

2015
2016
JAHRESBERICHT

MESSEN · KONTROLLIEREN · OPTIMIEREN

Titelbild *Die Dicke einzelner Lack-
schichten auf einer Autokarosserie lässt
sich mit Terahertz-Systemen messen.*

»Rechenpower trifft Messsystem«

► PRODUKTIONSKONTROLLE

► MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG

► OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

► GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

► FUNKTIONELLE MATERIALIEN UND SYSTEME



Prof. Dr. Karsten Buse,
Institutsleiter

Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

Fraunhofer IPM entwickelt und baut Messsysteme, die Weltrekorde markieren – in Bezug auf Geschwindigkeit und Genauigkeit. Die Fusion von Mechanik, Elektronik und in aller Regel auch Optik – fußend auf Know-how aus aktueller Forschung – ist charakteristisch für unsere technologischen Entwicklungen. In den letzten Jahren ist jedoch ein Trend verstärkt hinzugekommen: die Digitalisierung. Die Rechenpower einer heutigen Grafikkarte kommt an die eines Großrechners vergangener Jahre heran. Damit wird es möglich, Daten mit enormer Geschwindigkeit und Genauigkeit zu verarbeiten. Für die Messtechnik markiert dies den Beginn einer neuen Ära.

Digitalisierung schafft neue Möglichkeiten

Im Projektalltag erweist sich die Digitalisierung für unsere Wissenschaftler nicht selten als disruptive Technologie: Messmethoden, die aufgrund ihrer Geschwindigkeit bisher Laborgeräten vorbehalten waren, werden so schnell und robust, dass Inline-Messstationen realisierbar sind. So lösen beispielsweise unsere Terahertz-Schichtdickenmesssysteme in jeder Sekunde einen Vierfachlack mit Mikrometernauigkeit auf. Dies reicht aus für robotergestützte Inline-Messungen. Unsere digital-holographischen 3D-Messsysteme liefern viele Millionen 3D-Messpunkte je Sekunde, sodass ganze Metallbauteile im Produktionstakt kontrolliert werden können. Für Branchen wie die Automobilzulieferindustrie ist diese 100-Prozent-Qualitätssicherung von besonderem Interesse. Algorithmen für die chemometrische Auswertung führen zu drastischen Verbesserungen von Signal-zu-Rausch-Verhältnissen und Nachweisempfindlichkeiten, zum Beispiel in der Gassensorik. Hier profitieren wir davon, dass bei fast jeder Messaufgabe Wissen vorhanden ist, beispielsweise

über mögliche Substanzen, die in einem Gemisch erwartet werden, und deren spektrale Fingerabdrücke. Das ist die Basis rechenintensiver, intelligenter Datenauswertung. Sensorfusion ist ebenfalls erst mittels heute verfügbarer Rechenleistung möglich: Wenn beispielsweise Inertialmesssysteme mit Laserscannern gekoppelt sind, bedarf es sehr guter Algorithmen und hoher Rechenleistung, um daraus eine im 3D-Raum absolut referenzierte 3D-Punktwolke zu generieren und aus dieser Schlüsse abzuleiten.

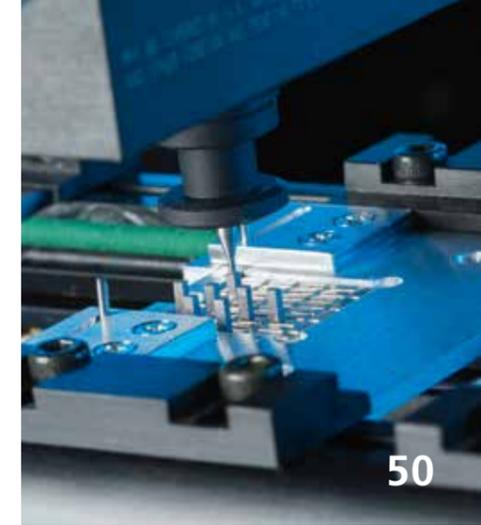
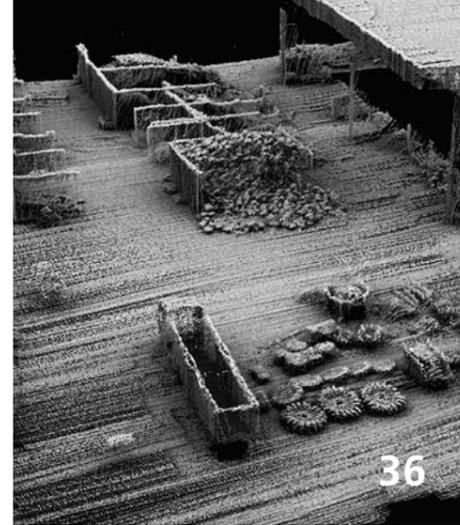
Software kann Hardware ersetzen

Wenn Hardware nur dazu dient, reproduzierbare und bekannte Messfehler zu eliminieren oder zu senken, dann kann durch ein Rückrechnen zuweilen auf ganze Hardwarekomponenten verzichtet werden, ohne Validitätsverlust beim Ergebnis. Beispielsweise können teure Linsen durch preiswerte ersetzt werden, wenn deren Fehler bekannt sind. Das senkt Kosten und führt mitunter zu gänzlich neuen Möglichkeiten in puncto Systemintegration. Statt auf den »Dreiklang« aus Mechanik-Elektronik-Optik setzt Fraunhofer IPM daher zunehmend auf einen »Vierklang«: Die Digitalisierung kommt hinzu und zeigt in der Messtechnik erst jetzt, welches Potenzial in ihr steckt. Potenzial für weitere Überraschungen inbegriffen.

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

Ihr

Karsten Buse



22

26

32

36

40

50

INHALT

- 4 EDITORIAL**
- 8 ORGANISATION**
- 10 BETRIEBSHAUSHALT | PERSONAL**
- 11 KURATORIUM**
- 12 MAGAZIN**
- 18 INTERVIEW**

- 22 PRODUKTIONSKONTROLLE**
- 24 INLINE-MESSTECHNIK**
Rückverfolgen bis zur letzten Schraube
- 26 OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK**
Optische Prüfung macht Inhalationsgeräte sicherer

- 28 MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG**
- 30 ELEKTRONISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK**
Struktur- und Defekterkennung – schnell und berührungslos
- 32 OPTISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK**
Schicht um Schicht exakt gemessen

- 34 OBJEKT- UND FORMERFASSUNG**
- 36 LASER SCANNING**
Datenerfassung aus der Luft

- 38 GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE**
- 40 INTEGRIERTE SENSORSYSTEME**
Miniaturisierte photoakustische Gasmesssysteme
- 42 THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME**
Elektronische Zungen schmecken den Unterschied
- 44 SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK**
Hochgenaue Brenngasanalyse mittels Infrarotspektroskopie

- 46 FUNKTIONELLE MATERIALIEN UND SYSTEME**
- 48 NICHTLINEARE OPTIK**
Eine Silizium-Kamera für das Mittlere Infrarot
- 50 THERMOELEKTRIK**
Hochtemperatur-Module: erste Schritte zur Serienfertigung
- 52 MAGNETOKALORIK UND ELEKTROKALORIK**
Effizienter Wärmeübertrag im magnetokalorischen Kühlkreislauf

- 54 FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT**
- 56 PARTNER | NETZWERKE**
- 57 PUBLIKATIONEN 2015**
- 62 MESSEN | VERANSTALTUNGEN**
- 66 IMPRESSUM**

INSTITUTSLEITUNG



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



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



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



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



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



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



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



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

PRODUKTIONSKONTROLLE



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



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



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



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

MATERIALCHARAKTERISIERUNG UND -PRÜFUNG



Abteilungsleiter
Prof. Dr. Georg von Freymann
T +49 631 2057 40-01
georg.vonfreymann@ipm.fraunhofer.de



Stellv. Abteilungsleiter
Dr. Joachim Jonuscheit
T +49 631 2057 40-11
joachim.jonuscheit@ipm.fraunhofer.de



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



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

OBJEKT- UND FORMERFASSUNG



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



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



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

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE



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



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



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



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



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

FUNKTIONELLE MATERIALIEN UND SYSTEME



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



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



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

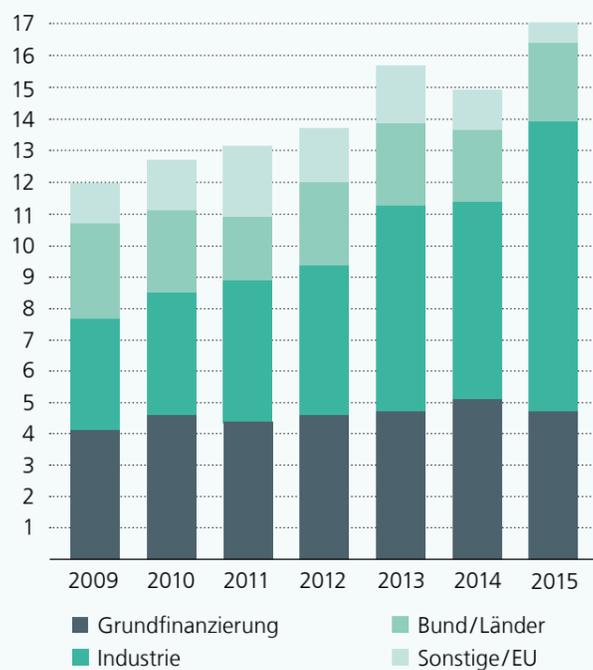


Nichtlineare Optik
Dr. Frank Kühnemann
T +49 761 8857 - 457
frank.kuehnemann@ipm.fraunhofer.de

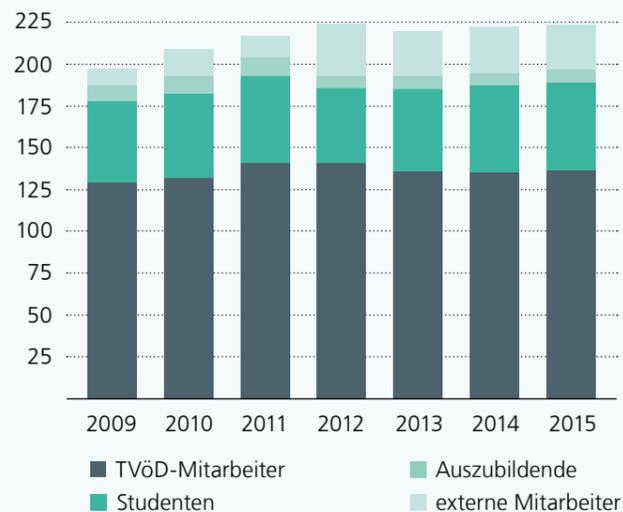


Thermoelektrik
Dr. Jan D. König
T +49 761 8857 - 329
jan.koenig@ipm.fraunhofer.de

