

Messen · Kontrollieren · Optimieren

2012
2013

Titel *Multireflexions-Gasmesszellen mit langer optischer Wegstrecke ermöglichen den Nachweis von Gaskonzentrationen in sehr geringen Mengen.*

Messen · Kontrollieren · Optimieren

GESCHÄFTSFELDER

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





INHALTSVERZEICHNIS

6	Editorial
7	Nachrichten
12	Betriebshaushalt Personal
13	Kuratorium Partner Netzwerke
14	Organisation Ansprechpartner
<hr/>	
16	PRODUKTIONSKONTROLLE
18	Passgenau trotz Toleranz: 100-Prozent-Kontrolle in Echtzeit
19	Angekommen in der Zukunft: Bewegte 3D-Werbebildschirme
20	Fluoreszenz für eine saubere Sache: Bildgebende Oberflächenkontrolle
<hr/>	
22	MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG
24	Zerstörungsfrei prüfen: Terahertz-Messtechnik für moderne Werkstoffe
25	Optik hilft Elektronik: Optische Messtechnik für schnelle Elektronik
<hr/>	
26	OBJEKT- UND FORMERFASSUNG
28	Blick ins »Schlüsselloch«: Laufzeitmessung im Laserschweißprozess
29	Straßen im Profil: Laserscanner misst Fahrbahnoberflächen
<hr/>	
30	GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE
32	Schnüffeln aus sicherer Entfernung: Lecksuche bei Biogasanlagen
33	Mehrwert aus Messwerten: Chemometrie ergänzt Spektroskopie
34	Kommunizierende Kugeln: Gassensoren wittern Gefahr
35	Aus Licht mach Schall: Mit Photoakustik Lichtabsorptionen hören
<hr/>	
36	ENERGIESYSTEME
38	Wertvolle Abgaswärme: Thermogeneratoren sparen Sprit
39	Magnetismus macht's möglich: Hall-Messplatz misst Ladungsträger
<hr/>	
40	Die Fraunhofer-Gesellschaft
41	Fraunhofer-Standorte Adressen
42	Publikationen 2012
46	Impressum



Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

das Jahr 2012 war für uns in vielerlei Hinsicht spannend – was die wirtschaftliche Entwicklung angeht, aber auch in Bezug auf unsere Themen und unsere strategische Aufstellung.

Von Fraunhofer IPM entwickelte Technologien und Systeme sind international gefragt und werden weltweit eingesetzt. Dieser Erfolg verschafft uns Freiräume, um unsere FuE-Arbeiten beständig zu verbessern. Die erste Jahreshälfte war allerdings von spürbarer Zurückhaltung ausländischer Kunden geprägt. Sicher eine Folge der Verunsicherung hinsichtlich des Euro. Es ist eine große Leistung der Belegschaft, dass das Jahr 2012 am Ende dennoch ein sehr erfolgreiches Jahr geworden ist: Die Wirtschaftserträge machten mehr als 35 Prozent der Gesamterlöse aus.

Zahlreiche Großsysteme wurden an Kunden ausgeliefert. Exemplarisch erwähnt seien ein hochgetaktetes, sensitives Abgasspektrometer, das erstmals mit Quanten-Kaskaden-Lasern arbeitet, sowie ein Draht-Inspektions-System, welches Kameras nutzt, deren Pixel durch zelluläre neuronale Netze miteinander verbunden sind. In diesen und in anderen Fällen ist es gelungen, Optik, Elektronik, Mechanik und Software so zu integrieren, dass robuste Systeme zur Lösung der messtechnischen Probleme unserer Kunden entstehen – oftmals mit neuartigen Komponenten direkt aus der Forschung.

geführt: Praktisch jede Branche und jedes Messverfahren kamen hier vor; die Studien haben unseren Auftraggebern geholfen, weitreichende Entscheidungen treffen zu können – von der Unternehmensakquisition bis zur Platzierung großer Entwicklungsaufträge. Viele Anfragen erreichten uns dank der neu gestalteten Internetseite. Auch im Netz wird Fraunhofer IPM inzwischen als Experte für Messtechnik international wahrgenommen.

Im Herbst 2012 fand ein Technologie-Strategie-Audit statt, zu dem wir zehn Experten aus der freien Wirtschaft und aus der Wissenschaft als Berater hinzugezogen haben. Nun setzen wir die Empfehlungen um: Kernkompetenzen werden klarer definiert und strukturiert weiterentwickelt, Geschäftsfelder deutlicher benannt und fokussierter bearbeitet. Diese Veränderungen werden im Jahr 2013 sichtbar werden – so auch in diesem Jahresbericht.

Für den Jahresbericht greifen wir bewusst einige Themen heraus, die typisch sind für das, was wir tun und was wir können. Wenn Sie Ihr Wunschthema hier nicht finden: Sprechen Sie uns an. Mit unserem Team decken wir eine große Bandbreite an grundständiger Ausbildung und Expertise ab – vom Urologen, der an der Analyse von Nierensteinen arbeitet, bis zum Geodäten, der zur Sicherung der Infrastruktur von Bahn und Straße beiträgt.

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

*Prof. Dr. Karsten Buse
Institutsleiter*

Auch 2012 haben wir wieder zahlreiche Studien zu sehr unterschiedlichen Themen durch-

Ihr

NACHRICHTEN

AUS FREIBURG UND KAISERSLAUTERN

60 Jahre Baden-Württemberg

Am 23. Juni 2012 öffneten die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute interessierten Besucherinnen und Besuchern gemeinsam ihre Türen. Anlass war das 60-jährige Bestehen des Landes Baden-Württemberg. An jedem Standort wurde ein individuelles Programm dargeboten, das Einblick in die wissenschaftlichen Schwerpunkte der einzelnen Institute gab. Am Fraunhofer IPM begrüßte Institutsleiter Karsten Buse seine Gäste unter anderem mit Vorführexperimenten. Anschließend wurden Besichtigungstouren unter dem Motto »Wissenschaft zum Anfassen« angeboten.

Das Land Baden-Württemberg ist für die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute seit vielen Jahren ein wichtiger Förderer und Geldgeber. Allein im letzten Jahr hat das Land die Fraunhofer-Gesellschaft insgesamt mit über 14 Millionen Euro unterstützt.

Mehr als 80 Teilnehmer beim 5. Gassensor-Workshop

Zum fünften Mal hat Fraunhofer IPM im März 2013 zum Gassensor-Workshop geladen. Rund 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmer, überwiegend aus der Industrie, nutzten das Forum, um sich über neueste Entwicklungen und Trends in der Gasesstechnik auszutauschen. Auf der Tagesordnung standen Vorträge zum klassischen Thema Metalloxid-Gassensoren, aber auch zu Strömungssensorik,

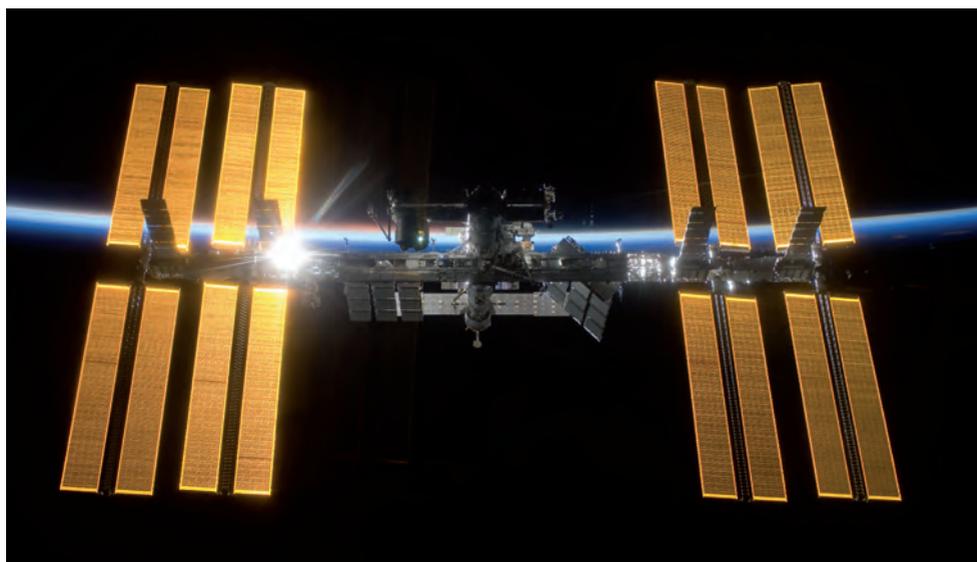
elektrochemischer Gassensorik, Photoakustik, UV- und Laser-Spektroskopie. Die Referenten präsentierten ein breites Spektrum an neuen Anwendungen – von der Atem- über die Spurengasanalytik bis zur Detektion von Prozessgasen und Luftqualität. In den Pausen fanden die Teilnehmer Zeit für einen intensiven Ideenaustausch an Ausstellungsständen und Postern – über Wissenschaft, Technik und neue Produktideen. Der Workshop wurde von den Firmen Axetris, Dittich Elektronik, IST Innovative Sensor Technology, Micronas und UST Umweltsensortechnik unterstützt.

Fraunhofer IPM stellt Internationale Raumstation ISS auf den Kopf

Ende 2012 fand ein einzigartiges 27-Tage-Experiment in 400 Kilometern Höhe statt: Die gesamte Internationale Raumstation ISS wurde gedreht, damit das von Fraunhofer IPM entwickelte Sonnenspektrometer SolACES (Solar AutoCalibrating EUV-Spektrometer) Daten sammeln konnte. Die ISS ist der Sonne normalerweise nie länger als zwei Wochen zugewandt. Da die Sonne aber rund vier Wochen braucht, um sich einmal um die eigene Achse zu drehen, konnte durch das Drehen der Raumstation erstmals ein ganzer Sonnenzyklus erfasst werden.

SolACES misst seit März 2008 an Bord der ISS die extrem ultraviolette (EUV)-Strahlung der Sonne. Das energiereiche EUV ionisiert Gase





Die Internationale Raumstation ISS wurde gedreht, um mit einem Sonnenspektrometer von Fraunhofer IPM 27 Tage am Stück die EUV-Strahlung zu messen.

in der erdnahen Iono- und Thermosphäre. Damit beeinflusst es die klimatischen Bedingungen der Erde und die Satellitensignale von Navigationssystemen. Erkenntnisse über die Intensität der EUV-Strahlung geben daher Aufschluss über die möglichen Folgen der schwankenden Sonnenintensität. Die vom Kontrollzentrum in Brüssel erfassten Daten werden von Fraunhofer IPM ausgewertet.

Auftragsmessungen online – kompetent, schnell, einfach

Fraunhofer IPM bietet messtechnische Serviceleistungen nun nutzerfreundlich übers Internet an. Im ServiceLab von Fraunhofer IPM haben Kunden die Möglichkeit, Angebote für Auftragsmessungen online einzuholen – schnell und einfach per Web-Formular. Die Messergebnisse liefert Fraunhofer IPM inklusive wissenschaftlicher Auswertung und Experten-Kurzbericht. Das ServiceLab umfasst derzeit drei Servicegruppen:

- ServiceLab »Gas- und Prozesstechnologie«
- ServiceLab »Energiesysteme«
- ServiceLab »Materialcharakterisierung und -prüfung«

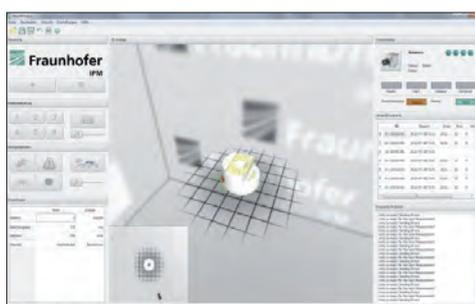
ServiceLab 
Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM

www.ipm.fraunhofer.de/serviceLab



Hier können Kunden Absorptionsmessungen oder Elektronenmikroskop-Aufnahmen beauftragen, Gassensoren und -systeme testen, Materialien mit Terahertz-Wellen charakterisieren sowie Parameter thermoelektrischer Materialien bestimmen lassen. Das ServiceLab wird weiter ausgebaut – geplant sind nicht nur zusätzliche Arten von Messungen, sondern auch weitere Servicegruppen.

Die einheitliche Benutzeroberfläche der Fraunhofer IPM-Messsysteme ist nach neuesten ergonomischen Erkenntnissen gestaltet.



Corporate Design für Software-Oberflächen

Fraunhofer IPM hat in Kooperation mit der Fachhochschule Furtwangen ein einheitliches Corporate Design für die Software-Oberflächen seiner Messsysteme entwickelt. Dank klarer Gestaltung, spezifischer Farbgebung sowie einheitlicher Anordnung und Benennung ist das neu gestaltete GUI (Graphical User Interface) benutzerfreundlich und bietet einen hohen Wiedererkennungswert. So erleichtert das zwei- oder dreispaltige Layout die intuitive Wahrnehmung der Programmelemente von links nach rechts. Das Ergebnis ist eine bessere Übersicht: Auf der linken Bildschirmseite befinden sich standardmäßig die Bedienelemente, etwa »Start/Stop« oder

»Messung«. Als zentrales Element in der Seitenmitte wird das Ergebnis der Anwendung in Form von Graphiken, Messwerten o. ä. dargestellt. Die optionale rechte Spalte kann für weitere Anzeigen, wie zum Beispiel »Systemstatus« oder »Verlauf der Messung«, genutzt werden.

Ein Leben für die Weltraumforschung: Karl Rawer feierte 100. Geburtstag

Am 19. April 2013 wurde der Gründer des heutigen Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik IPM, Professor Karl Maria Alois Rawer, 100 Jahre alt.

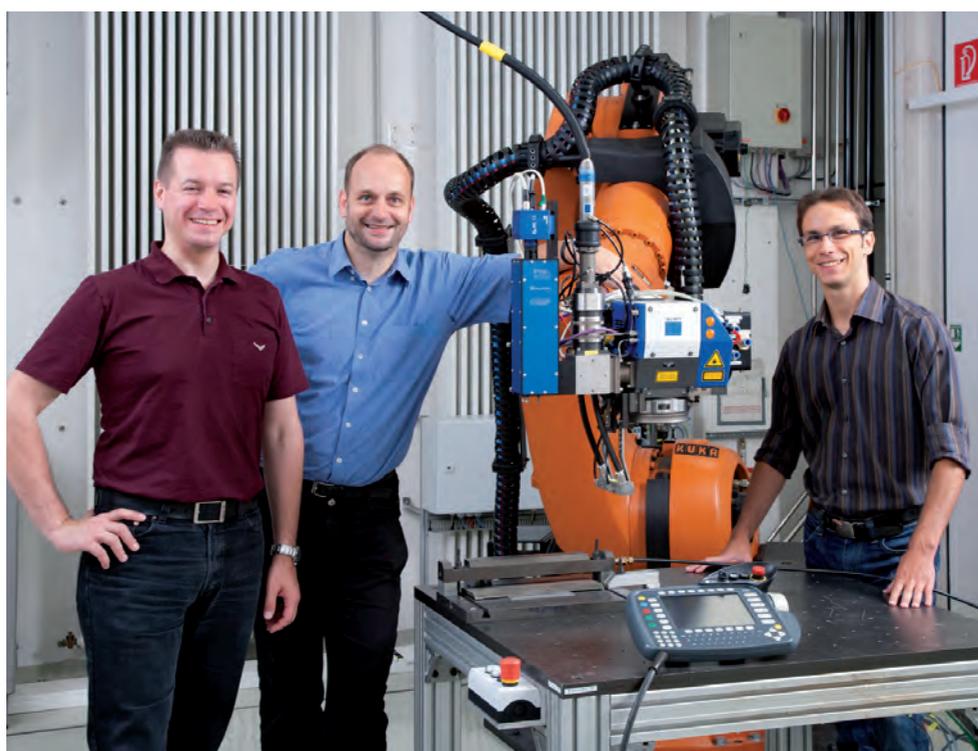
Rawers Lebensthema ist die Erforschung der Ionosphäre, also jenes Teils der erdnahen Atmosphäre, in dem Kurzwellen reflektiert werden, die für den weltweiten Funkverkehr von Bedeutung sind. Mit seiner Arbeit auf dem Gebiet der Ionosphärenforschung zählt Rawer zu den Pionieren der europäischen Weltraumforschung. Sein Wissen brachte er in die 1963 von ihm in Freiburg gegründete Arbeitsgruppe für Physikalische Weltraumforschung (APW) ein. Als diese im Jahr 1973 offiziell zum Fraunhofer-Institut für Physikalische Weltraumforschung wird – dem heutigen Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM –, übernimmt Rawer bis zu seiner Pensionierung im Jahr 1979 die Leitung.

