

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

MESSEN · KONTROLLIEREN · OPTIMIEREN

2014 / 2015

Messen · Kontrollieren · Optimieren

2014  
2015



Messen · Kontrollieren · Optimieren

.....  
**Titelbild** *Fraunhofer IPM entwickelt nicht nur integrierte Sensoren und mikro-systemtechnische Bauteile, sondern auch Messverfahren zur Fertigungskontrolle.*  
.....

# »Schneller und genauer messen ... für mehr Effizienz«

- PRODUKTIONSKONTROLLE
- MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG
- OBJEKT- UND FORMERFASSUNG
- GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE
- FUNKTIONELLE MATERIALIEN UND SYSTEME



Prof. Dr. Karsten Buse,  
Institutsleiter

## Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

eine immer bessere »Ressourceneffizienz«, das ist heute eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe. Gemeint ist damit nicht nur höhere Energieeffizienz, sondern vor allem auch höhere Rohstoffeffizienz. Gleichzeitig steigen unsere Ansprüche, unsere technischen Möglichkeiten und damit der grundsätzliche Ressourcenbedarf – denken wir z. B. nur an die Medizintechnik oder den Transport. Hier und in vielen anderen Branchen gelingt es Fraunhofer IPM, einen wesentlichen Beitrag zu leisten, damit unterm Strich die Effizienz gewinnt.

### Unsere Mission: Ressourceneffizienz erhöhen

Mithilfe unserer Messsysteme werden Fertigungsprozesse mit hohem Durchsatz zu 100 % überwacht, Fehler vermieden und die Produktivität erhöht. Unsere Systeme helfen, Emissionen zu erkennen und zu verringern. Und unsere Kompetenz auf dem Gebiet funktioneller Materialien hilft dabei, Abwärme zu recyceln. Ressourceneffizienz spart Geld und vergrößert unternehmerische Gewinne. In unserer Marktwirtschaft ist das der richtige Anreiz, damit Technik sich durchsetzt. Die von Fraunhofer IPM gebauten Messsysteme amortisieren sich oft innerhalb kurzer Zeit, reduzieren Risiken für Betriebe und sichern Arbeitsplätze. Dies durften wir in den vergangenen Monaten wieder mehrfach hautnah miterleben.

### Unser Anspruch: schneller messen und genauer

Bei der Sitzung unseres Kuratoriums kam die Frage auf, wodurch sich die Entwicklungen von Fraunhofer IPM im Wettbewerb auszeichnen,

und warum wir so erfolgreich sind, obwohl die von uns erstellten Systeme pro Stück oft 100 000 Euro oder mehr kosten und auf dem Markt der Test- und Messtechnik Weltkonzerne mit unglaublich großen Angebotspaletten aktiv sind. Für unseren Erfolg gibt es zwei gute Gründe: Zum einen entwickeln und fertigen wir einzelne und auf spezielle Anwendungen abgestimmte Spezialsysteme, die es sonst nicht gäbe. Zum anderen wurde in der Diskussion mit unseren Kuratoren deutlich, dass unsere Systeme Weltrekorde in Bezug auf Geschwindigkeit und Genauigkeit setzen. In der digital-holographischen 3D-Messtechnik nehmen unsere Anlagen mittlerweile mehr als 10 Millionen 3D-Punkte pro Sekunde auf, und die Laserscanner erreichen Genauigkeiten im Sub-Zehntel-Millimeter-Bereich, um nur zwei Beispiele zu nennen.

### Unser Ziel: Kunden, die gerne wiederkommen

Solche Alleinstellungsmerkmale haben dazu geführt, dass Fraunhofer IPM sich weiter sehr gut entwickelt hat. Kunden haben – begeistert von der Leistungsfähigkeit unserer Systeme und Entwicklungen – weitere Aufträge platziert und neue Kunden wurden gewonnen, die nach oft jahrelanger und ergebnisloser Suche nach geeigneten Messsystemen schließlich bei uns fündig geworden sind. Wir freuen uns stets über Ihre Anfragen und neue Herausforderungen!

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

Ihr

Karsten Buse



#### SICHERHEIT IN DER LEBENSMITTELPRODUKTION

Die Nachfrage nach qualitativ hochwertigem Stockfisch steigt weltweit – besonders in Südeuropa. Um den größeren werdenden Bedarf an dieser Spezialität abdecken zu können, wandelt sich die Stockfisch-Produktion derzeit vom Wikinger-Handwerk zur Hightech-Produktion.

Halbleiter-Gassensoren von Fraunhofer IPM spielen dabei eine zentrale Rolle.

40



#### ZERSTÖRUNGSFREIE MEHRSCHICHTANALYSE

Die Dicke von Schichten auf nicht-metallischen Substraten kann bisher nur zerstörend oder im Kontakt gemessen werden. Mit Terahertz-Wellen, die im Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen liegen, ist eine zerstörungsfreie Messung möglich: Terahertz-Wellen werden an Grenzflächen reflektiert, an denen sich der Brechungsindex ändert.

30



#### THERMOELEKTRIK IM BLOCKHEIZKRAFTWERK

Blockheizkraftwerke spielen eine wichtige Rolle in der Energiewende. Fraunhofer IPM entwickelt neuartige thermoelektrische Generatoren, die den elektrischen Wirkungsgrad und damit die Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks weiter erhöhen können.

52

Mikrostrukturierte Messstrukturen  
auf transparenten Substraten.



## INHALTSVERZEICHNIS

|    |                                           |
|----|-------------------------------------------|
| 5  | Editorial                                 |
| 8  | Magazin                                   |
| 12 | Lehrstühle in Freiburg und Kaiserslautern |
| 16 | Betriebshaushalt I Personal               |
| 17 | Kuratorium                                |
| 18 | Organisation I Ansprechpartner            |

|    |                                                    |
|----|----------------------------------------------------|
| 20 | <b>PRODUKTIONSKONTROLLE</b>                        |
| 22 | Digitale Holographie für die 100-Prozent-Kontrolle |
| 24 | Inline-Mikroskopie für anspruchsvolle Messaufgaben |

|    |                                                         |
|----|---------------------------------------------------------|
| 26 | <b>MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG</b>           |
| 28 | Schnelle Volumeninspektion mit Terahertz-Wellen         |
| 30 | Zerstörungsfreie Mehrschichtanalyse im Sekundentakt     |
| 32 | Vielseitig und exakt: der Netzwerkanalysator »Tera-VNA« |

|    |                                  |
|----|----------------------------------|
| 34 | <b>OBJEKT- UND FORMERFASSUNG</b> |
| 36 | Exakte Schienenmessung per Laser |

|    |                                                       |
|----|-------------------------------------------------------|
| 38 | <b>GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE</b>                    |
| 40 | Sicherheit in der Lebensmittelproduktion              |
| 42 | Messen mit Druck: Stempel vereinfacht Materialmessung |
| 44 | Quantenkaskadenlaser für die schnelle Abgasanalytik   |

|    |                                                     |
|----|-----------------------------------------------------|
| 46 | <b>FUNKTIONELLE MATERIALIEN UND SYSTEME</b>         |
| 48 | Cool: magnetische Kühlung ohne Kältemittel          |
| 50 | Reine Optik: Restabsorption präzise messen          |
| 52 | Thermoelektrische Generatoren im Blockheizkraftwerk |

|    |                             |
|----|-----------------------------|
| 54 | Die Fraunhofer-Gesellschaft |
| 56 | Partner I Netzwerke         |
| 58 | Publikationen 2014          |
| 62 | Messen I Veranstaltungen    |
| 66 | Impressum                   |

# Wissenschaftlerinnen bei Fraunhofer IPM



## WISSENSCHAFTSCAMPUS IN FREIBURG

Die Fraunhofer-Gesellschaft veranstaltete im Oktober 2014 den viertägigen Wissenschaftscampus in Freiburg, um mehr Frauen für die Wissenschaft zu begeistern. Studentinnen der MINT-Fächer (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) konnten an allen fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten und am benachbarten Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg tiefe Einblicke in die Forschung gewinnen und ihre persönlichen und fachlichen Kompetenzen stärken. Fraunhofer IPM richtete unter anderem den Workshop »Science-to-Business« aus, in dem die Teilnehmerinnen lernten, wie man wissenschaftliche Ergebnisse effektiv vermarktet. Der nächste Wissenschaftscampus wird 2015 an Fraunhofer-Standorten im Großraum Köln-Bonn stattfinden.



1



2

## GIRLS' DAY: MÄDCHEN-ZUKUNFTSTAG MITMACHEN STATT ZUSCHAUEN



Am 27. März 2014 war es wieder so weit: Schon zum

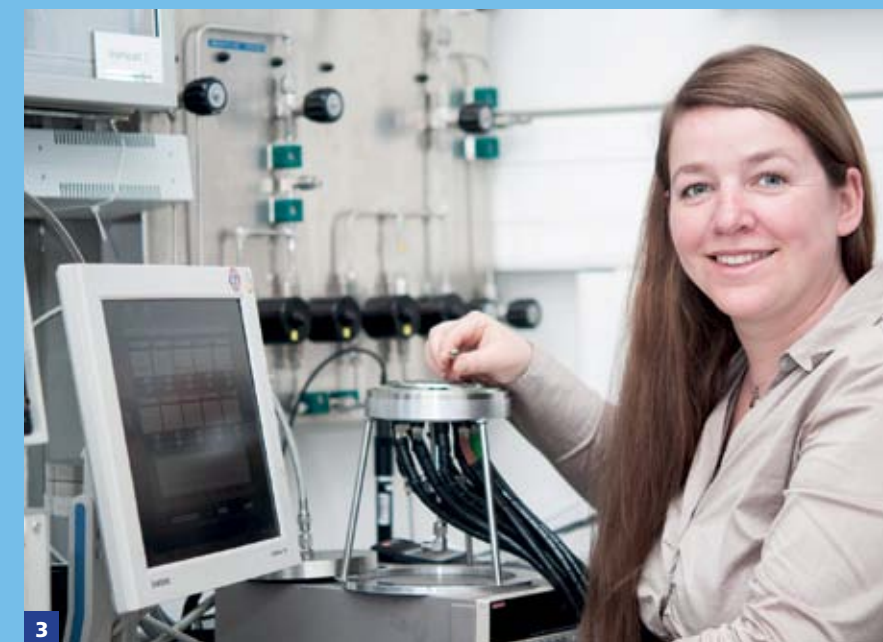
14. Mal lud Fraunhofer IPM Schülerinnen ab der achten Klasse zu einer Tour durch Labore und Werkstätten ein. Dabei konnten die 18 teilnehmenden Mädchen natürlich nicht nur zuschauen, sondern auch selbst aktiv werden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hatten sich für ihre Besucherinnen spannende Experimente ausgedacht, wie etwa: »Feuer und Eis«, ein thermoelektrischer Versuch, wie man aus Feuer Strom und aus Strom Eis macht. Unter dem Motto: »Sag die Wahrheit!« bauten die Mädchen einen Lügendetektor.

1 + 2 Studentinnen der MINT-Fächer waren zu Besuch in Freiburg und konnten sich davon überzeugen, wie spannend Forschung sein kann.

## Fraunhofer TALENTA: Frauen in die angewandte Forschung

Marie-Luise Bauersfeld ist seit Januar 2015 Leiterin der Gruppe »Integrierte Sensorsysteme« am Fraunhofer IPM. Gemeinsam mit Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern arbeitet die promovierte Mikrosystemtechnikerin an der Entwicklung, Konzeptionierung, Charakterisierung und Herstellung funktionaler Oberflächen, miniaturisierter Gassensoren und kompakter Gasmesssysteme. Gleichzeitig nimmt Bauersfeld seit April 2015 am »TALENTA speed up« teil, einem auf zwei Jahre angelegten Förder- und Entwicklungsprogramm für weibliche Führungskräfte der Fraunhofer-Gesellschaft. TALENTA verschafft Forscherinnen Freiräume für die eigene Karriereentwicklung – durch finanzielle Unterstützung, individuelle Qualifizierungsangebote, Standort- und Profilreflexion sowie durch die Möglichkeit zur Vernetzung mit anderen Frauen bei Fraunhofer. Ziel ist es, Mitarbeiterinnen darin zu unterstützen, die eigene Karriere gezielt voranzutreiben. Für Bauersfeld eröffnen sich durch das Programm viele neue Möglichkeiten: »Mit TALENTA kann ich mein Führungs-

potenzial stärken, meine Gruppe durch die Akquisition öffentlicher, nationaler und internationaler Projekte thematisch und personell erweitern, internationale Kooperationen und Netzwerke ausbauen, aber auch den wissenschaftlichen Nachwuchs durch die Begleitung von Studierenden als Mentorin unterstützen.« Und worauf möchte sich die Wissenschaftlerin in Zukunft inhaltlich konzentrieren? »Ich strebe unter anderem die Weiterentwicklung industrierelevanter Forschungsthemen an. Dazu gehört zum Beispiel die Ergänzung unseres Material- und Prozessspektrums um ionenleitende und gasochrome Halbleiter sowie hochporöse Nanostrukturen. Vorhandene Ansätze aus der Gassensorik gilt es in andere Anwendungsfelder wie die Partikel- oder Feuchtemesstechnik zu transferieren. Dabei liegt der Fokus nicht nur auf der Entwicklung einzelner Komponenten, sondern auf ihrer Integration in kompakte Gasmesssysteme. Das TALENTA-Programm unterstützt mich bei dieser Zielsetzung und ermöglicht mir eine freie Gestaltung meiner Arbeit durch das individuelle und auf meine Lebens- und Karrierephase ausgelegte Begleitangebot.«



3

3 Marie-Luise Bauersfeld leitet die Gruppe »Integrierte Sensorsysteme« am Fraunhofer IPM.

# Auszeichnungen

## »Hugo-Geiger-Preis« 2014 für Wissenschaftler von Fraunhofer IPM

Jens Kießling erhielt für seine Promotionsarbeit den Hugo-Geiger-Preis 2014. Mit dem Preis werden jährlich drei junge Wissenschaftler für herausragende Promotionsarbeiten ausgezeichnet. Kießling belegte Platz 1. Der junge Physiker entwickelte und realisierte am benachbarten Lehrstuhl für Optische Systeme der Uni Freiburg eine durchstimmbare Terahertz-Lichtquelle. Mit seiner Arbeit »Nichtlinear-Optische Erzeugung von Dauerstrich-Terahertzwellen« gelang Kießling ein entscheidender Schritt auf dem Weg zum »Laserlicht auf Knopfdruck«. Er entwickelte einen neuartigen optisch-parametrischen Oszillator, der das Licht eines einfarbigen Pumpasers in Laserlicht jeder gewünschten Wellenlänge im Terahertz-Bereich umwandeln kann. Die Erkenntnisse des Nachwuchswissenschaftlers führten – unterstützt durch die guten Fraunhofer-Industriekontakte – zur Entwicklung eines marktreifen Produkts. Mit dem optisch-parametrischen Oszillator »C-WAVE« steht erstmals eine in der Farbe regelbare Laserlichtquelle für den sichtbaren Spektralbereich zur Verfügung, ohne dass Komponenten oder Farbstoffe gewechselt werden müssen.



**1** Jens Kießling bei der feierlichen Verleihung des Hugo-Geiger-Preises 2014 in München.



**2** Markus Schindler freut sich über die Auszeichnung durch den Handwerkskammerpräsidenten Johannes Ullrich (links) und Vizepräsidenten Christof Burger (rechts).

### MARKUS SCHINDLER

#### BESTER JUNGMEISTER 2014

Erfolgsmeldung aus der Fraunhofer IPM Werkstatt: Der Feinwerkmechanikermeister Markus Schindler wurde von der Freiburger Handwerkskammer für seine herausragende Leistung mit dem Titel »Bester Jungmeister 2014« ausgezeichnet. Die Verleihung fand am 6. Dezember im Freiburger Konzerthaus statt. Glückwunsch!



## Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2014 für »T-COGNITION«

René Beigang von Fraunhofer IPM und Thorsten Sprenger von der Kasseler Firma Hübner GmbH & Co. KG erhielten einen der drei Joseph-von-Fraunhofer-Preise 2014. Ausgezeichnet wurden sie für die Entwicklung des Postscanners »T-COGNITION«, der Gefahrenstoffe in Postsendungen identifiziert – ohne, dass diese geöffnet werden müssen.

Harmloser Umschlag oder Briefbombe? In den Poststellen großer Unternehmen, Behörden, Justizvollzugsanstalten und Botschaften stellt sich diese Frage täglich. »T-COGNITION« bietet einen zuverlässigen Sicherheitscheck für Postsendungen, der das Briefgeheimnis wahrt. Der ungeöffnete Brief wird über eine Klappe in das Messgerät eingelegt und von Terahertz-Wellen durchleuchtet. Je nachdem, auf welche Stoffe die Wellen treffen, werden bestimmte Wellenlängen-Bereiche absorbiert. Das wird von Detektoren gemessen. »Innerhalb weniger Sekunden identifiziert das Gerät den spektroskopischen Fingerabdruck eines Gefahrenstoffs durch Abgleich mit einer Datenbank«, erläutert Thorsten Sprenger. Enthält ein

**3** Fraunhofer-Präsident Reimund Neugebauer (links) überreicht René Beigang (rechts) und Thorsten Sprenger (Mitte) den Joseph-von-Fraunhofer-Preis.

**4** Der Postscanner »T-COGNITION« erkennt Sprengstoff und Drogen in Postsendungen, ohne dass diese geöffnet werden müssen.



**4**

# Lehrstühle in Freiburg und Kaiserslautern

Fraunhofer IPM ist durch assoziierte Lehrstühle mit den lokalen Universitäten in Freiburg und Kaiserslautern vernetzt. So stehen wir in direktem Kontakt zur Grundlagenforschung und können auf neueste Forschungsergebnisse zurückgreifen.

**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. Die gemeinsam mit weiteren Optik-Lehrstühlen ins Leben gerufene Spezialisierungsmöglichkeit »Photonics« wurde in den Studienplan für den Masterstudiengang Mikrosystemtechnik aufgenommen. Gruppenleiter Dr. Ingo Breunig betreut die Forschungsarbeiten am Lehrstuhl.

## Lehrstuhl für Gassensoren

**Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein**

Am Lehrstuhl werden gassensitive Materialien, Sensoren und Sensorsysteme entwickelt. Im Zentrum der Forschung stehen miniaturisierte, energiesparende Gasmesssysteme. Ein besonderer Schwerpunkt ist die Entwicklung preisgünstiger und energiesparender Sensoren.



1

**Technische Universität Kaiserslautern**  
**Fachbereich Physik**



## Lehrstuhl für Optische Technologien und Photonik

**Prof. Dr. Georg von Freymann**

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



2

1 Campus der Technischen Fakultät der Universität Freiburg.

2 Verwaltungsgebäude der TU Kaiserslautern.

# Gebäude und Ausstattung



3

3 Der Neubau am Fraunhofer-Zentrum in Kaiserslautern wurde am 14. April 2015 feierlich eingeweiht.

## Gebäudeeinweihung in Kaiserslautern – Planungsfortschritte in Freiburg

Freude am Standort Kaiserslautern: Im Februar 2015 bezogen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung« ihr neues Domizil am Fraunhofer-Platz 1. Das Gebäude wurde am 14. April 2015 feierlich eröffnet, mit dabei hochrangige Gäste aus Politik und Wirtschaft. Das Wachstum der Abteilung hatte den Neubau notwendig gemacht, der von EU, Bund und Land Rheinland-Pfalz mit insgesamt 9 Millionen Euro unterstützt wurde. Das moderne Institutsgebäude bietet Raum für 50 Kolleginnen und Kollegen.