Betriebshaushalt 2009 bis 2015 in Mio. Euro



Personalentwicklung 2009 bis 2015



DIE ZAHLEN

Betriebshaushalt

Im Jahr 2015 betrug der Betriebshaushalt von Fraunhofer IPM 17 Millionen Euro und ist damit um 2,3 Millionen Euro höher als im Jahr 2014. Der Betriebshaushalt setzt sich zusammen aus Industrieerlösen, Mitteln aus öffentlich geförderten Projekten und der Grundfinanzierung (inklusive eingeworbene interne Projekte der Fraunhofer-Gesellschaft). Der Anteil externer Finanzierung lag im Jahr 2015 bei 72,7 Prozent bzw. 12,4 Millionen Euro. Die Industrieerlöse machen mit 9,3 Millionen Euro einen Anteil von 54,4 Prozent am Betriebshaushalt aus. Das entspricht einer Steigerung um über 11,5 Prozentpunkte gegenüber dem Vorjahr (42,9 Prozent bzw. 6,3 Millionen Euro). Verantwortlich für den außergewöhnlich hohen Anteil der Industrieerlöse waren mehrere große Industrieprojekte.

Personal

Im Vergleich zum Vorjahr hat sich die Mitarbeiterzahl kaum verändert. Insgesamt 139 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren bei Fraunhofer IPM mit TVöD-Verträgen beschäftigt, davon 17 am Standort Kaiserslautern. Am Institut arbeiten rund 55 Studenten und Berufseinsteiger, davon 46 Diplomanden sowie Master- und Bachelorstudenten und 9 Auszubildende. Zusätzlich sind etwa 25 externe Mitarbeiter sowie zahlreiche Praktikanten und Hilfskräfte am Fraunhofer IPM tätig. Prozentual verteilen sich die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf drei grundlegende Bereiche: Rund 50 Prozent der Beschäftigten arbeiten als wissenschaftliche Mitarbeiter, 35 Prozent als Ingenieure und technische Mitarbeiter sowie 15 Prozent als Angestellte im Bereich Infrastruktur und Werkstatt.

UNSER KURATORIUM

Vorsitzender

Reinhard Hamburger C-FOR-U Business Coaching

Mitglieder

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

Dr. Hans Eggers Bundesministerium für Bildung und Forschung

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

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

Siegfried Groß Keysight Technologies Deutschland GmbH

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

Gerhard Kleinpeter BMW AG

Prof. Dr. Jan G. Korvink Karlsruher Institut für Technologie KIT

Prof. Dr. Gunther Neuhaus Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg, Prorektor für Forschung

Dr. Volker Nussbaumer Deutsche Telekom AG

Dr. Christian Schmitz TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

Dr. Knut Siercks Hexagon Technology Center (CH-Heerbrugg)

Prof. Dr. Michael Totzeck Carl Zeiss AG

Dr. Carola Zimmermann Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur (MBWWK) des Landes Rheinland-Pfalz, Abt. Forschung und Technologie



EUROSENSORS-KONFERENZ IN FREIBURG

Vom 6. bis 9. September 2015 fand die 29. EUROSENSORS Konferenz in Freiburg statt. Sie ist eine der europaweit größten und bedeutendsten Konferenzen zum Thema Sensoren. Veranstalter waren Fraunhofer IPM und das Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK der Universität Freiburg. Neueste

technologische Entwicklungen in den Bereichen Sensoren, Aktoren sowie Mikro- und Nanosysteme wurden vorgestellt und diskutiert. Biosensoren sowie biomedizinische und chemische Sensoren standen im Mittelpunkt der diesjährigen Konferenz. Sie kommen beispielsweise in der Bioanalytik, bei Schadstoffmessungen in der Luft oder in Flüssigkeiten sowie in der Medizin bei Blutanalysen und Implantaten zum Einsatz.

Die etwa 550 Teilnehmerinnen und Teilnehmern hatten Gelegenheit, vier Plenarvorträge, acht Keynote- und sechs Gastvorträge international renommierter Wissenschaftler und Industrievertreter zu besuchen. Die Bandbreite der Themen reichte von neuen Sensoren für Anwendungen in der Automobilindustrie oder Medizintechnik bis hin zu klassischen Anwendungen in der Prozessanalytik. Zusätzlich gab es über hundert Fachvorträge und rund 230 Posterpräsentationen. Begleitet wurde die Konferenz von einer Ausstellung, bei der sich insgesamt 20 Unternehmen und Einrichtungen präsentierten.

2 Fraunhofer IPM veranstaltete 2015 gemeinsam mit dem IMTEK die renommierte, internationale Konferenz zum Thema Sensoren.

WORKSHOP ZUM THEMA FEUCHTEMESSTECHNIK

Auf großes Interesse seitens der Industrie stieß der Workshop »Berührungslose Feuchtemesstechnik«, den Fraunhofer IPM im Oktober 2015 erstmalig veranstaltete. So unterschiedlich wie die Orte, an denen Feuchte auftritt – im Getreide, an der Wohnungswand oder im Erdgas – so vielfältig ist auch die erforderliche Messtechnik. Besonders elegant und für viele Anwendungen geeignet ist die berührungslose Feuchtemessung.

Etwa 50 Teilnehmerinnen und Teilnehmer, vornehmlich aus der Industrie, informierten sich in Vorträgen zum aktuellen technologischen Stand unterschiedlicher berührungsloser Feuchtemessverfahren, darunter die NIR-Spektroskopie, die Mikrowellen-Transmission und die noch recht junge Terahertz-Spektroskopie. Abgerundet wurde der Workshop mit einer Ausstellung und Posterpräsentationen.

ERFOLGREICHER GASSENSOR-WORKSHOP



Neueste technologische Entwicklungen in der Gassensorik – darüber tauschten sich rund 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Wissenschaft und Industrie auf dem Gassensor-Workshop im September 2015 aus. Bereits zum sechsten Mal konnte Fraunhofer IPM mit einer hochkarätigen Veranstaltung einen spannenden Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft anregen. Wissenschaftler und Unternehmer diskutierten über aktuelle Trends in der Gassensorik; Schwerpunkte lagen auf der Halbleiter-Gassensorik, der elektrochemischen Sensorik, der Photoakustik, der

IR- und der Laserspektroskopie. Neun Vorträge spannten den thematischen Bogen von den »Chancen und Herausforderungen der Raman-Spektroskopie an Gasen« bis hin zur »Sensorik auf Basis von porösem Silizium und Aluminiumoxid-Substraten«. Eine Industrieausstellung rundete die Veranstaltung ab. Der Termin für den nächsten Gassensor-Workshop steht bereits fest: Es ist der 16. März 2017.

1 Flexible Sensoren, präsentiert im Rahmen des 6. Gassensor-Workshops.

QUANTENKASKADENLASER SIND REIF FÜR DIE INDUSTRIE

Fraunhofer IPM veranstaltete am 12. November 2015 den Workshop »Quantenkaskadenlaser in der Industrie«. Mehr als 70 Experten aus Industrie und Wissenschaft nahmen daran teil und diskutierten die neuesten Entwicklungen in diesem Technologiefeld und deren wirtschaftliche Perspektiven. »Die Lasertechnik im Mittleren Infrarot hat das Potenzial, sich in der Industrie fest zu etablieren« – das war der Tenor in der Abschlussdiskussion.

In der Automobil-Abgasanalyse beispielsweise werden Quantenkaskadenlaser (QCL) bereits heute erfolgreich eingesetzt. Beispiele für serienreife Geräte wurden in der

Workshop-begleitenden Firmenausstellung gezeigt. QCL-Messsysteme detektieren Abgase schneller und empfindlicher, als das mit herkömmlicher Technik möglich ist. Ein Vorteil, den es in Zukunft weiterzuentwickeln gilt.

3 Dr. Armin Lambrecht, verantwortlich für die Geschäftsfeldentwicklung am Fraunhofer IPM, moderierte die Diskussionen zu den Chancen der QCL-Technologie in der industriellen Messtechnik.



DER WISSENSCHAFTSNACHWUCHS LERNT MIT SEIFENBLASEN

Experimente rund um das Thema Licht begeisterten Groß und Klein beim Kindernachmittag am Fraunhofer IPM im Juli 2015. Allerlei Fragen – von den Farben des Regenbogens bis zur Genauigkeit optischer Messegeräte – beantworteten Wissenschaftler den Nachwuchsforscherinnen und Nachwuchsforschern. Aber es gab auch Licht zum »Anfassen«:

Experimente mit Seifenblasen und viel Wasser waren bei den sommerlichen Temperaturen sehr begehrt. Anlass der Veranstaltung war das von den Vereinten Nationen ausgerufene »Internationale Jahr des Lichts«, das an allen sechs Instituten des Fraunhofer-Verbunds Light & Surfaces in Form eines Kindernachmittags gleichzeitig thematisiert wurde.

1 Kindernachmittag zum »Internationalen Jahr des Lichts«.

GIRLS' DAY



Es ist schon fast eine kleine Tradition: Bereits zum 15. Mal fand am 23. April 2015 der Girls' Day am Fraunhofer IPM statt. Schülerinnen der fünften bis zehnten Klassen konnten an diesem Tag erneut einen Blick in Labore und Werkstätten werfen und sich ein Bild davon machen, wie Wissenschaft im Alltag funktioniert. Bei Themen wie »Die Laserlupe«, »Wie baue ich einen Mikrochip?« oder »Wie baut man eine Blinkschaltung?« durften die Mädchen mit Lichtwellen experimentieren, Leiterbahnen herstellen oder einen integrierten Schaltkreis aufbauen. Rund zehn Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen stellten das Programm zusammen und begleiteten die Schülerinnen durch den Tag.