Erklärtes Ziel des Ehrendoktors der Universität Düsseldorf war der grenzüberschreitende wissenschaftliche Austausch: So hielt er über Jahre hinweg Vorlesungen an der Pariser Universität Sorbonne. Der Träger des Bundesverdienstkreuzes erster Klasse lebt in Hugstetten bei Freiburg.



Der ehemalige Institutsleiter von Fraunhofer IPM, Karl Maria Alois Rawer, blickt seit April auf 100 Jahre Lebensgeschichte zurück.

Für die Echtzeitregelung von Laserschweißprozessen erhielten Andreas Blug von Fraunhofer IPM (Mitte) und seine Entwicklungspartner Felix Abt (Univ. Stuttgart, links) und Leonardo Nicolosi (TU Dresden, rechts) den »Stahl-Innovationspreis« und den »Berthold Leibinger Innovationspreis 2012« (dritter Platz).



Echtzeit-Laserschweißregelung zweifach ausgezeichnet

Für ein Messsystem zur Echtzeit-Laserschweißregelung ist das Fraunhofer IPM gemeinsam mit Projektpartnern gleich zweimal ausgezeichnet worden. Beim Stahl-Innovationspreis belegte das Messsystem in der Kategorie »Stahl in Forschung und Entwicklung« den dritten Platz. Zudem gewann das Team den mit 10 000 Euro dotierten dritten Preis des Berthold Leibinger Innovationspreises.

Das Laserschweißen hat sich in der modernen Produktion als Standard etabliert. Dennoch war eine Regelung dieses Produktionsverfahrens bisher nur unbefriedigend gelöst. Fraunhofer IPM-Projektleiter Andreas Blug, Felix Abt von der Universität Stuttgart und Leonardo

Nicolosi von der TU Dresden gelang auf diesem Gebiet ein Durchbruch. Ihr System zur Laser-Schweißregelung nutzt eine neue Art der Bildverarbeitung, die eine statistische Analyse des Durchschweißblochs innerhalb der Reaktionszeit des Schweißverfahrens ermöglicht. Hierfür nimmt eine Kamera bis zu 14 000 Bilder pro Sekunde auf. Dabei verarbeitet ein Zelluläres Neuronales Netzwerk (»Cellular Neural Network«, CNN) die Information jedes einzelnen der 25 000 Pixel gleichzeitig. Dank dieser hohen Bildverarbeitungsgeschwindigkeit ermöglicht die CNN-Technologie erstmals die Auswertung und Regelung von Laserschweißprozessen in Echtzeit. Damit lassen sich unvermeidliche Produktionsschwankungen ausgleichen und die Qualität der Schweißnaht sicherstellen.

VDI-Ehrenmedaille für Professor Elmar Wagner

Der ehemalige Institutsleiter von Fraunhofer IPM, Professor Elmar Wagner, erhielt die Ehrenmedaille des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. Damit ehrt der Verein Wagners besondere Verdienste im Bereich der Messtechnik und Sensorik.

Unter anderem begründete Wagner 1994 den Fachkongress OPTO, um den Austausch zwischen Wissenschaftlern und Anwendern auf dem Gebiet der Optik und Optoelektronik zu fördern. Der Fachkongress gilt heute als bedeutendste Veranstaltung zur optischen Messtechnik in Europa. Mit der Zeitschrift »tm – Technisches Messen«, deren Herausgeber Wagner seit vielen Jahren ist, etablierte er eine anerkannte wissenschaftliche Publikation auf

dem Gebiet der Messtechnik. Für den VDI war Elmar Wagner viele Jahre im Bereich »Optische Technologien« tätig. Bevor er 1986 die Leitung des Fraunhofer IPM übernahm, forschte er unter anderem für AEG-Telefunken, Hewlett Packard, die Technische Universität München und das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart.

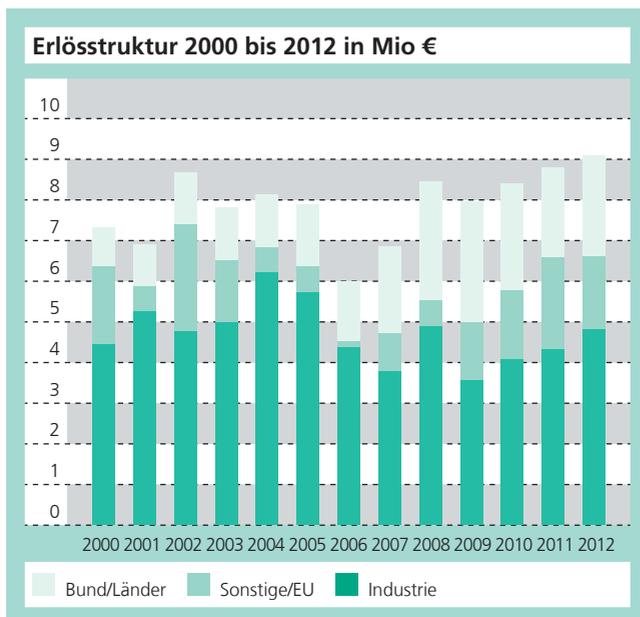
Die Ehrenmedaille des VDI wird seit 1959 an besonders verdiente ehrenamtliche VDI-Mitarbeiter, Politiker und Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens oder eines technisch-wissenschaftlichen Fachgebiets verliehen.

Abschied von Professor Joachim Hesse

Professor Joachim Hesse, ehemaliger Institutsleiter des Fraunhofer IPM, ist am 8. Februar 2013 im Alter von 75 Jahren in Berlin verstorben. Hesse stand dem Institut von 1980 bis 1986 vor. Unter seiner Leitung wurden neue Themenfelder wie die Laserspektroskopie, Halbleitertechnik und integrierte Optik aufgegriffen, die das Institut bis heute prägen. In seine Amtszeit fiel zudem die strategische Ausrichtung auf eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie. Aufgrund des starken Wachstums sorgte Hesse für mehrere bauliche Erweiterungen, den Ausbau der feinmechanischen Werkstatt und einige grundlegende organisatorische Anpassungen. In Abstimmung mit der Fraunhofer-Gesellschaft setzte Hesse seine berufliche Laufbahn ab 1986 beim Optik-Konzern Carl Zeiss fort, wo er als Generalbevollmächtigter und Forschungsleiter bis zum Beginn seines Ruhestands 2002 wirkte. Im Anschluss übernahm er für zwei Jahre die Institutsleitung des Fraunhofer-Instituts für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut HHI.



Für besondere Verdienste auf den Gebieten Sensorik und Messtechnik wurde Professor Elmar Wagner (links) mit der VDI-Ehrenmedaille ausgezeichnet. Professor Gerald Gerlach (rechts) von der TU Dresden überreichte die Auszeichnung während eines Festakts im Rahmen der Messe Sensor + Test 2012.



Betriebshaushalt

2012 beträgt der Betriebshaushalt von Fraunhofer IPM 13,7 Millionen Euro und liegt damit um 0,7 Millionen Euro höher als 2011. Der Betriebshaushalt setzt sich zusammen aus Industrieerlösen, Geldern aus öffentlich geförderten Projekten und der Grundfinanzierung. Dabei liegt der Anteil externer Finanzierungsgelder, bestehend aus externen öffentlichen Geldern und Industrieerlösen, bei 67 Prozent bzw. 9,1 Millionen Euro. Die Industrieerlöse machen mit 4,8 Millionen Euro einen Anteil von 35,3 Prozent am Betriebshaushalt aus. Das entspricht einer Steigerung von rund 12 Prozent gegenüber dem Vorjahr (4,3 Millionen Euro). Damit zeichnet sich trotz Eurokrise ein stabiles Wachstum ab. Um diesem Trend zu folgen, investierte Fraunhofer IPM im Jahr 2012 rund 1,3 Millionen Euro in die Modernisierung der Ausstattung.



Personal

Im Vergleich zum Vorjahr ist die Mitarbeiterzahl von rund 225 im Jahr 2012 relativ stabil geblieben. Insgesamt 143 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind bei Fraunhofer IPM in Festanstellung beschäftigt, davon 11 am Standort Kaiserslautern. Im Februar 2013 umfasste die Stellenkapazität 125 Vollzeitstellen. Zudem unterstützte Fraunhofer IPM rund 53 Berufseinsteiger und Studenten bei ihrer Karriere, davon 8 Auszubildende und 45 Diplomanden, Masteranden, Bacheloranden, Praktikanten sowie wissenschaftliche Hilfskräfte. Zusätzlich sind 30 externe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für Fraunhofer IPM tätig. Die Belegschaft teilt sich in drei grundlegende Bereiche: im Durchschnitt arbeiten 45 Prozent der Beschäftigten als wissenschaftliche Mitarbeiter, 40 Prozent als Ingenieure und technische Mitarbeiter sowie 15 Prozent als Angestellte im Bereich Infrastruktur und Werkstatt.

Unser Kuratorium

Ein Kuratorium mit Persönlichkeiten aus Wissenschaft, Industrie und Politik steht der Institutsleitung zur Seite, wenn es um strategische Fragen und Weichenstellungen für die Zukunft geht.

- Reinhard Hamburger, Vorsitzender des Kuratoriums, C-FOR-U Business Coaching
- Arno Bohn, Bohn Consult Unternehmerberatung GmbH
- Wolfgang Bay, Sick AG
- Dr. Bernd Dallmann, Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe GmbH & Co. KG
- Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Prof. Dr. Maximilian Fleischer, Siemens AG
- Siegfried Groß, Agilent Technologies Deutschland GmbH
- Dr. Ehrentraud Graw, Ministerium für Wirtschaft und Finanzen Baden-Württemberg
- Prof. Dr. Jan G. Korvink, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, IMTEK
- Dr. Volker Nussbaumer, Telekom AG
- Dr. Paul Schwabbauer, EADS Deutschland GmbH
- Reinhilde Spatscheck, SHS Gesellschaft für Beteiligungsmanagement mbH
- Dr. Michael Totzeck, Carl Zeiss AG
- Dr. Achim Weber, Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, Mainz

Partner & Netzwerke

Fraunhofer IPM ist Mitglied folgender Verbände und Allianzen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft:

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

Unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter engagieren sich in Verbänden, Fachorganisationen und Netzwerken und sind so in ständigem Austausch mit Kollegen aus ihren jeweiligen Fachgebieten.

Deutschland

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

International

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



Institutsleiter

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



Stellvertretender Institutsleiter

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



Referentin der Institutsleitung

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



Verwaltung und Infrastrukturdienste

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



Neue Technologien und Patente

Holger Kock
Telefon +49 761 8857-129
holger.kock@
ipm.fraunhofer.de



Qualitätsmanagement

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

Produktionskontrolle



Abteilungsleiter

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



Stellvertretender Abteilungsleiter

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



Inline-Messtechnik

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



Optische Oberflächen- analytik

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

Materialcharakterisierung und -prüfung



Abteilungsleiter

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



Stellvertretender Abteilungsleiter

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



Industrielle Terahertz- Messtechnik

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



Terahertz- Opto-Elektronik

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

Objekt- und Formerfassung



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



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



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

Gas- und Prozesstechnologie



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



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



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



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



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

Energiesysteme



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



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



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



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



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

GESCHÄFTSFELD PRODUKTIONSKONTROLLE

THEMEN

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

KOMPETENZEN

- ▶ Fluoreszenzmesstechnik
- ▶ schnelle Bildverarbeitung
- ▶ digitale Holographie
- ▶ Laserbelichter
- ▶ bildgebende Verfahren