Die Planung für den Institutsneubau in Freiburg geht in die heiße Phase: Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat den Raumbedarfs- und Stellenplan bewilligt, die Vergabeverfahren für die Architekten laufen. Baufreigabe ist voraussichtlich im Dezember 2015, Baubeginn des rund 6500m<sup>2</sup> großen Gebäudes voraussichtlich im September 2016.



## NEUER GASMESSPLATZ

Fraunhofer IPM verfügt seit dem Jahr 2014 über einen neuen Gasmessplatz. Dieser ermöglicht eine gleichzeitige Beaufschlagung von Detektoren mit Prüfgasen, die Regulierung der Temperatur, Strömung und Luftfeuchte sowie die Aufzeichnung resultierender Signalverläufe. Weitere Besonderheit: auch toxische Gase wie Kohlenmonoxid können bis 30 % beaufschlagt werden. Zusätzlich dazu lassen sich verschiedene Erdgase in unterschiedlichen Verhältnissen miteinander mischen und abfüllen.



4

4 Auch toxische Gase können hier beaufschlagt werden.



Thomas Hinrichs, Werkstattleiter  
bei Fraunhofer IPM.

## Beispiele aus dem Forschungs-Alltag



### PROJEKT: ABWÄRMEATLAS

Das Forschungsprojekt »Abwärmeatlas: Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potenziale und Forschungsbedarf« befasst sich mit der Abwärmenutzung in energieintensiven Branchen der Industrie. Deutschlandweit werden dafür Daten gesammelt und bewertet. Fraunhofer IPM identifiziert und charakterisiert im Rahmen des Projekts Technologien zur Abwärmenutzung und Bedingungen für deren Einsatz.



### Fraunhofer IPM auf der arabischen Halbinsel

Im November 2014 fand in Katar die »Qatar Foundation Annual Research Conference QFARC« statt. Die Konferenz wird von der Qatar Foundation for Education, Science and Community Development ausgerichtet. Deren Auftrag ist es, die Zukunft des Landes durch Bildung und Forschung zu sichern. Im Mittelpunkt der diesjährigen Konferenz standen die vier Themenbereiche »Energy and Environment«, »Computing and Information Technology«, »Health« und »Social Sciences, Arts and Humanities«. Jana Heuer und Hans-Fridtjof Pernau waren vor Ort. Beide forschen bei Fraunhofer IPM auf dem Gebiet der Thermoelektrik.

Katar zählt zu den trockensten Landschaften der Erde. Die Sicherung der Wasserversorgung spielt daher eine zentrale Rolle und stand im Mittelpunkt der Diskussionen. So hielt etwa der Nobelpreisträger und ehemalige Energieminister der USA, Dr. Steven Chu, einen Vortrag über »Solar Energy and Water Security«. Fraunhofer IPM stellte neue Möglichkeiten vor, wie energieautarke thermoelektrische Sensoren die Wasserversorgung verbessern könnten: Und zwar indem sie Pipelines, die Wasser über mehrere tausend Kilometer durch die Wüste transportieren, auf Lecks kontrollieren. Dank thermoelektrischer Generatoren benötigen sie weder Batterien noch Wartung und sind damit ideal geeignet für schwer erreichbare Einsatzorte.

## Interview: »Jeden Tag was Neues«

Unsere modern ausgestattete mechanische Werkstatt stellt maßgeschneiderte Präzisionsteile für die im Haus entwickelten Systeme her. Wir haben mit Thomas Hinrichs gesprochen, der seit 2005 die Werkstatt leitet.

### 1. Was sind die Vorteile von einer Werkstatt im Haus?

Zunächst einmal, dass wir auf alle Situationen flexibel reagieren können. Und im Gegensatz zur Wirtschaft, die für einen Auftrag sechs bis acht Wochen braucht, sind wir außerdem schneller. Das ist wichtig, denn wenn für ein Projekt kurzfristig ein Bauteil benötigt wird, würde es den ganzen Projektplan durcheinander bringen, wenn man so lange auf ein Teil warten müsste. Dass wir so schnell reagieren können, verdanken wir unter anderem dem Programm CAD-CAM Creo Elements Pro, mit dem wir direkt auf die Daten der Konstrukteure zugreifen und virtuelle Prototypen in 3D erstellen können. Dank der Simulationssoftware werden mögliche spätere Fehler schon im Vorfeld behoben. Dieser Zwischenschritt verringert die Ausschussrate und verhindert Probleme während der Produktion. Aus dem Modell heraus kann man auch direkt die Maschinen programmieren, wir sind da also schon einen Schritt weiter als viele andere, die das noch von Hand machen. Wir haben ganz kurze Wege zwischen Konstruktion und Fertigung. So sind unsere Mitarbeiter in der Lage, die Aufträge der Konstrukteure schnell, flexibel und in hoher Qualität zu bearbeiten.

### 2. Welche Aufgaben haben Sie als Leiter?

Ich kümmere mich um die Arbeitsvorbereitung und die Termine und koordiniere, wer wann was an welcher Maschine macht. Der Terminplan ist bei uns das A und O. Damit die Projektleiter gut planen können, ist es wichtig, zeitlich zuverlässig zu sein, und das sind wir auch.

### 3. Wie sieht ein normaler Arbeitstag in der Werkstatt aus?

Das kann man gar nicht so genau sagen. Es kann sein, dass ein Arbeitsplan für die nächsten zwei Wochen innerhalb von wenigen Stunden komplett hinfällig wird, da wir immer zeitlich flexibel auf neue Aufträge reagieren. Akute Aufträge schieben wir dazwischen. Das bringt den Terminplan natürlich erstmal durcheinander. Aber dafür wird es bei uns nie langweilig. Es gibt wirklich jeden Tag was Neues, das macht unsere Arbeit hier sehr interessant und abwechslungsreich. Ein weiterer wichtiger Bestandteil unserer Werkstatt ist die Ausbildung zum Industriemechaniker Fachrichtung Feinwerk- und Gerätetechnik. Der stellvertretende Leiter der Werkstatt, Achim Weber, ist Ausbildungsleiter und Mitglied im Prüfungsausschuss der Industrie- und Handelskammer Südlicher Oberrhein. Pro Lehrjahr nehmen wir einen neuen Auszubildenden, derzeit haben wir vier. Für unsere Werkstattgröße mit zehn Mitarbeitern, davon fünf Gesellen, ist das sehr viel. Unsere Gesellen »generieren« wir auch komplett selber, also alle, die jetzt hier arbeiten, haben auch hier gelernt.

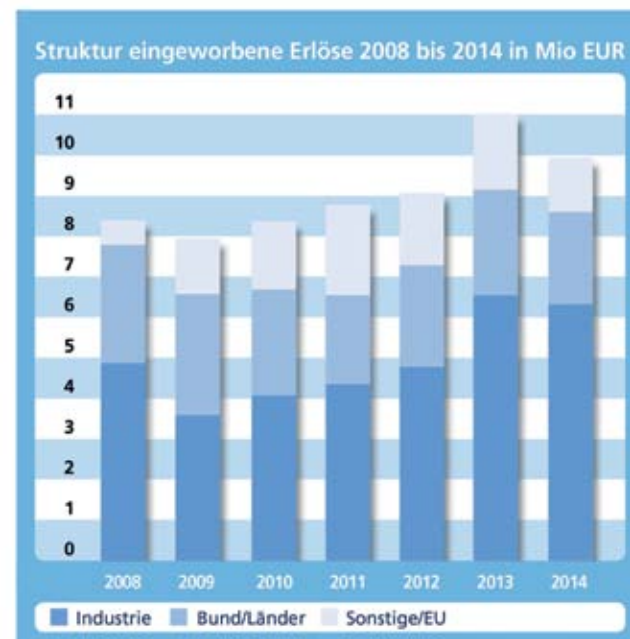


### Maschinenausstattung

- zwei Hermle 5-Achs-Bearbeitungszentren X-Y-Z 600-450-450 mm
- ein Hermle 3-Achs-Bearbeitungszentrum X-Y-Z 800-600-500
- eine Fehlmann Präzisions-Fräs-Bohrmaschine
- zwei manuelle Weiler Präzisions-Drehmaschinen (Sonderspindellagerung mit 2 µm Rundlauf)
- drei Drei-Achs CNC-Fräsmaschinen mit Strecken- und Bahnsteuerung

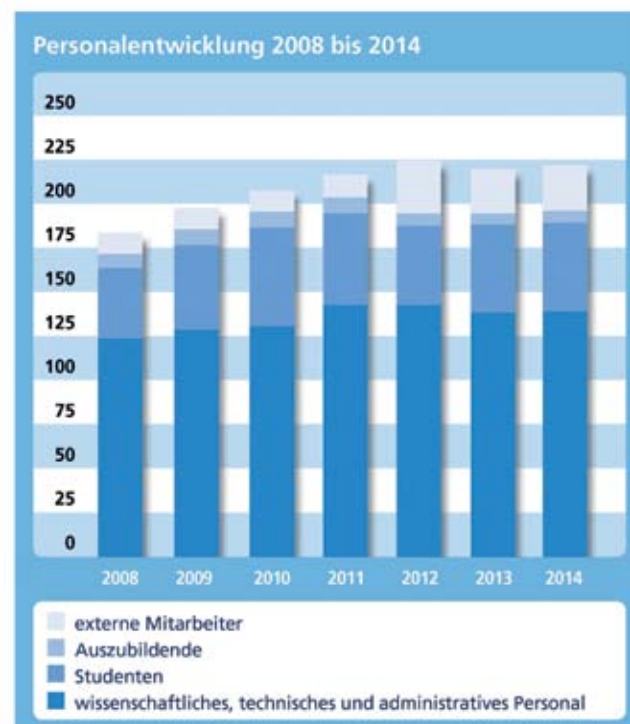
### Betriebshaushalt

Im Jahr 2014 betrug der Betriebshaushalt von Fraunhofer IPM 14,7 Millionen Euro und ist damit um 0,6 Millionen Euro niedriger als im Jahr 2013. Der Betriebshaushalt setzt sich zusammen aus Industrieerlösen, öffentlich geförderten Projekten und der Grundfinanzierung. Dabei liegt der Anteil externer Finanzierungsgelder, bestehend aus externen öffentlichen Geldern und Industrieerlösen, bei 67,6 Prozent bzw. 9,9 Millionen Euro (Abb. rechts). Die Industrieerlöse machen mit 6,3 Millionen Euro einen Anteil von 42,9 Prozent am Betriebshaushalt aus. Das entspricht einer leichten Steigerung gegenüber dem Vorjahr um 0,3 Prozentpunkte.



### Personal

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich die Mitarbeiterzahl kaum verändert. Insgesamt 137 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind bei Fraunhofer IPM in Festanstellung beschäftigt, davon 18 am Standort Kaiserslautern. Am Institut arbeiten zusätzlich rund 55 Studenten und Berufseinsteiger, davon 46 Diplomanden, Master- und Bachelorstudenten, 9 Auszubildende, Praktikanten und Hilfskräfte. Zusätzlich sind etwa 25 externe Mitarbeiter am Fraunhofer IPM tätig (Abb. rechts). 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.



### Unser Kuratorium

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

- Reinhard Hamburger, Vorsitzender des Kuratoriums, C-FOR-U Business Coaching
- Dr. Bernd Dallmann, Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe GmbH & Co. KG
- Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Prof. Dr. Thomas Graf, Direktor des Instituts für Strahlwerkzeuge IFSW der Universität Stuttgart
- Dr. Ehrentraud Graw, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
- Siegfried Groß, Keysight Technologies Deutschland GmbH
- Prof. Dr. Jan G. Korvink, Institut für Mikrostrukturtechnik, Karlsruher Institut für Technologie
- 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



»Der Fraunhofer-Grundgedanke wird am Fraunhofer IPM ganz hervorragend gelebt. Das macht es Firmen leicht, in Kooperation zu treten.«

*Dr. Christian Schmitz*



**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



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



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



**Technische Dienste**  
Clemens Fallert  
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. Daniel Carl  
Telefon +49 761 8857-549  
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de



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



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



**Optische Oberflächenanalytik**  
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 2057 40-01  
georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de



**Stellvertretender Abteilungsleiter**  
Dr. Joachim Jonuscheit  
Telefon +49 631 2057 40-11  
joachim.jonuscheit@ipm.fraunhofer.de



**Elektronische Terahertz-Messtechnik**  
Dr. Fabian Friederich  
Telefon +49 631 2057 40-08  
fabian.friederich@ipm.fraunhofer.de



**Optische Terahertz-Messtechnik**  
Dr. Frank Ellrich  
Telefon +49 631 2057 40-04  
frank.ellrich@ipm.fraunhofer.de



**Terahertz-Opto-Elektronik**  
Dr. Christoph Kaiser  
Telefon +49 631 2057 40-06  
christoph.kaiser@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**  
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein  
Telefon +49 761 8857-134  
juergen.woellenstein@ipm.fraunhofer.de



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



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



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



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

**Funktionelle Materialien und Systeme**



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



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



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



**Nichtlineare Optik**  
Dr. Frank Kühnemann  
Telefon +49 761 8857-457  
frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de



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

# Produktionskontrolle

## »Wir entwickeln optische Messsysteme für die Produktion«

### THEMEN

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

### KOMPETENZEN

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

### KONTAKT

#### Dr. Daniel Carl, Abteilungsleiter

Telefon +49 761 8857-549, daniel.carl@ipm.fraunhofer.de

#### Dr. Alexander Bertz

Inline-Messtechnik

Telefon: +49 761 8857-362, alexander.bertz@ipm.fraunhofer.de

#### PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg

Optische Oberflächenanalytik

Telefon +49 761 8857-306, albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de

Messung von Mikrodeformationen mittels elektronischer Specklemuster-Interferometrie.

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 Sinn der Industrie 4.0 möglich. Eingesetzt wird eine große Bandbreite an Verfahren, darunter digitale Holographie, Infrarot-, Reflexions-Spektroskopie 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 2D- und 3D-Messsysteme, die ausgewertete Daten in Echtzeit und unter harten Produktionsbedingungen bereitstellen, zum Beispiel 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-Reflexions-Spektroskopie. Die langjährige Erfahrung bei der Systementwicklung umfasst optische Einheiten, Bilderfassung und Bildverarbeitung.

# INLIE - MESSTECHNIK

## Digitale Holographie für die 100-Prozent-Kontrolle

Fraunhofer IPM bringt die digitale Mehrwellenlängen-Holographie erstmals in die Produktionslinie. Um Bauteile im Takt der Produktion mikrometergenau zu vermessen, optimierten die Wissenschaftler das 3D-Messverfahren.

Die Anforderungen an die Präzision von Bauteilen und Maschinen steigen stetig. Hochtechnisierte Industrien wie die Luftfahrt- oder die Automobilindustrie arbeiten heutzutage mit Fertigungstoleranzen im Mikrometerbereich. Die gestiegenen Anforderungen an die Prozesse machen oftmals eine 100-Prozent-Kontrolle notwendig. Gleichzeitig steigt der Durchsatz moderner Produktionsanlagen permanent: Produktionstakte von mehreren Bauteilen pro Sekunde sind keine Seltenheit mehr, was die Einsatzmöglichkeiten etablierter Messverfahren stark begrenzt.

Fraunhofer IPM setzt hier mit großem Erfolg auf die digitale Mehrwellenlängen-Holographie als Messtechnik der Wahl. Sie ermöglicht eine schnelle und gleichzeitig hochpräzise 3D-Messung von technischen Bauteilen. Ein großer Vorteil ist die Skalierbarkeit des Verfahrens: Während beispielsweise für mikromechanische Bauteile feinste Strukturen aufgelöst werden müssen, können durch Anpassung am optischen Aufbau auch Messfelder von 30 × 30 mm<sup>2</sup> und darüber realisiert werden. Spiegelfeinde und raue Oberflächen können gleichermaßen vermessen werden; auch Materialverbünde wie metallische Strukturen auf Kunststoffsubstraten sind gut messbar, ebenso Verbundwerkstoffe wie kohlefaserverstärkte Kunststoffe.

### Flexibler Aufbau für individuelle Anwendungen

Die digitale Mehrwellenlängen-Holographie beruht darauf, dass der zu vermessende Prüfling mit Laserlicht bestrahlt wird. Der Prüfling streut das Licht teilweise zurück zum Sensor. Das rückgestreute Licht wird in der Regel mit einem Objektiv eingesammelt und auf eine Kamera gelenkt. Dort wird es

1 Topographie eines Ball Grid Arrays mit Lötkontakten (Höhe: 150 µm).

1

mit unbeeinflusstem Laserlicht derselben Quelle kohärent überlagert. Die dadurch entstehenden Interferenzbilder – die sogenannten digitalen Hologramme – tragen die Information über die Form des Objekts in sich. Mithilfe numerischer Berechnungen lässt sich diese Information aus den Hologrammen extrahieren. Wiederholt man die Messung mit mehreren leicht unterschiedlichen Laserwellenlängen, wird anhand der kleinen Unterschiede der Messergebnisse der axiale Messbereich signifikant bis in den cm-Bereich gesteigert. Erst diese Auswertung ermöglicht die 3D-Messung an rauen Oberflächen, die ansonsten wegen des Speckleeffekts unmöglich ist. Durch die Wahl der Laserwellenlängen und des optischen Aufbaus lässt sich das Verfahren an verschiedene Einsatzbereiche individuell anpassen.