NACHWUCHSPREIS »GREEN PHOTONICS«

Vincenz Sandfort belegte mit seiner Masterarbeit, die er am Fraunhofer IPM verfasste, den zweiten Platz beim Nachwuchspreis »Green Photonics« 2015. Der Preis wird jährlich vom gleichnamigen Fraunhofer-Innovationscluster an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verliehen, die sich in ihren Abschlussarbeiten mit der nachhaltigen Nutzung von Licht beschäftigen. »Untersuchungen zur

Verstärkung von Raman-Gas-Streusignalen durch photonische Kristallfasern« waren das Thema von Sandforts Arbeit. Der Nachwuchswissenschaftler entwickelte im Rahmen seiner Forschung ein hochsensibles Raman-Gas-Messsystem zur dauerhaften, berührungslosen und ressourcenschonenden Überwachung des Gasnetzwerkes. Betreut wurde die Arbeit von Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein.

DOPPELT AUSGEZEICHNET: THERMOELEKTRIK-FORSCHUNG

Gleich zwei Preise erhielt Fraunhofer IPM für Forschungen auf dem Gebiet nanostrukturierter thermoelektrischer Schichtsysteme: Der Hugo-Junkers-Preis des Ministeriums für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt ging an das Team um Dr. Jan D. König. Gemeinsam mit Forscherinnen und Forschern der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik belegten die Wissenschaftler den ersten Platz in der Hauptkategorie »Innovativste Vorhaben der Grundlagenforschung«. Ausgezeichnet wurden ihre theoretischen Arbeiten zur Optimierung thermoelektrischer Materialien durch Nanostrukturierung sowie Herstellungsmethoden zur kostengünstigen und flexiblen Produktion der Schichten.

Der Physiker Dr. Markus Winkler erhielt den Nachwuchspreis der Deutschen Thermoelektrik-Gesellschaft für seine Doktorarbeit auf dem Gebiet nanostrukturierter thermoelektrischer Schichtsysteme. Die Jury hob den hohen wissenschaftlichen Mehrwert der Arbeit und die Sorgfalt bei der Herstellung der Schichtsysteme als Grund für die Nominierung hervor. Die Arbeit liefere zahlreiche industrierelevante Erkenntnisse für die Herstellung thermoelektrischer Mikro-Module und thermischer Sensoren. Im Rahmen seiner Doktorarbeit entwickelte Winkler Verfahren zur Erzeugung besonders leistungsstarker Schichtsysteme mittels Molekularstrahlepitaxie und Sputterprozessen. Winkler teilt sich den mit insgesamt 1000 Euro dotierten Preis mit Florian Gather von der Justus-Liebig-Universität Gießen.

2 PD Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg (links) nimmt den Preis für die »Beste Kundenakquise 2015« von Fraunhofer-Vorstand Alfred Gossner (Mitte) entgegen. Rechts im Bild Preisträger Dr. Dirk Hecker, Fraunhofer IAIS.

PREIS FÜR »BESTE KUNDENAKQUISE 2015«

Das Team um Dr.-Ing. Albrecht Brandenburg erhielt die Auszeichnung für die Akquisition des größten Industrieauftrags innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft im Jahr 2015. Das Pharmaunternehmen Boehringer Ingelheim microParts GmbH beauftragte Fraunhofer IPM mit Messgeräten im Gesamtwert von mehr als 1,3 Millionen Euro. Der Preis wurde im Rahmen des Symposiums »Netzwerk 2016« verliehen.

Aufträge aus der Industrie machen einen wesentlichen Anteil der Finanzierung der Fraunhofer-Gesellschaft aus. Fraunhofer IPM erwirtschaftete im Jahr 2015 ein Auftragsvolumen von rund 9,3 Millionen Euro aus der Industrie.



LEHRSTÜHLE IN FREIBURG UND KAISERSLAUTERN

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

Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Physik

Lehrstuhl für Optische Technologien und Photonik
Prof. Dr. Georg von Freymann

Wissenschaftler der Arbeitsgruppe studieren die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Im Fokus stehen dreidimensionale Mikro- und Nanostrukturen als Grundlage funktioneller Materialien für die Photonik und die Materialwissenschaften, aber auch optisch reprogrammierbare Strukturen für die Spintronik als Bausteine für die Computer von morgen.



2

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK

Lehrstuhl für Optische Systeme
Prof. Dr. Karsten Buse



Forschungsschwerpunkte sind nichtlinear-optische Materialien und Flüstergalerieresonatoren. Ein Ziel ist die Miniaturisierung optisch-parametrischer Oszillatoren. Die gemeinsam mit weiteren Optik-Lehrstühlen ins Leben gerufene Spezialisierungsmöglichkeit »Photonics« wurde in den Studienplan für den Masterstudiengang Mikrosystemtechnik aufgenommen. Gruppenleiter Dr. Ingo Breunig betreut die Forschungsarbeiten am Lehrstuhl.

Lehrstuhl für Gassensoren
Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

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

2 Das IMTEK der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.



1

»LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT«

Pilotprojekt zur Prognose von Umweltkatastrophen

Zur Einschätzung von Geo-Risiken müssen viele Umweltparameter über lange Zeiträume beobachtet und interpretiert werden. Wissenschaftler von Fraunhofer IPM und der Universität Freiburg arbeiten im Projekt »MulDiScan« daran, Phänomene wie Überschwemmungen, Bergstürze und Waldbrände besser vorherzusagen zu können.

»Dazu benötigen wir hochwertige Messdaten großer, teils schwer zugänglicher Landstriche, die geometrische Veränderungen von Strukturen erfassen«, sagt Dr. Alexander Reiterer, Projektkoordinator am Fraunhofer IPM.

Dabei setzen die Wissenschaftler auf kleine unbemannte Luftfahrzeuge (»Unmanned Aerial Vehicles«). Darauf montierte Messgeräte erstellen sehr schnell ein detailgenaues, dreidimensionales Abbild des Geländes und sind mit Sensoren ausgerüstet, die unter anderem Temperatur und Feuchte messen. Um die Messdaten in einem zweiten Schritt interpretieren zu können, arbeitet Fraunhofer IPM mit Wissenschaftlern der Universität Freiburg zusammen. Denn für zuverlässige Prognosen ist es notwendig, die Informationen mit weiteren Mess- und Erfahrungswerten zu kombinieren.

Das Projekt ist eines von zwölf Pilotprojekten im Rahmen des »Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg«, das vom Land Baden-Württemberg, der Universität Freiburg und der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert wird.

MEHR PLATZ FÜR INNOVATIONEN UND KREATIVITÄT

Fraunhofer IPM bekommt ein neues Zuhause auf dem Campus der Technischen Fakultät in Freiburg. Die Nutzfläche des Gebäudes umfasst etwa 6500 Quadratmeter. Rund ein Drittel der Fläche ist für Büros vorgesehen, der Rest für moderne Labor-, Werkstatt- und Sondernutzflächen. Die Planungen für das derzeit größte Fraunhofer-Bauprojekt in Baden-Württemberg begannen bereits im Jahr 2012. Seitdem hat sich viel getan: Ein Grundstück wurde gefunden, das Architekturbüro ausgewählt und ein Raumplan erstellt. Im September 2016 soll mit dem Bau begonnen werden. Bezugfertig wird das Gebäude voraussichtlich Ende 2019 sein.

1 Der geplante Institutsbau ist dreizügig, verfügt über lichtpendende Innenhöfe, unterschiedliche Geschosshöhen und eine modulare Fassade.

»GUTE VISUALISIERUNG MACHT ES LEICHTER, MESSDATEN ZU INTERPRETIEREN.«

Professor Christoph Müller über die Visualisierung von 3D-Daten. Müller verbrachte von Oktober 2015 bis Januar 2016 ein Forschungssemester am Fraunhofer IPM. Schwerpunkt seiner Arbeit war die Visualisierung von Messergebnissen im Rahmen der »Forschungsallianz Kulturerbe«, an der Fraunhofer IPM beteiligt ist. Im Projekt arbeiten die Wissenschaftler mit der Freiburger Münsterbauhütte zusammen.

Herr Professor Müller, wie kam es zur Zusammenarbeit mit unserem Institut?

Einige unserer Studenten arbeiten seit 2012 zusammen mit Fraunhofer IPM an der Visualisierung von Messdaten. Anschaulich dargestellte Messergebnisse erhöhen den Kundennutzen – hier schien beiden Partnern eine Zusammenarbeit sehr attraktiv. Für zukünftige Projekte ist ein tieferes beiderseitiges Verständnis notwendig, daher entschied ich mich, mein Forschungssemester am IPM zu verbringen.

Wo sind die Berührungspunkte von Messtechnik und Computergrafik?

Abstandsbasierte 3D-Messtechnik erzeugt komplexe Punktwolken, die letztendlich immer durch Menschen interpretiert werden. Dazu braucht es gute Visualisierung, die inzwischen in Echtzeit möglich ist. Die Computergrafik beschäftigt sich seit jeher mit den Möglichkeiten, komplexe Daten in Echtzeit zu visualisieren. Welche Art der Darstellung von Messergebnissen ist aus Benutzersicht wünschenswert? Was lässt sich technisch überhaupt realisieren? Neuartige Geräte wie Datenbrillen, die von Firmen wie Google Glass oder Microsoft mit massivem Aufwand vorangetrieben werden, bieten Interaktionsmöglichkeiten, deren Nutzen und Einsatzgebiete zunächst erforscht werden müssen. Zusammen können wir hier Know-how

aufbauen, das sich für das IPM in Projekten einsetzen lässt. Wir als Hochschule profitieren in vielerlei Hinsicht von einer praxisnahen Anbindung an ein renommiertes Institut, etwa über die Beteiligung an Forschungsprojekten, aber auch über attraktive Praktika und Abschlussarbeiten.

Wie weit sind Sie mit den Arbeiten bisher gekommen?

Im Projekt »Forschungsallianz Kulturerbe« haben wir untersucht, inwieweit sich eine am Markt erhältliche »Augmented-Reality-Brille« sinnvoll zur Visualisierung nutzen lässt. Hier ist es gelungen, die schlechte Raum-Ortung durch ein alternatives System zu ersetzen und so die Bedienbarkeit der Brille zu erhöhen. Gleichzeitig hatte ich die Möglichkeit, »Google Tango« zu testen – ein neuartiges Gerät, bei dem die Messtechnik direkt in ein Tablet eingebaut ist. In beiden Fällen zeigte sich, dass die vollmundigen Ankündigungen der Hersteller mit Vorsicht zu genießen sind.