KONTAKT

Dr. Heinrich Höfler, Abteilungsleiter

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

Inline-Messtechnik

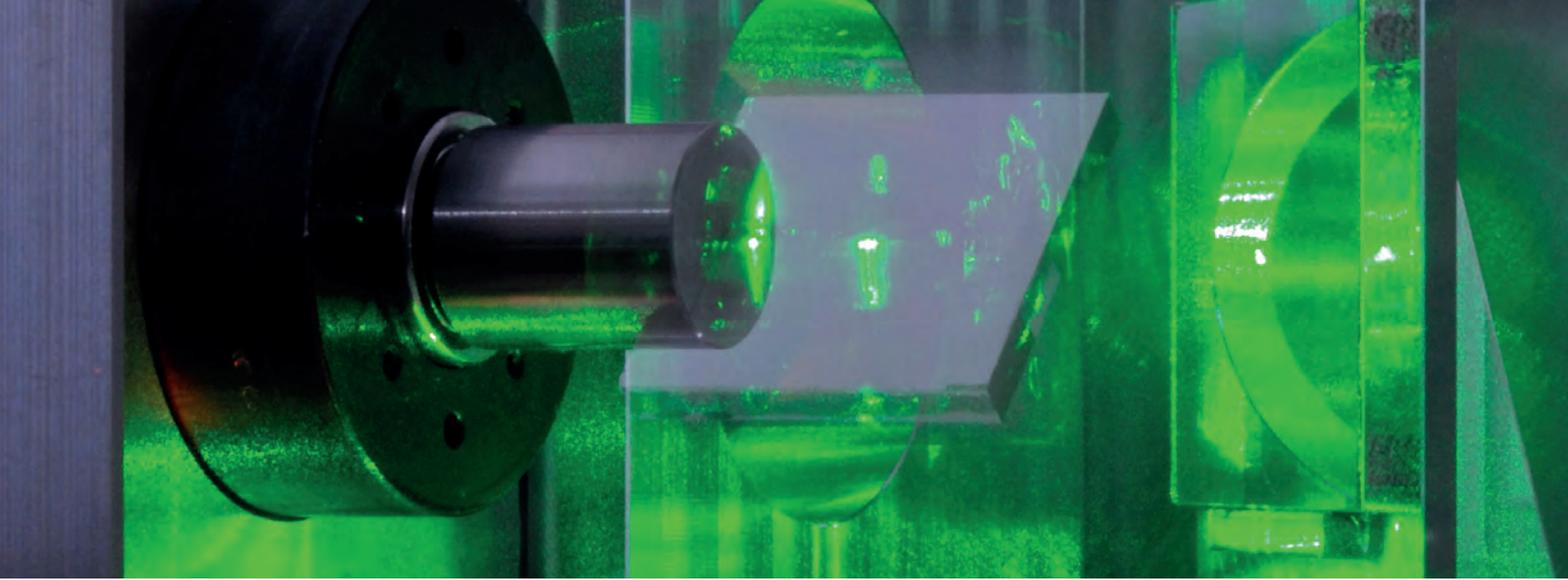
Dr. Daniel Carl

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

Optische Oberflächenanalytik

PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg

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



PRODUKTIONSKONTROLLE

»Wir entwickeln optische Systeme zur 100-Prozent-Kontrolle«

Dr. Heinrich Höfler

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

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

Optische Oberflächenanalytik

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

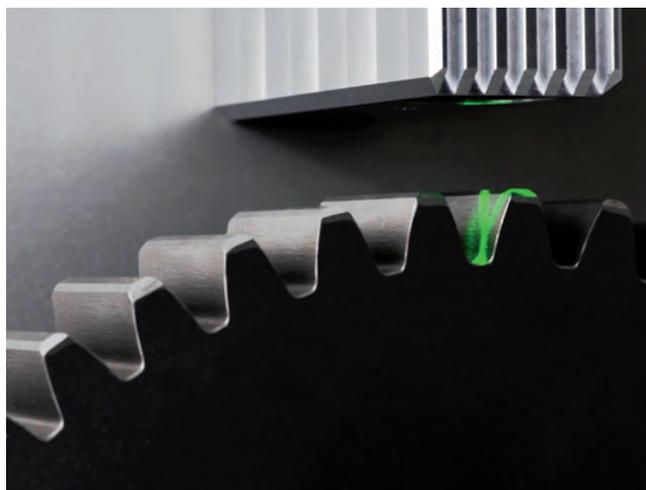
Inline-Messtechnik

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

INLINE-MESSTECHNIK

PASSGENAU TROTZ TOLERANZ: 100-PROZENT-KONTROLLE IN ECHTZEIT

In modernen Produktionsprozessen ist die Passgenauigkeit von Komponenten entscheidend für die Effizienz einer Maschine: Je exakter zwei Zahnräder in einem Getriebe zueinander passen, desto geringer sind Verschleiß, Energieeinsatz und Vibration. Bauteile mit großer Toleranz produzieren und trotzdem später passgenau miteinander kombinieren – dies ermöglicht ein neues Inline-Messsystem von Fraunhofer IPM. Das Inspektionssystem misst beispielsweise die absolute Geometrie von Zahnrädern direkt in der Produktionslinie. So lassen sich die exakten Maße jedes einzelnen Zahnrads zum Zeitpunkt der Fertigstellung dokumentieren – bei Bedarf mit einer Genauigkeit bis in den Nanometerbereich. Dazu zählen zum Beispiel die jeweiligen Zahnpositionen, der Kopf- bzw. Fußkreis, Verzahnungsfehler oder auch die Flankensteilheit. Eine solche 100-Prozent-Erfassung direkt in der Fertigungslinie erlaubt eine Klassifizierung und optimale Kombination der Zahnräder nach Passgenauigkeit.



Ein neues Inspektionssystem sorgt dafür, dass Komponenten stets exakt zusammenpassen – unabhängig von der Fertigungstoleranz.

Zur Messung nutzt das Inspektionssystem die Vorteile der Mehrwellenlängen-Interferometrie. Bei diesem kontaktlosen, schnellen und präzisen Messprinzip wird zunächst ein Laserstrahl auf die Oberfläche eines Messobjekts gerichtet. Das rückgestreute Licht wird anschließend wieder mit dem Ursprungslaserstrahl überlagert. Das Ergebnis ist ein Interferogramm, das alle notwendigen 3D-Informationen des Messpunkts enthält – je nach Rauigkeit mit nanometergenauer Höhenauflösung. Das gelingt selbst auf steilen Flanken wie zum Beispiel Zahnradzähnen. Dank einer hardwarenahen und an die jeweilige Messaufgabe angepassten Datenauswertung, erreicht das System hohe Messgenauigkeiten bei einer gleichzeitig sehr hohen Messgeschwindigkeit von rund 10 mm/s und einer Messrate im kHz-Bereich. Im Gegensatz zu den auch heute noch üblichen taktilen Verfahren klassifiziert das interferometrische Messsystem die Bauteile ohne Zeitverlust direkt in der Fertigung.

Das Inspektionssystem lässt sich an verschiedene Anforderungen anpassen und funktioniert auf ganz unterschiedlichen Materialien mit schwarzen, rauen ebenso wie glänzenden Oberflächen. Für den Anwender ist die industrielle Wertschöpfung des Messsystems vor allem dann besonders hoch, wenn Komponenten in einem Nachfolgeschritt passgenau einander zugeordnet werden müssen. Bei komplexen Baugruppen kann durch die exakte Prüfung jeder einzelnen Komponente die Ausschussrate der gesamten – meist deutlich teureren Baugruppe – drastisch reduziert werden. So greift am Ende ein Zahnrad optimal ins andere.

INLINE-MESSTECHNIK

ANGEKOMMEN IN DER ZUKUNFT: BEWEGTE 3D-WERBEBILDSCHIRME

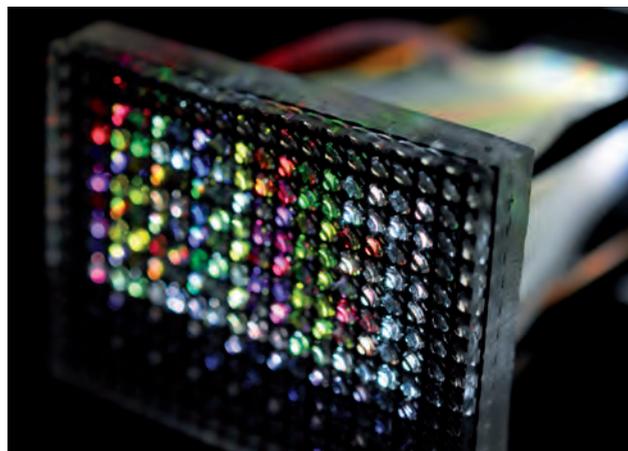
In der Hollywood-Version des Jahres 2015, die in der cineastischen Perle »Zurück in die Zukunft II« beschrieben wird, gibt es ihn schon: den dreidimensionalen Werbebildschirm. Der frisch in der Zukunft angekommene Michael J. Fox alias Marty McFly wird durch einen aus der Tiefe einer Werbetafel angreifenden Haifisch verschluckt. Im Jahre 1989 war eine derartige 3D-Großanzeige reine Fiktion. Nun haben Wissenschaftler am Fraunhofer IPM das erste Funktionsmuster eines solchen Displays hergestellt, auf dem der Betrachter Animationen mit 3D-Effekt auch ohne Spezialbrille sieht.

Der Clou liegt in der Nutzung einer speziellen Mikrooptik, die die vielen Perspektiven eines dreidimensionalen Bildes unter unterschiedlichen Raumwinkeln anzeigt und so für den Betrachter das Lichtfeld eines realen Objekts erzeugt. Die Forscher am Fraunhofer IPM nutzen dafür eine Platte, die mit einer Vielzahl aneinandergefügter Mikrooptiken bestückt ist. Jede Mikrooptik projiziert dabei mehrere tausend unterschiedliche Perspektiven in Richtung des Betrachters, der diese Darstellung als Tiefenwirkung wahrnimmt. Fraunhofer IPM hat erstmalig einen briefmarkengroßen, aus 96 Mikrooptiken bestehenden Miniaturbildschirm aufgebaut, mit dem die korrekte Funktion der Technologie nachgewiesen wurde. Durch den Einsatz spezieller Bildleitfasern lassen sich solche kleinen Kacheln beliebig aneinanderfügen, sodass der Größe der 3D-Werbedisplays im Prinzip keine Grenzen gesetzt sind.

Gemeinsam mit dem Fraunhofer COMEDD arbeitet das Team nun an einem DIN-A4-großen Demonstrator. Dabei werden etwa einhundert Mikro-OLED-Displays mit einer besonders hohen Bildpunktdichte eingesetzt, die einen kompakten Aufbau ermöglichen. Bei der Darstellung bewegter Bilder führt die hohe Anzahl an Perspektiven zu einer weiteren Herausforderung:

Herkömmliche Übertragungstechnik bewältigt die im Vergleich zu zweidimensionalen Bildern bis zu 30 000 Mal höhere Datenmenge nicht. Schon für eine statische 3D-Werbetafel beläuft sich letztere auf bis zu fünf Gigabyte. Das Fraunhofer ISIT entwickelt daher Hard- und Softwarekomponenten, um die nötigen Bandbreiten für die Darstellung zu ermöglichen. Aber auch mit Komprimierung verbleiben große Datenmengen, die vom Kunden sicher zur Werbetafel übertragen werden müssen: Hierfür entwickelt das Fraunhofer ESK eine maßgeschneiderte Softwarelösung.

Im Film lernt McFly noch andere Segnungen der Zukunft kennen: Einige davon, die Bildtelefonie oder eine minutengenaue Regenvorhersage, sind in der Wirklichkeit des 21. Jahrhunderts angekommen; andere sind noch immer Fiktion. Mit dem dynamischen 3D-Großdisplay hat Fraunhofer IPM eine weitere Zukunftsvision Hollywoods der Realität ein Stück näher gebracht.



Zu jeder Linse des Miniaturbildschirms führt eine eigene Bildleitfaser: So entsteht der Baustein für beliebig große 3D-Werbebildschirme mit bewegten Bildern.

OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

FLUORESZENZ FÜR EINE SAUBERE SACHE: BILDGEBENDE OBERFLÄCHENKONTROLLE

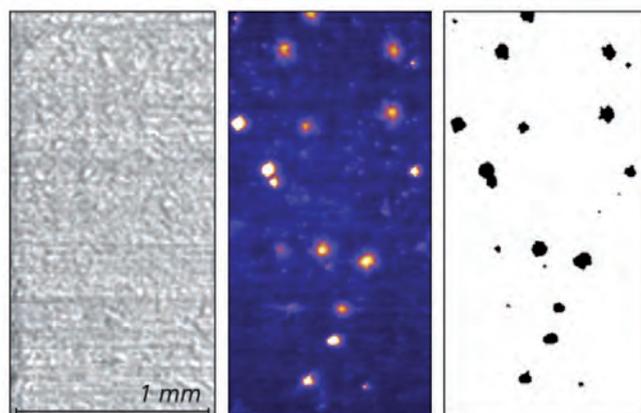
Ein winziger verschmutzter Metallkontakt kann beispielsweise in einem Kraftfahrzeug dafür verantwortlich sein, dass dieses von heute auf morgen nicht mehr funktioniert. Eine Reparatur ist aufwendig und teuer – muss doch der kleine Defekt erst einmal gefunden werden.

Damit solche Defekte gar nicht erst entstehen, hat Fraunhofer IPM ein bildgebendes Fluoreszenz-Messsystem entwickelt. Es sorgt für eine automatische Oberflächeninspektion direkt in der Produktionslinie. Denn in der Verbindungstechnik lautet das oberste Gebot: Nur reine Oberflächen lassen sich sorgfältig verbinden oder beschichten. Verschmutzte Metallkontakte werden nicht akkurat gebondet und unreine Oberflächen nicht sorgfältig beschichtet. Wer die Qualität des fertigen Produkts im Auge hat, prüft daher am besten direkt im Fertigungsprozess.

Das Fluoreszenz-Messsystem von Fraunhofer IPM misst Form, Position und Menge von Verunreinigungen oder Defekten innerhalb von 40 bis 100 Millisekunden berührungslos auf Flächen von 5×8 Quadratmillimetern bei einer Auflösung von 20 Mikrometern. Mit geeigneten Wellenlängen im UV-Bereich regt das System die Eigenfluoreszenz unerwünschter Substanzen an und detektiert bereits wenige Mikrogramm pro Quadratzentimeter mit einer Kamera. Im zweiten Schritt kontrolliert eine Mustererkennung automatisch in knapp 30 Millisekunden die Qualität der Oberfläche anhand eines zuvor definierten Grenzwerts. Überschreiten Defekte oder Verunreinigungen diesen Grenzwert, wird der nächste Prozessschritt angepasst: beispielsweise wird das Bauteil erneut gereinigt oder aber aussortiert. Auf diese Weise hilft die orts aufgelöste Auswertung, Produktionsabläufe optimal zu prüfen, zu dokumentieren und dadurch dauerhaft zu optimieren.

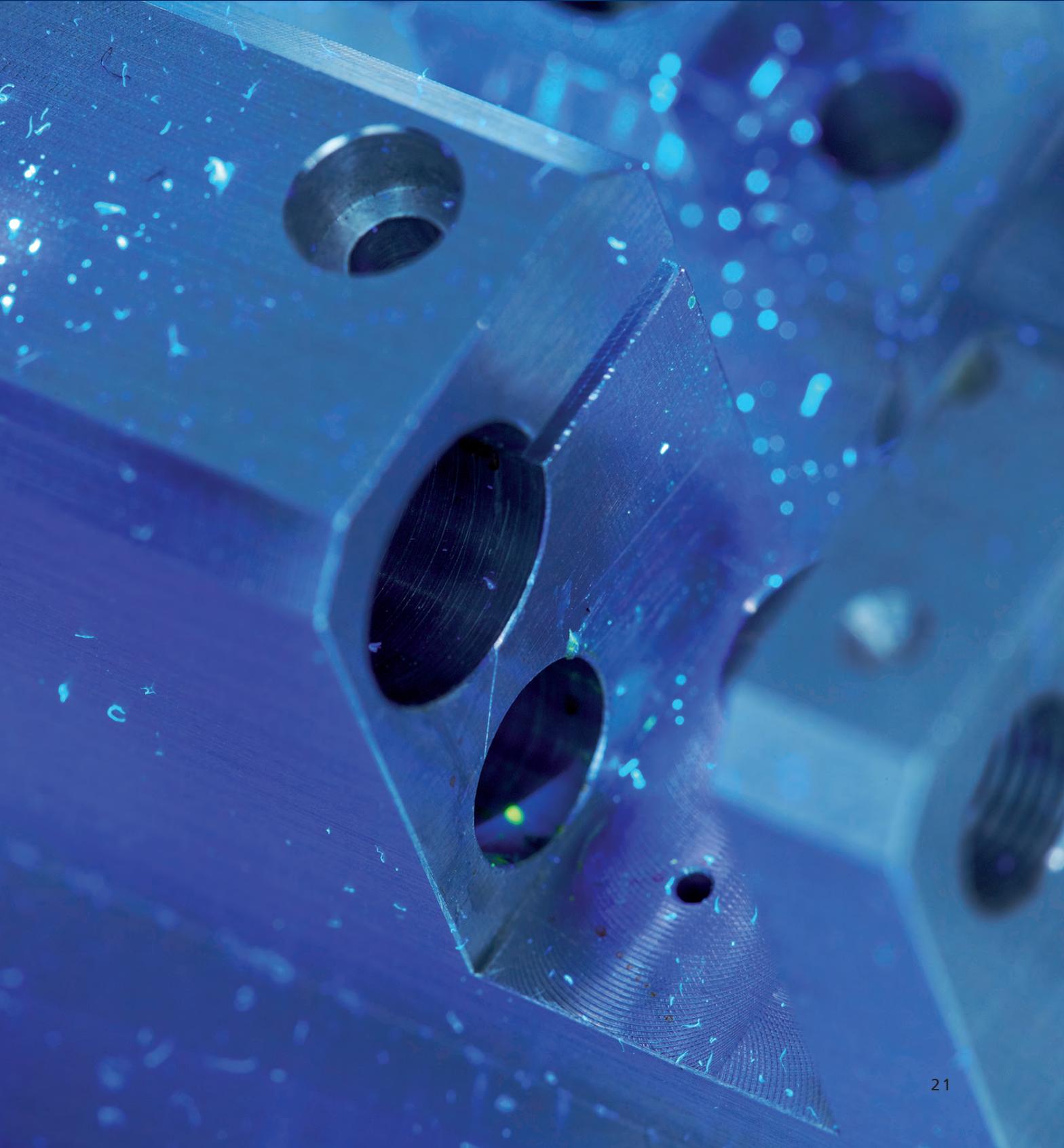
Auf einem Metallkontakt von $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ Größe sind bereits sehr geringe Mengen an Schmierölen zu viel für eine sorgfältige Weiterverarbeitung – sodass ein kleiner Metallkontakt am Ende große Probleme verursachen kann. Mit bloßem Auge oder einem Lichtmikroskop sind solche Mengen kaum oder nur schwer erkennbar. Das Fluoreszenz-Verfahren hingegen detektiert auch geringe Mengen an unerwünschten Rückständen wie z. B. Schmiermittel, Reinigungssubstanzen oder Fotolacke.

