Padilla, W.J.  
**THz wave modulators: A brief review  
on different modulation techniques**

Journal of infrared, millimeter, and terahertz  
waves 34 (1), 1 (2013)

Wang, Hsin; Porter, Wallace D.; Böttner,  
Harald; König, Jan; Chen, Lidong; Bai,  
Shengqiang; Tritt, Terry M.; Mayolet, Alex;  
Senawiratne, Jayantha; Smith, Charlene;  
Harris, Fred; Gilbert, Patricia; Sharp, Jeff W.;  
Lo, Jason; Kleinke, Holger; Kiss, Laszo  
**Transport properties of bulk thermo-  
electrics – an international Round-Rob-  
in Study, Part I: Seebeck coefficient and  
electrical resistivity**  
Journal of Electronic Materials 42 (4), 654 (2013)

Wang, H.; Porter, W.D.; Böttner, H.; König,  
J.; Chen, L.; Bai, S.; Tritt, T.M.; Mayolet, A.;  
Senawiratne, J.; Smith, C.; Harris, F.; Gilbert,  
P.; Sharp, J.; Lo, J.; Kleinke, H.; Kiss, L.  
**Transport properties of bulk thermo-  
electrics. An international round-robin  
study, Part II: Thermal diffusivity,  
specific heat, and thermal conductivity**  
Journal of Electronic Materials 42 (6),  
1073 (2013)

Berndt, Michael; Carl, Daniel; Fratz,  
Markus; Steiert, Matthias; Zeiser, Roderich  
**Verformung von Mikrosystemen bei  
hohen Temperaturen**  
DGaO-Proceedings. Online journal , Paper  
A38, 2 (2013)

Zeiser, Roderich; Steiert, Matthias; Berndt,  
Michael; Wilde, Jürgen; Beckmann, Tobias;  
Fratz, Markus  
**Verformungsmessung von Mikrosyste-  
men bei hohen Temperaturen mit ESPI,  
DIC und Holographie**  
MikroSystemTechnik Kongress 2013,  
721 (2013)

Breunig, I.; Sturman, B.; Sedlmeir, F.; Schwe-  
fel, H.G.L.; Buse, K.  
**Whispering gallery modes at the rim  
of an axisymmetric optical resonator:**

**Analytical versus numerical descrip-  
tion and comparison with experiment**  
Optics Express 21 (25), 30683 (2013)

## DOKTORARBEITEN 2013

Bauersfeld, Marie-Luise:  
**Selektives Gassensorsystem zur Detek-  
tion von flüchtigen Verbindungen für  
Lebensmittelschnelltests**

Beckmann, Tobias:  
**Optisch parametrische Oszillation in  
Flüstergalerieresonatoren**

Beer, Sebastian:  
**Development of a selective electro-  
static sampling system for detection  
of trace explosives and illicit drugs.**

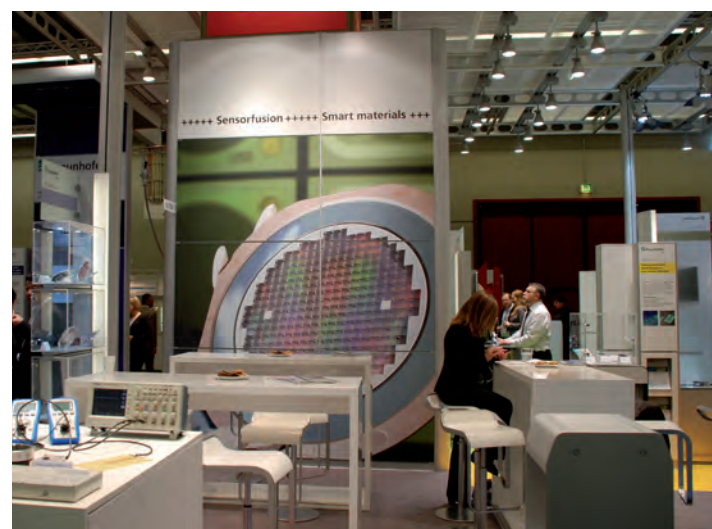
Kießling, Jens:  
**Nichtlinear-optische Erzeugung von  
Dauerstrich-Terahertzwellen**

König, Jan:  
**Beiträge zur Aufklärung des Einbaus  
von Titan in PbTe und (Pb,Ge)Te in  
Bezug auf einer Optimierung der  
thermoelektrischen Gütezahl ZT**

Waasem, Niklas:  
**Photoakustische Absorptionsspek-  
troskopie an hochtransparenten  
optischen Materialien**