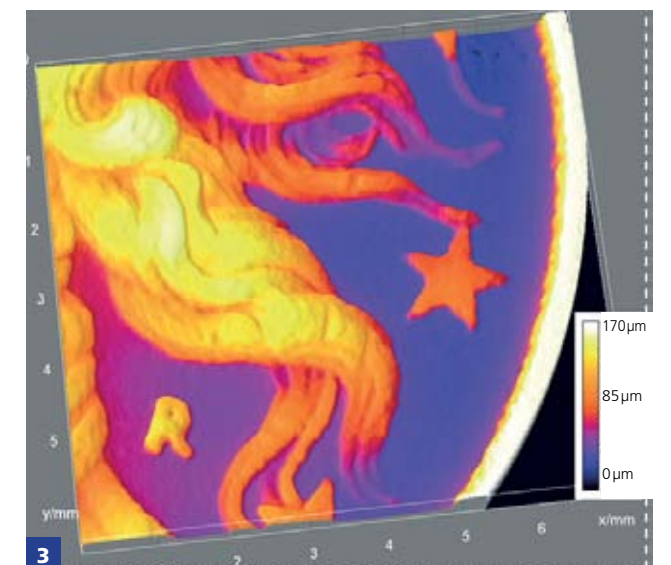
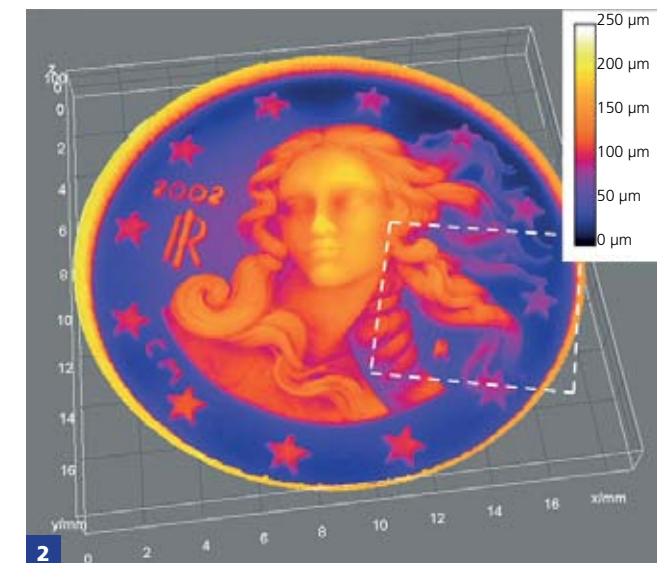
### Präzise Messung metallischer Objekte

Metallische Bauteile und Halbzeuge, wie sie etwa beim Tiefziehen – einem Verfahren zur Blechumformung – oder anderen Kaltumformungsprozessen entstehen, lassen sich mit digitaler Mehrwellenlängen-Holographie sehr gut vermessen. Dies zeigen beispielhaft Messungen an der Oberfläche einer italienischen 10-Cent-Münze. Das gestrichelt markierte Messfeld in Bild 2 hat eine Größe von rund 20 × 20 mm<sup>2</sup>. Es besteht aus insgesamt 9 Millionen Messpunkten. Die Zeit für die Datenaufnahme beträgt 150 ms. Und die anschließende Rechnung, die aus den Rohdaten echte 3D-Daten erzeugt, dauert weniger als 200 ms. Erreicht wird die schnelle Datenauswertung durch hochgradig parallele Datenverarbeitung auf modernen Grafikkarten. Ein Ausschnitt aus dem gesamten Messdatensatz ist in Bild 3 zu sehen. Auch die feinen Details der Messoberfläche werden aufgelöst. Die erreichbare laterale Auflösung ist dabei durch die Abbildungsqualität des verwendeten Objektivs gegeben und liegt bei den meisten Anwendungen im Bereich weniger Mikrometer. Die digitale Mehrwellenlängen-Holographie ist ein 3D-Messverfahren mit viel Potenzial. Ob beim Tiefziehen, Prägen, Spritzgießen, der spanenden Bearbeitung oder in der Elektronikfertigung: Sie eignet sich überall dort, wo bei hohen Messraten hochgenaue Messergebnisse gefordert sind und setzt einen neuen Standard für die 3D-Messung in der Produktionslinie.

2 + 3 Beispielmessung der Oberfläche einer italienischen 10-Cent-Münze. Das in Bild 2 gezeigte Messfeld ist rund 400 mm<sup>2</sup> groß. Bild 3 zeigt die markierte Detailsicht aus Bild 2.



DENNIS GÁBOR (1900–1979) gilt als Erfinder der Holographie. Der ungarische Ingenieur hatte als Erster im Jahr 1947 zeigen können, wie sich die Information über die Phasen des Zwischenbilds durch Überlagerung der Objekt- und der Referenzwelle auf direktem Weg gewinnen und fotografisch festhalten lässt. Dafür erhielt Gábor im Jahr 1971 den Nobelpreis für Physik.





1 Fraunhofer IPM entwickelt spezielle Mikroskopie-Systeme, die zur Inline-Kontrolle in Produktionsprozessen eingesetzt werden.

1

## OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

# Inline-Mikroskopie für anspruchsvolle Messaufgaben

**Einwegartikel werden in der Regel kostengünstig und schnell produziert. Doch auch kurzlebige Produkte müssen oft hohen Qualitätsansprüchen genügen – etwa in der Medizin. Fraunhofer IPM entwickelt dafür Spezial-Mikroskopie-Systeme, die kritische Produktionsprozesse vollautomatisch überwachen.**

Für eine 100-Prozent-Qualitätskontrolle in der medizintechnischen Produktion sind Standard-Messtechniken oftmals unzureichend. Zu komplex sind die Messaufgaben und die Prozesse, in die die Messungen integriert werden müssen. Dabei ist eine lückenlos dokumentierte Qualitätskontrolle gerade bei medizinischen Produkten unabdingbar, denn hier können Fehler unmittelbar Folgen für die Gesundheit von Menschen haben. Medizinische Einwegartikel werden in hohen Stückzahlen hergestellt, doch zur Qualitätssicherung in diesem sensiblen Bereich ist auch hier die 100-Prozent-Bauteilkontrolle unerlässlich. Dies ist nur mit Inline-Inspektionsystemen zu erreichen, die bis in den Mikrometer-Bereich messen, und das auch bei hohem Durchsatz.

### Strukturdefekte im Mikrometerbereich zuverlässig detektieren

Fraunhofer IPM entwickelt speziell für die Massenproduktion Mikroskopie-Systeme, die in der Lage sind, auch solch anspruchsvolle Produktionsprozesse zuverlässig und vollautomatisch zu überwachen. Die individuell angepassten Spezial-Mikroskope erkennen Strukturdefekte mikromechanischer Bauteile sowie Verunreinigungen auf diesen Bauteilen in einer

Größenordnung von wenigen Mikrometern. Herausforderungen für die Entwickler sind dabei neben der Größe auch die nicht planen Geometrien der Bauteile: Häufig handelt es sich um sehr kleine, dafür aber geometrisch anspruchsvolle mikromechanische Objekte, deren Oberflächen gekrümmt sind oder verdeckte Kanten und Strukturen aufweisen. Auch Verbundsysteme aus verschiedenen Materialien stellen in diesem Bereich hohe Anforderungen an eine präzise Messtechnik. Je nach Szenario passt Fraunhofer IPM Mikroskope an diese komplexen Geometrien und Eigenschaften an.

### Individuell angepasste Systeme

Wo immer möglich greifen die Wissenschaftler dabei zunächst auf kommerziell erhältliche Mikroskope zurück, die sie dann zu Spezialsystemen erweitern. Dafür werden Beleuchtung, mechanische und elektrische Schnittstellen und nicht zuletzt die Software zur Dateninterpretation auf die besonderen Anforderungen hin optimiert. So lässt sich eine lückenlose Dokumentation und damit Rückverfolgbarkeit der Bauteile erreichen, was besonders im sensiblen medizinischen Bereich unter Sicherheitsaspekten von großer Bedeutung ist. Für den Aufbau und ausführliche Tests steht am Institut ein



2 Mikrofluidik-LabDisk: HSG-IMIT, Institut für Mikro- und Informationstechnik Freiburg.

2

Reinraum der Klassen 100 und 1000 zur Verfügung. So können die Systeme unter den Bedingungen der medizintechnischen Produktion entwickelt und getestet werden. Damit wird gewährleistet, dass sie auch unter sehr rauen, anspruchsvollen Umgebungsbedingungen funktionieren. Die Systeme messen schnell und präzise und können schließlich zur Inline-Kontrolle direkt in Produktionsprozessen eingesetzt werden. Fraunhofer IPM-Mikroskope sind also immer dort gefragt, wo messtechnische Standardlösungen nicht ausreichen, etwa für die schnelle Inspektion großer planer Flächen auf mikrometergroße Defekte oder Verunreinigungen sowie für die Prüfung von Bauteilen mit speziellen Geometrien, bei denen eine mikrometergenaue Passung im Sekundentakt sichergestellt werden muss. Fehlerhafte Bauteile können so rechtzeitig ausgeschleust und die Produktion – insbesondere von Einwegartikeln – deutlich effizienter und vor allem sicher realisiert werden.



**MEDIZINISCHE EINWEGARTIKEL, z. B. für die moderne Laboranalytik, haben oft winzige Strukturen in der Größenordnung weniger Mikrometer. Schon kleinste Fehler führen auf dieser Größenskala zu unbrauchbaren Analyseergebnissen. Hersteller solcher in Masse gefertigten Kunststoffteile müssen daher die exakte Maßhaltigkeit nachweisen können.**

# Materialcharakterisierung und -prüfung »Wir charakterisieren berührungslos und zerstörungsfrei«

## THEMEN

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

## KOMPETENZEN

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

## KONTAKT

**Prof. Dr. Georg von Freymann, Abteilungsleiter**

Telefon +49 631 2057 40-01, georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de

**Dr. Fabian Friederich**

Elektronische Terahertz-Messtechnik

Telefon +49 631 2057 40-08, fabian.friederich@ipm.fraunhofer.de

**Dr. Frank Ellrich**

Optische Terahertz-Messtechnik

Telefon +49 631 2057 40-04, frank.ellrich@ipm.fraunhofer.de

**Dr. Christoph Kaiser**

Terahertz-Opto-Elektronik

Telefon +49 631 2057 40-06, christoph.kaiser@ipm.fraunhofer.de

Terahertz-Wellen machen  
verborgene Strukturen und  
Materialdefekte sichtbar.

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 Alternative zu Ultraschallmessungen, wenn kein mechanischer Kontakt möglich ist oder gewünscht wird, aber auch zu Röntgenmessungen, wenn ionisierende Strahlen ein Problem darstellen. Mit den 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 Verbundwerkstoffen (Glasfasern etc.) zerstörungsfrei aufspüren. Besonders Interesse gilt der Schichtdickenmessung, zum Beispiel in Lackierprozessen oder bei der Herstellung von Tabletten.

### Elektronische Terahertz-Messtechnik

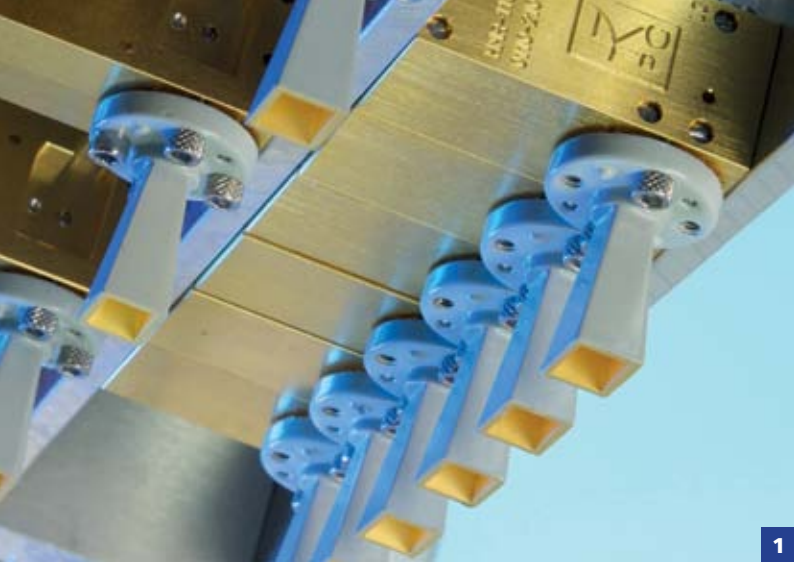
Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung anwendungsspezifischer Terahertz-Systeme für die zerstörungsfreie Materialprüfung. Dabei steht der untere Terahertz-Spektralbereich im Fokus. Viele elektrisch nichtleitende Materialien wie Kunststoffe, Keramiken oder Textilien sind in diesem Spektralbereich häufig transparent.

### Optische Terahertz-Messtechnik

Die Gruppe entwirft und baut schlüsselfertige Terahertz-Zeitbereichs-Systeme zur Erzeugung und Detektion breitbandiger Terahertz-Strahlung. Das Team befasst sich mit der Herstellung von Terahertz-Antennen als Sende- und Empfangseinheit und forscht im Bereich der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung. Dazu zählen Anwendungen im Sicherheitsbereich sowie die nahezu substratunabhängige Dickenanalyse von Mehrschichtsystemen.

### Terahertz-Opto-Elektronik

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



1

1 + 2 Ein MIMO-Terahertz-System kann mithilfe von jeweils nur zwölf Terahertz-Sendern und -Empfängern bis zu 144 Bildpunkte simultan aufzeichnen. Das erspart nicht nur teure Komponenten, sondern verkürzt gleichzeitig auch deutlich die Messzeit.

## ELEKTRONISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

# Schnelle Volumeninspektion mit Terahertz-Wellen

**Niederfrequente Terahertz-Wellen eignen sich hervorragend zur zerstörungsfreien Materialprüfung. Denn elektrisch nichtleitende Materialien wie Kunststoffe, Keramiken, Textilien oder auch komplexe Verbundwerkstoffe sind in diesem Spektralbereich häufig transparent. Bei der Entwicklung industriereifer Systeme zur Volumeninspektion setzt Fraunhofer IPM nun auf neue Messkonzepte aus der Kommunikations- und Radartechnik.**

In der zerstörungsfreien Prüfung hat die berührungslose Terahertz-Messtechnik schon an vielen Stellen für große Aufmerksamkeit gesorgt. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe: Zum einen die gute Transparenz vieler elektrisch nichtleitender Materialien gegenüber Terahertz-Wellen und zum anderen die Tatsache, dass Terahertz-Wellen im Gegensatz zur Röntgenstrahlung nicht ionisierend sind. Doch für die Attraktivität einer Messmethode aus Sicht der Industrie sind andere Dinge ebenso relevant: Passt die Messgeschwindigkeit des Inspektionssystems zum Prozess? Lässt sich das System flexibel an unterschiedliche Aufgaben anpassen? Mit anderen Worten: Die Herausforderungen bei der Entwicklung einer markttauglichen Terahertz-Volumeninspektion liegen nicht allein darin, innere Materialstrukturen in Form von Tiefenschnittbildern aussagekräftig darzustellen. Genauso wichtig sind eine schnelle Signalverarbeitung und ein Gesamtsystemdesign, das sich zum Einsatz in der Produktionsumgebung eignet. Um das zu erreichen, nutzt Fraunhofer IPM nicht nur sein exzellentes Know-how in der Terahertz-Messtechnik, sondern profitiert auch von alter-

nativen Messkonzepten, die aus der Kommunikations- und Radartechnik stammen.

## Neue Konzepte für die bildgebende Terahertz-Materialprüfung

In der Nachrichtentechnik bezeichnet man die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen mit dem Akronym »MIMO« (Multiple Input Multiple Output, siehe Kasten). Diese Form der Signalverarbeitung hat sich in der Kommunikationstechnik bereits sehr bewährt. Fraunhofer IPM hat dieses Konzept nun erfolgreich in die bildgebende Terahertz-Messtechnik übertragen. Das neu entwickelte MIMO-Terahertz-System verfügt über ein speziell ausgedünntes Array mit mehreren Terahertz-Sendern und -Empfängern in Verbindung mit einer sehr schnellen computergestützten Bildrekonstruktion. Dieser neue Ansatz der bildgebenden Terahertz-Messtechnik ist für die Industrie hochinteressant, da auf diese Weise eine schnelle Volumeninspektion großflächiger Objekte mit hoher Tiefenauflösung direkt im Prozess durchgeführt werden kann. Die hier verwendete Bildgebungstechnik auf

2

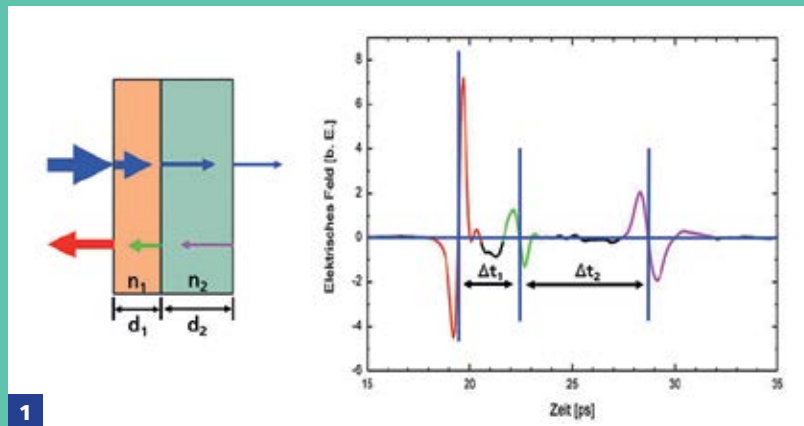


»MIMO« (MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT) bezeichnet ein Signalauswerteverfahren, das auf mehreren Sende- und Empfangsantennen basiert. Das Konzept stammt ursprünglich aus der Nachrichtentechnik. MIMO erlaubt die Anwendung von speziellen Modulationsverfahren, die neben der zeitlichen auch die räumliche Information ausnutzen.

Basis des MIMO-Verfahrens beruht auf einem multistatischen Radar mit synthetischer Apertur (SAR). Die Methode benötigt eine rechenintensive Bildrekonstruktion. Das Messprinzip besteht darin, durch gezieltes Schalten einzelner Sende- und Empfangseinheiten eine synthetische Sensoranordnung zu generieren. Dadurch kann die benötigte Anzahl der teuren Sensorelemente erheblich reduziert und die physikalische Sensoranordnung flexibel für die Anwendung angepasst werden. Im Idealfall entspricht die Gesamtzahl der Messpunkte der Anzahl der Sender mal der Anzahl der Empfänger.

## Weniger Komponenten – mehr Leistung

In einer ersten Umsetzung der Idee wurden jeweils zwölf Terahertz-Sender und -Empfänger auf einer Länge von 60 cm angeordnet (Bild 1 und 2). Moduliert man nun zur Bestimmung der Signallaufzeit die Betriebsfrequenz zwischen 75 GHz und 110 GHz, so lässt sich daraus das Volumen großflächiger Messobjekte mit einer Auflösung von 144 einzelnen Messpunkten pro Zeile inspizieren. Aus den Laufzeiten der von der Sensorik ausgesendeten und vom Messobjekt zurückreflektierten Terahertz-Signale erhält man dann die gewünschten Tiefeninformationen und kann Merkmale innerhalb des Messobjekts dreidimensional lokalisieren. Bisherige Systeme, die das Messobjekt Pixel für Pixel mittels einer einzelnen Sensoreinheit abrastern, haben sich für Voruntersuchungen und Stichprobenmessungen bereits bestens bewährt. Die zeilenförmige Sensoranordnung des neu entwickelten MIMO-Terahertz-Systems erlaubt in Verbindung mit einem Fließband jetzt auch eine schnelle Inspektion des Messobjekts in der Prozesskontrolle. Die spezielle Messtechnik reduziert sowohl den Einsatz teurer Sensorelemente als auch die Komplexität des gesamten Systems auf das Nötigste.



1 Links: Beaufschlagt man z. B. ein Zweischichtsystem mit Terahertz-Wellen (blauer Pfeil), so werden die Wellen an den Grenzflächen aufgrund des Brechungsindexunterschieds ( $n_1 \neq n_2$ ) teilreflektiert. Rechts: Aus den Laufzeitunterschieden der reflektierten Wellen  $\Delta t_1$  und  $\Delta t_2$  lassen sich dann die Schichtdicken  $d_1$  und  $d_2$  bestimmen.