Wie wird die weitere Zusammenarbeit aussehen?

Die nächsten Schritte werden sein, unsere Projektideen in Anträgen zu platzieren. Mittelfristig wäre eine institutionalisierte Kooperation, zum Beispiel in Form einer gemeinsamen Arbeitsgruppe, denkbar.

Vielen Dank für das Gespräch!



Forschungsallianz Kulturerbe

Im Rahmen der »Forschungsallianz Kulturerbe« fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Technologien zur Erhaltung des Kulturerbes. Fraunhofer IPM realisiert hier in einem Teilprojekt Verfahren zur 3D-Erfassung von Skulpturen an ihrem jeweiligen Standort. Ist eine Skulptur an einem historischen Gebäude beschädigt, muss heute das Original demontiert und ein Gipsabdruck genommen werden, um als Modell zu dienen. Die exakten 3D-Daten der fraglichen Figur sollen zukünftig – ähnlich wie eine CAD-Zeichnung – eine völlig neue, digitale Arbeitsgrundlage für Restauratoren schaffen. Zur Erstellung des digitalen 3D-Modells wird das Objekt vor Ort mit einer Kamera von außen, die oftmals filigranen inneren Strukturen mithilfe eines Endoskops von innen aufgenommen. Aus den vielen Einzel-Bildaufnahmen setzen speziell ausgelegte Algorithmen die 3D-Form zusammen. Die 3D-Daten sind eine Dokumentation des Ist-Zustands und können bei einer etwaigen Beschädigung der Skulptur als Vorlage für Restaurierungsarbeiten dienen. Für Kunsthistoriker bilden sie eine völlig neue Forschungsgrundlage – ein großer Datenpool, auf den sie bei ihrer Arbeit zurückgreifen können und der ihre Feldforschung ergänzt.

Wie könnten 3D-Daten die Arbeit von Steinmetzen erleichtern?

Die Daten könnten Restauratoren zukünftig beim Bearbeiten der Roh-Figur unterstützen. Die Vision der Wissenschaftler: Abzutragende Flächen werden auf einer so genannten Augmented-Reality-Brille dargestellt und auf das Werkstück projiziert. Während der Arbeit erfolgen interaktive Messungen, die jeweils Ist- und Sollzustand der Figur vergleichen und Abweichung visualisieren. Um eine Skulptur zu kopieren, arbeiten Steinmetze heute nach Augenmaß und mit manueller Messtechnik.

CHRISTOPH MÜLLER, Jahrgang 1968, ist Informatiker und Mathematiker. Seit 2010 Professor für Computergrafik und Game-Engineering an der Fakultät »Digitale Medien« der Hochschule Furtwangen. Zu seinen Lehr- und Forschungsgebieten gehören Computergrafik, 3D-Modellierung / Technische Gestaltung in 3D sowie 3D-Echtzeit-Software-Entwicklung.

1 Das Gipsmodell, das zur Restaurierung von Skulpturen nötig ist, soll zukünftig auf Basis digitaler Daten erstellt werden.

2 Prof. Christoph Müller





1

1 Thomas Gießler zum Thema Innovation: »Wichtig ist, dass wir immer zwei Schritte vor den anderen sind.«

2 Der Sensorkopf von Fraunhofer IPM erfasst pro Aufnahme 9 Mio. 3D-Messpunkte – und das zehnmal pro Sekunde.



INTERVIEW

2

»WIR HABEN VIEL VONEINANDER GELERNT.«

Im Auftrag der Werner Gießler GmbH hat Fraunhofer IPM eine vollautomatische Inline-Prüfung für Präzisionsdrehteile entwickelt. Das System prüft die Dichtflächen etwa daumennagelgroßer Präzisionsdrehteile im Sekundentakt. Mikrodefekte bis hinunter zu wenigen Mikrometern werden zuverlässig erkannt. Ein Gespräch mit dem Geschäftsführer Thomas Gießler.

Herr Gießler, wie kam es zur Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

Wir hatten schon mehrere Firmen kontaktiert. Doch niemand konnte die Aufgabe in unserem Sinne lösen. Unser Kunde Bosch fordert von uns 0 ppm – d. h. unter einer Million gelieferter Teile darf kein einziges Fehlteil sein. Das ist mit einer händischen Prüfung unter dem Mikroskop praktisch nicht zu schaffen. Der Kontakt zu Fraunhofer kam letztendlich über eine Google-Recherche, die nicht nur einige Firmen sondern auch Fraunhofer als Treffer lieferte. Und was zunächst selbst für Fraunhofer unlösbar erschien, rückte dann nach und nach in den Bereich des Möglichen: Wir haben viel voneinander gelernt.

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

Das Drehteil, dessen Dichtfläche wir zu 100 Prozent kontrollieren müssen, steckt weltweit in 70 Prozent aller Lkw Common-Rail-Dieseleinspritzungen. Wir sind Alleinlieferant für Bosch und dieses Bauteil macht 50 Prozent unseres Umsatzes aus. Das heißt: Wir waren sehr daran interessiert eine Lösung sprich einen Sensor für die Endkontrolle der Oberfläche zu finden. Viele Dinge wie Taktzeiten, Zuführungen etc. wurden von uns vorgegeben. Fraunhofer IPM musste seinen Sensor zur schnellen optischen Oberflächenprüfung perfekt in unsere Umgebung integrieren – und das ist gelungen.

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

Wir haben selbst schon viele Anlagen wie Sortierautomaten, aber auch die Automatisierung und Schnittstellen zu Maschinen gebaut. Insofern war es für uns nicht fremd, mit den Messtechnik-Experten von Fraunhofer IPM zu kommunizieren. Die denken und handeln ja auch sehr industrienah. Wir hatten die gleiche Wellenlänge: Zwischen Erstkontakt und Beauftragung vergingen nur acht Wochen!

Inwiefern wird sich die Investition in Messtechnik für Sie rechnen?

Die Endkontrolle, die wir mit Fraunhofer IPM jetzt automatisiert haben, wird bislang von einem externen Dienstleister aufwendig von Hand gemacht: Mitarbeiterinnen legen dort jedes einzelne Teil unters Mikroskop. Die Kosten für den Sensor von Fraunhofer IPM sind niedriger als zwei Jahre Sichtprüfung. Perfekt war, dass wir einige entscheidende Machbarkeitsuntersuchungen im Vorfeld durch ein ZIM-Projekt fördern lassen konnten. Denn das war eine wichtige Unterstützung, weil wir so das finanzielle Risiko zu Beginn deutlich senken konnten. Der gesamte Kontrollautomat wird sich nach drei Jahren für uns amortisiert haben.

DIE WERNER GIESSLER GMBH fertigt komplexe Präzisionsdrehteile vor allem als Zulieferer für die Automobilindustrie. Das mittelständische Unternehmen mit Sitz in Elzach bei Freiburg beschäftigt rund 130 Mitarbeiter und erzielte im Jahr 2015 einen Jahresumsatz von 13,2 Mio. Euro. Je nach Anforderung werden die wärme- oder oberflächenbehandelten Komponenten als Einzelteile oder in Baugruppen an den Endkunden geliefert.

Wann lohnt sich Ihrer Meinung nach die Zusammenarbeit mit einem externen Forschungspartner?

Es ist für mich eine Notwendigkeit, dass ich mit der externen Entwicklung eine Alleinstellung erhalte. Ich bin nicht so risikobereit und möchte durch Innovationen im Wesentlichen den Arbeitsplatz meiner Mitarbeiter und auch meinen eigenen sichern. Wir würden das mit Fraunhofer IPM genauso noch einmal machen. Wichtig ist, dass wir immer zwei Schritte vor den anderen sind.

Vor welchen technologischen Herausforderungen stehen Zulieferer aus der metallverarbeitenden Industrie?

Das Risiko für Zulieferer wird immer größer: Wenn man sich mit den Großen einlässt, muss man auch die passenden Prüfautomaten haben. Firmen, die das nicht gelernt haben, gibt es bald nicht mehr. Konkretes Beispiel: Den 7-Jahres-Vertrag als Bosch-Alleinlieferant für ein bestimmtes Drehteil haben wir nur bekommen, weil wir sehr viele Alleinstellungsmerkmale für diesen Prozess haben. Das sichert uns das Geschäft.

Wie wichtig war die räumliche Nähe – Fraunhofer IPM ist keine 30 Kilometer von Ihrer Firma entfernt?

Bei der ersten Auswahl war es die reine Leistung, die Fraunhofer IPM ins Spiel gebracht hat, nicht die räumliche Nähe. Anfangs haben die Leute von Fraunhofer signalisiert, dass

unsere Anforderungen unlösbar sind. Aber die haben uns dann doch ganz kurzfristig besucht und sich die gesamte Aufgabe im Detail angeschaut. Da war die Nähe ein echter Vorteil. Es war und ist eine vorbildliche Zusammenarbeit – und vielleicht wird in Zukunft noch mehr daraus: Wir haben uns intern überlegt, dass wir mit solchen hochspezialisierten Prüfsystemen auch gemeinsam auf den Markt gehen könnten. Wir machen die Handhabungstechnik – Fraunhofer IPM den Sensor.

Vielen Dank für das Gespräch!

3 »Firmen, die nicht gelernt haben, die Qualität ihrer Teile zu prüfen, gibt es bald nicht mehr«, prophezeit Thomas Gießler.



»Industrie 4.0: Unsere Messtechnik sichert die Qualität.«

Für die Produktionskontrolle entwickelt Fraunhofer IPM optische Systeme und bildgebende Verfahren, mit denen sich Oberflächen und 3D-Strukturen in der Produktion analysieren und Prozesse regeln lassen. Die Systeme messen so schnell und so genau, dass kleine Defekte oder Verunreinigungen auch bei hohen Produktionsgeschwindigkeiten erkannt werden. Damit wird eine 100-Prozent-Echtzeitkontrolle in der Produktion im Sinne der Industrie 4.0 möglich. Eingesetzt wird eine große Bandbreite an Technologien, darunter digitale Holographie, Infrarot-, Reflexions-Spektroskopie und Fluoreszenzverfahren, kombiniert mit sehr schneller hardwarenaher Bild- und Datenverarbeitung. Die Systeme werden beispielsweise in der Umformtechnik und im Automobilbereich eingesetzt.