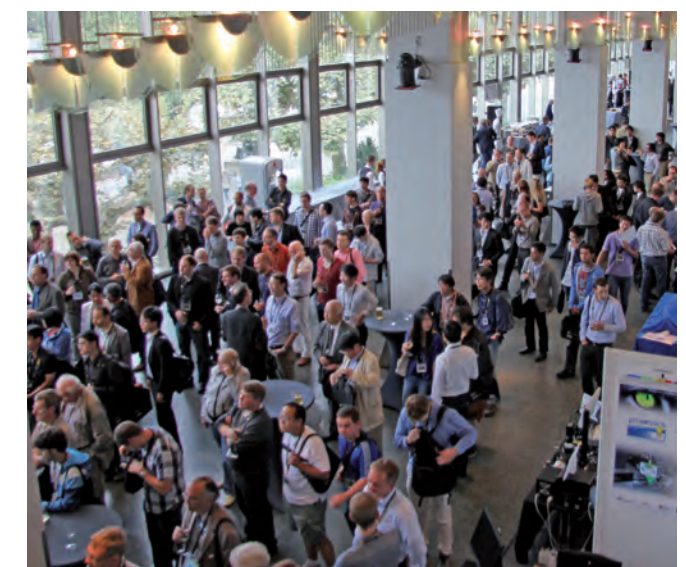
## FRAUNHOFER IPM AUF MESSEN ...

- **Leitmesse Energy – HANNOVER MESSE** Hannover
- **27. Control – Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung** Stuttgart
- **LASER – World of PHOTONICS** München
- **SENSOR + TEST** Nürnberg
- **INTERGEO** Essen
- **Rendez-vous CARNOT 2013**  
Lyon, Frankreich
- **parts2clean** Stuttgart
- **S.E.F. – Smart Energies for Factories**  
Paris, Frankreich



## ... UND AUF TAGUNGEN UND WORKSHOPS

- **Sensorik für erneuerbare Energien und Energieeffizienz** Berlin  
Veranstalter: AMA Fachverband für Sensorik e. V. und ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
- **Schnelle Strahlablenkung für Laseranwendungen** Nürnberg  
Veranstalter: bayern photonics e. V. und Bayerisches Laserzentrum GmbH
- **E-MRS Spring Meeting** Straßburg, Frankreich  
Veranstalter: European Materials Research Society (E-MRS)
- **Fraunhofer Vision-Technologietag** München  
Veranstalter: Fraunhofer-Allianz Vision
- **Inspektion und Charakterisierung von Oberflächen mit Bildverarbeitung** Karlsruhe  
Veranstalter: Fraunhofer-Allianz Vision
- **Freiburger Wissenschaftsmarkt der Universität Freiburg**  
Veranstalter: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg / Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe



## VON FRAUNHOFER IPM VERANSTALTET:

- Gassensor-Workshop 2013 – Intelligente Technologien für die Gasmesstechnik
- 38. »International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)«

*Oben: Neugierige Besucher auf dem Freiburger Wissenschaftsmarkt. Hier präsentierten alle fünf Fraunhofer-Institute Wissenschaft zum Anfassen. Unten: Ans Fachpublikum richtete sich die »38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves«, die Fraunhofer IPM in Mainz veranstaltete.*

**Fraunhofer IPM**

**Freiburg**

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

**Kaiserslautern**

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM  
Abteilung Materialcharakterisierung und -prüfung  
Gebäude 56  
Erwin-Schrödinger-Straße  
67663 Kaiserslautern  
Telefon +49 631 205 5100  
Fax +49 631 205 5102  
info@ipm.fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de

**Anschrift der Redaktion**

Fraunhofer-Institut für  
Physikalische Messtechnik IPM  
Presse und Öffentlichkeitsarbeit  
Holger Kock

Heidenhofstraße 8  
79110 Freiburg  
Telefon +49 761 8857-129  
holger.kock@ipm.fraunhofer.de

**Redaktion**

Holger Kock; Iris Erbach, Anja Strobel, Isabell Wiedle

**Gestaltung**

ASD–ANJASCHMIDTDESIGN; Freiburg;  
www.anjaschmidttdesign.de

**Bildquellen**

Kai-Uwe Wudtke (Titel, S. 17, 18, 19, 25, 29, 30, 32, 33, 35); Klaus Polkowski (S. 5, 6, 7, 8); SPIE & PHOTONICS MEDIA (S. 10) IMTEK-Uni Freiburg, TU Kaiserslautern (S.12); Felix Grotheloh/ Klaus Polkowski (S. 14, 15); HÜBNER GmbH und Co. KG ( S. 21); BMW AG, München (S. 22); Fotolia/Marcel Schauer (S. 27); IAF (S. 45); Fraunhofer IPM (S. 9, 23, 26, 36, 37, 44, 45)

**Druck**

Druckerei Borchert, Weil am Rhein

Dieser Bericht wurde auf klimaneutral hergestelltem  
Papier gedruckt.

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

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der  
Redaktion erforderlich.

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