Das Fluoreszenz-Messsystem von Fraunhofer IPM ist bereits erfolgreich in der Prüfung von metallischen und anderen funktionalen Oberflächen sowie in photolithographischen Belichtungsprozessen im Einsatz. Messverfahren und Detektionsbereich werden flexibel an die Aufgabenstellung des Kunden angepasst. Je nach Spezifikation können auch deutlich größere Flächen überprüft werden. Mit vergleichsweise geringem Aufwand erzielt die Oberflächenkontrolle eine große Wirkung.



Das Messsystem erfasst die Reinheit metallischer Kontakte (links) durch ein bildgebendes Fluoreszenzverfahren (Mitte) und prüft mittels Mustererkennung (rechts), ob die Verunreinigung einen Grenzwert überschreitet.

*Mit Bildaufnahmen in bis zu 3 Milli-
sekunden inspiziert das Fluoreszenz-
Messsystem Oberflächen direkt in der
Produktionslinie.*



GESCHÄFTSFELD MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

THEMEN

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

KOMPETENZEN

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

KONTAKT

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

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

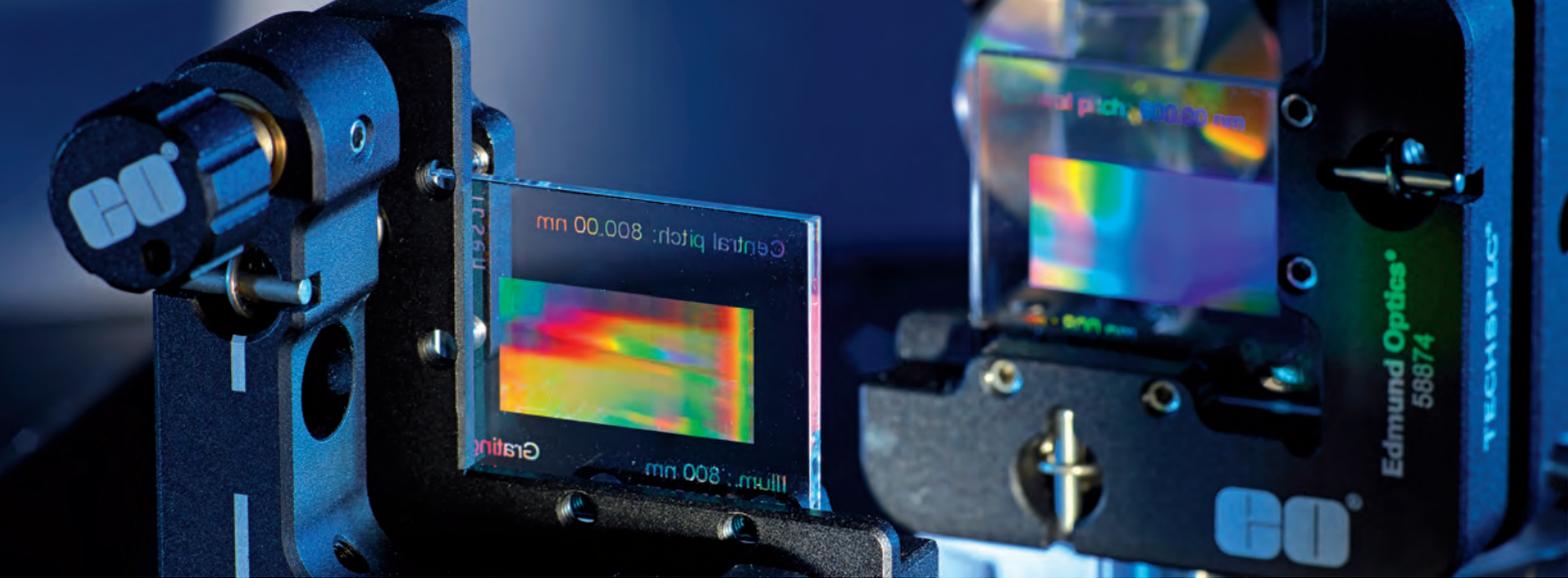
Prof. Dr. Georg von Freymann
Terahertz-Opto-Elektronik
Telefon +49 631 205-5225, georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de

▶ Charakterisierung und Prüfung
von Materialien online beauftragen

ServiceLab
Materialcharakterisierung und -prüfung



www.ipm.fraunhofer.de/servicelab/mc



MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

»Wir prüfen Materialien: berührungslos
und zerstörungsfrei«

Prof. Dr. Georg von Freymann

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

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

Industrielle Terahertz-Messtechnik

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

Terahertz-Opto-Elektronik

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

INDUSTRIELLE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

ZERSTÖRUNGSFREI PRÜFEN: TERAHERTZ-MESSTECHNIK FÜR MODERNE WERKSTOFFE

Die Flugzeugnase ist ein empfindliches Organ, das wichtige Messinstrumente wie das Navigations- und Wetterradar beherbergt. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen wird es vom sogenannten Radom geschützt, einer Bugverkleidung aus Glasfaserverbundwerkstoffen. Kleinste Unregelmäßigkeiten beim Aushärten des Kunstharzes – Einschlüsse von Fremdkörpern oder Luftblasen – können langfristig zu Rissen führen. Dringt hier Feuchtigkeit ein, wird der Signalempfang über das Radom gestört. Im EU-Projekt DOTNAC (Development and Optimisation of THz NDT on Aeronautics Composite Multi-layered Structures) entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus fünf Nationen einen Prototyp für ein Terahertz-Messsystem zur zerstörungsfreien Prüfung aeronautischer Verbundmaterialien aus mehrschichtigen Strukturen am Beispiel eines Testradoms. Das System soll Fehler sowohl während der Produktion als auch im Rahmen regelmäßiger Wartungen erkennen und etablierte Prüfmethode im Flugzeugbau – wie etwa Ultraschall- und Röntgenverfahren, Infrarotthermographie oder akustische Verfahren – ergänzen.



Die Terahertz-Messtechnik eignet sich zur Prüfung moderner Verbundmaterialien und soll im Flugzeugbau etablierte zerstörungsfreie Prüfmethode ergänzen.

Zwei unterschiedliche bildgebende Terahertz-Messverfahren in Reflexionsgeometrie wurden an modernen Werkstoffen getestet, um die jeweiligen Vor- und Nachteile gegenüber den herkömmlichen Prüfverfahren zu ermitteln. Die Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie (Time-Domain Spectroscopy, TDS) arbeitet mit breitbandigen THz-Wellen von 120 GHz bis 1,2 THz, die die Oberfläche des Radoms Punkt für Punkt abtasten. Ein auf diesem Prinzip basierender fasergekoppelter Sensor wurde von der TU Kaiserslautern aufgebaut. Aufgabe von Fraunhofer IPM war die Entwicklung eines frequenzmodulierten Dauerstrich-Radarsystems (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW), mit dem die Oberfläche des Radoms mit den Frequenzen 100, 150 und 300 GHz gescannt werden kann. Beide Systeme wurden an unterschiedlichen Proben getestet – z. B. an Kohle- und Glasfaserverbundstoffen, Schichtsystemen und Sandwichstrukturen mit simulierten Defekten.

Beide Sensoren wurden in einen 3D-Scanner nach industriellem Maßstab integriert. Eine »Motion Plattform« bewegt den aktuell montierten Sensor auf drei Achsen so, dass der Neigungswinkel zur gekrümmten Oberfläche des rotierenden Radoms stets gleich bleibt. Die Distanz zur Probe wird dabei über eine weitere Achse konstant gehalten. Die Systemintegration umfasste die mechanische, elektrische und softwareseitige Anbindung des TDS- sowie des FMCW-Sensors in die Scanner-Plattform.

Die Qualität der FMCW-Messungen kann mittels einer von Fraunhofer IPM entwickelten Datenfusionssoftware noch einmal deutlich gesteigert werden: Dabei werden die mit unterschiedlichen Messfrequenzen erzielten Ergebnisse auf rechnerischen Weg kombiniert, sodass sich eine virtuell höhere Eindringtiefe und eine bessere Tiefenaufklärung erzielen lassen.

TERAHERTZ-OPTO-ELEKTRONIK

OPTIK HILFT ELEKTRONIK: OPTISCHE MESSTECHNIK FÜR SCHNELLE ELEKTRONIK

Die Fortschritte in der Mikroelektronik waren in den vergangenen Jahrzehnten gigantisch. Smart-Phones beispielsweise sind heute deutlich leistungsfähiger, als es früher ganze EDV-Anlagen waren. Verantwortlich dafür sind immer leistungsfähigere und schnellere Elektronikkomponenten. Mittlerweile stoßen diese in Frequenzbereiche vor, die noch vor wenigen Jahren undenkbar waren. Schaltkreise mit Signalfrequenzen bis zu 760 GHz sind bereits entwickelt. Konventionelle Messtechnik ist nicht mehr in der Lage, Signale, die von derartigen Schaltkreisen produziert werden, zeitaufgelöst darzustellen. Wichtige Signalinformationen sind der heutigen Messtechnik daher unzugänglich: Kleine Signalfehler auf kurzen Zeitskalen, die nicht reproduzierbar in jedem Zyklus auftreten, sind genauso wenig messbar, wie schnelle, nicht periodische Signale. Fraunhofer IPM hat sich daher zum Ziel gesetzt, gemeinsam mit seinen Partnerinstituten IAF und ITWM ultraschnelle Messtechnik für solch hohe Frequenzen zu entwickeln.

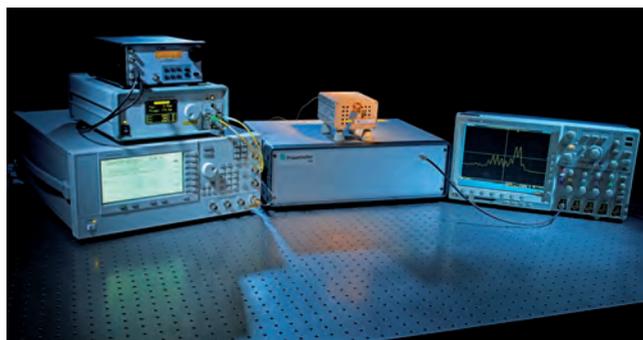
Die Messtechnik für höchstfrequente Signale im Grenzbereich zwischen Elektronik und Optik benötigt zum einen Funktionsgeneratoren mit Terahertz-Bandbreite, zum anderen Oszilloskope, die elektrische Signale mit Terahertz-Bandbreite messen können. Hier wird jeweils das gleiche Prinzip angewendet: Man wandelt elektronische Pulse in optische und umgekehrt.

Beim Funktionsgenerator »TeraGenerator« werden ultrakurze Lichtpulse aus einem Frequenzkamm durch Pulsformung derart modifiziert, dass sie den gewünschten Signalverlauf wiedergeben. Die Umwandlung dieses ultraschnellen optischen Signals in das gewünschte elektronische Signal erfolgt über photoleitende Schalter. Solche Schalter sind aus der Erzeugung und Detektion von Terahertz-Wellen bekannt und können bereits Bandbreiten bis in den Terahertz-Bereich sicherstellen. Der »TeraGenerator«

liefert Eingangssignale für ultraschnelle Schaltkreise, die dann beispielsweise verstärkt und verarbeitet werden.

Im Oszilloskop »TeraScope«, das elektrische Signale mit THz-Bandbreite messen kann, werden zeitlich kurze elektronische Signale einem Laserimpuls aufgeprägt. Dadurch lassen sich die Signale als Frequenzinformation weiterverarbeitet. Dieses Aufprägen gelingt durch Kombination ultraschneller elektro-optischer Wandler mit ultrakurzen Laserimpulsen. Zur späteren Detektion der Signale mit konventioneller Messelektronik wird die optisch vorliegende Information über dispersive Elemente – eine sogenannte Zeitlinse – zeitlich gestreckt.

Diese beiden ultraschnellen Messgeräte existieren derzeit erst als Prototypen, die bis in den Frequenzbereich von 0,1 THz messen können. Durch weitere Entwicklungsschritte, haben sie das Potenzial, die Messtechnik in der Höchstfrequenzelektronik zu revolutionieren. Welche Produkte und Technologien die Elektronikindustrie damit entwickeln und auf den Markt bringen wird? Lassen wir uns überraschen.



Das »TeraScope« prägt Laserimpulsen zeitlich kurze elektronische Signale auf. So sollen elektrische Signale mit THz-Bandbreite messtechnisch erschlossen werden.