2 Fraunhofer IPM stellt selbstentwickelte Terahertz-Sende- und Empfangseinheiten her und setzt diese in der zerstörungsfreien Mehrschichtanalyse ein.

## OPTISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

# Zerstörungsfreie Mehrschichtanalyse im Sekundentakt

Die Dicke von Schichten auf nicht-metallischen Substraten wird in der Regel zerstörend gemessen. Terahertz-Wellen, die im Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen liegen, sind oft die bessere Alternative: Sie werden an Grenzflächen reflektiert, an denen sich der Brechungsindex ändert. Aus den Laufzeitunterschieden der reflektierten Teilwellen lässt sich dann die Schichtdicke bestimmen – auch und vor allem bei komplizierten Mehrschichtsystemen.

Warum ist das Wissen um Schichtdicken für die Industrie so wichtig? Ein Beispiel: Flugzeuge werden heutzutage nacheinander mit mehreren Schichten Lack überzogen: zuerst mit Primer, der direkt auf das Bauteil aufgetragen wird, dann mit Basislack und zum Schluss mit Klarlack. Am Ende der Prozedur trägt ein großes Verkehrsflugzeug bis zu einer halben Tonne Farbe. Auch diese Schichten fliegen mit und erhöhen den Treibstoffverbrauch. Bislang werden Flugzeugteile deshalb vor und nach dem Lackieren gewogen. Wurde versehentlich zu viel Lack aufgetragen, kostet das nicht nur wertvolle Produktionszeit, sondern vor allem auch Geld.

### Mehrschichtanalyse ist entscheidend

Die Lösung ist hier eine zerstörungsfreie und berührungslose Terahertz-Mehrschichtanalyse. Mit ihr lässt sich die Schichtdicke auf nahezu jedem Werkstoff überwachen – und zwar schon während des Lackierens. Dabei wird die Dicke jeder einzelnen Lackschicht so exakt erfasst, dass sich anhand dieser Parameter die Lackieranlage steuern lässt. Bisher genügte es meist, die Gesamtdicke einer Beschichtung zu erfassen.

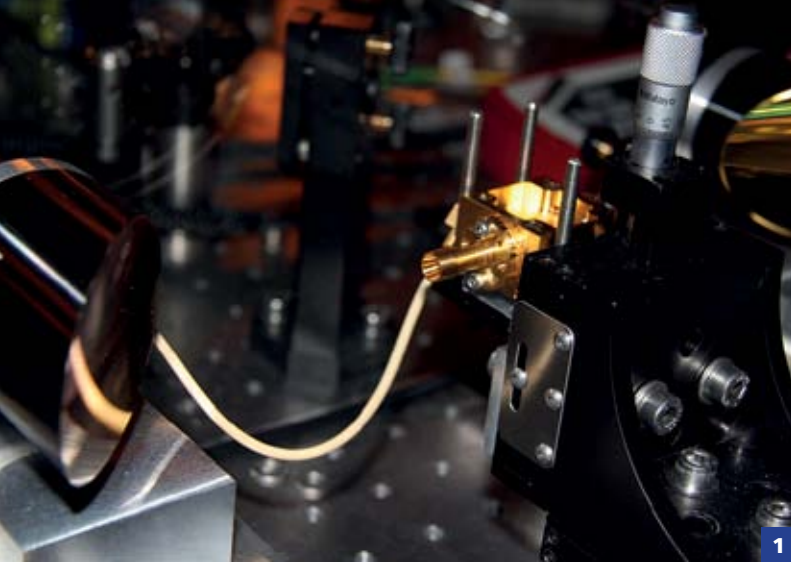
Doch immer häufiger wird die Dickenkontrolle der Einzelschichten innerhalb eines Mehrschichtsystems gefordert. Aufwändige Mehrschichtlackierungen werden vor allem im Flugzeug- und im Automobilbau eingesetzt. Darüber hinaus werden inzwischen viele weitere Produkte durch Beschichtungen veredelt. Hierzu zählen so unterschiedliche Dinge wie Rotor- und Turbinenblätter, Schiffsrümpfe oder auch Tabletten. Im Hinblick auf Ressourcenschonung und Qualitätskontrolle ist die Industrie in all diesen Fällen sehr stark an einer Messtechnik interessiert, die Einzelschichtdicken in Mehrschichtsystemen erfassen kann. Besonders die Analyse von Mehrschichtsystemen auf Kunststoffsubstraten wird immer wichtiger, da diese Materialien verstärkt eingesetzt werden, um Gewicht und Kosten zu reduzieren. Aktuell kann als einziges Messverfahren nur die Terahertz-Messtechnik im industrierelevanten Dickenbereich von 10–500 µm Einzelschichten in Mehrschichtsystemen zerstörungsfrei und berührungslos nachweisen. Dies hat Fraunhofer IPM in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Partnern unter anderem aus dem Automotive-Bereich bereits gezeigt.

### Terahertz-Mehrschichtanalyse

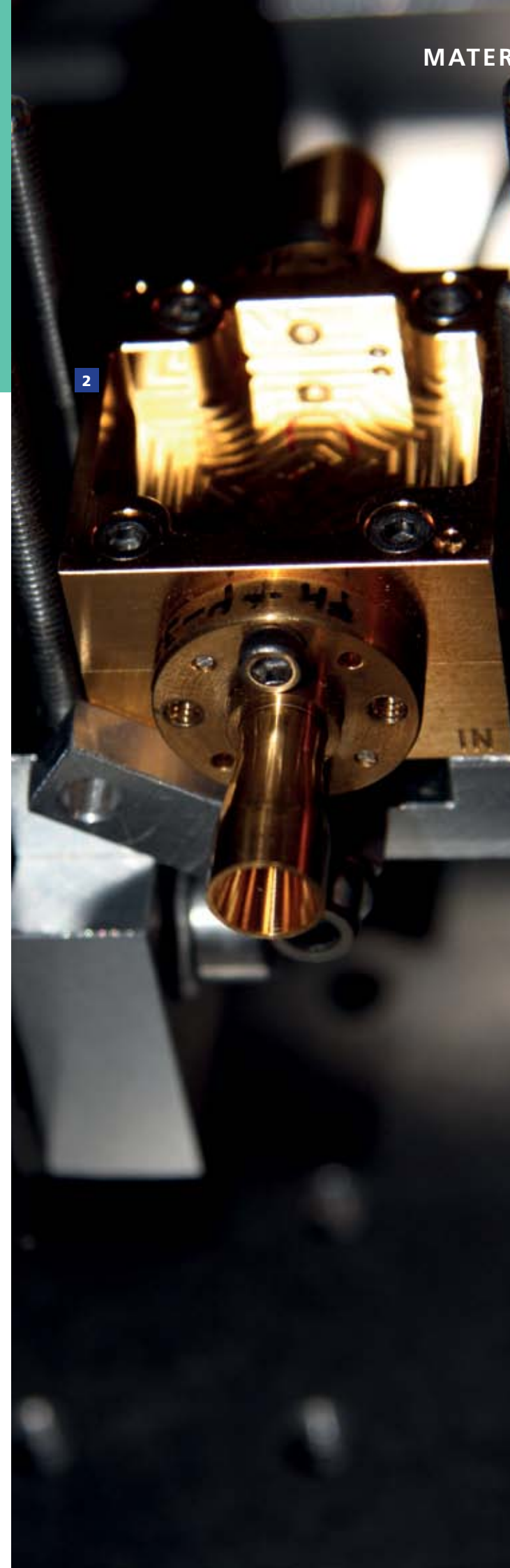
Bei der Schichtdickenmessung mit der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie nutzt Fraunhofer IPM die Tatsache aus, dass der einfallende Terahertz-Strahl bei Materialübergängen teilweise reflektiert wird (Bild 1). Im einfachsten Fall erhält man zwei Reflexe: einen ersten vom Übergang Luft-Beschichtung und einen zweiten vom Übergang Beschichtung-Substrat. Aus der Zeitdifferenz zwischen den beiden Reflexen und mit Kenntnis des Brechungsindex kann daraus dann die Schichtdicke bestimmt werden. Besteht die Beschichtung aus mehreren Schichten, so erscheinen zwischen den beiden oben genannten Reflexen weitere Reflexe, die auch die Analyse komplizierter Mehrschichtsysteme erlauben. In der Praxis bekommt der Anwender von der Auswertung nur wenig mit. Eine benutzerfreundliche Software übernimmt die komplette Auswertung. Kalibriert wird das System an definierten Referenzproben. Das Messergebnis liegt bereits innerhalb einer Sekunde vor, wobei die Auswertung der Messung parallel zur darauffolgenden Messung erfolgt. So steht sowohl für die Messung, als auch für die Auswertung jeweils eine Sekunde zur Verfügung. Dabei beträgt die erreichbare Messgenauigkeit in Abhängigkeit vom jeweiligen Schichtsystem etwa  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Das ist für viele Anwendungen bereits optimal.



SELBST KOMPLIZIERTE SCHICHTSYSTEME lassen sich mithilfe der Terahertz-Messtechnik sicher analysieren. Als Träger-substrat sind Metalle, Kunststoffe aber auch Kohlenfaserverbundwerkstoffe bestens geeignet.



1 + 2 Beim Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« lassen sich die Terahertz-Pulse hohlleitergebunden auf das zu untersuchende Bauteil übertragen.



3 Vergleichsmessungen des Streuparameters  $S_{21}$  an einem Leistungsverstärker (MPA) im Bereich von 220 GHz bis 330 GHz. Die rote Kurve wurde mit einem kommerziellen Vektornetzwerkanalysator (VNA) gemessen, die blaue Kurve mit dem »Tera-VNA«, der auf dem Prinzip der Zeitbereichsspektroskopie (TDS) basiert.

## TERAHERTZ-OPTO-ELEKTRONIK

# Vielseitig und exakt: der Netzwerkanalysator »Tera-VNA«

Die Hochfrequenzelektronik entwickelt sich ständig weiter – vor allem die Fortschritte in der Kommunikationstechnik sind rasant. Fraunhofer IPM sorgt dafür, dass die dafür notwendige Messtechnik das hohe Entwicklungstempo mitgehen kann. Der neu entwickelte Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« arbeitet in einem viel größeren Frequenzbereich als herkömmliche Netzwerkanalysatoren – und das sehr exakt.

Zur optimalen Dimensionierung und Berechnung elektronischer Systeme benötigen Elektroniker verlässliche und möglichst exakte Angaben zu den sogenannten Streuparametern (S-Parametern). Diese beschreiben das Verhalten linearer elektrischer Bauteile, Komponenten und Netzwerke mittels Wellengrößen. Marktübliche Netzwerkanalysatoren messen diese Werte im Frequenzbereich. In den letzten Jahren konnte die Bandbreite solcher Geräte auf bis zu 1,1 Terahertz (THz) angehoben werden. Doch das reicht bei weitem nicht aus: Elektronische Bauteile arbeiten heute inzwischen in so hohen Frequenzbereichen, dass die herkömmliche Messtechnik an ihre Grenzen stößt. Mit dem Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« verdoppelt Fraunhofer IPM nun den erreichbaren Frequenzbereich. Der Trick dabei: »Tera-VNA« misst die gewünschten S-Parameter nicht im Frequenzbereich, sondern im Zeitbereich.

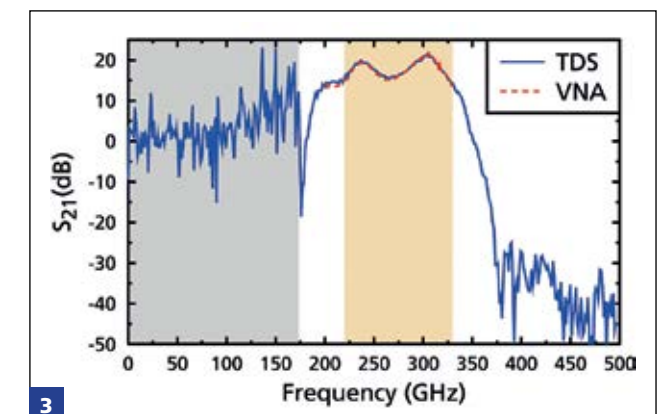
### Messen im Zeitbereich

»Tera-VNA« basiert – wie der Name schon andeutet – auf der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie. Für diese Anwendung wurde das System so weiterentwickelt, dass sich die Terahertz-

Pulse hohlleitergebunden auf das zu untersuchende Bauteil übertragen lassen. Nachdem die Pulse das Bauteil durchlaufen haben, können diese dann im Zeitbereich optisch detektiert werden. Nach der Übertragung der so gewonnenen Daten in den Frequenzbereich lassen sich daraus dann die gewünschten vektoriellen S-Parameter des zu untersuchenden Bauteils bestimmen. Dies konnte für Frequenzen von 100 GHz bis 2 THz gezeigt werden. Die neue Technologie bietet eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber der klassischen Netzwerkanalyse im Frequenzbereich.

### Vorteile der Methode

Im Vergleich zu heute üblichen elektronischen Netzwerkanalysatoren erlaubt die Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie die Arbeit mit sehr hohen Bandbreiten bei relativ günstigen Systempreisen. Ein weiterer Pluspunkt des »Tera-VNA« ist, dass für den Wechsel zwischen verschiedenen Frequenzbändern nur jeweils die Hohlleiterkomponenten bzw. Tastköpfe getauscht werden müssen. Bei elektronischen Netzwerkanalysatoren müssen stattdessen für unterschiedliche Frequenzbänder oft ganz unterschiedliche Messgeräte eingesetzt werden.



Der Terahertz-Netzwerkanalysator »Tera-VNA« kann bei viel höheren Frequenzen messen als es heute übliche Netzwerkanalysatoren können. Darüber hinaus lassen sich sogar die Laufzeiten der Pulse durch ein Netzwerk direkt bestimmen. Nicht sichtbare Fehler oder Stoßstellen im Netzwerk können so direkt detektiert und deren Positionen direkt identifiziert werden. Das eröffnet neue Möglichkeiten in der Entwicklung neuer Hochfrequenzelektronik.



VEKTORIELLE NETZWERKANALYSATOREN (VNA) benötigt man zur Entwicklung elektrischer Schaltungen oder als Prüfmittel in der Produktion. In der Hochfrequenzelektronik bestimmt man damit die Streuparameter von Komponenten oder Netzwerken, um deren Verhalten mittels Wellengrößen beschreiben zu können.

# Objekt- und Formerfassung

## »Wir scannen schnell, genau und augensicher«

### THEMEN

- ▶ Verkehr und Logistik
- ▶ 3D-Vermessung von Zügen und Bahnstrecken
- ▶ Untersuchung von Straßenoberflächen
- ▶ mobile Zustandsüberwachung aus der Luft
- ▶ Erfassung von Unterwassergroßstrukturen

### 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

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« erfassen wir die dreidimensionale Geometrie und Lage von Objekten in der Umgebung. 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 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 – zur Überwachung von Bahninfrastruktur ebenso wie zur Vermessung von Straßenoberflächen. Ein neuer Anwendungsbereich ist die mobile Datenerfassung aus der Luft und im Wasser.

### 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 Systeme sind weltweit auf ganz unterschiedlichen Anwendungsgebieten im Einsatz.



Laserscanner erfassen das Lichtraumprofil  
von Bahngleisen – schnell und genau.

## LASER SCANNING

# Exakte Schienenmessung per Laser

Laserscanner haben viele Vorteile gegenüber Kamerasystemen, wenn es um die Vermessung der Bahninfrastruktur geht. Mit dem Rail Track Scanner RTS steht nun erstmals ein Scanner zur Verfügung, der ein detailreiches Abbild von Schienen, Schienenkopf, Schwellen und Gleisbett liefert.



## MESSUNGEN PER LASERSCANNER

Fraunhofer IPM entwickelt neben dem Rail Track Scanner RTS weitere optische Systeme zur Messung von Fahrdrabtabnutzung, Fahrdrablage, Lichtraumprofil, Mastenposition sowie zur Erfassung der Geometrie fahrender Züge.

Damit die Reise mit der Bahn sicher bleibt, wird die Schieneninfrastruktur regelmäßig auf Schäden überprüft. Doch das ist keine leichte Aufgabe: Allein Deutschland hat ein Schienennetz von mehr als 40 000 Kilometern.

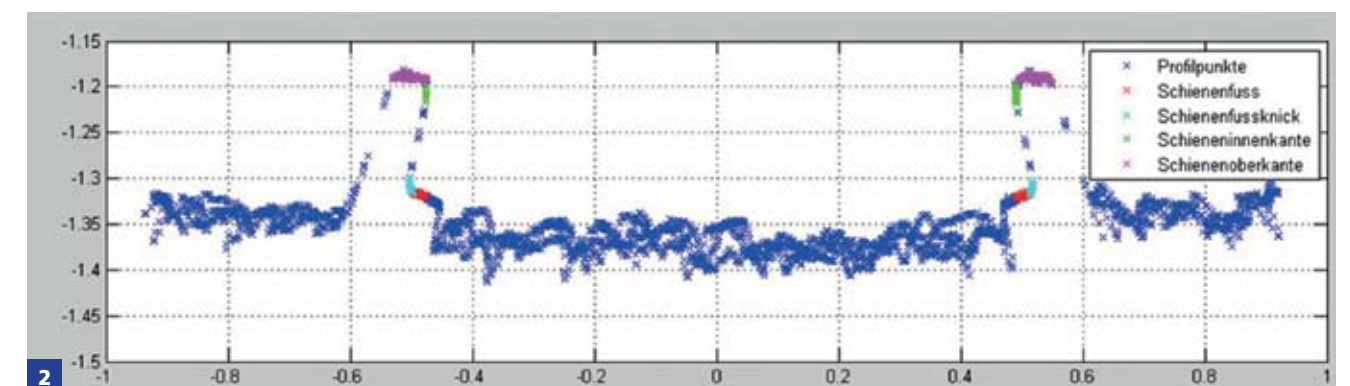
Weichen, Schwellen und Schienen werden zur Kontrolle heute in der Regel mit kamerabasierten Systemen erfasst. Dies birgt einige Nachteile: Die Systeme funktionieren nur bei ausreichendem Umgebungslicht oder künstlicher Beleuchtung. So messen die Systeme vorzugsweise bei Tag, also dann, wenn das Schienennetz ohnehin stark ausgelastet ist und Messzüge die Taktung zusätzlich erschweren. Der neue Rail Track Scanner arbeitet unabhängig vom Umgebungslicht. Er erfasst die Geometrie von Schienen, Schienenkopf, Schwellen und Schienenbett und erlaubt eine automatisierte Datenauswertung – und dies schnell, zuverlässig und mit der nötigen Präzision.

Der Laserscanner erkennt bereits kleinste Unregelmäßigkeiten, denn diese können gefährlich werden: Schienen stehen unter großer Spannung, sie könnten sprunghaft aufbrechen und einen regelrechten Dominoeffekt erzeugen – im schlimmsten Fall reißen Schienen und Bahnschwellen über weite Strecken.