KONTAKT

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

Inline-Messtechnik

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

Optische Oberflächenanalytik

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

THEMEN

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

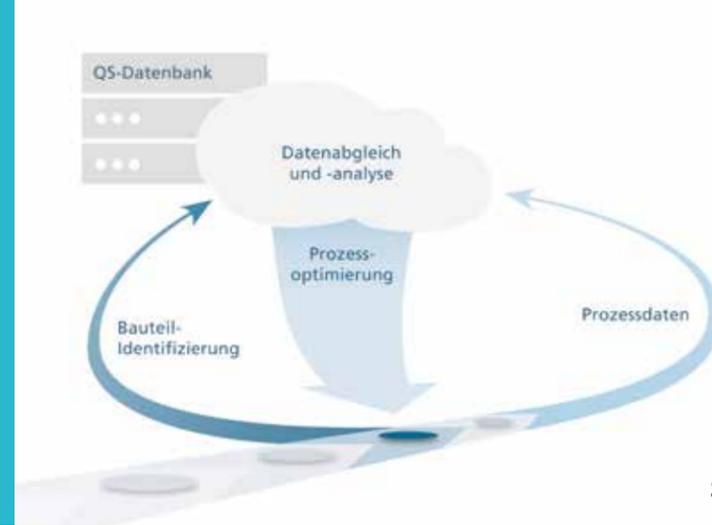
KOMPETENZEN

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

Messtechnik optimiert die
Qualität von Präzisionsbauteilen.



1



2

INLINE-MESSTECHNIK

Rückverfolgen bis zur letzten Schraube

Rückverfolgbarkeit gilt als einer der Eckpfeiler der Industrie 4.0. Sie ist die Grundlage dafür, dass im Produktionsprozess gewonnene Daten auf einzelne Bauteile und Halbzeuge zurückgeführt werden können. Nur so lassen sich regelmäßig auftretende Fehler analysieren und in den Produktionsprozess rückkoppeln. Fraunhofer IPM arbeitet im Projekt »Track4Quality« an einem neuartigen Verfahren zur Rückverfolgung von Massenbauteilen, das die Oberflächenstruktur von Bauteilen als individuelles Unterscheidungsmerkmal nutzt.

Die Qualität komplexer Industrieprodukte hängt von der Qualität jedes einzelnen Bauteils ab. Ein einziger fehlerhafter, nur wenige Cent teurer Stecker kann die Funktionsfähigkeit und Langlebigkeit einer komplexen Elektronik-Steuerbox im Automobil beeinträchtigen. Versagt das montierte Bauteil beim Funktionstest, werden sämtliche verbauten Halbzeuge in »Sippenhaft« genommen: Das Gesamtprodukt wird aussortiert. Die Kosten sind hoch, der Lerneffekt oft gleich null. Ziel muss es daher sein, jedes auch noch so kleine Bauteil und Halbzeug mit einer Signatur zu versehen, um es in der Wertschöpfungskette möglichst bis an den Anfang zurückverfolgen zu können. Nur so lassen sich mithilfe von Inline-Prüfsystemen Ursachen für wiederkehrende Produktionsfehler erkennen und nachhaltig beheben.

Fingerabdruck des Produkts identifiziert Bauteil

Die Rückverfolgung von Massenbauteilen darf eines nicht sein: teuer. Viele der etablierten Markierungsmethoden scheitern bereits an dieser Anforderung, denn sie erfordern zusätzliche kostspielige Produktionsschritte. Andere

wiederum sind nicht praktikabel, da sie bestimmte Funktionen der Bauteile beeinträchtigen. Das Eingravieren einer Seriennummer in eine Dichtfläche verbietet sich ebenso wie der Barcode auf einer dekorativen Oberfläche. Manche Bauteile sind schlicht zu klein, um überhaupt Markierungen darauf aufzubringen. Zudem sind aufgebrachte Marker nicht fälschungssicher. All dies gilt nicht für ein Tracking-Verfahren, das Fraunhofer IPM gemeinsam mit der Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V. und Industriepartnern im Rahmen des Projekts »Track4Quality« (T4Q) entwickelt. Es kommt ohne zusätzliche Markierung aus, indem es nutzt, was ohnehin vorhanden ist: die Bauteiloberfläche. Unter dem Mikroskop betrachtet weisen nahezu alle technischen Oberflächen zufällige Merkmale wie Mikrostrukturen oder Farbtexturen auf, die einmalig sind wie der Fingerabdruck eines Menschen.

Das T4Q-Sensorsystem nimmt definierte Bereiche der Bauteiloberfläche hochauflösend mit einer Industrie-Kamera auf. Aus der Bildaufnahme mit ihren spezifischen Strukturverläufen und deren Position zueinander wird eine numerische Kennung errechnet und in einer Datenbank hinterlegt.

»WENN MASCHINEN IN ZUKUNFT MITEINANDER KOMMUNIZIEREN, wird es nicht nur darauf ankommen, dass geredet wird, sondern auch was gesagt wird. Messtechnik wird dabei eine wichtige Rolle spielen. Sie liefert einen Großteil der Daten, die Maschinen austauschen und die darüber entscheiden, ob die digitale Durchdringung der Fertigungstechnik tatsächlich zu mehr Effizienz und höherer Produktqualität führen wird.« – Daniel Carl

Zur späteren Identifizierung wird der gesamte Vorgang wiederholt. Stimmen die Kennungen überein, so handelt es sich um das gesuchte Bauteil. Der Sensor ist so ausgelegt, dass eine große Bandbreite an Materialien – von glatten Kunststoffen über präzisionsbearbeitetes Aluminium, Eisenguss bis hin zu lackierten Oberflächen – mit ein und derselben Hardware im Produktionstakt erfasst werden kann.

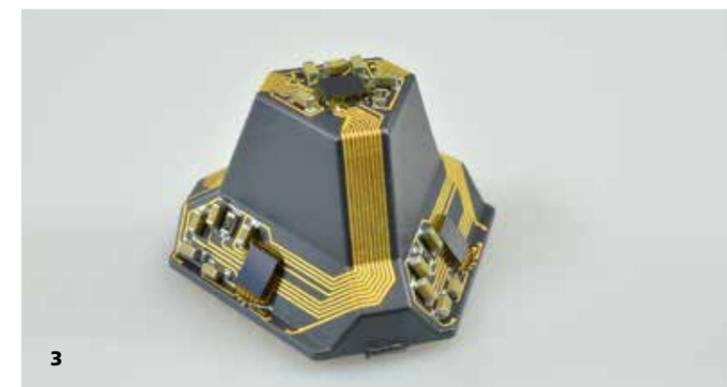
Im Rahmen einer Studie wurde das T4Q-Verfahren in einer Produktionskette für Molded Interconnect Devices (MID) auf Praxisstauglichkeit getestet. Fingerprints von 30 dieser dreidimensionalen Spritzguss-Kunststoffträger wurden testweise am Hahn-Schickard-Institut erzeugt. Anschließend durchliefen die Versuchsträger alle üblichen Prozessschritte

der Herstellungskette wie Temperaturschocktests, Laserstrukturierung, CO₂-Schneestrahlnreinigung, nasschemische Reinigung, Metallbeschichtung, Reflowlöten und Leitleben. Trotz dieser Prozessschritte und zusätzlicher auf einigen Substraten aufgebrachten Leiterbahnen, die den Fingerprintbereich anteilig überdeckten, wurden die Bauteile sicher erkannt. Nachdem so die grundsätzliche Tauglichkeit und die Robustheit des T4Q-Verfahrens gezeigt werden konnte, arbeiten die Wissenschaftler an der Überführung in die Produktionsumgebung. Gelingt am Ende die eindeutige Bauteilidentifikation auch für Cent-Bauteile, so ist dies eine wichtige Voraussetzung für nachhaltig optimierte Fertigungsprozesse – ganz im Sinne der Industrie 4.0.

1 Die Qualität von nur wenigen Cent teuren Halbzeugen kann über Funktionsfähigkeit und Langlebigkeit teurer Produkte entscheiden.

3 An einem als MID-Bauteil gefertigten 3D-Sensor wurde die Praxisstauglichkeit des Tracking-Verfahrens getestet.

2 Im Laufe von Produktionsprozessen werden Unmengen an Mess- und Prozessdaten generiert. Nur mit einer eindeutigen Bauteilsignatur lassen sich diese Daten einzelnen Bauteilen zuordnen und statistisch auffällige Unregelmäßigkeiten bis zu den Fehlerquellen zurückführen.



3



OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

Optische Prüfung macht Inhalationsgeräte sicherer

Mit dem treibgasfreien Inhalationsgerät Respimat® ist dem Pharmaunternehmen Boehringer Ingelheim eine technische Innovation gelungen. Diese beruht in erster Linie auf einem winzigen Bauteil: einer speziellen Mikro-Düse zur Vernebelung des Medikaments. Um die Qualität dieses mikrofluidischen Bauteils bereits während der Fertigung exakt kontrollieren zu können, hat Fraunhofer IPM ein optisches Inline-Prüfsystem entwickelt.

Die Erzeugung eines medizinisch optimalen Aerosols in einem handlichen Inhalationsgerät ist technisch höchst anspruchsvoll: Beim Drücken des Auslösers wird die Wirkstofflösung mechanisch durch eine Mikro-Düse gepresst. In diesem so genannten Uniblock wird das flüssige Medikament so gefiltert, dass zwei exakt dosierte Sprühstrahlen in einem definierten Winkel mit großer Geschwindigkeit aufeinanderprallen. Dabei entsteht eine feine Sprühwolke, die leicht einzuatmen ist und einen hohen Anteil lungengängiger Wirkstoffpartikel enthält. Damit dies zuverlässig funktioniert, muss der Uniblock präzise gefertigt sein. Nur eine hochgenaue Prüfung, sichert dabei die Qualität der Bauteile. Im Auftrag des Respimat®-Herstellers Boehringer Ingelheim microParts (BlmP) hat Fraunhofer IPM ein optisches Prüfsystem entwickelt und in der Fertigungsumgebung implementiert. Es erfasst mögliche Strukturfehler, Verunreinigungen, Kratzer sowie fehlerhafte Außenabmessungen, und zwar unter Reinraumbedingungen.