GESCHÄFTSFELD OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

THEMEN

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

KOMPETENZEN

- ▶ 3D-Laserscanner, 3D-Kameras, 3D-Datenverarbeitung
- ▶ Erfassung bewegter Objekte auch bei 100 km/h
- ▶ schnelle Bildauswertung
- ▶ robuste Gehäusetechnologie

KONTAKT

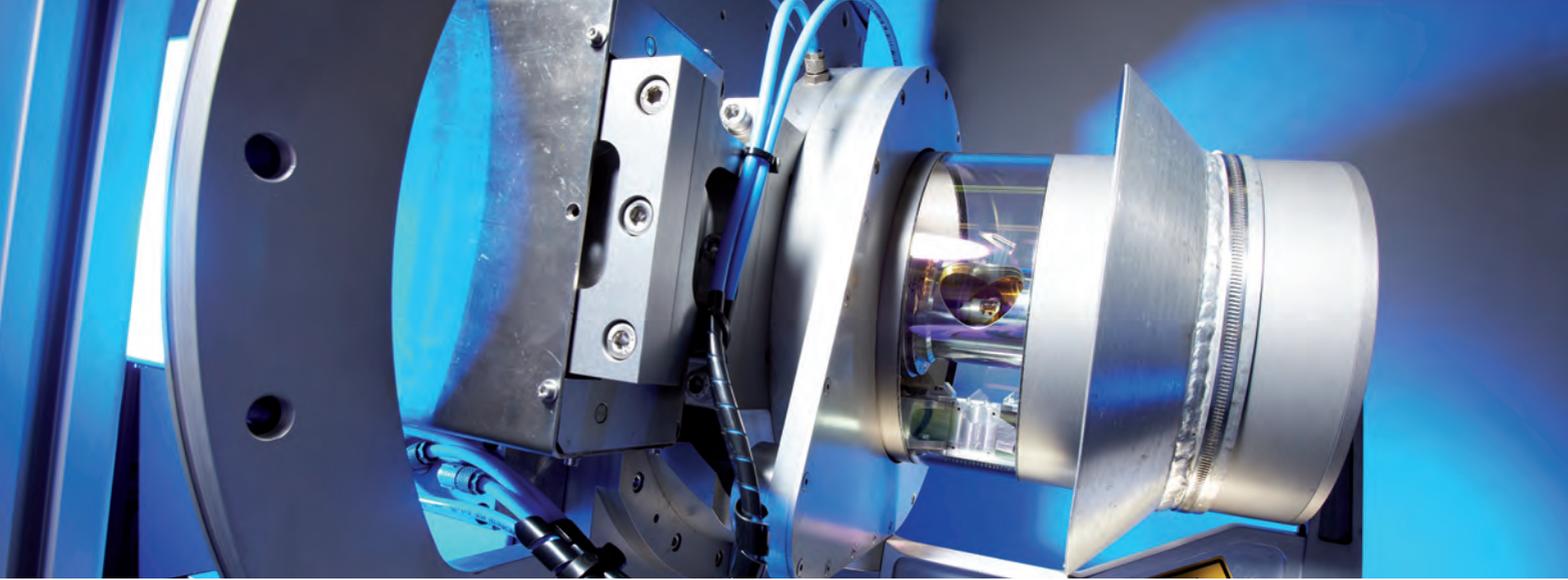
Dr. Heinrich Höfler, Abteilungsleiter

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

Dr. Alexander Reiterer

Laser Scanning

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



OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

»Wir erfassen Objekte und Formen mit Licht – auch bei hohen Geschwindigkeiten«

Dr. Heinrich Höfler

Laser-Scanner und maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamera-Systeme, die Geometrie und Lage von Objekten in der Umgebung dreidimensional erfassen, sind der Schwerpunkt im Geschäftsfeld Objekt- und Formerfassung. Die Systeme messen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision insbesondere von bewegten Plattformen aus. Besonderes Augenmerk liegt auf der Robustheit und langen Lebensdauer der Systeme

sowie einer effizienten Datenauswertung. Objekte und Formen werden über einen weiten Größenbereich erfasst: von zehntel Millimetern bis in den 10-Meter-Bereich. Die Messsysteme sind weltweit im Einsatz – im Bahnverkehr ebenso wie zur Vermessung von Straßenoberflächen. Hinzu kommen Spezialanwendungen in den Bereichen Sicherheit sowie Verkehr und Logistik.

Laser Scanning

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

LASER SCANNING

BLICK INS »SCHLÜSSELLOCH«: LAUFZEITMESSUNG IM LASERSCHWEISSPROZESS

Laserschweißen ist die Technik der Wahl, wenn es darum geht, Bauteile stabil und gleichzeitig optisch unauffällig zu verbinden. Um unerwünschte Durchschweißung zu vermeiden, muss die vorgegebene Einschweißtiefe exakt eingehalten werden. Dies zu prüfen ist bisher lediglich nachträglich, beispielsweise durch Röntgen, möglich. Fraunhofer IPM hat mit einem bildgebenden Verfahren bereits eine Regelung der Einschweißtiefe für bestimmte Laserschweißprozesse erreicht. In einem von der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH geförderten Projekt sind Wissenschaftler am Institut gemeinsam mit Kollegen des Instituts für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart das Problem nun mit einer geometrischen Tiefenmessung angegangen, die hohe Auflösungen in einem kleinen Messbereich möglich macht.

Aufschluss über die Einschweißtiefe gibt das sogenannte »Keyhole«, eine schlauchförmige Kapillare in Strahlrichtung, die während des Schweißprozesses entsteht. Die Tiefe des Keyholes ermitteln die Wissenschaftler nach dem Prinzip des Phasenlaufzeitverfahrens. Dabei durchläuft ein hochfrequent



Die Einschweißtiefe beim Laserschweißen lässt sich mithilfe von Lichtlaufzeitmessungen ermitteln. In Kombination mit einem konfokalen Messverfahren sollen zukünftig höhere Tiefenaufösungen erreicht werden.

modulierter Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 850 nm die Distanz bis zum Werkstück. Das reflektierte Licht wird von einem Detektor empfangen. Aus der Phasenverschiebung zwischen Sende- und Empfangssignal lässt sich anhand der Modulationswellenlänge und der Lichtgeschwindigkeit der Abstand zum Werkstück ermitteln.

Die besondere Geometrie des Keyholes erfordert einen speziellen optischen Aufbau: Der Hohlraum mit steilen Kanten und schmaler Form lässt sich nur mit einer koaxialen Messanordnung erfassen, bei der die optischen Achsen von Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang deckungsgleich sind. Ein oszillierender galvanometrischer Scanner lenkt den Messlaser in Richtung Schweißkopf, wo er mit dem Schweißlaser kombiniert wird. So wird zirka eintausend Mal pro Sekunde ein drei bis fünf Millimeter breites Profil quer zur Vorschubrichtung aufgenommen und eine kontinuierliche Referenzierung auf die Werkstückoberfläche ermöglicht.

Mit den Arbeiten im Projekt konnten die Wissenschaftler zeigen, dass sich die Einschweißtiefe im Laserschweißprozess grundsätzlich mittels Lichtlaufzeitmessung messen lässt. Faktoren, die die Qualität der Messung beeinträchtigen – wie etwa die Stauchung des Keyholes durch die Schmelzbadbewegung, Störlicht oder unerwünschte Reflexe – konnten weitgehend beseitigt werden. Allerdings reicht die Qualität der Messungen noch nicht für eine echte Prozessregelung. In einem Nachfolgeprojekt arbeitet das Entwickler-Team an einer Kombination aus Laufzeitverfahren und einem konfokalen Messverfahren, das deutlich höhere Tiefenaufösungen verspricht und die Nachteile der Laufzeitmessung im Nahbereich ausgleichen soll. Ziel ist es, in Zukunft neben der Einschweißtiefe auch Bohrtiefe, Materialabtrag und Fügeversatz in Laserbearbeitungsprozessen zu messen.

LASER SCANNING

STRASSEN IM PROFIL: LASERSCANNER MISST FAHRBAHNOBERFLÄCHEN

Im Vierjahresrhythmus erfassen Autobahn- und Straßenmeistereien den Zustand des Fernstraßennetzes. Mit strengen Vorgaben für die Messtechnik sorgt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) dafür, dass am Ende eine einheitliche Bewertung des Straßenzustands steht. Mit dem von Fraunhofer IPM entwickelten Pavement Profile Scanner PPS hat die BASt erstmals einen Messaufbau mit einem einzelnen Laserscanner zur Messung von Querebenen zeitlich befristet zugelassen. Integriert auf einem Messfahrzeug nimmt er zusammen mit weiteren Sensoren ein detailliertes Profil der Straßenoberfläche auf.

Gegenüber bisher eingesetzten Systemen bietet der von Fraunhofer IPM entwickelte Laserscanner zahlreiche Vorteile: Er misst das Querprofil der Straße über die volle Fahrbahnbreite von vier Metern mit einem einzigen Scanner. Herkömmliche Messsysteme arbeiten mit bis zu 40 Einzellasern, die an einem Querbalken am Messfahrzeug angebracht sind und eine maximale Breite von 3,3 Metern abdecken. Diese sperrige Messvorrichtung erweist sich als hinderlich im fließenden Verkehr und macht den Einsatz auf schmalen kommunalen Straßen unmöglich.

Die Scanner-Lösung liefert zudem deutlich genauere Messdaten: Der Pavement Profile Scanner erzeugt bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h bis zu 100 Messpunkte in einem Flächenareal von 10 cm × 10 cm. Das System misst die Entfernung zur Straßenoberfläche eine Million Mal pro Sekunde und arbeitet dabei nach dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Ein schnell rotierender Spiegel lenkt hierfür einen Laserstrahl 800 Mal pro Sekunde über die Straße und erzeugt jeweils ein Querprofil mit 900 Messpunkten. Aus den Abstandswerten, der Scanbewegung und der Fahrzeugbewegung wird ein dreidimensionales Bild der Straßenoberfläche generiert. Während nicht-scannende Einzellaser-Systeme im Querprofil lediglich alle

10 cm einen Messwert erfassen, liefert der Pavement Profile Scanner einen Messwert alle 5 mm quer zur Fahrtrichtung und erfasst so Verformungen wie beispielsweise Spurrinnen sehr genau.

Als technische Herausforderung erweist sich die dunkle Fahrbahnoberfläche, welche das Laserlicht nur sehr schwach reflektiert, und daher eine entsprechend hohe Laserleistung erfordert. Gleichzeitig soll der Laser uneingeschränkt im öffentlichen Raum einsetzbar sein. Um Augensicherheit und hohe Laserleistung in Einklang zu bringen, arbeitet der Pavement Profile Scanner mit einem Infrarotlaser mit einer Wellenlänge von über 1500 nm und erfüllt so die Anforderungen der Laserklasse 1.

Neben der Vermessung von Straßen setzt der Entwicklungspartner Lehmann + Partner GmbH das Gerät auch zur Bewertung nicht-staatlicher Verkehrsflächen ein: Unlängst ließ beispielsweise der Betreiber des Hamburger Flughafens die Ebenheit der Landebahn kontrollieren – für eine sichere und sanfte Landung der Flugzeuge.



Ein einziger Laserscanner misst das Querprofil der Fahrbahn auf einer Breite von vier Metern. Mit 800 Profilen pro Sekunde erreicht er eine hohe Genauigkeit.

GESCHÄFTSFELD GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

THEMEN

- ▶ Gasanalytik
- ▶ Partikelmesstechnik
- ▶ »Food Chain Management«

KOMPETENZEN

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

KONTAKT

Dr. Armin Lambrecht, Abteilungsleiter

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

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

Integrierte Sensorsysteme

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

Dr. Raimund Brunner

Spektroskopie und Prozessanalytik

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

Dr. Frank Kühnemann

Technologie Optischer Materialien

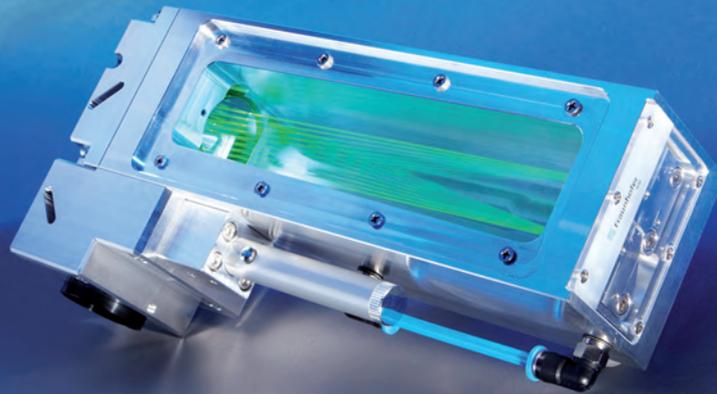
Telefon +49 761 8857-457, frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

▶ Messungen zur Gas- und
Prozesstechnologie online beauftragen

ServiceLab
Gas- und Prozesstechnologie



www.ipm.fraunhofer.de/servicelab/gp



GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

»Wir machen Verborgenes sichtbar und kontrollieren Prozesse«

Dr. Armin Lambrecht

Im Geschäftsfeld Gas- und Prozesstechnologie entwickelt und fertigt Fraunhofer IPM Mess- und Regelsysteme nach kundenspezifischen Anforderungen. Kurze Messzeiten, hohe Präzision und Zuverlässigkeit, auch unter extremen Bedingungen, zeichnen diese Systeme aus. Zu den Kompetenzen gehören unter anderem Laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Partikelmesstechniken zur Feinstaubanalyse, Prozessmesstechnik und die Cha-

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

Integrierte Sensorsysteme

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

Spektroskopie und Prozessanalytik

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

Technologie Optischer Materialien

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

SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

SCHNÜFFELN AUS SICHERER ENTFERNUNG: LECKSUCHE BEI BIOGASANLAGEN

Mehr als 7500 Biogasanlagen sind in Deutschland installiert. Dies stinkt nicht selten den Nachbarn. Sie klagen über Geruchsbelästigung, verursacht in erster Linie durch Leckagen. Austretendes Gas verbreitet nicht nur einen üblen Geruch, sondern birgt auch ein erhebliches Sicherheitsrisiko. Bereits kleinere Leckagen mindern zudem die Wirtschaftlichkeit der Anlagen und heben deren ökologischen Vorteil auf, denn Methan und Kohlendioxid als die Hauptbestandteile von Biogas wirken als besonders starke Treibhausgase.

Gemeinsam mit Fraunhofer UMSICHT und dem Messtechnik-Spezialisten Schütz Messtechnik GmbH arbeitet Fraunhofer IPM an einem optischen Messsystem, das Leckagen an Biogasanlagen aus mehreren Metern Entfernung ortet. Ziel ist ein bildgebendes System, das schneller, empfindlicher und preisgünstiger als heutige Messgeräte ist.



Ein optisches Messsystem ortet Leckagen an Biogasanlagen aus mehreren Metern Entfernung. Gemessen wird die thermische Strahlungsemission des Gases, die durch spezifisch eingestrahktes Laserlicht angeregt wird.

Handgehaltene schnüffelnde Geräte (Sniffer), die üblicherweise zur Gasdetektion eingesetzt werden, tasten Oberflächen aus einer Entfernung von wenigen Zentimetern punktuell ab – eine wenig praktikable Lösung für große, schwer zugängliche Anlagen. Für eine flächendeckende Ferndetektion von Gasleckagen werden daher heute Gaskameras eingesetzt, die austretendes Methan mittels Absorptionsspektroskopie nachweisen. Diese sind allerdings teuer, erfordern geschultes Personal und optimale Messbedingungen. Eine weitere Alternative sind laserbasierte Messgeräte, die nach dem Prinzip der Rückstreuungsspektroskopie arbeiten. Sie funktionieren jedoch nur bei geeigneter Hintergrundfläche als Rückstreuer empfindlich und zuverlässig. Damit sind Messungen gegen den freien Horizont nicht möglich. Für die Ortung und Dokumentation fehlt diesen Messsystemen zudem eine Bildgebung.

Die Wissenschaftler setzen für die Ferndetektion von Gas erstmals auf das von Fraunhofer IPM patentierte Prinzip der laserbasierten Emissionsspektroskopie und umgehen so das Problem der Rückstreuung. Zudem erweist sich die Emissionsspektroskopie als sehr gasspezifisch und wenig anfällig für Querempfindlichkeiten. In das Spektrum einer einzelnen Methanabsorptionslinie wird mit einem Quantenkaskadenlaser spezifisch Laserlicht eingestrahlt. Durch die Absorption wird das Molekül zu Schwingungen angeregt, die ihre Energie in Form von Wärmestrahlung abgeben. Ein infrarotempfindlicher Photodetektor misst die thermische Strahlungsemission und zeigt somit das Leck an. Eine integrierte Entfernungsmessung erlaubt es, den Methanhintergrund aus der Luft herauszurechnen und damit die Gaskonzentration zu bestimmen. Ziel ist sowohl ein handgehaltenes System für punktuelle Messungen zur Leckquantifizierung als auch ein Screening-Gerät zur Leckortung, das große Flächen schnell abtastet.

SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

MEHRWERT AUS MESSWERTEN: CHEMOMETRIE ERGÄNZT SPEKTROSKOPIE

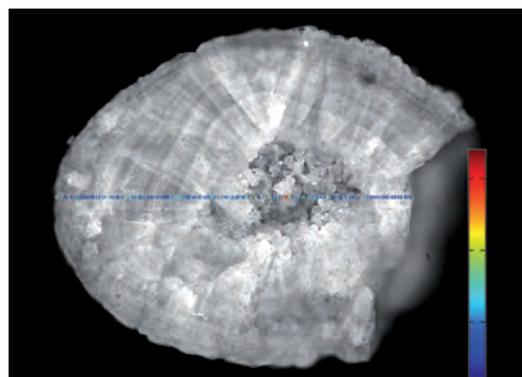
Moderne Spektrometer liefern eine große Menge an Messdaten. Nur mit effizienter Datenanalyse lässt sich ein Maximum an Information aus den Messdaten gewinnen. Fraunhofer IPM nutzt sogenannte chemometrische Verfahren, um chemische Informationen aus experimentellen Daten zu gewinnen. In Kooperation mit der Abteilung Urologie des Universitätsklinikums Freiburg wurden verschiedene chemometrische Verfahren zur Analyse von Nierensteinen entwickelt. Die Zusammensetzung der Steine wird nach der operativen Entfernung standardmäßig bestimmt, um die medikamentöse Nachsorge festzulegen. Diese Analyse erfolgt heute in der Regel in spezialisierten Labors mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie und liefert Ergebnisse erst nach bis zu drei Wochen. Wissenschaftler von Fraunhofer IPM arbeiten an einem System, das die extrahierten Steine vor Ort analysiert. So können weitere Therapieschritte unmittelbar besprochen werden, ohne dass eine erneute Vorstellung des Patienten notwendig ist.

Zur Analyse der Steine setzen die Entwickler auf die Raman-Spektroskopie, die unter den gegebenen Bedingungen mit vergleichsweise günstigen optischen Komponenten auskommt und auch problemlos bei wässrigen Proben funktioniert. So entfällt die bisher nötige aufwändige Probenpräparation. Zunächst wurde am Reinstoff geprüft, ob alle potenziellen Bestandteile von Nierensteinen ein verwertbares Raman-Signal liefern und welche Anregungswellenlänge ein günstiges Verhältnis zwischen Signal und Fluoreszenzhintergrund liefert.

Um die Zusammensetzung natürlicher Nierensteine zu analysieren, muss es gelingen, die gemessenen Spektren, die aus Signalen von bis zu zehn Einzelkomponenten zusammengesetzt sind, auf ihre Grundbestandteile zurückzuführen und Hintergrund- und Störsignale zu verwerfen. Chemometrische Verfahren wie

die multivariate lineare Regression, Hauptkomponentenanalysen oder Support-Vektor-Maschinen helfen, die spektralen Daten zu trennen und zu kategorisieren: Jedes der mit einer CCD-Kamera ausgelesenen Spektren besteht aus 1024 Intensitätswerten. Mit Hilfe statistischer Algorithmen werden signifikante Unterschiede zwischen den gemessenen Intensitätswerten ermittelt, aus denen sich Merkmals-Cluster ableiten lassen. Anhand dieser Cluster ist es möglich, echte Signale von Störsignalen zu trennen und einen Klassifizierungsalgorithmus zu trainieren, der auf Basis einer Trainingsbibliothek Analysen unbekannter Proben mit hoher Genauigkeit ermöglicht.

Wie nützlich die rechnerische Verarbeitung der Daten ist, zeigt das Problem des überlagernden Fluoreszenzhintergrundes bei der Messung der Nierensteine: Diesen mittels verschiedener Raman-Anregungswellenlängen zu eliminieren blieb erfolglos. Erst eine speziell entwickelte chemometrische Analyse konnte die störende Fluoreszenz softwareseitig entfernen und ermöglicht damit die OP-begleitende Harnsteinanalyse.



Für eine OP-begleitende Analyse von Harnsteinen setzt Fraunhofer IPM verschiedene chemometrische Verfahren ein.

INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

KOMMUNIZIERENDE KUGELN: GASSENSOREN WITTERN GEFAHR

Naturkatastrophen, Terroranschläge und Industrieunfälle haben eins gemein: Sie verursachen Chaos. Im Katastrophenfall ist die wichtigste Aufgabe die umfassende Suche nach Opfern und Gefahrenquellen. Rettungskräfte setzen dafür ihr Leben aufs Spiel und manchmal ist ein solcher Einsatz sogar nahezu unmöglich – wie im Fall Fukushima.

Um in Katastrophenfällen schnell und effizient zu reagieren, entwickeln die sechs Institute Fraunhofer IOSB, IAIS, IIS, IOSB-AST, IPA und IPM im Projekt SENEKA unterschiedliche Sensoren sowie mobile Luft- und Landroboter. Diese sollen anstelle von Rettungskräften das Gelände inspizieren und durch eine situationsabhängige, drahtlose Ad-hoc-Vernetzung untereinander eine umfassende Aufklärung über das Katastrophenumfeld geben.

Beispielsweise nach einem Chemieunfall können spezielle Sensorkugeln von Fraunhofer IPM Gase aufspüren, die für Rettungskräfte gefährlich sind. Die etwa tennisballgroßen Kugeln



Mobile Roboter streuen im Katastrophenfall miteinander vernetzte Sensorkugeln über das Gelände. Diese lokalisieren Gefahrenquellen wie giftige Gase oder Chemikalien und informieren die Rettungskräfte.

sind mit unterschiedlichen Sensortypen bestückt, die die Umgebung genau erfassen. Mobile Roboter streuen die Sensoren zunächst grob über das Katastrophengebiet. Vor Ort messen die Sensoren dann verschiedene Gase wie Ammoniak und Kohlenmonoxid sowie zusätzlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Mit diesen Daten lassen sich bereits erste Rückschlüsse auf giftige Gase, gefährliche Chemikalien oder mögliche Brandentwicklungen ziehen. Pro Sensorknoten soll ein 360° Anemometer inklusive Kompass Aufschluss über Windrichtung sowie Windgeschwindigkeit geben. Dadurch können die Sensorknoten nicht nur Gefahrenquellen lokalisieren, sondern auch die potenzielle Ausbreitung von Bränden oder Gaswolken berechnen.

In jedem der Sensorknoten ist eine Ortungseinheit basierend auf Funk und Ultraschall installiert, damit sich die Sensoren untereinander orten und die gemessenen Umgebungsparameter austauschen können. Das Sensornetzwerk fusioniert die Daten der einzelnen Sensoren nach dem Prinzip der Schwarmintelligenz und verknüpft sie miteinander zu einer Auswertung, so dass eine orts aufgelöste Darstellung der Gefahrenquellen im betroffenen Gebiet entsteht. Erhält die Einsatzleitung die Informationen, kann sie das weitere Vorgehen koordinieren.

Ein Sensornetzwerk für den Ernstfall muss möglichst kostengünstig sein: Denn je größer das Gebiet, desto mehr Sensoren werden benötigt und nach dem Rettungseinsatz lassen sich die Sensoren nicht immer bergen. Fraunhofer IPM entwickelt daher für diese Einsätze »Best Price-Sensoren«, die nicht nur kostengünstig in der Produktion sind, sondern auch einen sehr sparsamen Energieverbrauch haben und somit einen längeren oder mehrfachen Einsatz erlauben. Erprobt wird das SENEKA-Konzept anhand eines realitätsnah inszenierten Katastrophenfalls auf einem Testgelände des Technischen Hilfswerks ab nächstem Jahr.

TECHNOLOGIE OPTISCHER MATERIALIEN

AUS LICHT MACH SCHALL: MIT PHOTO-AKUSTIK LICHTABSORPTIONEN HÖREN

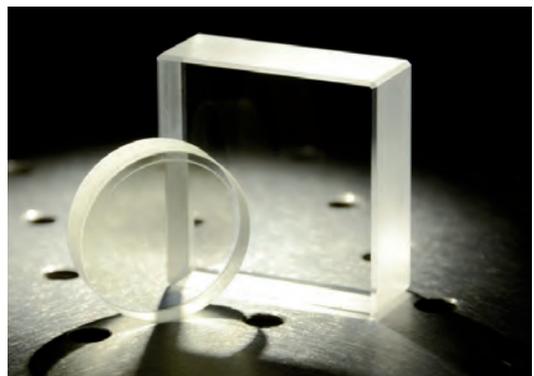
Laserpointer, Laserdrucker, Kraftfahrzeuge – täglich nutzen wir Produkte, die mit Lasern funktionieren oder mithilfe von Lasern gefertigt werden. Vor allem industrielle Anwendungen wie das Laserschweißen treiben die Entwicklung extrem leistungsstarker Laser voran. Dabei helfen optische Komponenten wie Linsen und Kristalle, das Laserlicht zu führen, zu fokussieren oder umzuwandeln. Diese optischen Komponenten halten allerdings mit der Entwicklung der Laser nicht immer Schritt. Hochleistungslaser mit optischen Standardkomponenten zu betreiben ist in etwa so, als würde man einen Sportwagen mit Rädern aus Holz ins Rennen schicken.

Dieser Rückstand liegt meistens an den optischen Materialien, aus denen die Komponenten bestehen. Selbst minimale »Färbungen« der Gläser, Polymere oder Kristalle, hervorgerufen durch geringe Restabsorptionen, können bei leistungsstarken Lasersystemen gravierende Folgen haben: Das optische System überhitzt, die Strahlführung geht verloren, im Extremfall wird gar die optische Komponente zerstört.

Um die optischen Komponenten auf den technischen Stand heutiger Hochleistungslaser zu bringen, muss daher die Reinheit der verwendeten Materialien kontrolliert werden. Hier ist der wichtigste Qualitätsindikator die Menge an Licht, die ein optisches Material beim Durchleuchten absorbiert. Diese Menge ist jedoch so gering, dass sie sich bei modernen optischen Materialien nicht direkt durch herkömmliche spektroskopische Verfahren erfassen lässt. Fraunhofer IPM setzt daher auf ein besonders empfindliches Messverfahren: Um das absorbierte Licht zu messen, nutzen die Wissenschaftler den sogenannten photoakustischen Effekt, den Alexander Graham Bell bereits 1880 entdeckte. Dabei wird das optische Material zunächst mit einem fokussierten Laserlichtpuls beleuchtet. Ein Teil des Lichts

wird absorbiert, wobei das Licht seine Energie an das Material abgibt. Dadurch erwärmt sich das Material lokal, dehnt sich aus und erzeugt eine Druckwelle. Dieser Schall wird mit einem hochempfindlichen Piezo-Sensor quasi »abgehört«. Dabei gilt: je lauter der Schall, desto unreiner das optische Material.

Durch das photoakustische Verfahren gelingt es den Wissenschaftlern, hundertmal kleinere Materialfärbungen nachzuweisen, als es mit Standardverfahren möglich ist. Der Photoakustik-Messplatz von Fraunhofer IPM zeichnet sich durch ein modernes abstimmbares Lasersystem aus, das Messungen über einen weiten Wellenlängenbereich ermöglicht: vom fernen UV über den gesamten sichtbaren Bereich bis ins Infrarot. Der absorbierte Wellenlängenbereich gibt Aufschluss über die Farbe und dadurch auch über die Art der Verunreinigung. Das ist eine entscheidende Information, um verbesserte optische Materialien herstellen zu können. So hilft die weitaus höhere Nachweisempfindlichkeit bei der Materialauswahl und Materialoptimierung, damit Lasersysteme auch bei hoher Leistung im Rennen bleiben.



Nur reine optische Komponenten halten extremer Laserleistung stand. Fraunhofer IPM setzt bei der Reinheitskontrolle optischer Materialien auf die Photoakustik.

GESCHÄFTSFELD ENERGIESYSTEME

THEMEN

- ▶ Umwandlung von Abwärme in elektrischen Strom
- ▶ metrologische Systeme
- ▶ energieautarke Sensorik und kabellose Sensornetzwerke

KOMPETENZEN

- ▶ Materialsynthese und -optimierung
- ▶ Hochtemperatur- und Nanomaterialien
- ▶ Entwicklung von Modulen, Konvertern und Systemen
- ▶ »Energy Harvesting«

KONTAKT

Dr. Kilian Bartholomé, Abteilungsleiter

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

Martin Jäggle

Energieautarke Systeme und Thermoelektrische Messtechnik

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

Jan König

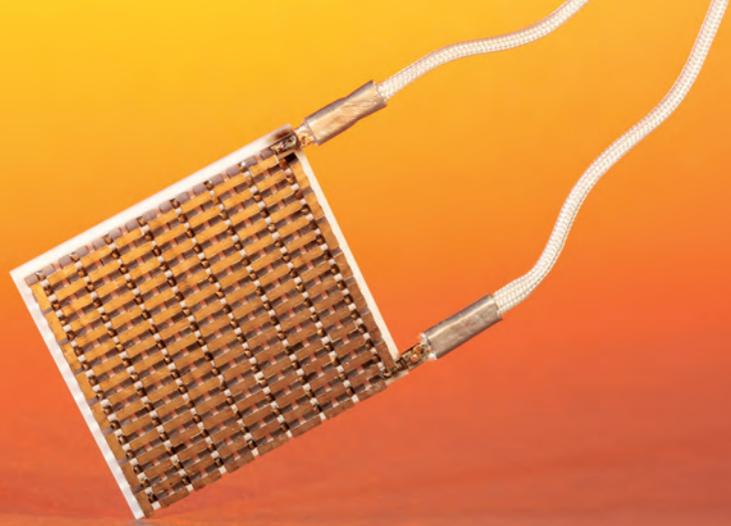
Thermoelektrische Energiewandler

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

▶ Messungen von Materialparametern für
die Thermoelektrik online beauftragen



www.ipm.fraunhofer.de/servicelab/es



ENERGIESYSTEME

»Wir machen Strom aus Abwärme«

Dr. Kilian Bartholomé

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

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

Energieautarke Systeme und Thermoelektrische Messtechnik

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

Thermoelektrische Energiewandler

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

THERMOELEKTRISCHE ENERGIEWANDLER

WERTVOLLE ABGASWÄRME: THERMOGENERATOREN SPAREN SPRIT

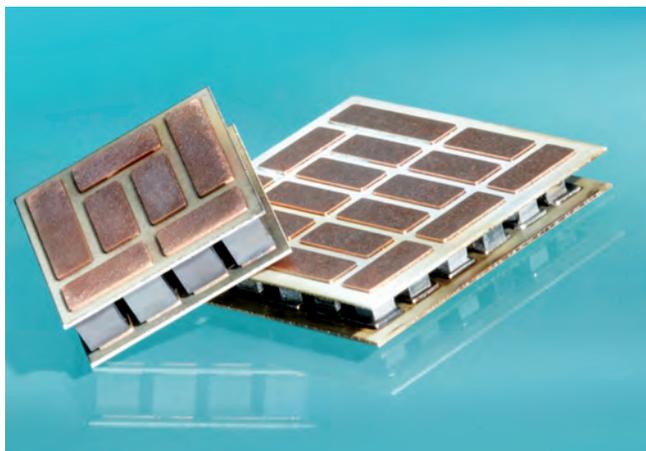
Bei vielen Verbrennungsprozessen gehen weit über 60 Prozent der Energie fossiler und nachwachsender Brennstoffe verloren. Ein Kraftfahrzeug beispielsweise nutzt zur Fortbewegung nur 30 Prozent der im Treibstoff chemisch gebundenen Energie. Die restliche Energie geht vor allem als Abwärme verloren. Thermoelektrische Generatoren machen diese bisher vergeudete Abwärme nutzbar, indem sie sie in elektrische Energie umwandeln.