## Messunsicherheiten von weniger als einem Millimeter

Ein spezieller optischer Aufbau erlaubt die Montage des schuhkartongroßen Scanners auf einem beliebigen Schienenfahrzeug in einem Abstand von nur 1,2 Metern über dem Gleisbett. Der Laser scannt die Gleise quer zur Vorwärtsbewegung des Messfahrzeugs über eine Breite von zirka 1,7 Metern. Mit bis zu 800 Profilen und zwei Millionen Messungen pro Sekunde entsteht ein detailreiches dreidimensionales Abbild der Schienen und der damit unmittelbar verknüpften Infrastruktur. Aus der so generierten Punktwolke werden mit geeigneten Algorithmen Parameter wie Abstand, Höhe und Neigung der Schiene oder die Geometrie des Schienenkopfes extrahiert und mit Soll-Profilen verglichen. Die Scanfrequenz kann flexibel an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden. Topografische Strukturen bzw. Strukturänderungen werden mit einer Messunsicherheit von kleiner als einem Millimeter zuverlässig erfasst. Ein weiterer großer Vorteil: Der RTS arbeitet mit einem augensicheren Infrarot-Laser und ist deshalb ohne Einschränkungen auch im öffentlichen Bereich einsetzbar.

Fraunhofer IPM präsentierte den Rail Track Scanner im September 2014 auf der Inntrans in Berlin als Weltneuheit. Der RTS wird nun erstmals zur messtechnischen Beurteilung von Schmalspurstrecken in der Schweiz eingesetzt.



1 Der Rail Track Scanner prüft das Schienennetz mit einer Messunsicherheit von weniger als einem Millimeter.

1

2 Ergebnis einer Messfahrt: Auf der horizontalen Achse ist der Abstand von der Gleisachse aufgetragen, in vertikaler Richtung das entsprechende Höhenprofil, das gleichzeitig auch die Form des Gleisbetts und der Schienen darstellt. Ausgezeichnet zu erkennen sind die zwei Schienen mit den entsprechenden Schienenköpfen, dazwischen die raue Oberfläche des Schotterbetts. Farblich codiert sind die verschiedenen Objekte dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das kleine Messrauschen und die hohe Anzahl von Messpunkten.

# Gas- und Prozesstechnologie

## »Wir messen präzise – auch unter extremen Bedingungen«

### THEMEN

- Gasmesstechnik
- Partikelmesstechnik
- thermische Messtechnik
- robuste Gesamtsysteme

### KOMPETENZEN

- Spektroskopie von EUV bis MIR, Laserspektroskopie
- Gassensorik
- thermische Sensorik
- Mikrosystemtechnik
- Simulation

### KONTAKT

**Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein, Abteilungsleiter**

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

**Dr. Marie-Luise Bauersfeld**

Integrierte Sensorsysteme

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

**Martin Jägle**

Thermische Messtechnik und Systeme

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

**Dr. Raimund Brunner**

Spektroskopie und Prozessanalytik

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

.....  
Ein kompaktes Infrarot-Spektrometer  
überwacht die optimale Verteilung von  
Löschgasen in Brandlöschsystemen.  
.....

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.

#### Integrierte Sensorsysteme

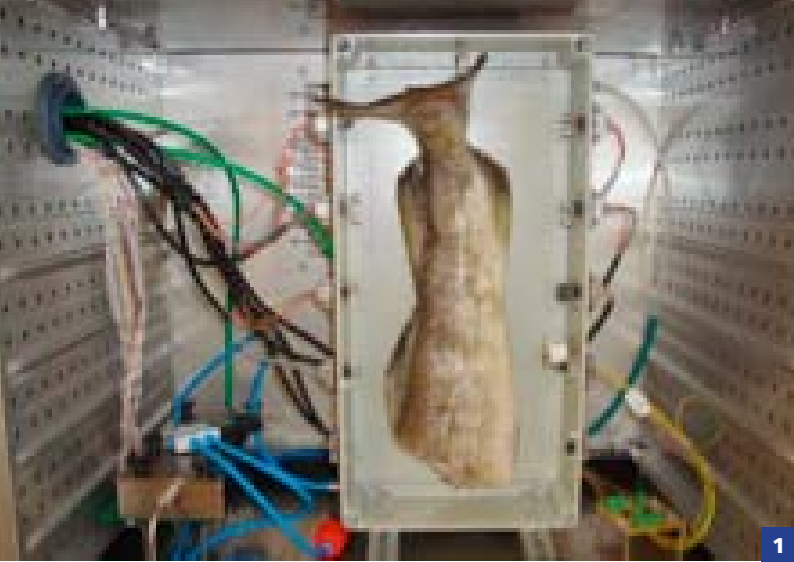
Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung, Konzeptionierung, Charakterisierung und Herstellung funktionaler Oberflächen, miniaturisierter Gassensoren und kompakter Gasmesssysteme. Dazu werden Gassensortechnologie und Elektronik in kompakten und kostengünstigen Mikrosystemen kombiniert.

#### Thermische Messtechnik und Systeme

Die Gruppe entwickelt kundenspezifische Substrate, thermische Sensoren und Systeme aus unterschiedlichen Materialien. Flexible Substrate ermöglichen die Messung kleinster Temperaturunterschiede mittels sogenannter Kalorimeterchips oder die Bestimmung unterschiedlichster Materialparameter wie der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit mittels aufpressbarer Messstrukturen.

#### 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-, Brenngas- und Partikelmesstechnik.



1 Das Sensorsystem misst die austretenden flüchtigen organischen Verbindungen, relative Feuchte, Temperatur, Gewichtsveränderung sowie die Farbe der Fischaußenhaut.

## INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

# Sicherheit in der Lebensmittelproduktion

**Die Nachfrage nach qualitativ hochwertigem Stockfisch steigt weltweit – besonders in Südeuropa. Um den größer werdenden Bedarf an dieser Spezialität abdecken zu können, wandelt sich die Stockfisch-Produktion derzeit vom Wikinger-Handwerk zur Hightech-Produktion. Halbleiter-Gassensoren von Fraunhofer IPM spielen dabei eine zentrale Rolle.**

Das Trocknen von frischem Fisch ist eine uralte Form des Konservierens. Schon die Wikinger nutzten den kalten Wind an den Küsten Nordnorwegens, um frischen Kabeljau auf Holzgestellen zu trocknen und so als Stockfisch haltbar zu machen. Doch diese Prozedur ist nicht sehr effizient: Der Fisch kann nur in dem kurzen Zeitraum von Februar bis Mai getrocknet werden. Bis zu 40 Prozent der Tiere verderben, häufig aufgrund von Insektenbefall: Wird es wärmer, steigt die Gefahr, dass Insekten Eier in den Fisch ablegen. Außerdem kann es während des Trocknens zu einem unerwünschten Bakterienwachstum auf dem Fisch kommen, was zu massiven Geruchsentwicklungen führt. Siedeln sich die »falschen« Bakterien an, wird der Fisch ungenießbar.

In dem von der EU geförderten Projekt »Safe Track Food« entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie einen neuen, wetterunabhängigen, industriellen Trocknungsprozess für Fisch, der nicht nur schneller und dadurch effizienter als bisherige Verfahren ist, sondern auch eine gleichbleibende Qualität und dadurch deutlich weniger Ausschuss ermöglichen soll. Um das

zu erreichen, wird der natürliche Stockfisch-Trockenprozess in die Fabrik übertragen. Dort wird der Fisch bei 4 °C bis 8 °C getrocknet. Fraunhofer IPM hat zur Qualitätsüberwachung der verschiedenen Stadien während des Trocknens ein Sensorsystem entwickelt, das aus zwei Einheiten besteht: Die Sensoreinheit misst direkt im Trocknungssofen die austretenden flüchtigen organischen Verbindungen, relative Feuchte, Temperatur, Gewichtsveränderung sowie die Farbe der Fischaußenhaut. Die Auswerte- und Kontrolleinheit steht außerhalb der Klimakammer und zeichnet die in der Kammer gewonnenen Daten auf. Diese werden anschließend an eine Online-Plattform übertragen.

### Halbleiter-Gassensoren überwachen die Trocknung

Der komplexe Aufbau, der aus Metalloxid-Gassensoren und vielen weiteren Sensoren besteht, ist in der Lage, das jeweilige Trocknungsstadium des Fisches genau zu bestimmen. Außerdem detektiert das System das Ausströmen flüchtiger Verbindungen – qualitativ und quantitativ –, die während des Reifungsprozesses entstehen. Diese ausströmenden Gase geben Aufschluss darüber, ob die Trocknung rei-



2

## GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

2 Schon die Wikinger nutzten den kalten Wind an den Küsten Nordnorwegens zum Trocknen und Konservieren von Kabeljau.

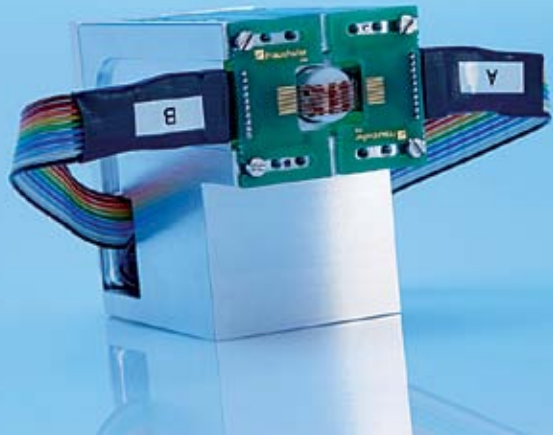


**DAS EU-PROJEKT »Safe Track Food – Development of a novel Industrial Fish Drying and Maturing Process to secure Seafood Safety, Traceability and Quality«** hat das Ziel, einen industriellen Trocknungsprozess für Fisch zu entwickeln, der eine gleichbleibende Qualität ermöglichen soll. [www.safetrackfood.eu](http://www.safetrackfood.eu)

bungslos verläuft und der Fisch während der Reifung nicht verdirbt. Aus bestimmten Gaszusammensetzungen lässt sich ableiten, dass der Fisch verzehrfertig ist. Eine besondere Herausforderung an das Sensorsystem ist die Detektion des während der Trocknung entstehenden Fischgeruchs. Das System muss selbst bei erheblicher Geruchsentwicklung und damit einhergehenden hohen Konzentrationen der jeweils austretenden Gase, wie etwa Ammoniak, noch präzise messen und keine Sättigungseffekte zeigen. Auch die Umgebungstemperatur, die hohe Luftfeuchte und die mechanische Beanspruchung stellen große Herausforderungen an das Sensorsystem dar.

### Experte für Lebensmittelkontrolle

Fraunhofer IPM griff bei der Entwicklung dieses neuartigen miniaturisierten Geruchs- und Gas-Messsystems für die industrielle Stockfischproduktion auf seine langjährige Erfahrung und Kompetenz in der Mikrosystemtechnik und Gassensor-Technologie zurück. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts entwickeln regelmäßig kleine, leichte und flexible Sensorsysteme für all jene Bereiche in der Lebensmittelindustrie, in denen eine lückenlose Überwachung zur Qualitätskontrolle notwendig ist.



1 Der Messkopfaufsatz lässt sich einfach austauschen, um unterschiedliche Parameter zu messen.

1

## THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

# Messen mit Druck: Stempel vereinfacht Materialmessung

**Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit gleichzeitig messen – ohne Probenvorbereitung. Dies ermöglicht ein neuartiges folienbasiertes Messkonzept, bei dem ein Messkopf durch einfaches Aufdrücken auf die Probe mit der Oberfläche des Materials kontaktiert wird.**

Seit mehreren Jahren arbeitet Fraunhofer IPM an der Entwicklung flexibler Sensoren. Die Flexibilität dieser Sensoren gilt im doppelten Sinn: Anpassungsfähig, was die Messaufgabe betrifft, und biegsam sollen Sensoren der neuen Generation sein. Verschiedene elektronische Sensoren auf flexiblen Kunststoff-Substraten wie Polyimid- oder PET-Folien wurden bereits entwickelt. Diese »Messpflaster« sind grundsätzlich in der Lage, eine große Bandbreite an physikalischen Größen simultan zu bestimmen – von einfachen Temperaturmessungen über die Messung elektrischer oder thermischer Leitfähigkeit und der Wärmekapazität bis hin zur Bestimmung von Parametern wie Seebeck-Koeffizient, Lorenz-Zahl oder der Porosität hinreichend glatter Oberflächen von Festkörpern. In Flüssigkeiten messen flexible »elektronische Zungen« pH-Wert, Dichte oder Viskosität durch einfaches Eintauchen.

### Messen durch Pressen

Neueste Entwicklung in der flexiblen Messtechnik ist ein Material-Messstempel. Die Messstrukturen sind in eine flexible Kunststofffolie aus Polyimid (Kapton) integriert. Dies gelingt mithilfe der Dünnschichttechnik. Eine Isolationsschicht, ebenfalls aus Polyimid, dient zur elektrischen Isolierung zwischen

Teilen der Messstruktur und Probe. Aufgebracht auf einen flexiblen Messkopfaufsatz misst der Sensor die elektrische und thermische Leitfähigkeit ohne Probenvorbereitung durch



2

2 Durch einfaches Aufpressen misst der Sensor die elektrische und thermische Leitfähigkeit eines Materials. Das Werkstück bleibt intakt.



**BIEGSAME SENSOREN** messen physikalische Parameter wie Temperatur, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Wärmekapazität, Seebeck-Koeffizient, Lorenz-Zahl oder auch Porosität.

einfaches Aufpressen auf die glatte Oberfläche eines Werkstücks. Das Werkstück muss dazu nicht extra bearbeitet werden, wie bei herkömmlichen Messmethoden, sondern bleibt vollkommen intakt. Durch Austausch des Folien-Messkopfaufsatzes lassen sich weitere Parameter wie Ladungsträgerart, Seebeck-Koeffizient oder die thermische und elektrische Kapazität eines Materials bestimmen. Der Messkopf kann je nach Anwendung individuell auf das zu untersuchende Material, einzelne Messparameter und die Beschaffenheit des Werkstücks zugeschnitten werden.

### »Thermisches Ultraschallbild«

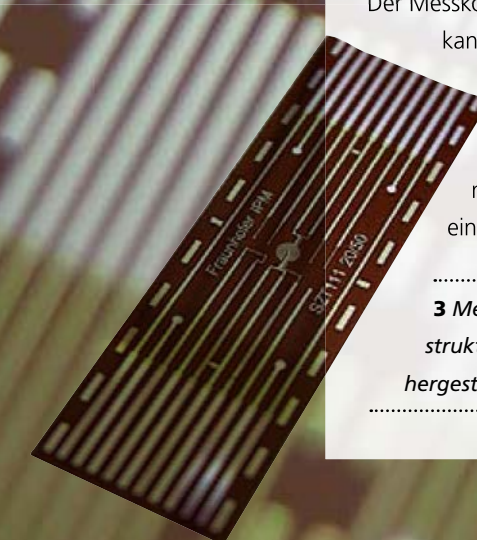
Eine sehr schwierig zu bestimmende Größe wie die thermische Leitfähigkeit kann so im laufenden Prozess an Werkstücken überprüft werden. Dabei setzen die Wissenschaftler auf die sogenannte 3-Omega-Methode: Eine in der Messfolie enthaltene Heizerstruktur wird mit einem Wechselstrom der Frequenz Omega beaufschlagt. Aufgepresst auf einen Körper werden so Wärmewellen mit der doppelten Frequenz in das Material geleitet. Die Eindringtiefe dieser Wellen unterscheidet sich je nach Frequenz, Material und Materialdicke. Die hierbei verursachte Temperaturerhöhung hängt von den thermischen Materialeigenschaften und der Frequenz ab und kann über die Änderung des Widerstands der Heizerstruktur gemessen werden.

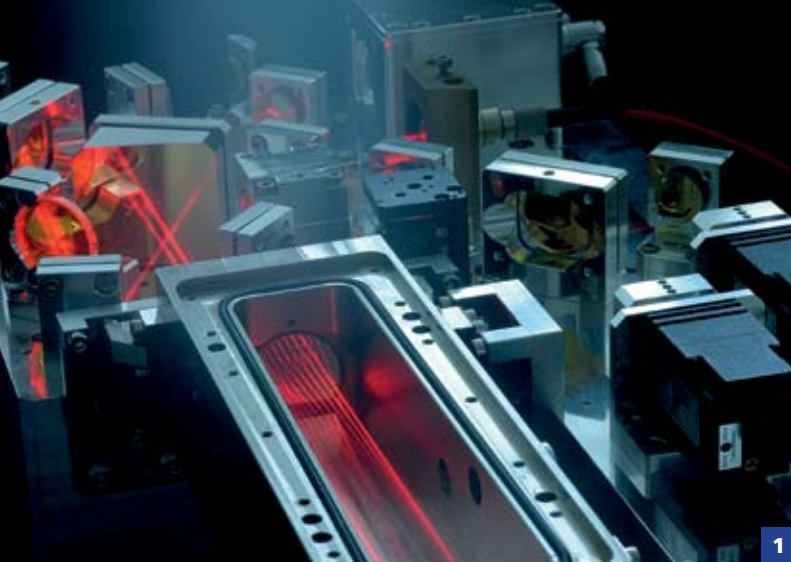
Besteht das untersuchte Werkstück aus mehreren Lagen verschiedener Materialien oder aus einem Verbundwerkstoff kann so quasi ein »thermisches Ultraschallbild« erzeugt werden, sofern sich die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Komponenten unterscheidet. Lufteinschlüsse sowie delaminierte Schichten können grundsätzlich ebenso detektiert werden. Die 3-Omega-Methode ist nicht auf die Messung fester Werkstoffe beschränkt, sondern eignet sich auch zur Messung von Gasen oder Flüssigkeiten.

Der Messkopf selbst hat in etwa die Größe eines Stifts und kann so sehr einfach an einen Roboterarm angeflanscht werden. Falls die Integration aller notwendigen Messstrukturen für eine Multi-Parametermessung in einem Kopf nicht möglich ist, können mehrere Messköpfe gleichzeitig an einem Werkstück eingesetzt werden. Auch hier ist Flexibilität gefragt.

3 Messchip aus Kunststoffolie mit Messstrukturen. Die Chips werden auf Waferbasis hergestellt und anschließend vereinzelt.

3





1 Optische Spektrometer mit Quantenkaskadenlasern können Lachgas sehr empfindlich nachweisen.

## SPÉKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

# Quantenkaskadenlaser für die schnelle Abgasanalytik

**Die europäischen Emissionsgesetze werden immer strenger, sowohl für die Industrie als auch für die Automobilbranche. Klimaschutz kann nur funktionieren, wenn die Luftverunreinigung durch Autoabgase stetig verringert wird. Zur Entwicklung abgasärmerer Motoren hat Fraunhofer IPM eine zuverlässige Abgasmesstechnik entwickelt. Mit ihr lässt sich insbesondere auch das sehr klimaschädliche Lachgas detektieren. Das System basiert auf der Infrarot-Absorptionsspektroskopie mit Quantenkaskadenlasern als Lichtquelle in Verbindung mit einer speziell ausgelegten Probenahme.**

Schärfere Abgasgesetze führten schon in den vergangenen Jahrzehnten dazu, dass eine ganze Reihe neuer Technologien zur Emissionsreduktion eingeführt wurden. Auch die Abgasnachbehandlung wurde zunehmend komplexer. Zwar konnten schon mit den ersten 3-Wege-Katalysatoren große Erfolge erzielt werden, doch nach wie vor beschäftigt der Ausstoß unerwünschter Gase Wissenschaftler und Automobilhersteller gleichermaßen – insbesondere in der Motorenentwicklung. Im Zuge dessen wird der Anspruch an die Messgenauigkeit immer höher: Forderungen nach Nachweisen im Bereich von 10 ppb sind keine Seltenheit mehr (ppb = 1 Teil pro Milliarde).