Der Uniblock ist ein mikrostrukturiertes, 2 mm x 2,5 mm großes Silizium-Bauteil, das mit Glas gedeckelt und insgesamt etwa 1,2 mm dick ist. Die Prüfung eines solchen als Serienprodukt mit hohem Durchsatz produzierten Bauteils erfordert

neben einer hohen Ortsauflösung zusätzlich eine sehr hohe Prüfgeschwindigkeit. Das am Fraunhofer IPM entwickelte System prüft verschiedene Eigenschaften und mögliche Fehler des Uniblocks während der Produktion: Strukturfehler, also Abweichungen der Mikrostruktur von der Sollgeometrie und fehlende Strukturen, Verunreinigungen, Bondfehler bei der Verbindung der Silizium-Struktur mit dem Glasdeckel, Sägefehler als Ursache für fehlerhafte Außenabmessungen des Bauteils, Defekte und Ausbrüche an den Kanten. Um selbst feinste Strukturen wie die etwa 8 µm breiten Filterkanäle zuverlässig prüfen zu können, sind Messgenauigkeiten im unteren Mikrometerbereich gefordert. Gleiches gilt für typische Verunreinigungen: Auch diese haben oft eine Ausdehnung von nur wenigen Mikrometern.

Laser-Scanning-Mikroskop erkennt mikrometer-feine Strukturen im Prozess

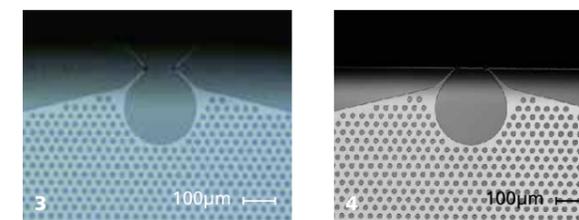
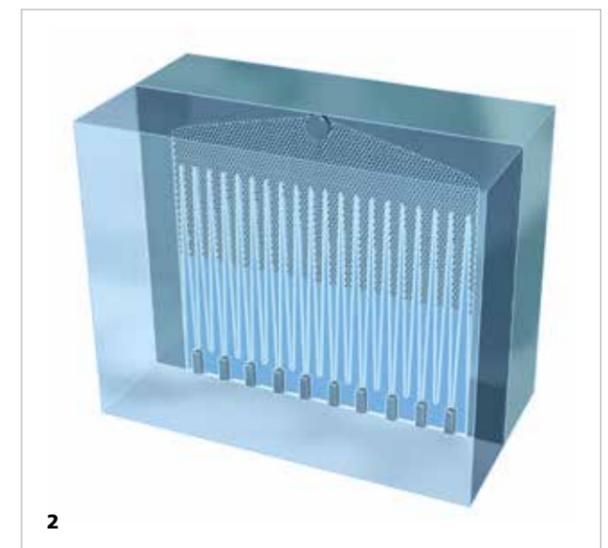
Das Prüfsystem arbeitet mit einem Laser-Scanning-Mikroskop, das sämtliche Messungen durch die Glasdeckelung mit einer Taktrate von 1,3 Sekunden ausführt. Ein fokussierter Laserstrahl scannt die Oberfläche des Uniblocks. Der Laserfokus wird auf eine kleine Öffnung, das »Pinhole«, im

MIKRO-ELEKTROMECHANISCHE SYSTEME (MEMS) wie der Uniblock sind Bestandteil vieler moderner Produkte: als Inertialsensoren in Airbags, als optische Aktoren in Mikrosiegeln oder als mikrofluidische Komponenten in Druckköpfen und medizintechnischen Produkten. Leistungsfähige Inline-Prüftechnik für die Produktion der filigranen Bauteile ist mehr denn je gefragt.

1 Beim treibgasfreien Respimat®-Inhalator wird das Medikament allein durch mechanischen Druck durch eine Mikrodüse gepresst.

2 In der Mikrodüse wird der flüssige Wirkstoff so gefiltert, dass zwei exakt dosierte Sprühstrahlen in einem definierten Winkel mit großer Geschwindigkeit aufeinanderprallen. Dabei entsteht eine feine Sprühwolke. Damit dies funktioniert, muss das Bauteil mit hoher Präzision gefertigt sein.

Mikroskop abgebildet, sodass fast ausschließlich Licht aus einer Probenebene auf den Detektor gelangt. Anders als ein konventionelles Lichtmikroskop erkennt das Laser-Scanning-Mikroskop die Kante des Uniblocks auf der Ebene der Siliziumoberfläche unter dem Glas sehr präzise. Nur so kann das System die Lage der Mikrostruktur relativ zu den Außenkanten prüfen – eine wichtige Voraussetzung für einen wesentlichen Teil der Prüfungen. Aber nicht die einzige: Soll die Messtechnik präzise funktionieren, muss das Mikroskop optimal in das Handling-System integriert sein. Die einzelnen Uniblocke müssen aus einem Magazin in ein Prüfnest unter dem Mikroskop transferiert und nach der optischen Prüfung wieder in ein Magazin übertragen werden. Dazu müssen die exakte Position der Uniblocke bei der Zuführung und die Position der Magazintaschen des Abführmagazins bekannt sein. Die starke Volumenstreuung des Kunststoffes, aus dem die Magazine gefertigt sind, und der mangelnde Kontrast zum relativ dunklen Hintergrund erschwerten dabei die Kantenerkennung. Fraunhofer IPM hat diese Aufgabe mit angepasster Bilderfassung und -verarbeitung und einer speziell ausgelegten Beleuchtungsoptik gelöst. Die geforderten Wiederholgenauigkeiten der Positionsbestimmung liegen hier bei 30 µm.



Am Standort Dortmund produziert Boehringer Ingelheim microParts GmbH jährlich rund 44 Millionen Respimat®-Inhalationsgeräte. Fraunhofer IPM hat dort bereits mehrere Prüfanlagen in die Produktionslinie integriert, die vor Ort fehlerfrei arbeiten. Sie ermöglichen eine zuverlässige Erkennung fehlerhafter Bauteile.

3+4 Durch die Glasdeckelung des Bauteils sind die Strukturen des Mikrobauteils sichtbar. Die Kante des Siliziumblocks allerdings wird mit einem konventionellen Weitfeldmikroskop nicht dargestellt (3). Die Lage der Mikrostruktur relativ zu den Außenkanten kann daher nicht bestimmt werden. Dies gelingt mit einem Laser-Scanning-Mikroskop (4).

»Unsere Systeme messen Schicht für Schicht.«

Fraunhofer IPM entwickelt anwendungstaugliche Messsysteme zur Materialcharakterisierung und -prüfung. Dabei greifen die Wissenschaftler auf Kompetenzen in der optischen System- und Messtechnik, der Spektroskopie und der Entwicklung von Kristall- und Halbleiterkomponenten zurück. Die Technologien reichen von der optischen Kohärenztomographie (OCT) im sichtbaren Spektralbereich über die Zeitbereichsspektroskopie im Terahertz-Frequenzbereich bis zu elektronischen Systemkonzepten im Millimeterwellenbereich. In der Materialprüfung lassen sich Defekte in Keramiken, Kunststoffen oder auch faserverstärkten Verbundwerkstoffen zerstörungsfrei aufspüren. Besonderes Interesse gilt der Schichtdickenmessung, zum Beispiel in Lackierprozessen. Neben OCT sind hier insbesondere die Terahertz- und Millimeterwellen-Messtechnik eine Alternative zu Ultraschallmessungen, wenn kein mechanischer Kontakt möglich oder gewünscht ist, aber auch zu Röntgenmessungen, wenn ionisierende Strahlen ein Problem darstellen. Zusätzlich zur Dickenbestimmung können mit den Messsystemen die Materialparameter der einzelnen Schichten bestimmt und mittels chemometrischer Auswertemethoden eindeutig und zuverlässig identifiziert werden.

KONTAKT

Prof. Dr. Georg von Freymann
Abteilungsleiter

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

Elektronische Terahertz-Messtechnik

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

Optische Terahertz-Messtechnik

Die Gruppe entwirft und baut schlüsselfertige Terahertz-Zeitbereichssysteme zur Erzeugung und Detektion breitbandiger Terahertz-Strahlung. Dies umfasst die Herstellung von Terahertz-Antennen als Sende- und Empfangseinheiten. Das Einsatzspektrum reicht von robotermontierten Schichtdicken-Messsystemen über hochauflösende Spektroskopie bis zur Messtechnik für die ultraschnelle Elektronik, bei der extrem schnelle elektro-optische Wandler und ultraschnelle Optik kombiniert werden.

THEMEN

- ▶ zerstörungsfreie Materialprüfung
- ▶ Schichtdickenmessung
- ▶ chemische Analyse
- ▶ Sicherheitsanwendungen
- ▶ Vektor-Netzwerkanalysatoren

KOMPETENZEN

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

Die Dicke einzelner Lackschichten auf einer Autokarosserie lässt sich mit Terahertz-Systemen messen.



ELEKTRONISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

Struktur- und Defekterkennung – schnell und berührungslos

Elektrisch nichtleitende Materialien wie Kunststoffe, Keramiken, Textilien oder auch Verbundwerkstoffe sind für niederfrequente Terahertz-Wellen häufig transparent. Dieser Spektralbereich eignet sich daher hervorragend zur zerstörungsfreien Materialprüfung. Fraunhofer IPM entwickelt industriereife Terahertz-Prüfsysteme, nutzt dafür nicht nur eigene Komponenten und Technologien, sondern setzt auch auf innovative Messkonzepte aus der Kommunikations- und Radartechnik.

Methoden der berührungslosen Terahertz-Messtechnik zur zerstörungsfreien Materialprüfung haben zwei große Vorteile: Zum einen sind viele elektrisch nichtleitende Materialien für Terahertz-Wellen transparent. Und zum anderen sind Terahertz-Wellen im Gegensatz zur Röntgenstrahlung nicht ionisierend. Doch die Herausforderungen bei der Entwicklung einer marktauglichen Terahertz-Prüfung liegen nicht allein darin, tiefliegende Materialstrukturen in Form von aussagekräftigen Schnittbildern darzustellen. Genauso wichtig sind eine schnelle Signalverarbeitung und ein Systemdesign, das die Systemintegration in die Produktionsumgebung erlaubt.