Für die Abwärmenutzung im Automobil forscht Fraunhofer IPM an thermoelektrischen Materialien für den Aufbau von Thermogeneratoren. Das Prinzip solcher Generatoren basiert auf dem sogenannten Seebeck-Effekt: Durch den Wärmefluss von einer heißen Seite durch das thermoelektrische Material zu einer kalten Seite wird elektrischer Strom erzeugt. Die Leistungsfähigkeit der Generatoren hängt dabei in erster Linie von der Effizienz des thermoelektrischen Materials ab. In verschiedenen Projekten hat Fraunhofer IPM erfolgreich Bismutellurid, Blei-

tellurid, Skutterudite, Halbheusler-Legierungen und Silizide getestet. Die damit entwickelten Generatoren sind in breiten Temperaturbereichen einsetzbar und können somit eine größere elektrische Leistung generieren.

Einer der leistungsfähigeren Thermogeneratoren wurde nun in dem von der Europäischen Union geförderten Projekt »Heat-ReCar« gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Forschung entwickelt. Als thermoelektrisches Material wurde Bismutellurid verwendet. Der Generator ist in einem Kleintransporter mit Dieselmotor direkt am Abgasrohr angebracht. Aus der Abwärme des Abgases gewinnt er eine maximale Leistung von 500 Watt elektrische Energie.

Für die exakte Berechnung der Treibstoffeinsparung fanden Tests nach speziellen Fahrzyklen statt, die eine genormte Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Kraftfahrzeugen erlauben. In dem »Neuen Europäischen Fahrzyklus« (NEDC) erbrachte der thermoelektrische Generator eine Treibstoffeinsparung von 2,2 Prozent, was einer CO₂-Einsparung von 6,7 Gramm pro Kilometer entspricht. In dem weltweit genormten Zyklus »Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure« (WLTP) wurden sogar 3,9 Prozent Treibstoffersparnis und eine CO₂-Reduzierung von 9,6 Gramm pro Kilometer erreicht. Bismutellurid ist für Abgastemperaturen um 450 °C besonders gut geeignet. Für Pkw mit Ottomotoren, die mit höheren Verbrennungstemperaturen arbeiten und somit höhere Abgastemperaturen erzielen, erreichen thermoelektrische Module sogar noch höhere Wirkungsgrade. Dazu bedarf es sogenannter segmentierter Module, die aus Bismutellurid und geeigneten Hochtemperatur-Materialien wie z. B. Skutteruditen und Halbheusler-Legierungen zusammengesetzt werden. Noch 2013 werden segmentierte Module in Fahrzeugen getestet.



Im Automobil sparen thermoelektrische Module bisher bis zu 3,9 Prozent Treibstoff ein und reduzieren so den CO₂-Verbrauch um 9,6 Gramm pro Kilometer.

MAGNETISMUS MACHT'S MÖGLICH: HALL-MESSPLATZ MISST LADUNGSTRÄGER

Abwärme fällt in allen Bereichen des täglichen Lebens an – in der Industrie, im Haushalt und im Verkehr. Aus dieser ungenutzten Abwärme können thermoelektrische Module Strom erzeugen – emissionslos, geräuschlos und wartungsfrei. Die Effizienz der Module hängt dabei wesentlich vom Material und dessen Eigenschaften ab, unter anderem von der Anzahl, Art und Beweglichkeit der Ladungsträger. Um diese Materialparameter bei bis zu 650 °C bestimmen zu können, hat Fraunhofer IPM einen Hochtemperatur-Hall-Messplatz entwickelt. Denn moderne thermoelektrische Materialien werden inzwischen bei sehr hohen Umgebungstemperaturen eingesetzt.

Das Messprinzip basiert auf dem Hall-Effekt, den der amerikanische Physiker Edwin Herbert Hall 1879 entdeckte. Er beobachtete, dass elektrischer Strom in einem Leiter durch das Anlegen eines Magnetfeldes beeinflusst wird. Sind die Ladungsträger normalerweise gleichmäßig über das Material verteilt, erzeugt das Magnetfeld ein Ungleichgewicht in der Ladungsträgerverteilung. Dadurch entsteht eine Spannung, die Aufschluss darüber gibt, wie viele Ladungsträger sich im untersuchten Leitermaterial befinden, wie beweglich diese sind und welche Ladung sie haben.

In thermoelektrischen Halbleitern ist es üblich, die Ladungsträgerdichte durch Dotieratome zu beeinflussen. Dies sind Atome, die dem Halbleiter gezielt hinzugefügt werden, um die elektrische Leitfähigkeit des Materials zu erhöhen. Durch diese Erhöhung sinkt jedoch der Seebeck-Koeffizient, der die elektrische Spannung im thermoelektrischen Material angibt. Um die optimale Effizienz des thermoelektrischen Materials zu erreichen, müssen beide Parameter – der Seebeck-Koeffizienten und die Ladungsträgerkonzentration – gleichzeitig möglichst hohe Werte haben. Dazu müssen die Dotieratome sehr exakt »dosiert«

und ebenso exakt gemessen werden. Dies gleicht der Suche nach der Nadel im Heuhaufen, denn auf 1 000 000 thermoelektrische Materialatome kommt weniger als ein Dotieratom. Der Hochtemperatur-Hall-Messplatz von Fraunhofer IPM ist jedoch empfindlich genug, um den Einfluss dieser Dotieratome zu messen.

Dabei hat nicht nur die Dotierung, sondern auch die Temperatur einen Einfluss auf die Anzahl der Ladungsträger: Je höher die Temperatur, desto mehr Ladungsträger werden aktiviert. In hohen Temperaturbereichen von 600 °C gab es bisher noch kein kommerziell erhältliches Hall-Messsystem. Fraunhofer IPM hat daher speziell für die Hall-Messung von 20 bis 650 °C den neuen Messplatz »IPM-HT-Hall« entwickelt – ein wichtiges Werkzeug für die Steigerung der Effizienz thermoelektrischer Materialien. Die maximale Arbeitstemperatur soll bis Ende des Jahres auf 800 °C erweitert werden.



Der Hochtemperatur-Hall-Messplatz von Fraunhofer IPM bestimmt bei Temperaturen von 20 – 650 °C die Anzahl, Art und Beweglichkeit der Ladungsträger in Halbleitern.

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 66 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen. Rund 22 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,9 Milliarden Euro. Davon fallen 1,6 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Euro-

pas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

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

www.fraunhofer.de

Fraunhofer IPM

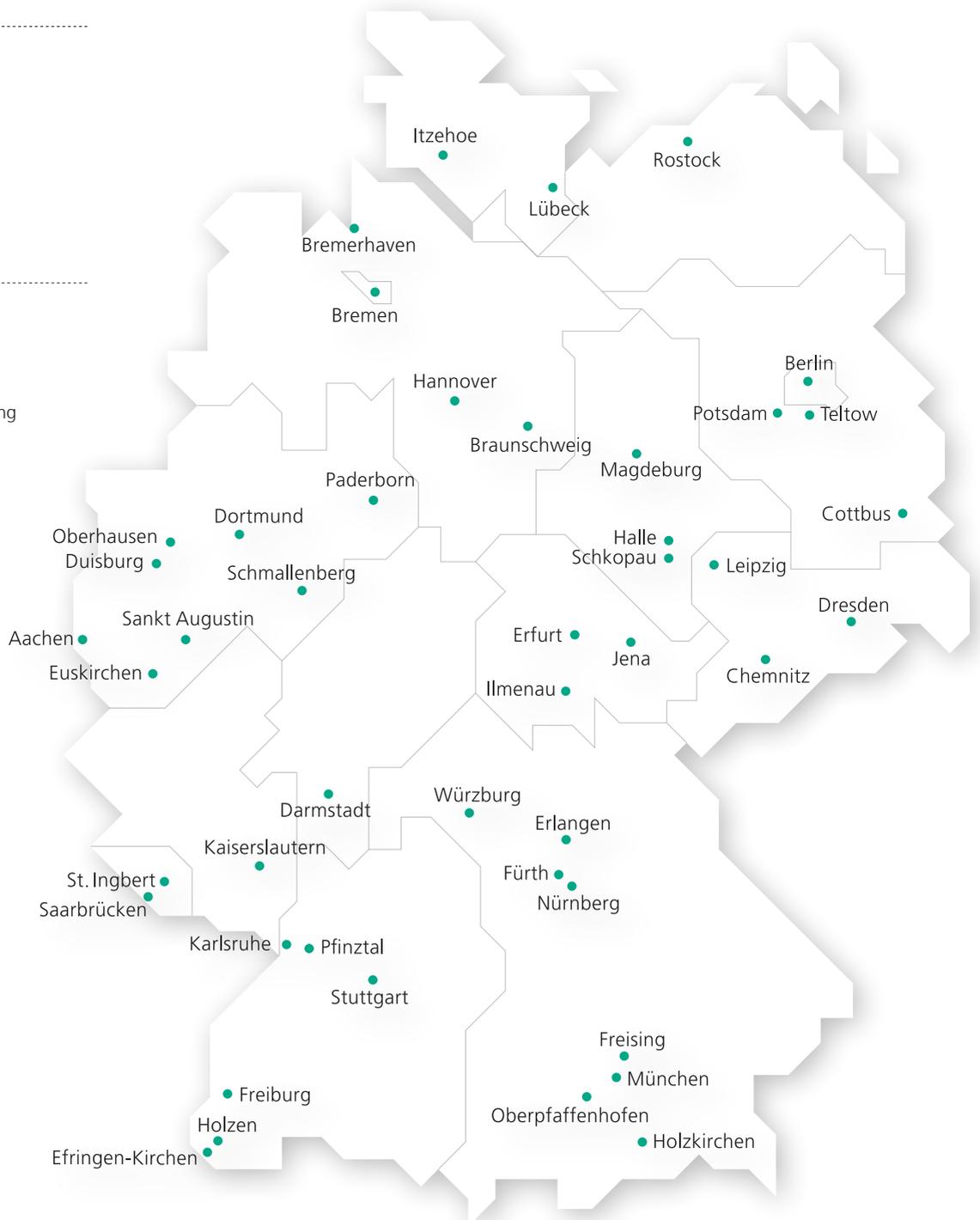
Freiburg

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8
79110 Freiburg
Telefon +49 761 8857-0
Fax +49 761 8857-224

Kaiserslautern

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

www.ipm.fraunhofer.de



Brook, A.; Cristofani, Edison; Vandewal, Marijke; Matheis, Carsten; Jonuscheit, Joachim

3D radar image processing methodology for Non-Destructive Testing of aeronautics composite materials and structures

2012 IEEE Radar Conference, RADAR 2012. Proceedings Vol.2 , 806 (2012)

Brook, A.; Cristofani, E.; Vandewal, M.; Matheis, C.; Jonuscheit, J.; Beigang, R.

A 3D THz image processing methodology for a fully integrated, semi-automatic and near real-time operational system

Terahertz physics, devices, and systems VI , Art. 8363 OE (2012)

Molter, D.; Torosyan, G.; Klier, J.; Matheis, C.; Petermann, C.; Weber, S.; Ellrich, F.; Jonuscheit, J.; Beigang, R.

All-solid-state THz ATR spectroscopy module

3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology: TST 2012. CD-ROM

Pelz, U.; Kaspar, K.; Schmidt, S.; Dold, M.; Jäggle, M.; Pfaadt, A.; Hillebrecht, H.

An aqueous-chemistry approach to nano-bismuth telluride and nano-antimony telluride as thermoelectric materials

Journal of Electronic Materials 41 (6), 1851 (2012)

Kontermann, S.; Ruf, A.; Preu, R.

Atomistic simulations of the silicon surface structure at the interface of silver thick film contacts on n-type silicon

Advanced materials processing for scalable solar-cell manufacturing , 131 (2012)

Feige, V.K.S.; Berta, M.; Ellrich, F.; Jonuscheit, J.; Beigang, R.

Berührungslose Mehrlagen-Schichtdickenmessung industrieller Beschichtun-

gen mittels THz-Messtechnik

Technisches Messen : TM 79 (2), 87 (2012)

Werner, C.S.; Beckmann, T.; Buse, K.; Breunig, I.

Blue-pumped whispering gallery optical parametric oscillator

Optics Letters 37 (20), 4224 (2012)

Petermann, Christian

Breitbandspektroskopie mit Superkontinuum-Quellen

Ellrich, Frank; Torosyan, Garik; Wohnsiedler, Sabine; Bachtler, Sebastian; Hachimi, A.; Jonuscheit, Joachim; Beigang, René; Platte, F.; Nalpantidis, K.; Sprenger, T.; Hübsch, D.

Chemometric tools for analysing Terahertz fingerprints in a postscanner

37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2012 , 2 (2012)

Herrmann, M.; Platte, F.; Nalpantidis, K.; Beigang, R.; Heise, H.M.

Combination of Kramers-Kronig transform and time-domain methods for the determination of optical constants in THz spectroscopy

Vibrational spectroscopy 60, 107 (2012)

Zouaghi, W.; Ospald, F.; Molter, Daniel; Beigang, René

Comparison of high-speed terahertz optical sampling techniques at different wavelengths

37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2012 , 2 (2012)

Ospald, F.; Zouaghi, W.; Rämmer, J.-M.; Beigang, René

Comparison of THz emitters and detectors pumped at 1560 nm: DAST, ErAs:InGaAs and LTG GaAs

37th International Conference on Infrared,

Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2012 , 2 (2012)

Paul, O.; Urzhumov, Y.; Elsen, C.; Smith, D.; Rahm, M.

Construction of invisibility cloaks of arbitrary shape and size using planar layers of metamaterials

Journal of applied physics 111 (12), Art.123106, 8 (2012)

Jacquot, A.; Bayer, B.; Winkler, M.; Böttner, H.; Jaegle, M.

Coupled theoretical interpretation and experimental investigation of the anisotropy of the lattice thermal conductivity of Bi₂Te₃ single crystal

Journal of solid state chemistry 193

Jacquot, A.; Bayer, B.; Winkler, M.; Jaegle, M.

Coupled theoretical interpretation and experimental investigation of the lattice thermal conductivity of Bi₂Te₃ single crystal

9th European Conference on Thermoelectrics, ECT 2011 , 61 (2012)

Gerhard, M.; Theuer, M.; Beigang, R.