### Neue Technologie für extreme Messanforderungen

Aktuelle Treibhausgas-Regelungen beispielsweise erfordern Messungen von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) schon in sehr geringen Konzentrationen von unter 1 ppm (ppm = 1 Teil pro Million).

Das Gas, auch als Distickstoffmonoxid bekannt, entsteht hauptsächlich beim Abbau von mineralischem Stickstoffdünger im Boden, aber auch bei der Verbrennung von Treibstoff im Ottomotor. Konventionelle Technologien, die man bisher für Messungen von  $\text{N}_2\text{O}$  eingesetzt hat – wie die nichtdispersive Infrarottechnologie (NDIR) oder elektrochemische Gassensoren – sind entweder nicht empfindlich genug für heutige Messanforderungen, oder sie zeigen zu starke Querempfindlichkeiten.

Ein von Fraunhofer IPM gemeinsam mit einem Industriepartner entwickeltes optisches Spektrometer auf Basis von Quantenkaskadenlasern (QCL) ermöglicht nun erstmals eine Abgasmessung, die den gestiegenen Ansprüchen genügt. Das Gasanalysegerät ist in der Lage, Lachgas in sehr niedrigen Konzentrationen zuverlässig nachzuweisen, und zwar im Bereich von 10 ppb bis 100 ppm (4 Dekaden). Der dafür

eingesetzte QCL-Analysator ist hochselektiv gegenüber den restlichen Komponenten in der vorliegenden Gasmatrix, wie sie im Abgas von Verbrennungsmotoren typischerweise auftritt.

Quantenkaskadenlaser sind Halbleiterlaser für Wellenlängen im mittleren Infrarot (MIR). Anders als andere im MIR emittierende Laser besitzt der QCL eine vergleichsweise hohe Ausgangsleistung und arbeitet auch bei Raumtemperatur – aufwändiges Kühlen ist nicht erforderlich. Das Stabilisieren der Lasertemperatur und damit der Emissionswellenlänge erfolgt über ein gewöhnliches Peltierelement mit entsprechender Lüftung. Die Regelung ist für Laserarbeitspunkte zwischen  $-30^\circ\text{C}$  und  $+30^\circ\text{C}$  ausgelegt.

### Industrietaugliche Systeme für Automobilhersteller

Bei der Entwicklung des  $\text{N}_2\text{O}$ -Abgasmesssystems konnten die Wissenschaftler am Institut auf langjährige Erfahrungen in der Abgasmesstechnik zurückgreifen: Bereits mit dem QCL-basierten Abgasanalysator DEGAS (Dynamic Exhaust Gas Analyser System) für einen großen Automobilhersteller hatte Fraunhofer IPM im Jahr 2002 ein industrietaugliches Messsystem für den schnellen, empfindlichen und selektiven Nachweis von Kohlenmonoxid, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid entwickelt. Mit DEGAS lässt sich die Konzentration verschiedener Abgaskomponenten simultan mit einer Zeitauflösung von fünf Millisekunden messen und das gleichzeitig an bis zu vier Messstellen am Abgasstrang. Der jetzt neu entwickelte QCL-Analysator ist für Messschrankapplikationen ausgelegt und daher wesentlich kompakter in der Ausführung. Darüber hinaus soll er in der nächsten Ausbaustufe zwei Gaskomponenten simultan erfassen können. Der QCL-Analysator wird nicht nur in der Forschung und Entwicklung erfolgreich eingesetzt, sondern zunehmend auch für Zertifizierungsmessungen an schadstoffarmen Motoren.



FRAUNHOFER IPM nutzt in der Gas- und Prozesstechnologie eine Vielfalt an spektroskopischen Methoden. Neben der Laserspektroskopie gehören klassische Verfahren wie Fourier-Transform-IR-Spektroskopie (FTIR), Photometrie, Filter-, UV- und Raman-Spektroskopie sowie Photoakustik dazu.

2

2 Abgasärmere Motoren zu entwickeln gehört noch immer zu den großen Herausforderungen für Wissenschaft und Industrie.

# Funktionelle Materialien und Systeme

## »Bei uns macht das Material den Unterschied«

### THEMEN

- ▶ effiziente, kältemittelfreie Kühlung
- ▶ Abwärmeverstromung
- ▶ energieautarke Sensoren und Systeme
- ▶ weit abstimmbare Laserlichtquellen für die Spektroskopie
- ▶ Charakterisierung von optischen Materialien und Halbleitern
- ▶ thermische Analyse von Dünnschichtsystemen und Massivmaterialien
- ▶ Entwicklung von Messsystemen und Auftragsmessungen zur Bestimmung thermischer und elektrischer Materialeigenschaften

### KOMPETENZEN

- ▶ funktionelle Materialien:
  - magneto- und elektrokalisches
  - nichtlinear-optisch
  - thermoelektrisch
- ▶ FEM-Simulationen
- ▶ thermisches Management (Heat-Pipes, Peltier)
- ▶ spezielle elektrische und thermische Kontaktierung
- ▶ Frequenzkonversion zur Lichterzeugung und -detektion
- ▶ Messung geringster Absorptionen
- ▶ Systemdesign und -entwicklung

### KONTAKT

#### Dr. Heinrich Höfler, Abteilungsleiter

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

#### Dr. Kilian Bartholomé

Magnetokalorik und Elektrokalisches

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

#### Dr. Frank Kühnemann

Nichtlineare Optik

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

#### Dr. Jan D. König

Thermoelektrik

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

.....  
Hochreine optische Kristalle sind  
Voraussetzung für moderne  
photonische Technologien.  
.....

Im Geschäftsfeld »Funktionelle Materialien und Systeme« werden Materialien mit besonderen physikalischen Eigenschaften hergestellt und optimiert und daraus Systeme entwickelt. Dazu zählen:

- magneto- und elektrokalisches Materialien für effiziente und kältemittelfreie Wärmepumpen und Kühlsysteme.
- nichtlinear-optische Materialien, z.B. für die Entwicklung neuartiger Laser mit durchstimmbarer Wellenlänge
- thermoelektrische Materialien zur direkten Wandlung von Abwärme in elektrischen Strom z.B. im Pkw, bei Industrieprozessen oder zum Betrieb kleiner energieautarker Sensorsysteme.

### Magnetokalorik und Elektrokalisches

Die Gruppe »Magnetokalorik und Elektrokalisches« befasst sich mit der Entwicklung innovativer Kühlsysteme auf Basis neuartiger magneto- und elektrokalisches Materialien. Mit Hilfe dieser Systeme können im Vergleich zu herkömmlichen kompressorbasierten Kühltechniken effizientere und umweltfreundlichere Systeme komplett ohne schädliche Kältemittel realisiert werden.

### Nichtlineare Optik

Arbeitsschwerpunkt der Gruppe sind Materialien und Methoden der nichtlinearen Optik. Es werden hochempfindliche Spektroskopieverfahren entwickelt und eingesetzt, mit denen die Restabsorption hochtransparenter Materialien bestimmt werden kann – eine wichtige Eigenschaft von Komponenten für Hochleistungslaser und die nichtlineare Optik. Die langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der nichtlinear-optischen Frequenzkonversion werden für die Entwicklung weit abstimmbarer Laserlichtquellen und empfindlicher Infrarot-Detektionssysteme eingesetzt.

### Thermoelektrik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung neuer thermoelektrischer Materialien und Bauelemente für verschiedene Anwendungen – von Thermopile-Detektoren über Thermogeneratoren bis hin zu Hochleistungs-Peltierkühlern. Das Spektrum der Gruppe umfasst neben der Materialforschung die Entwicklung thermoelektrischer Module und Systeme, deren Simulation sowie die Entwicklung kundenspezifischer thermoelektrischer Messtechnik.



1 Kältemittelfreie Kühltechnik wäre gerade im Automobil oder Flugzeug von Vorteil. Hier sind leicht entzündliche oder gesundheitsschädliche Substanzen besonders unerwünscht.

## MAGNETOKALORIK UND ELEKTROKALORIK

# Cool: magnetische Kühlung ohne Kältemittel

Rund um den Globus werden immer mehr Klimaanlage installiert. Sie arbeiten meist mit klimaschädlichen Kältemitteln und benötigen zudem sehr viel Energie. Magnetokalorische Kältetechnik könnte in Zukunft deutlich energieeffizientere Kühlsysteme ermöglichen, die ganz ohne Kältemittel auskommen.

Die Kältetechnik ist ein schnell wachsender Markt mit hohem Energiebedarf. Selbst im relativ kühlen Deutschland werden pro Jahr über 72 000 GWh Strom zur Kälteerzeugung verbraucht. Das entspricht 14 Prozent des gesamten Strombedarfs. Weltweit kommen jährlich mehr als 50 Millionen neue Klimaanlage hinzu. Ganz gleich ob in Gebäuden, in Fahrzeugen oder als Kühlschrank – nahezu alle heute verfügbaren Kältesysteme funktionieren nach dem Kompressor-Prinzip, wobei die Wärme über den veränderten Aggregatzustand eines Kältemittels abgeführt wird. Das Problem dabei: Alle Kältemittel weisen ein mehr oder weniger großes Treibhauspotenzial auf; manche wie zum Beispiel Ammoniak zusätzlich noch eine direkte Gesundheitsgefährdung. Mit abnehmender Dichtigkeit des Kühlkreislaufs entweichen diese Mittel früher oder später und müssen kostspielig ersetzt werden. Zudem benötigen Kompressoren viel Platz, sind laut und müssen gewartet werden.

### Vielversprechende Kältetechnik

Auf Basis des magnetokalorischen Effekts lassen sich besonders energieeffiziente Kühlsysteme entwickeln, die ganz ohne Kältemittel auskommen. Sie basieren auf sogenannten

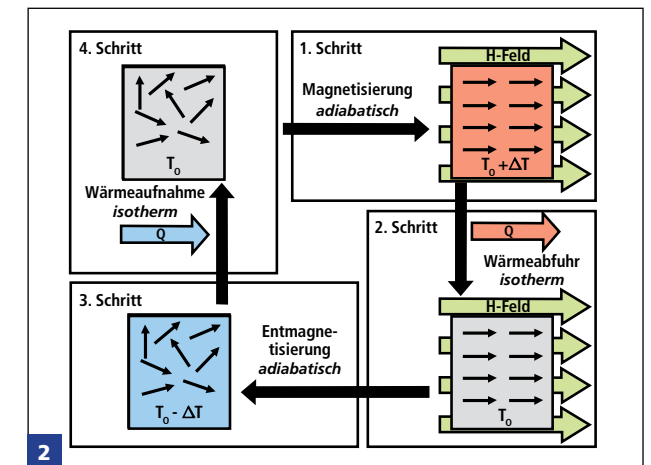
magnetokalorischen (MK) Materialien. MK-Materialien sind magnetisierbare Materialien, die sich bei Einwirkung eines magnetischen Feldes erwärmen und bei Entfernen des Feldes entsprechend wieder abkühlen. So lässt sich ein Kühlzyklus realisieren (Bild 2): Das erwärmte MK-Material wird mit einer Wärmesenke verbunden, sodass Wärme abgeführt werden kann. Wird nun das magnetische Feld entfernt, kühlt sich das Material wieder ab und befindet sich auf einer niedrigeren Temperatur als zu Beginn des Zyklus. Das MK-Material wird nun mit der zu kühlenden Stelle verbunden und kann Wärme aufnehmen. Magnetokalorische Kühlsysteme können im Vergleich zu kompressorbasierten Systemen bis zu 30 Prozent höhere Wirkungsgrade erzielen. Der Verzicht auf Kältemittel erleichtert den Einsatz in mobilen Systemen wie Automobilen, Zügen oder Flugzeugen, wo der Einsatz gesundheitsschädlicher oder leicht entzündlicher Substanzen problematisch ist. Dass die Systeme wartungsarm sind und dazu geräuschlos funktionieren, ist ein zusätzliches Plus.

### Systemaufbau entscheidet über Kühlleistung

Noch sind magnetische Kühlsysteme Zukunftsmusik. Die Aussichten jedoch sind vielversprechend: Magnetokalori-



**MAGNETOKALORISCHE KÜHLUNG – DAS PRINZIP:** Durch Anlegen eines magnetischen Feldes (H-Feld) wird das magnetokalorische (MK) Material erwärmt (Schritt 1). Das MK-Material wird dann mit einer Wärmesenke verbunden, sodass die entstandene Wärme (Q) abgeführt werden kann (Schritt 2). Wird nun das magnetische Feld entfernt (Schritt 3), kühlt sich das MK-Material wieder ab und befindet sich auf einer niedrigeren Temperatur als zu Beginn des Zyklus. Das MK-Material wird nun mit der zu kühlenden Stelle verbunden und kann Wärme (Q) aufnehmen (Schritt 4).



2 Das Prinzip der magnetokalorischen Kühlung (Details siehe Kasten links).

sche Materialien sind in den vergangenen Jahren deutlich effizienter und preiswerter geworden. Für eine Industrialisierung müssen sie jedoch in großem Maßstab herstellbar sein, Materialformgebung und Systementwicklung für den Aufbau von Kühlsystemen müssen entwickelt werden. Der Systemaufbau trägt entscheidend zur Kühlleistung bei. Fraunhofer IPM greift beim thermischen Systemdesign und der thermischen Anbindung von Komponenten auf Erfahrungen aus dem Bereich der Thermoelektrik zurück. Wissenschaftler am Institut erforschen in diesem Zusammenhang, wie sich die Wärmeübertragung vom magnetokalorischen Material an das zu kühlende oder zu erwärmende Medium optimieren lässt. Die eingesetzten Techniken erzielen eine bis zu 1 000-fach höhere Wärmeübertragung als dies z. B. durch reine Wärmeleitfähigkeit von Kupfer möglich wäre. So lassen sich bei gegebenen Temperaturdifferenzen grundsätzlich deutlich höhere Kühlraten erzeugen. Diese Wärmeübertragungstechniken sind zentrales Thema des Projekts MacCool, in dem eine magnetokalorische Wärmepumpe zur energiesparenden, kältemittelfreien Temperaturstabilisierung von Elektrofahrzeug-Batterien entwickelt wird.



**DER MAGNETOKALORISCHE EFFEKT** wurde bereits 1881 vom deutschen Physiker Emil Warburg entdeckt.

1 + 2 Mit hochempfindlichen photoakustischen und photothermischen Messverfahren lässt sich die Qualitätskontrolle für optische Materialien deutlich verbessern.

## NICHTLINEARE OPTIK

# Reine Optik: Restabsorption präzise messen

**Fraunhofer IPM hat zwei Verfahren zur Messung der Reinheit optischer Gläser optimiert – und forscht damit auf dem ureigenen Gebiet Joseph von Fraunhofers, der bereits vor 200 Jahren Produktions- und Bearbeitungstechniken für optische Gläser entscheidend voranbrachte.**

Dass Glasfasern Lichtpulse über weite Strecken übertragen können, hielt man lange für ausgeschlossen, denn Verunreinigungen im Material absorbierten einen wesentlichen Teil des Lichts. Erst als es gelang, deutlich transparentere Glasfasern herzustellen, wurde auch die verlustarme Datenübertragung möglich. Heute stellt sich die Frage der Reinheit auch für kurze optische Komponenten, denn immer leistungsstärkere Laserquellen stellen immer höhere Anforderungen an die Qualität der optischen Bauteile. Dabei spielt – im Unterschied zu Glasfasern – weniger die Abschwächung der Lichtleistung eine Rolle, denn diese ist angesichts vergleichsweise kleiner Bauteile gering. Problematisch hingegen sind die thermischen Auswirkungen: Das absorbierte Licht wird nahezu vollständig in Wärme umgewandelt. Mit der Temperatur ändert sich punktuell der Brechungsindex des Materials und mit ihm die optischen Eigenschaften. Solche thermooptischen Effekte können zu unerwünschten Schwankungen von Laserleistungen führen oder, etwa beim Laserschweißen, zur Verschiebung der Fokusposition. Nicht selten kann dabei die optische Komponente selbst Schaden nehmen.

### Genau, reproduzierbar und zerstörungsfrei

Für die Entwicklung optischer Materialien ist es daher entscheidend, den Absorptionskoeffizienten eines Materials zu kennen. Hersteller optischer Materialien und Beschichtungen benötigen Messverfahren, um Volumen- und Oberflächenabsorption zu bestimmen. Die Messergebnisse sollten sehr genau und reproduzierbar sein; die Messtechnik im Idealfall berührungslos, zumindest aber zerstörungsfrei. Nur so lassen sich Fertigungsprozesse optimieren.

Transmissionsspektrometer, die üblicherweise zur Messung von Absorption genutzt werden, sind für die geringen Absorptionskoeffizienten optischer Materialien nicht empfindlich genug. Zur Bestimmung von Restabsorption in optischen Materialien werden daher vor allem hochempfindliche indirekte Messverfahren genutzt, die die Erwärmung der Probe durch die absorbierte Energie zum Nachweis nutzen.



**DIE BESTIMMUNG DER ABSORPTIONSLINIEN im Sonnenspektrum gelang Joseph von Fraunhofer vor allem dank verbesserter Qualität der von ihm genutzten Glasprismen.**

### Genauigkeit durch Kombination: Photoakustik plus photothermische Interferenzmessung

Photoakustische Messverfahren weisen die Absorption anhand der thermischen Ausdehnung des Materials nach. Bei gepulster Beleuchtung entstehen dabei akustische Wellen, die mithilfe eines Piezosensors detektiert werden. Aus der Amplitude der Schallwellen lässt sich der Absorptionskoeffizient ableiten. Ein von den Wissenschaftlern neu entwickeltes photoakustisches Spektrometer misst erstmalig Absorptionsspektren in 1 mm dicken Proben über den gesamten Wellenlängenbereich von 212 bis 2 500 nm mit Nachweisgrenzen bis  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ . Photoakustische Messungen eignen sich besonders für Materialien mit großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Mit der »Photothermal common-path interferometry« (PCI) wurde ein alternatives Messverfahren weiterentwickelt, das sich vor allem für Materialien mit hohen thermooptischen Koeffizienten eignet. Die bei Einstrahlung durch Absorption erzeugte lokale Erwärmung bildet eine »thermische Linse«. Ein Abfragestrahl nimmt diese als Inhomogenität wahr. Abgebildet auf einer Photodiode gibt die Selbstinterferenz des Abfragestrahls Auskunft über die absorbierte Lichtleistung. Das für einzelne Wellenlängen bereits bei Glas- und Kristallherstellern etablierte Verfahren wurde von den Wissenschaftlern erstmals mit einer durchstimmbaren Lichtquelle kombiniert, um Spektren der Restabsorption im Nah- und Mittelinfrarot aufzunehmen.