Terahertz-Systeme, die ein Messobjekt Pixel für Pixel mittels einer einzelnen Sensoreinheit abrastern, haben sich für Voruntersuchungen und Stichprobenmessungen bereits bestens bewährt. Fraunhofer IPM hat darüber hinaus auch das Portfolio für schnelle, industrietaugliche Terahertz-Prüfsysteme inzwischen deutlich erweitert: Es reicht von handgeführten Einzelpunktsensoren über schnelle Scanner-Systeme auf Basis der vielfach erprobten Scanner-Technologie von Fraunhofer IPM bis hin zu Sensornetzwerken für großflächige Prüfungen in der Qualitätskontrolle.

Vom Signal zur 3D-Struktur

Bei allen Systemlösungen lässt sich die Signallaufzeit durch Modulation der Betriebsfrequenz bestimmen. Aus den Laufzeiten der von der Sensorik ausgesendeten und vom Messobjekt reflektierten Terahertz-Signale erhält man dann die gewünschten Tiefeninformationen und kann Merkmale innerhalb des Messobjekts mit einer Auflösung bis in den sub-Millimeterbereich dreidimensional lokalisieren. Einzelpunktsensoren eignen sich insbesondere für stichprobenartige Dicken- und Dichtemessungen, beispielsweise an Rohrwänden. Bei Merkmalen, die wenige Zentimeter groß sind, wie etwa Kunststoffschweißnähte, kommen hingegen schnelle Zeilenscanner zum Einsatz.

Ausgedünnte Terahertz-Sensornetzwerke

Zur Terahertz-Prüfung großflächiger Objekte mit hoher Tiefenaufklärung direkt im Prozess setzt Fraunhofer IPM auf ausgedünnte Terahertz-Sensornetzwerke. Hierfür wurden bewährte Konzepte aus der Kommunikationstechnik erfolgreich in die bildgebende Terahertz-Prüftechnik übertragen. Das dabei zugrundeliegende Messprinzip

TERAHERTZ-PRÜFUNG

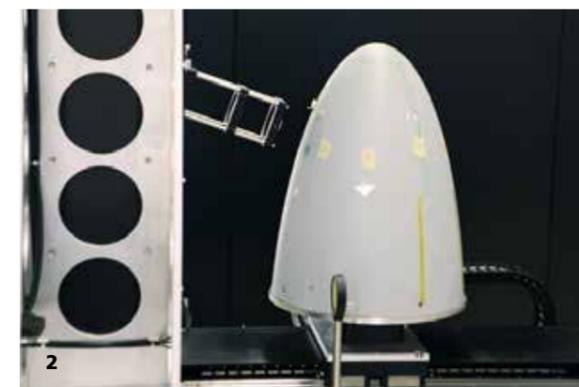
Komplementär zur Ultraschall- oder Röntgenprüfung ermöglicht die Terahertz-Technologie die bildgebende Inspektion dielektrischer Materialien auf innere Fehlstellen oder charakteristische Merkmale. Die berührungslose Terahertz-Prüfung liefert typischerweise auch bei weichen Materialien und Kunststoffverbänden bereits sehr kontrastreiche Aufnahmen. Ähnlich wie bei Ultraschallverfahren lassen sich tomographieähnliche Tiefenschnittbilder erzeugen.

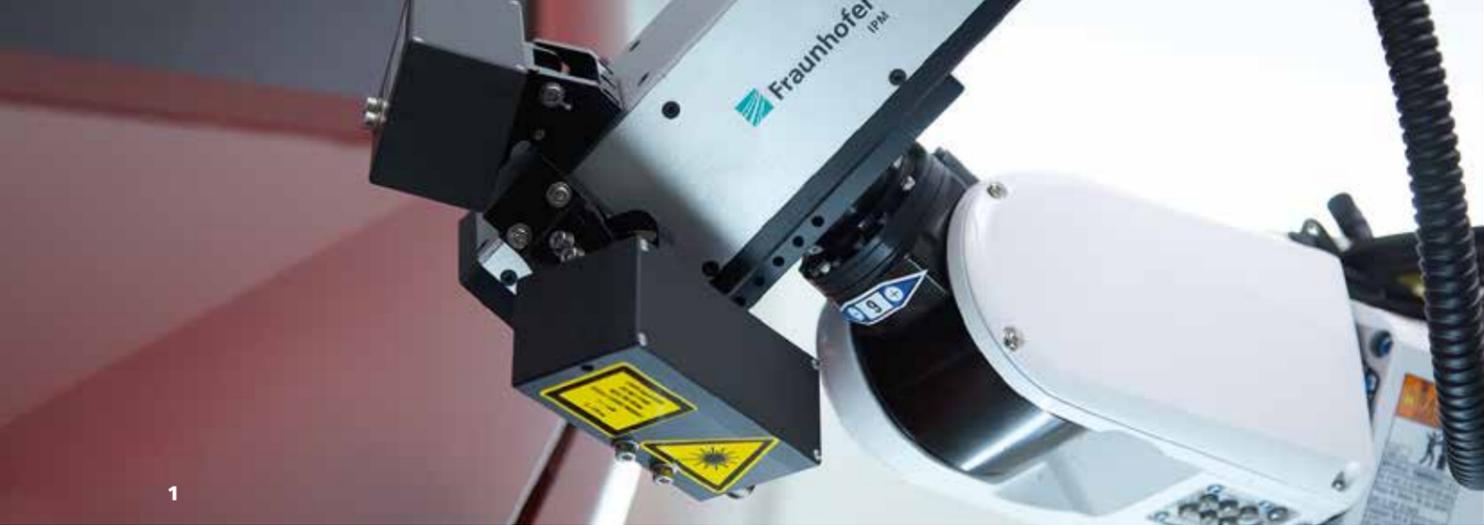
1 Ein Terahertz-Sensornetzwerk kann mit wenigen Terahertz-Sendern und -Empfängern eine Vielzahl an Bildpunkten gleichzeitig aufzeichnen. Das erspart teure Komponenten und verkürzt gleichzeitig die Messzeit.

besteht darin, durch gezieltes Schalten einzelner Sende- und Empfangseinheiten eine synthetische Sensoranordnung zu generieren. Dadurch wird die Anzahl der teuren Sensorelemente erheblich reduziert und die physikalische Sensoranordnung kann flexibel für die jeweilige Anwendung angepasst werden. Im Idealfall entspricht die Gesamtzahl der Messpunkte der Anzahl der Sender mal der Anzahl der Empfänger. In Verbindung mit einem Fließband erlaubt eine solche zeilenförmige Sensoranordnung dann eine vergleichsweise schnelle Prüfung des

Messobjekts – zum Beispiel direkt im Produktionsprozess. Selbst hohle und geschäumte Materialien mit gekrümmten Oberflächen lassen sich so problemlos untersuchen; auch dann, wenn der Prüfling nur von einer Seite zugänglich ist.

2+3 Die innere Struktur einer Flugzeugspitze (Radom) lässt sich mit Terahertz-Prüftechnik erfassen und als 3D-Tomographiebild darstellen (Quelle: DOTNAC, FP7-gefördertes Projekt).





1

OPTISCHE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

Schicht um Schicht exakt gemessen

Messverfahren, die die Struktur von Schichtsystemen zerstörungsfrei darstellen und analysieren, spielen in der Industrie eine immer wichtigere Rolle – in der Entwicklung und in der Qualitätskontrolle. Zwei sich ergänzende Methoden, die Terahertz-Messtechnik und die Optische Kohärenztomographie, erobern derzeit diesen Markt.

Die Terahertz-Technologie etabliert sich derzeit als berührungslose Methode zur Schichtdickenmessung, beispielsweise von Autolack-Schichtsystemen. Denn im Gegensatz zu anderen zerstörungsfreien Analysemethoden kann man mittels Terahertz-Wellen, die im Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen liegen, selbst komplexe Mehrschichtsysteme exakt analysieren. Dies gelingt, da Terahertz-Wellen an jeder einzelnen Grenzfläche reflektiert werden, an der sich der Brechungsindex ändert. Anhand der Laufzeitunterschiede der reflektierten Teilwellen lassen sich die Schichtdicken von Mehrschichtsystemen exakt bestimmen – berührungslos und zerstörungsfrei.

Schichtsysteme sind weit verbreitet

Im Rahmen der Qualitätskontrolle genügt es bisher meist, die Gesamtdicke einer Beschichtung zu erfassen. Doch immer häufiger ist die Dickenkontrolle der Einzelschichten innerhalb eines Mehrschichtsystems gefordert. Und das gilt selbst für industriell bereits stark verbreitete Standardsysteme wie zum Beispiel die Lackierung von Autokarosserien. Besonders die Mehrschichtanalyse auf Kunststoffsubstraten gewinnt an Bedeutung, da diese immer häufiger eingesetzt werden, um Gewicht und Kosten zu sparen.

Aktuell kann als einziges Messverfahren die Terahertz-Messtechnik im industrierelevanten Dickenbereich von 10–500 µm einzelne Schichten in Mehrschichtsystemen zerstörungsfrei und berührungslos nachweisen. Dies hat Fraunhofer IPM in Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Partnern u. a. aus dem Automotive-Bereich gezeigt. Der Einsatz in der Serienproduktion soll bereits im Jahr 2016 erfolgen. Sehr vielversprechend sind auch erste Ergebnisse in Richtung der Vermessung weicher, strukturierter Schichten wie zum Beispiel Häute aus PVC-Kunststoff, die im Innenraum von Fahrzeugen eingesetzt werden. Der Anwendungsbereich der Terahertz-Mehrschichtanalyse ist physikalisch bedingt jedoch auf Schichtdicken von über 10 µm eingeschränkt.