Coupling into tapered metal parallel plate waveguides using a focused terahertz beam

Applied Physics Letters 101 (4), Art. 041109, 4 (2012)

Paul, Oliver; Rahm, Marco

Covariant description of transformation optics in nonlinear media

Optics Express 20 (8), 8982 (2012)

Winkler, Markus; Liu, Xi; Schürmann, Ulrich; König, Jan D.; Kienle, Lorenz; Bensch, Wolfgang; Böttner, Harald

Current Status in Fabrication, Structural and Transport Property Characterization, and Theoretical Understanding of Bi₂Te₃ / Sb₂Te₃ Superlattice Systems

Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie 638 (15), 2441 (2012)

Vandewal, M.; Depauw, J.; Rombaut, K.; Beigang, R.; Jonuscheit, J.; Mounaix, P.; Sáez de Ocariz, I.; Martinez Edo, R.; Priegue, A.; Sternberg, Y.

Development and optimization of THz NDT on aeronautics composite multi-layered structures

Terahertz physics, devices, and systems VI , Art. 8363 0Y (2012)

Carl, Daniel; Fratz, Markus; Giel, Dominik; Höfler, Heinrich

Digital-holographischer Mehrwellenlängensensor HoloTop zur 100-Prozent-Kontrolle von Oberflächen

Technisches Messen : TM 79 (11), 489 (2012)

Blug, Andreas; Abt, Felix; Nicolosi, Leonardo

Echtzeit-Regelung mittels schneller Bildverarbeitung optimiert das Laserschweißen

Photonik 44 (6), 42 (2012)

Winkler, M.; Liu, X.; König, J.; Buller, S.; Schürmann, U.; Kienle, L.; Bensch, W.; Böttner, H.

Electrical and structural properties of Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ thin films grown by the nanoalloying method with different deposition patterns and compositions

Journal of Materials Chemistry 22 (22), 11323 (2012)

Ospald, F.; Zouaghi, W.; Rämer, J.-M.; Beigang, R.

Emitters and detectors for a THz time domain material inspection system pumped at 1560 nm

3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology: TST 2012. CD-ROM

Rahm, M.; Akalin, T.; Nahata, A.; Beruete, M.

Focus on terahertz plasmonics: In memory of Professor Mario Sorolla Ayza

New journal of physics. Online journal 14 (Editorial)

Petermann, Christian; Beigang, René; Fischer, Peer

Fourier-transform photocurrent spectroscopy using a supercontinuum light source

Applied Physics Letters 100 (6), Art. 061108, 3 (2012)

Blug, A.; Abt, F.; Nicolosi, L.; Heider, A.; Weber, R.; Carl, D.; Höfler, H.; Tetzlaff, R.

The full penetration hole as a stochastic process: Controlling penetration depth in keyhole laser-welding processes

Applied Physics. B 108 (1), 97 (2012)

Luedtke, F.; Buse, K.; Sturman, B.

Hidden reservoir of photoactive electrons in LiNbO₃ crystals

Physical review letters 109 (2), Art. 026603 (2012)

Schumacher, Soeren; Nestler, Jörg; Otto, Thomas; Wegener, Michael; Ehrentreich-Förster, Eva; Michel, Dirk; Wunderlich, Kai; Palzer, Silke; Sohn, Kai; Weber, Achim; Burgard, Matthias; Grzesiak, Andrzej; Teichert, Andreas; Brandenburg, Albrecht; Koger, Birgit; Albers, Jörg; Nebling, Eric; Bier, Frank F.

Highly-integrated lab-on-chip system for point-of-care multiparameter analysis

LAB on a chip 12 (3), 464 (2012)

Herbst, Johannes; Scherer, Benjamin; Ruf, Alexander; Erb, Jochen; Lambrecht, Armin

Hollow fiber based quantum cascade laser spectrometer for fast and sensitive drug identification

Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX , Paper 82681Q (2012)

Schürmann, U.; Winkler, M.; König, J.; Liu, X.; Duppel, V.; Bensch, W.; Böttner, H.; Kienle, L.

In Situ TEM investigations on thermoelectric Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ multilayers

Advanced engineering materials 14 (3), 139 (2012)

Jonuscheit, J.

In the news: THz spectrometer tests substances

Trends in analytical chemistry 36, IX (2012)

Cristofani, Edison; Vandewal, Marijke; Matheis, Carsten; Jonuscheit, Joachim

In-depth high-resolution SAR imaging using Omega-k applied to FMCW systems

2012 IEEE Radar Conference, RADAR 2012. Proceedings Vol.2 , 725 (2012)

Konz, Werner

Integrated total analysis systems

Comprehensive sampling and sample preparation. Analytical techniques for scientists. Vol.1: Sampling Theory and Methodology , 99 (2012)

Bessas, D.; Sergueev, I.; Wille, H.C.; Persson, J.; Ebling, D.; Hermann, R.P.

Lattice dynamics in Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃: Te and Sb density of phonon states

Physical Review. B 86 (22), Art.224301, 9 (2012)

Schmitt, Katrin; Rist, Jonas; Peter, Carolin; Wöllenstein, Jürgen

Low-cost fiber-optic waveguide sensor for the colorimetric detection of ammonia

Microsystem Technologies 18 (7-8), 843 (2012)

Schmitt, K.; Rist, J.; Peter, C.; Wöllenstein, J.

Low-cost fiber-optic waveguide sensor for the colorimetric detection of ammonia

Microsystem Technologies 18 (7-8), 843 (2012)

Peter, Carolin; Schmitt, Katrin;
Apitz, Martin; Wöllenstein, Jürgen

Metallo-porphyrin zinc as gas sensitive material for colorimetric gas sensors on planar optical waveguides

Microsystem Technologies 18 (7-8),
925 (2012)

Reinhard, B.; Schmitt, K.M.; Wollrab, V.;
Neu, J.; Beigang, R.; Rahm, M.

Metamaterial near-field sensor for deep-subwavelength thickness measurements and sensitive refractometry in the terahertz frequency range

Applied Physics Letters 100 (22),
Art. 221101, 4 (2012)

Reinhard, B.; Fip, T.; Volk, M.;
Schmitt, K.M.; Neu, J.; Hoeh, M.; Rahm, M.

Metamaterial Terahertz Transmission Optics and Surface Waves

3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology: TST 2012. CD-ROM

Satzer, Britta; Baulig, Claudia;
Sandner, Thilo; Schwarzer, S.

Micromirror-based sending and detection optical assembly for time-of-flight laser scanners

Optical Sensing and Detection II ,
Paper 84390Z (2012)

Pfeifer, Marcel; Fischer, Peer;
Lüdeke, Steffen

Mid-IR laser-based vibrational optical activity

Biomedical Vibrational Spectroscopy V.
Advances in Research and Industry ,
Paper 821906 (2012)

Miniaturized thermoelectric converters, technologies, and applications

Thermoelectrics and its Energy Harvesting.
Vol.2: Modules, Systems, and Applications
in Thermoelectrics , 17/1 (2012)

Breunig, Ingo; Beckmann, Tobias;
Buse, Karsten

Monolithic optical parametric oscillators

Laser Resonators, Microresonators, and
Beam Control XIV , Paper 82360S (2012)

Nicolosi, Leonardo; Tetzlaff, Ronald;
Abt, Felix; Blug, Andreas; Höfler, Heinrich

Multi-feature detection for quality assessment in laser beam welding: Experimental results

13th International Workshop on Cellular
Nanoscale Networks and their Applications,
CNNA 2012 , 6 (2012)

Aabdin, Z.; Peranio, N.; Eibl, O.; Töllner, W.;
Nielsch, K.; Bessas, D.; Hermann, R.P.;
Winkler, M.; König, J.; Böttner, H.;
Pacheco, V.; Schmidt, J.; Hashibon, A.;
Elsässer, C.

Nanostructure, excitations, and thermoelectric properties of Bi₂Te₃-based nanomaterials

Journal of Electronic Materials 41 (6),
1792 (2012)

Eine neue Form von Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy

Technisches Messen : TM 79 (1), 10 (2012)

Reiterer, Alexander; Dambacher, Martin;
Maindorfer, Ingo; Höfler, Heinrich; Ebers-
bach, Dirk; Frey, Carsten; Scheller, Steffen;
Klose, Dirk

Neue Laserscanner-Technologie zur Ebenheitsmessung von Straßenbelägen

VDV-Magazin 63 (5), 376 (2012)

Nicolosi, L.; Abt, F.; Blug, A.; Heider, A.;
Tetzlaff, R.; Höfler, H.

A novel spatter detection algorithm based on typical cellular neural network operations for laser beam welding processes

Measurement Science and
Technology 23 (1), Art. 015401, 8 (2012)

Blug, Andreas; Strohm, Peter; Carl, Daniel;
Höfler, Heinrich; Blug, Bernhard;
Kailer, Andreas

On the potential of current CNN cameras for industrial surface inspection

13th International Workshop on Cellular
Nanoscale Networks and their Applications,
CNNA 2012 , 6 (2012)

Beckmann, Tobias; Buse, Karsten;
Breunig, Ingo

Optimizing pump threshold and conversion efficiency of whispering gallery optical parametric oscillators by controlled coupling

Optics Letters 37 (24), 5250 (2012)

Brunner, R.; Lambrecht, A.; Herbst, J.;
Heubuch, A.; Jacob, E.

Quantenkaskadenlaser-Spektrometer für die schnelle und artefaktfreie Abgasanalyse

7. Internationales Forum Abgas- und
Partikelemissionen 2012. Beiträge ,
110 (2012)

Miernik, A.; Wilhelm, K.; Bolwien, C.; Eilers,
Y.; Lambrecht, A.; Schönthaler, M.

Raman spectroscopy: In-vitro analysis of urinary stone composition at different excitation wavelengths

European urology. Supplements 11 (1),
E102 (2012)

Peranio, N.; Winkler, M.; Aabdin, Z.;
König, J.; Böttner, H.; Eibl, O.

Room temperature MBE deposition of Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ thin films with low charge carrier densities

Physica status solidi. A 209 (2), 289 (2012)

Peranio, N.; Winkler, M.; Bessas, D.;
Aabdin, Z.; König, J.; Böttner, H.;

Hermann, R.P.; Eibl, O.

Room-temperature MBE deposition, thermoelectric properties, and advanced structural characterization of binary Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ thin films

Journal of alloys and compounds 521, 163 (2012)

Aabdin, Z.; Peranio, N.; Winkler, M.; Bessas, D.; König, J.; Hermann, R.P.; Böttner, H.; Eibl, O.

Sb₂Te₃ and Bi₂Te₃ thin films grown by room-temperature MBE

Journal of Electronic Materials 41 (6), 1493 (2012)

Strohm, Peter; Blug, Andreas; Carl, Daniel; Höfler, Heinrich

Schnelle 100-Prozent-Oberflächenkontrolle in der Produktion mit Zellularen Neuronalen Netzwerken

Automatisierungstechnik : AT 60 (5), 289 (2012)

Kuntze, Helge-Björn; Frey, Christian W.; Tchouchenkov, Igor; Staehle, Barbara; Rome, Erich; Pfeiffer, Kai; Wenzel, Andreas; Wöllenstein, Jürgen

SENEKA – sensor network with mobile robots for disaster management

IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, HST 2012 , 5 (2012)

Lerch, R.; Werthschützky, R.; Wagner, E.; Gerlach, G.

SENSOR + TEST Konferenzen 2011 in Nürnberg

Technisches Messen : TM 79 (1), 3 (2012)

Weis, P.; Garcia-Pomar, J.L.; Hoh, M.; Reinhard, B.; Brodyanski, A.; Rahm, M.

Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene

ACS nano 6 (10), 9118 (2012)

Knabe, Bastian; Buse, Karsten; Assenmacher, Wilfried; Mader, Werner

Spontaneous polarization in ultrasmall lithium niobate nanocrystals revealed by second harmonic generation

Physical Review. B 86 (19), Art.195428, 9 (2012)

Winkler, M.; Liu, X.; König, J.; Kirste, L.; Böttner, H.; Bensch, W.; Kienle, L.

Sputtered p-type Sb₂Te₃/(Bi,Sb)₂Te₃ soft superlattices created by nanoalloying

Journal of Electronic Materials 41 (6), 1322 (2012)

Fuchs, F.; Hugger, S.; Kinzer, M.; Yang, Q.K.; Bronner, W.; Aidam, R.; Degreif, K.; Rademacher, S.; Schnürer, F.; Schweikert, W.

Standoff detection of explosives with broad band tunable external cavity quantum cascade lasers

Quantum Sensin and Nanophotonic Devices IX , Paper 82681N (2012)

Molter, D.; Torosyan, G.; Ballon, G.; Drigo, L.; Lötin, J.; Beigang, R.

Step-scan terahertz time-domain magneto-optics

3rd EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology: TST 2012. CD-ROM

Molter, D.; Torosyan, G.; Ballon, G.; Drigo, L.; Beigang, R.; Leotin, J.

Step-scan time-domain terahertz magneto-spectroscopy

Optics Express 20 (6), 5993 (2012)

Schmitt, Klemens; Wollrab, Viktoria; Neu, Jens; Beigang, René; Rahm, Marco

Terahertz thin film and refractive index sensing with a metamaterial near-field sensor

37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2012 , 2 (2012)

Molter, D.; Theuer, M.; Jonuscheit, J.; Torosyan, G.; Beigang, R.

Terahertz-Spektroskopie: Messung von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern

GI. Labor-Fachzeitschrift (6), 446 (2012)

Hinsche, N.F.; Yavorsky, B.Y.; Gradhand, M.; Czerner, M.; Winkler, M.; König, J.; Böttner, H.; Mertig, I.; Zahn, P.

Thermoelectric transport in Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ superlattices

Physical Review. B 86 (8), Art. 085323, 13 (2012)

Lenz, E.; Haupt, S.; Edler, F.; Ziolkowski, P.; Pernau, H.-F.

Traceable measurements of electrical conductivity and Seebeck coefficient of β -Fe_{0.95}Co_{0.05}Si₂ and Ge in the temperature range from 300 K to 850 K

Physica status solidi. C 9 (12), 2432 (2012)

Jonuscheit, J.; Molter, D.; Ellrich, F.; Beigang, R.; Platte, F.; Nalpantidis, K.

Unsichtbares sichtbar machen – versteckte Substanzen mittels Terahertz-Spektroskopie identifizieren

Photonik (6), 58 (2012)

Strohm, Peter; Blug, Andreas; Carl, Daniel; Höfler, Heinrich

Zellulare Neuronale Netzwerke zur schnellen bildbasierten Regelung von Materialbearbeitungsprozessen

Technisches Messen : TM 79 (3), 152 (2012)

IMPRESSUM

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, Verena Schreiber, Anja Strobel

Gestaltung

emigre | Christian Lampe,
Freiburg, www.emigre.de

Bildquellen

Kai-Uwe Wudtke/Fraunhofer IPM (Titel, S. 21, 27, 31, 34,
37, 38, 39); Felix Groteloh/Fraunhofer IPM (S. 5); Klaus
Polkowski/Fraunhofer IPM (S. 6, 14, 15); NASA (S. 8);
Berthold Leibinger Stiftung GmbH (S. 10, 28); M. Gillert
(S. 11); Thomas Brenner/Fraunhofer IPM (S. 23, 25); Air-
bus S.A.S. (S. 24); Lehmann+Partner GmbH (S. 29)

Druck

Poppen & Ortmann KG,
www.poppen-ortmann.de

Dieser Bericht wurde auf klimaneutral hergestelltem
Papier gedruckt.

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

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der
Redaktion erforderlich.