Die Messung über große Wellenlängenbereiche gibt Aufschluss über Ursachen unterschiedlicher Absorptionsbanden wie etwa Verunreinigungen. Zudem bietet es neue Möglichkeiten der Absolutkalibrierung beider Verfahren. Untersucht wurden gängige optische Materialien wie Lithiumtriborat, Lithiumniobat, Alpha-Bariumborat und Kalziumfluorid.

Im Rahmen einer Vergleichsstudie konnten die Wissenschaftler die Zuverlässigkeit der photoakustischen und der photothermischen Methode bei der Bestimmung von Restabsorption in transparenten optischen Materialien validieren. Ihre hohe Empfindlichkeit von weniger als 10 ppm pro cm machen sie zu einem wertvollen Werkzeug für die Qualitätskontrolle und zur Verbesserung von Materialien, Komponenten und Lichtquellen.

## THERMOELEKTRIK

# Thermoelektrische Generatoren im Blockheizkraftwerk

**Blockheizkraftwerke spielen eine bedeutende Rolle in der Energiewende. Sie arbeiten effizienter als konventionelle Kraftwerke. Fraunhofer IPM entwickelt neuartige thermoelektrische Generatoren, die die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks noch weiter erhöhen.**

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind deshalb so vielversprechend, weil sie bereits sehr effizient mit Energie umgehen: Sie produzieren gleichzeitig Strom und Wärme. Neben der Erzeugung von elektrischem Strom ist ein BHKW dank der Kraft-Wärme-Kopplung zusätzlich in der Lage, die anfallende Abwärme zu nutzen. Diese bleibt bisher bei konventionellen Kraftwerken weitgehend ungenutzt.

Jedoch, das geht noch besser: Fraunhofer IPM, weltweit führend auf dem Gebiet der Thermoelektrik, wird nun erstmals neuartige thermoelektrische Generatoren (TEG) in den Wärmetauscher eines BHKWs integrieren, die dessen Wirtschaftlichkeit und die Stromausbeute deutlich steigern können. Während herkömmliche BHKW bisher nur Brauch-

wasser erwärmen konnten, sind die in den Wärmetauscher integrierten neu entwickelten TEG in der Lage, einen Teil des Wärmestroms des Abgases direkt in nutzbaren elektrischen Strom umzuwandeln.

### Thermoelektrik: Hightech für den Umweltschutz

Durch die zusätzliche Stromerzeugung wird der elektrische Wirkungsgrad eines BHKWs deutlich gesteigert, und zwar momentan um bis zu 3 Prozent. Dieses Plus an Energieeffizienz ist von großer Bedeutung für den wirtschaftlichen Betrieb eines Blockheizkraftwerks: Je höher der Anteil der erzeugten elektrischen Energie, desto länger die Jahreslaufzeiten des Kraftwerks und somit auch dessen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz.

**1** Fraunhofer IPM entwickelt thermoelektrische Generatoren, die auch bei Temperaturen von bis zu 550°C noch sicher und zuverlässig arbeiten.



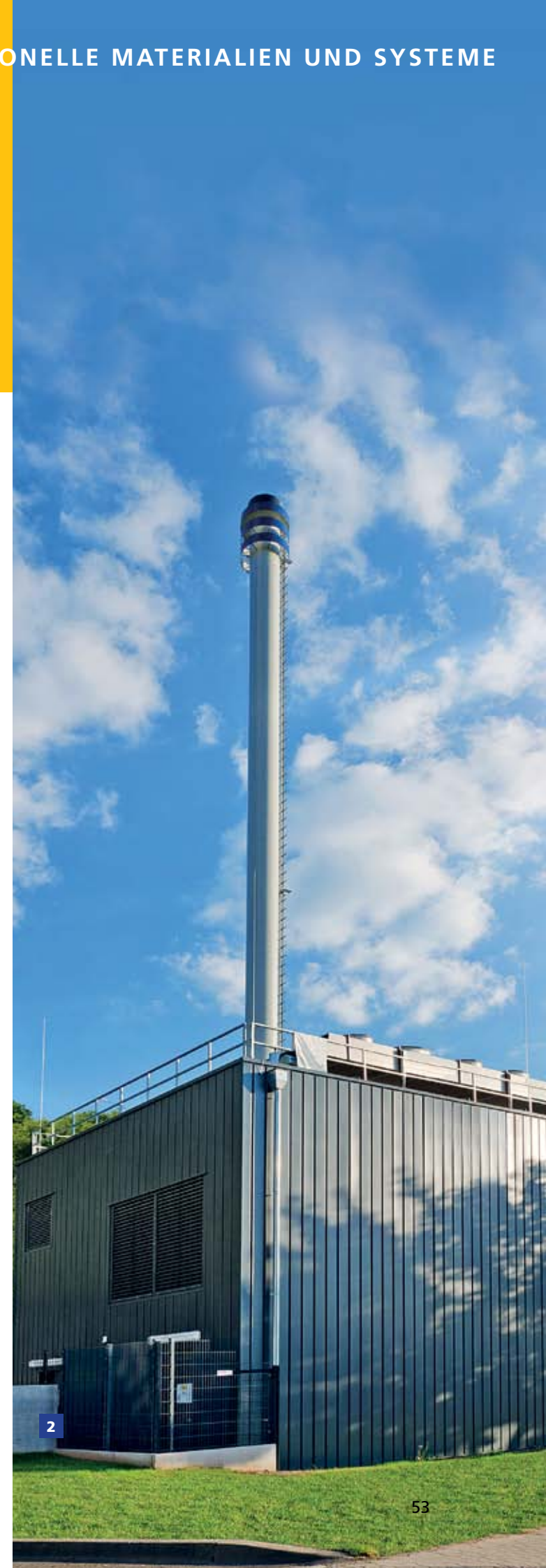
**ABWÄRME IN STROM UMWANDELN** – daran arbeiten weltweit viele Forscher mit Hochdruck. Diese Form des »Energy Harvesting« bietet sich bei vielen Verbrennungsprozessen geradezu an. Voraussetzung dafür sind effiziente thermoelektrische Materialien und optimierte Fertigungsprozesse.

Das Ernten von Abwärme mithilfe thermoelektrischer Generatoren ist eines von vielen spannenden Forschungsfeldern der Thermoelektrik – sei es in Kraftwerken, Industrieprozessen oder im Automobil. Die dafür eigens entwickelten thermoelektrischen Generatoren basieren auf Materialien, die Wärmeströme zwischen einer warmen und einer kalten Seite in elektrische Ströme umwandeln. Im Gegensatz zu vielen anderen Umwandlungsmechanismen benötigen TEG keine beweglichen Bauteile – sie arbeiten geräuschlos und wartungsfrei. Darüber hinaus sind sie extrem langlebig, was sie im wahrsten Sinne des Wortes nachhaltig macht.

### Kostengünstig und effizient

Die meisten der bisher auf dem Markt erhältlichen Generatoren eignen sich nur für den Einsatz bei Temperaturen von bis zu 200°C. Fraunhofer IPM hat nun erstmals Module entwickelt, die auch bei Temperaturen von bis zu 550°C zuverlässig arbeiten. Außerdem gelang es den Experten, den Materialeinsatz bei der Herstellung dieser Module bei gleicher Leistung um rund die Hälfte zu reduzieren. Die Module werden dadurch deutlich leichter, günstiger und attraktiver für den industriellen Einsatz. So arbeitet Fraunhofer IPM zurzeit mit Industriepartnern an der Industrialisierung dieser vielversprechenden Technologie.

**2** Die Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks kann durch den Einsatz thermoelektrischer Generatoren deutlich gesteigert werden.



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.

www.fraunhofer.de

**www.fraunhofer.de**



### Partner und Netzwerke

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

#### Fraunhofer-Gesellschaft

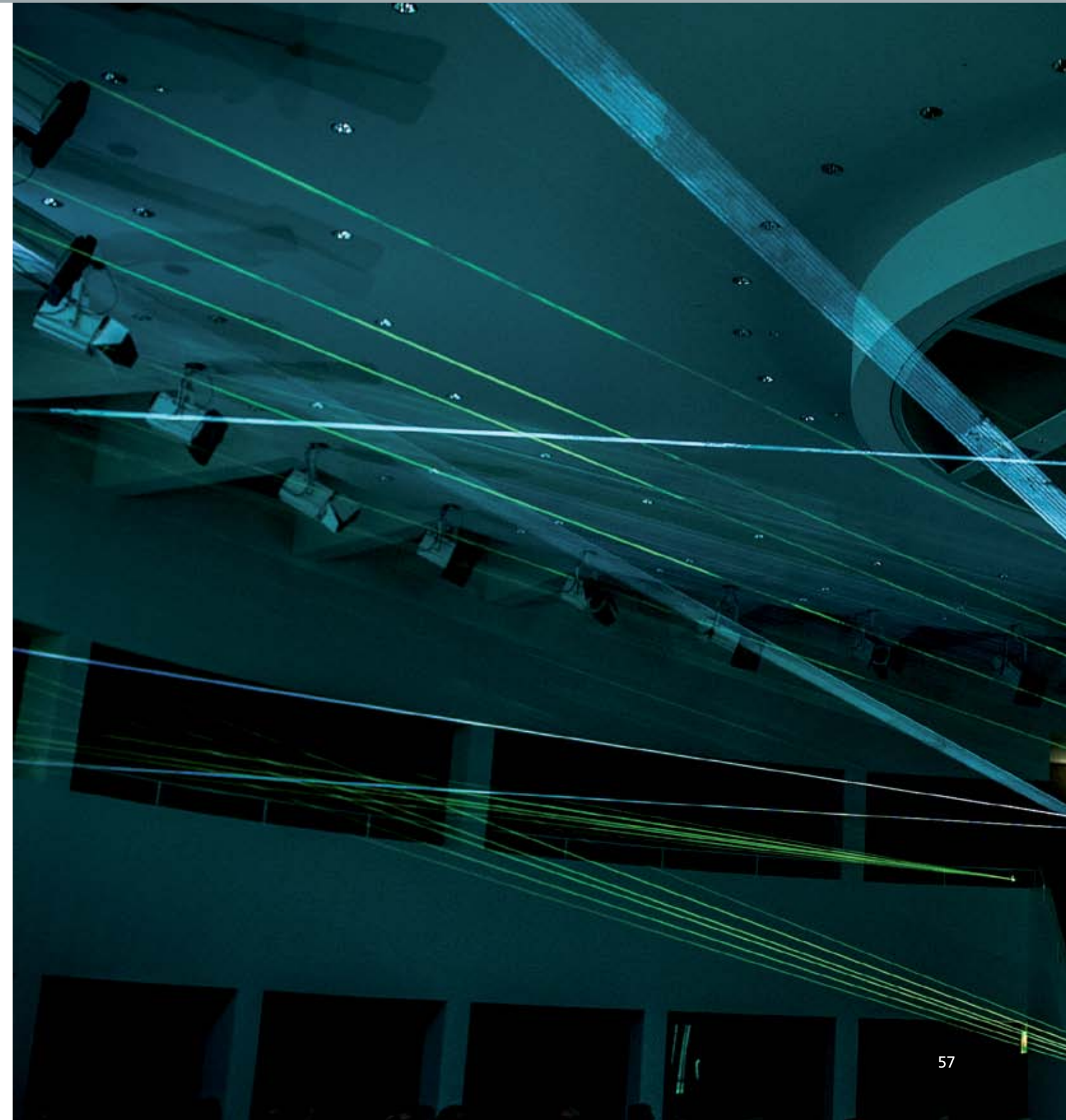
- Fraunhofer-Verbund Light & Surfaces
- Fraunhofer-Allianz Energie
- Fraunhofer-Allianz Food Chain Management
- Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik
- Fraunhofer-Allianz Verkehr
- Fraunhofer-Allianz Vision

#### Deutschland

- AMA Fachverband für Sensorik
- Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA
- Biovalley Deutschland e.V.
- BBA-BW Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
- CAST e.V. – Competence Center for Applied Security
- Cluster Bahntechnik e.V.
- DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
- DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- DTG – Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V.
- DTZ – Deutsches Terahertz-Zentrum e.V.
- FAIM - Forum Angewandte Informatik und Mikrosystemtechnik e.V.
- GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker
- Green City Freiburg Regional Cluster
- MST BW – Mikrosystemtechnik BW
- Netzwerkdraht e.V.
- Optence e.V.
- Photonics BW
- SPECTARIS – Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V.
- VDI/VDE – GMA Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
- VDMA – Photovoltaik-Produktionsmittel; E-Batterie
- VDSI – Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e.V.

#### 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
- LIA – Laser Institute of America
- MRS – Material Research Society
- OSA – Optical Society of America
- SPIE – International Society for Optics and Photonics



Fratz, Markus; Weimann, Claudius; Wölfelschneider, Harald; Koos, Christian; Höfler, Heinrich

**Absolutely referenced distance measurement by combination of time-of-flight and digital holographic methods**

Photonic instrumentation engineering, Paper 899200 (2014)

Buehler-Paschen, Silke; Pereira Goncalves, Antonio; Populoh, Sascha; König, Jan

**Advanced thermoelectrics: From materials to devices**

Physica status solidi. A 211 (6), 1227 (2014)

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

**Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system**

Optical engineering 53 (3), Art. 031208, 15 (2014)

Kneer, Janosch; Boxberg, Manuel; Busch, Sebastian; Eberhardt, André; Palzer, Stefan; Wöllenstein, Jürgen

**Alterations in the complex refractive index of copper oxide thin films as sensing effect for hydrogen sulfide monitoring**

Microsystem Technologies 20 (4-5), 607 (2014)

Kneer, J.; Eberhardt, A.; Walden, P.; Perez, A.O.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.

**Apparatus to characterize gas sensor response under real-world conditions in the lab**

Review of scientific instruments 85 (5), 055006 (2014)

Kemmler, Manuel; Sauer, Ursula; Schleicher, Erwin; Preininger, Claudia; Brandenburg, Albrecht

**Biochip point-of-care device for sepsis diagnostics**

Sensors and Actuators. B 192, 205 (2014)

Lambrecht, Armin; Pfeifer, Marcel; Konz, Werner; Herbst, Johannes; Axtmann, Felix

**Broadband spectroscopy with external cavity quantum cascade lasers beyond conventional absorption measurements**

Analyst 139 (9), 2070 (2014)

Beigang, Renè; Biedron, Sandra; Dyjak, Slawomir; Ellrich, Frank; Haakestad, Magnus; Hübsch, Daniel; Kartaloglu, Tolga; Ozbay, Ekmel; Ospald, Frank; Palka, Norbert; Puc, Uros; Czerwiska, Elbieta; Sahin, Asaf B.; Sesek, Alexander; Trontelj, Janez; Švigelj, Andrej; Altan, Hakan; Rheenen, Arthur D. van; Walczakowski, Michal

**Comparison of terahertz technologies for detection and identification of explosives**

Terahertz physics, devices, and systems

VIII: Advanced applications in industry and defense, Paper 91020C, 10 (2014)

Kießling, Jens; Buse, Karsten; Vodopyanov, Konstantin L.; Breunig, Ingo

**Continuous-wave optical parametric source for terahertz waves tunable from 1 to 4.5 THz frequency**

Nonlinear Frequency Generation and Conversion. Materials, Devices, and Applications XIII, Paper 896408 (2014)

Salvador, J.R.; Cho, J.Y.; Ye, Z.; Moczysgemba, J.E.; Thompson, A.J.; Sharp, J.W.; Koenig, J.D.; Maloney, R.; Thompson, T.; Sakamoto, J.; Wang, H.; Wereszczak, A.A.

**Conversion efficiency of skutterudite-based thermoelectric modules**

Physical chemistry, chemical physics : PCCP 16 (24), 12510 (2014)

Wang, Hsin; McCarty, Robin; Salvador, James R.; Yamamoto, Atsushi; König, Jan

**Determination of thermoelectric module efficiency: A survey**

Journal of Electronic Materials 43 (6), 2274 (2014)

Metzger, Bernd; Hentschel, Mario; Schumacher, Thorsten; Lippitz, Markus; Ye, Xingchen; Murrax, Christopher B.; Knabe, Bastian; Buse, Karsten; Giessen, Harald

**Doubling the efficiency of third harmonic generation by positioning ITO nanocrystals into the hot-spot of plasmonic gap-antennas**

Nano Letters 14 (5), 2867 (2014)

Rademacher, Sven; Wöllenstein, Jürgen

**Energy self-sufficient sensor nodes for the detection of gaseous hazardous substances in case of disaster**

Smart SysTech 2014, European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies. CD-ROM, 4 (2014)

Janssen, S.; Schmitt, K.; Blanke, M.; Bauersfeld, M.L.; Wöllenstein, J.; Lang, W.

**Ethylene detection in fruit supply chains**

Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A 372 (2017), Art. 20130311 (2014)

Busch, Sebastian; Ketterer, Manuel; Vinzenz, Xenia; Hoffmann, Christian; Schmitt, Katrin; Wöllenstein, Jürgen

**Evaluation of bioinspired functional surfaces for nanoparticle filtering**

Microsystem Technologies 20 (4-5), 919 (2014)

Saleemi, M.; Ruditskiy, A.; Toprak, M.S.; Stingaciu, M.; Johnsson, M.; Kretzschmar, I.; Jacquot, A.; Jäggle, M.; Muhammed, M.

**Evaluation of the structure and transport properties of nanostructured antimony telluride (Sb2Te3)**

Journal of Electronic Materials 43 (6), 1927 (2014)

Herbst, Johannes; Brunner, Raimund; Lambrecht, Armin

**Fast automotive diesel exhaust measurement using quantum cascade lasers**

Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XI, Paper 899322 (2014)

Beckmann, Tobias; Fratz, Markus; Bertz, Alexander; Carl, Daniel

**High-speed deformation measurement using spatially phase-shifted speckle interferometry**

Practical Holography XXVIII. Materials and Applications, Paper 90060E (2014)

Rademacher, Sven; Peter, Carolin; Knop, Daniel; Wöllenstein, Jürgen; Eberhardt, André

**Kostengünstiges Gassensorarray zum selektiven Nachweis von Spurengasen für low-power Anwendungen**

Sensoren und Messsysteme 2014. CD-ROM, 5 (2014)

Pernau, H.F.; Pietsch, T.; Scheer, E.

**Magnetotransport in atomic-size bismuth contacts**

Journal of Physics. Condensed Matter 26 (47), Art.474203, 10 (2014)

Ioannidou, A.A.; Rull, M.; Martin-Gonzalez, M.; Moure, A.; Jacquot, A.; Niarchos, D.

**Microwave synthesis and characterization of the series Co (1-x )Fe(x)Sb(3) high temperature thermoelectric materials**

Journal of Electronic Materials 43 (7), 2637 (2014)

Huber, Jochen; Rademacher, Sven; Wöllenstein, Jürgen; Eberhardt, André

**Miniaturisiertes photoakustisches CO<sub>2</sub>-Gasmesssystem für die Raumluftüberwachung**

Sensoren und Messsysteme 2014. CD-ROM, 5 (2014)

Ortiz Perez, Alvaro; Eberhardt, André; Walden, Paul; Kneer, Janosch; Wöllenstein, Jürgen; Palzer, Stefan

**Mobile artificial nose for bad odor detection**

Sensoren und Messsysteme 2014. CD-ROM, 5 (2014)

Breunig, Ingo; Bückle, Anni; Werner, Christoph S.; Buse, Karsten

**Non-Lorentzian pump resonances in whispering gallery optical parametric oscillators**

Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XVI, Paper 896007 (2014)

Cristofani, Edison; Friederich, Fabian; Wohnsiedler, Sabine; Matheis, Carsten; Jonuscheit, Joachim; Vandewal, Marijke; Beigang, René

**Nondestructive testing potential evaluation of a terahertz frequency-modulated continuous-wave imager for composite materials inspection**

Optical engineering 53 (3), Art. 031211 (2014)

Fratz, Markus; Carl, Daniel

**Novel industry ready sensors for shape measurement based on multi wavelength digital holography**

Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology , 479 (2014)

Jetter, Volker; Gutscher, Simon; Bug, Andreas; Knorz, Annerose; Ahrbeck, Christopher; Nekarda, Jan; Carl, Daniel  
**Optimizing process time of laser drilling processes in solar cell manufacturing by coaxial camera control**  
Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing, LAMOM XIX, Paper 896715 (2014)

Rüther, Anja; Pfeifer, Marcel; Lórenzfónfría, Víctor A.; Lüdeke, Steffen  
**pH titration monitored by quantum cascade laser-based vibrational circular dichroism**  
Journal of physical chemistry. B 118 (14), 3941 (2014)

Reiterer, Alexander; Höfler, Heinrich; Wölfelschneider, Harald; Baulig, Claudia; Maindorfer, Ingo; Dimopoulos, Nikolaos; Schwarzer, Stefan; Dambacher, Martin  
**Railway measurement techniques: Opportunities and challenges**  
Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance 2014. Proceedings, Paper 86 (2014)

Rüther, A.; Pfeifer, M.; Lórenzfónfría, V.A.; Lüdeke, S.  
**Reaction monitoring using mid-infrared laser-based vibrational circular dichroism**  
Chirality 26 (9), 490 (2014)

Fieberg, Stephan; Waasem, Niklas; Kühnemann, Frank; Buse, Karsten  
**Sensitive absorption measurements in bulk material and coatings using a photothermal and a photoacoustic spectrometer**  
Nonlinear Frequency Generation and Conversion. Materials, Devices, and Applications XIII, Paper 896410, 7 (2014)

Rademacher, Sven; Huber, Jochen; Wöllestein, Jürgen  
**Sensorknoten zur Erfassung von gasförmigen Gefahrenstoffen im Katastrophenfall**  
Sensoren und Messsysteme 2014. CD-ROM , 5 (2014)

Kuntze, Helge-Björn; Frey, Christian W.; Emter, Thomas; Petereit, Janko; Tchouchenkov, Igor; Müller, Thomas; Tittel, Martin; Worst, Rainer; Pfeiffer, Kai; Walter, Moriz; Rademacher, Sven; Müller, Fabian  
**Situation responsive networking of mobile robots for disaster management**  
ISR/Robotik 2014, Joint Conference of 45th International Symposium on Robotics and 8th German Conference on Robotics. Proceedings. CD-ROM , 313 (2014)

Schmidtke, G.; Nikutowski, B.; Jacobi, C.; Brunner, R.; Erhardt, C.; Knecht, S.; Scherle, J.; Schlagenhauf, J.  
**Solar EUV irradiance measurements by the auto-calibrating EUV spectrometers (SolACES) aboard the International Space Station (ISS)**

Solar physics 289 (5), 1863 (2014)  
Thuillier, G.; Bolsée, D.; Schmidtke, G.; Foujols, T.; Nikutowski, B.; Shapiro, A. I.; Brunner, R.; Weber, M.; Erhardt, C.; Hersé, M.; Gillotay, D.; Peetermans, W.; Decuyper, W.; Pereira, N.; Haberreiter, M.; Mandel, H.; Schmutz, W.  
**The solar irradiance spectrum at solar activity minimum between solar cycles 23 and 24**  
Solar physics 289 (6), 1931 (2014)

Thuillier, G.; Schmidtke, G.; Erhardt, C.; Nikutowski, B.; Shapiro, A.I.; Bolduc, C.; Lean, J.; Krivova, N.; Charbonneau, P.; Cessateur, G.; Haberreiter, M.; Melo, S.; Delouille, V.; Mampaey, B.; Yeo, K.L.; Schmutz, W.  
**Solar Spectral Irradiance Variability in November/December 2012: Comparison of Observations by Instruments on the International Space Station and Models**  
Solar physics 289 (12), 4433 (2014)

Fieberg, Stephan; Sturman, Boris; Kühnemann, Frank; Buse, Karsten  
**Strong polarization effects in photothermal common-path interferometry**  
Optics Letters 39 (13), 3880 (2014)  
Kneer, J.; Woellenstein, J.; Palzer, S.  
**Specific, trace gas induced phase transition in copper(II) oxide for highly selective gas sensing**  
Applied physics letters 105 (7), 073509 (2014)

Czugala, M.; O’Connell, C.; Blin, C.; Fischer, P.; Fraser, K.J.; Benito-Lopez, F.; Diamond, D.  
**Swelling and shrinking behaviour of photoresponsive phosphonium-based ionogel microstructures**  
Sensors and Actuators. B 194, 105 (2014)

Hansen, A.-L.; Dankwort, T.; Winkler, M.; Ditto, J.; Johnson, D.C.; Koenig, J. D.; Bartholome, K.; Kienle, L.; Bensch, W.  
**Synthesis and Thermal Instability of High-Quality Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Super lattice Thin Film Thermoelectrics**  
Chemistry of materials 26 (22), 6518 (2014)

Bartholomé, Kilian; Balke, Benjamin; Zuckermann, Daniel; Köhne, Martin; Müller, Michael; Tarantik, Karina; König, Jan  
**Thermoelectric modules based on Half-Heusler materials produced in large quantities**  
Journal of Electronic Materials 43 (6), 1775 (2014)

Renner, M.; Freymann, G. von  
**Transverse mode localization in three-dimensional deterministic aperiodic structures**  
Advanced optical materials 2 (3), 226 (2014)

Janssen, S.; Pankoke, I.; Klus, K.; Schmitt, K.; Stephan, U.; Wöllestein, J.  
**Two underestimated threats in food transportation: Mould and acceleration**

Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A 372 (2017), Art. 20130312, 13 (2014)

Steiert, Matthias; Zeiser, Roderich; Berndt, Michael; Wilde, Jürgen; Beckmann, Tobias; Fratz, Markus  
**Verformungsmessung an elektronischen Bauteilen und Baugruppen mit Grauwertkorrelation und Holografie**  
Elektronische Baugruppen und Leiterplatten, EBL 2014 , 159 (2014)

Breunig, Ingo; Buse, Karsten  
**Whispering gallery optical parametric oscillators**  
Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XI , Paper 89930B (2014)

**DOKTORARBEITEN 2014**  
Pfeifer, Marcel  
**Novel approaches to optical activity measurements**

Fieberg, Stephan  
**Analyse thermooptischer Effekte zur Absorptionsmessung**

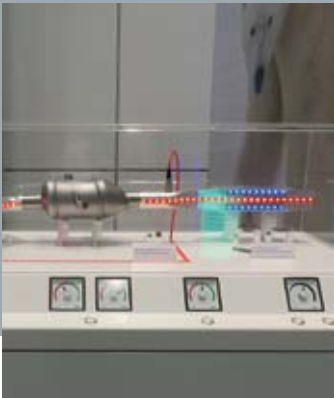
**ERTEILTE PATENTE 2014**  
König, Jan; Matheis, Carsten; Vetter, Uwe  
**Verfahren zur Herstellung eines thermoelektrischen Bauelements und thermoelektrisches Bauelement**

Blug, Andreas  
**Verfahren zur Herstellung einer Fügeverbindung und Vorrichtung**

Brandenburg, Albrecht  
**Vorrichtung zur optischen Detektion von Substanzen in einem flüssigen oder gasförmigen Medium**

Ellrich, Frank  
**Kollimator für elektromagnetische Hochfrequenzstrahlung**  
Schmitt, Katrin; Hoffmann, Christian  
Transdermales therapeutisches System

Schmitt, Katrin; Hoffmann, Christian  
**Transdermales therapeutisches System**



Messe-Demonstrator für flexible Messtechnik.



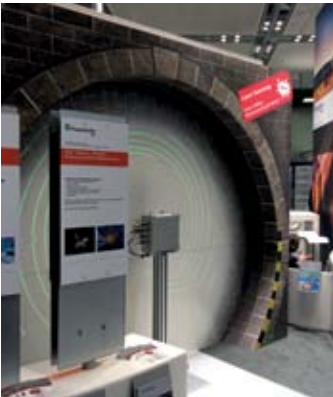
Energy Hannover Messe: Stand der Fraunhofer-Allianz Energie.

MESSEN

- **SPIE Photonics West 2014**  
**Laser, Photonics, Biomedical Optics Conference and Exhibition**  
San Francisco, USA 04.–06.02.2014  
Auf dem Stand der Firma Hübner wurden die Systeme »C-Wave« und »T-Cognition« präsentiert, die jeweils mit einem »Prism Award« ausgezeichnet wurden.
- **Wire 2014**  
**Internationale Fachmesse Draht und Kabel**  
Düsseldorf 07.–11.04.2014  
Gemeinschaftsstand Netzwerk-Draht  
Auf der Fachmesse für Draht und Kabel stellte Fraunhofer IPM das Inspektionssystem WIRE-AOI vor, das Drahtoberflächen bei Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s vollständig inspiziert und dabei Fehler in Echtzeit detektiert.
- **Energy Hannover Messe 2014**  
**Internationale Leitmesse der erneuerbaren und konventionellen Energieerzeugung, Energieversorgung, -übertragung, -verteilung und -speicherung**  
Hannover 07.–11.04.2014  
Stand der Fraunhofer-Allianz Energie  
Fraunhofer IPM präsentierte verschiedene Systeme zur Steigerung der Energieeffizienz in Verbrennungsprozessen, darunter Gasmesstechnik zur Optimierung von Motoren in der Entwicklungsphase, intelligente Gasensoren und thermoelektrische Generatoren zur Verstromung von Abwärme.

- **Control 2014**  
**28. Control – Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung**  
Stuttgart 06.–09.05.2014  
Stand der Fraunhofer-Allianz Vision  
Präsentiert wurden Inline-Systeme zur Mikro-Deformationsmessung, zur Drahtinspektion, zur Detektion großflächiger Restverschmutzungen sowie zur Schichtdickenmessung mittels Terahertz-Wellen.
- **E-MRS Spring Meeting**  
**der European Materials Research Society**  
Lille, Frankreich 27.–29.05.2014  
Stand der Quick-Ohm GmbH  
Quick-Ohm GmbH und Fraunhofer IPM präsentierten schlüsselfertige Messsysteme für Bulk- und Dünnschichtmaterialien.
- **SENSOR+TEST 2014**  
**Messtechnik-Messe**  
Nürnberg 03.–05.06.2014  
Stand der Fraunhofer-Gesellschaft  
Vorgestellt wurde eine folienbasierte Sensoranordnung mit einem Mess-Stempelsystem zur Messung thermischer und elektrischer Materialeigenschaften.
- **Lasys 2014**  
**Internationale Fachmesse für Systemlösungen in der Laser-Metallbearbeitung**  
Stuttgart 24.–26.06.2014  
Stand von Photonics BW  
Präsentiert wurde ein System zur Optimierung der Nahtqualität in Laserschweißprozessen durch Echtzeit-Regelung.

- **Parts2Clean**  
**12. Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung**  
Stuttgart 24.–26.06.2014  
Stand der Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik  
Ausgestellt wurde ein Messgerät zur Bestimmung von Restverschmutzungen auf großen Bauteilen mittels bildgebender Fluoreszenzmesstechnik.
- **InnoTrans 2014**  
**Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik, Innovative Komponenten, Fahrzeuge, Systeme**  
Berlin 3.–26.09.2014  
Stand der Fraunhofer-Allianz Verkehr  
Fraunhofer IPM präsentierte die neuesten Entwicklungen in der Bahnmesstechnik – den Rail Track Scanner RTS und den Sector Profile Scanner SPS.



Auf der InnoTrans 2014 konnten sich Besucher von der Präzision der Laserscanner überzeugen.

**Workshop: Gastechnologie in der Energiewende**  
Das Thema Strom bestimmt die öffentliche Debatte in der Energiewende; die Bedeutung des Gasmarkts für die Energiepolitik wird hingegen systematisch unterschätzt. Diese Ansicht vertraten Gastechnologie-Expertinnen und -Experten auf einem Workshop, den Fraunhofer IPM am 26. Juni 2014 veranstaltete. Einig war sich die »Community«, dass die technischen Möglichkeiten der vorhandenen Gasinfrastruktur für die Energiewende nicht annähernd ausgeschöpft sind. Die Experten plädierten dafür, die Strom- und Gasinfrastruktur besser zu vernetzen. Technologien wie »Power-to-Gas«, bei denen überschüssiger Strom



in Gas umgewandelt wird, ermöglichen es, Erzeugung und Nutzung von Energie zeitlich und örtlich zu entkoppeln.  
»Die technologischen Möglichkeiten, Gas stärker für die Energiewende einzusetzen, sind noch lange nicht ausgereizt«, stellte Institutsleiter Karsten Buse fest und forderte Investitionen in Innovationen statt Subventionen im Energiesektor. »Die Gasindustrie darf nicht länger Spielball der Kräfte sein. Sie muss die Innovationen aktiv vorantreiben«. Dies muss die Politik durch ausreichende Forschungsmittel unterstützen, so die Forderung der Experten, die ihre Erkenntnisse schließlich in einem Positionspapier für die Politik dargelegt haben.





In Workshops identifizieren wir gemeinsam mit Branchenkennern neue Forschungsthemen.

## VERANSTALTUNGEN

- **Expertenworkshop – Zertifizierung mobiler Erfassungssysteme von 3D-Daten**  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 05.02.2014

- **Angewandte Forschung für Verteidigung und Sicherheit in Deutschland**  
Berlin, 03.–05.02.2014  
Vortrag und Poster über Angewandte Forschung für Sicherheit am Beispiel Gefahrsstoffdetektion. Posteingangskontrolle mit Terahertz-Wellen, z. B. in Justizvollzugsanstalten; orts aufgelöste Messung gasförmiger Gefahrstoffe und Brandgase z. B. im Katastrophenfall.

- **6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications**  
Kaiserslautern, Fraunhofer IPM, 11.–2.03.2014  
Beim »International Workshop on Terahertz Technology and Applications« standen unter anderem die Anwendung von Quantenkaskadenlasern (QCL) und die Metrologie im Mittelpunkt.

- **Girls' Day**  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 27.03.2014

- **Fraunhofer-Jahrestagung**  
Institutsvorstellung und -führung für Interessierte  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 22.05.2014

- **Workshop »Gas-Technologie in der Energiewende«, Forschungs- und Entwicklungspotenziale**  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 26.06.2014

- **Workshop »Laserbasierte Prozessanalytik«**  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 25.–26.09.2014  
Einführung in die Grundlagen der optischen Prozessanalytik – laserbasierte Messverfahren für die Online- und Inline-Analytik.

- **Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2014**  
**Fachausstellung Straßen und Verkehr**  
Stuttgart 30.09.–02.10.2014  
Fraunhofer IPM war hier mit dem Pavement Profile Scanner vertreten. Dieser Scanner erzeugt 3D-Bilder der Fahrbahnoberfläche mit bislang unerreichter Präzision.

- **International Student Conference on Micro Technology 2014**  
Industrie-Ausstellung und Kontaktbörse für Studierende der Ingenieur- und Naturwissenschaften und junge Doktoranden  
Freiburg, IMTEK, 06.–10.10.2014

- **Wissenschaftscampus 2014**  
**Das Sprungbrett für Frauen in die Forschung.**  
Fachtag »Science to Business«  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 06.–09.10.2014

- **MoLaS 2014**  
**Technology Workshop Mobile Laser Scanning**  
Freiburg, Fraunhofer IPM, 26.–27.11.2014

- **4. IAV-Tagung Thermoelektrik**  
**Abwärmennutzung in Verkehr und Industrie**  
Ellington Hotel Berlin 10.–12.12.2014

### Die Welt in 3D: Workshop zum Thema mobile Objekterfassung



**MoLaS** Mobile Laser Scanning | Technology Workshop

Mehr als 100 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus 14 Ländern kamen zum »MoLaS – Technology Workshop Mobile Laser Scanning«, den Fraunhofer IPM erstmalig im November 2014 veranstaltete. Damit ist es aus dem Stand gelungen, die Mobile-Laserscanning-Community für ein Workshop-Konzept zu begeistern, das die Technologie der mobilen 3D-Erfassung von Objekten in den Mittelpunkt stellt. Vortragende verschiedener europäischer Universitäten, Forschungseinrichtungen und Firmen stellten technologische Trends beim mobilen Laserscanning vor. Das Programm umfasste vier Sessions mit den Themen Sensorik, Kalibration, Datenverarbeitung und Anwendungen. Auch sehr konkrete Ansätze waren dabei: Beispielsweise ein rucksackgetragener Laserscanner, der Messungen auch in unwegsamem Gelände ermöglicht. In den Pausen boten eine Postersession und eine Industrieausstellung Gelegenheit zu Gesprächen unter Experten. MoLaS wird zukünftig im Zweijahresrhythmus am Fraunhofer IPM abgehalten.

[www.molas-workshop.org](http://www.molas-workshop.org)



Fraunhofer IPM

Freiburg

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM  
Heidenhofstraße 8  
79100 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  
Fraunhofer-Platz 1  
67663 Kaiserslautern  
Telefon +49 631 2057 40-00  
Fax +49 631 2057 40-03  
info@ipm.fraunhofer.de

www.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.anjaschmidt-design.de

Bildquellen

Kai-Uwe Wudtke (Titel, S. 6, 7, 13, 35, 39, 42, 43, 65); Klaus Polkowski (S. 5, 57); Fraunhofer/Dragos Popescu (S. 8, 64); Marc Müller (S. 10); Handwerkskammer Freiburg (S. 10); Fraunhofer/Dirk Mahler (S. 11); HÜBNER GmbH und Co.KG (S. 11); IMTEK-Uni Freiburg, TU Kaiserslautern (S. 12); Fotolia/Ivan Smuk (S. 14); Privat (S. 17); Felix Grothelo/Klaus Polkowski/Holger Kock (S. 18, 19); Achim Käflein (S. 21, 50, 51); Fraunhofer IPM (S. 9, 13, 15, 22, 23, 25, 30, 32, 33, 37, 40, 44, 47, 49, 52, 62, 63); Fotolia/xy (S. 24); Thomas Brenner (S. 27); Stephan Lessoing (S. 28, 29, 31); iNovitas (S. 36); harvepino/Fotolia (S. 41); Fotolia/Stefan Redel (S. 45); Oliver Böhmer/luedesign (S. 48); Fotolia/Westend 61 (S. 49); Fotolia/Petair (S. 53); Fraunhofer-Gesellschaft (S. 55); pixelio/Rainer Sturm (S. 62)

Druck

schwarz auf weiß litho und druck GmbH, Freiburg

Dieser Bericht wurde auf klimaneutral hergestelltem Papier gedruckt.

© 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.