Neue Methode für sehr dünne Schichten

Doch auch zur Messung sehr dünner Schichten gibt es eine Lösung: die Optische Kohärenztomographie (OCT). Dieses Verfahren wurde ursprünglich für die tiefenaufgelöste Visualisierung biologischer und medizinischer Materialien entwickelt. Dank intensiver Forschung hat sich das Verfahren inzwischen auch außerhalb der Medizin etabliert. Hochaufgelöste Probenquerschnitte, die mittels sichtbarem Licht oder Infrarotlicht völlig zerstörungsfrei in Echtzeit erzeugt werden,

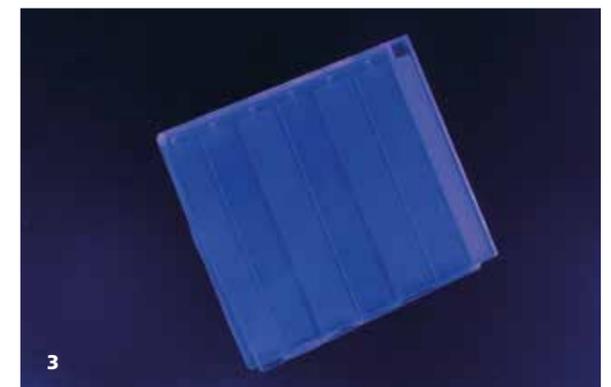
DIE TOMOGRAPHISCHE BILDGEBUNG ist eine wichtige messtechnische Methode, um innerer Strukturen semitransparenter Materialien zu charakterisieren und zu analysieren. Etablierte nicht-invasive, tomographische Bildgebungsverfahren wie Ultraschall und Magnetresonanztomographie stoßen bei feinen Strukturen jedoch an ihre Auflösungsgrenzen. Bei teiltransparenten Materialien kann hier die Optische Kohärenztomographie feinste Details mit Strukturgrößen von bis zu 1 µm noch sicher auflösen.

machen die OCT zur idealen berührungslosen Prüftechnik für viele Anwendungen. Das physikalische Prinzip hinter dieser Methode ist die interferometrische Überlagerung eines Lichtstrahls, der aus unterschiedlichen Probentiefen reflektiert wird, mit einem Referenzstrahl. Aus Intensität und zeitlicher Verschiebung des reflektierten Strahls lässt sich die Tiefeninformation der Probe mathematisch ermitteln und als Querschnittsbild darstellen. Das Auflösungsvermögen beträgt je nach spektraler Breite zwischen 1 und 20 µm.

Die Optische Kohärenztomographie eignet sich für alle Materialien, die für sichtbares oder nahinfrarotes Licht zumindest teiltransparent sind. Dies sind viele Kunststoffe, Verbundmaterialien, Metalle, Gläser, Keramiken oder Halbleitermaterialien. Mit OCT erschließt Fraunhofer IPM derzeit den Bereich dünner Schichten. Erfolgreich vermessen wurden bereits Epoxidharzschichten, die zum Beispiel zur elektrischen Isolierung auf Metallen aufgebracht werden.

2+3 Heutzutage genügt es nicht mehr, die Gesamtdicke einer Beschichtung zu erfassen. Immer häufiger sollen die Einzelschichten eines Mehrschichtsystems exakte Schichtdicken aufweisen: Epoxidharzschichten bei einem Motor (2), beschichtetes Architekturglas (3).

1 Zur Messung von Lackschichten auf Karosserieteilen wird das Terahertz-Messsystem per Roboterarm geführt.



»Wir entwickeln die schnellsten Laserscanner der Welt.«

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« erfassen wir die dreidimensionale Geometrie und Lage von Objekten. Dazu entwickeln wir nicht nur Laserscanner, sondern auch maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamera-Systeme. Diese Geräte messen mit hoher Geschwindigkeit und Präzision insbesondere von bewegten Plattformen aus. Besonderes Augenmerk liegt auf der Geschwindigkeit, Robustheit und langen Lebensdauer der Systeme sowie einer effizienten Datenauswertung. Objekte und Formen werden über einen weiten Größenbereich erfasst: von zehntel Millimetern bis in den 100-Meter-Bereich. Die Messsysteme sind weltweit im Einsatz – zur Überwachung von Bahninfrastruktur ebenso wie zur Vermessung von Straßenoberflächen. Neue Anwendungsbereiche sind die mobile Datenerfassung aus der Luft, unter Wasser oder mit handgehaltenen Systemen.

KONTAKT

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

Laser Scanning

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

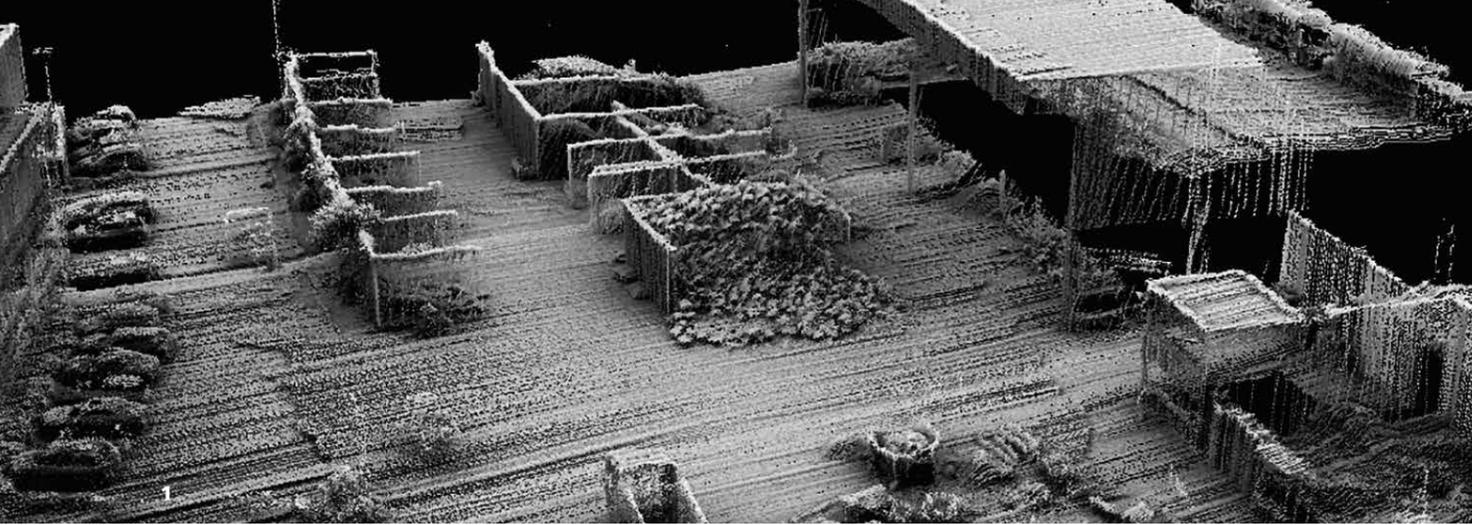
THEMEN

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

KOMPETENZEN

- ▶ augensichere 3D-Laserscanner, kamerabasierte 3D-Aufnahmen, 3D-Datenverarbeitung
- ▶ Erfassung von Objektgeometrie und -lage von mobilen Plattformen aus, auch bei hohen Geschwindigkeiten
- ▶ schnelle Bildauswertung
- ▶ robuste Systemtechnik

Eine Kamera kombiniert mit spezieller LED-Beleuchtung ermöglicht die Vermessung von Bahn-Oberleitungen.



LASER SCANNING

Datenerfassung aus der Luft

Überall dort, wo Infrastruktur-Messungen für Menschen gefährlich werden können – ob in unwegsamem Gelände oder aber in Krisenregionen – ist der Einsatz von UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) die erste Wahl. Montiert auf kleinen, fliegenden Plattformen erfassen Messsysteme große Flächen und komplexe Strukturen schnell und effizient. Fraunhofer IPM hat ein neuartiges Messsystem zur Erfassung der Umgebungsgeometrie für den Einsatz auf UAVs entwickelt.

Das aus unterschiedlichen, frei kombinierbaren Komponenten bestehende Messsystem ist in der Lage, sich auch ohne externe Referenzierungssysteme wie GNSS (Global Navigation Satellite System) lokal zu positionieren und zu orientieren. Dadurch eignet es sich insbesondere für abgeschattete und komplexe Strukturen mit schlechtem oder ohne GNSS-Empfang. Realisiert wird dies durch die Aufnahme sehr schneller Bildsequenzen und spezielle Algorithmen. Die erreichbare relative Genauigkeit liegt abhängig von den äußeren Bedingungen im Bereich weniger Zentimeter. Eigentliche Messkomponente des Systems ist ein augensicherer Laserscanner mit einem Arbeitsbereich von 250m. Der Scanner wird durch ein multi-spektrales Kamerasystem zu einem leistungsfähigen Multi-Sensorsystem ergänzt.

Klein, leicht und energiesparend

Messsysteme für UAVs müssen vor allem »Leichtgewichte« sein. Das stellt hohe Anforderungen an den Systemaufbau. Für die Sensorik sind daher enge Grenzen in puncto Größe, Gewicht und Leistungsaufnahme vorgegeben.

Fraunhofer IPM arbeitet kontinuierlich an der Optimierung dieser Sensoren. Aktuell wirken Wissenschaftler von Fraunhofer IPM an zwei Projekten mit, in denen UAV-getragene Messsysteme zum Einsatz kommen.

Ziel des Projekts »MulDiScan« ist es, Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Bergstürze oder Waldbrände besser vorhersagen zu können und damit die Grundlage für vorbeugende Maßnahmen zu schaffen. Dazu benötigen Wissenschaftler hochwertige Messdaten großer, teils schwer zugänglicher Landstriche, die auf geometrische Veränderungen von Strukturen hinweisen können. Forscher von Fraunhofer IPM arbeiten gemeinsam mit Wissenschaftlern der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg daran, die Datenerfassung und Dateninterpretation weiterzuentwickeln.

Im Projekt »MonIs«, unterstützt durch das europäische Förderprogramm »Eurostars«, entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern aus Deutschland, Österreich und Spanien ein System zur Überwachung von Infrastruktur wie Bahnstrecken, Straßen und Gebäuden.

LICHTLAUFZEITMESSUNG

Grundlage der Datenerfassung aus der Luft sind hochgenaue Messungen der Geometrie auf Basis von Lichtlaufzeitmessungen. Dabei wird die Zeit gemessen, die Lichtwellen oder Lichtpulse benötigen, um von einem Sender zu einem Objekt und zurück zu einem Detektor zu gelangen. Durch die Bewegung eines Laserscanners und rasch aufeinanderfolgenden Messungen ergibt sich eine Vielzahl von Messpunkten, die ein 3D-Modell der zu messenden Oberfläche ergeben.

Das Messsystem besteht aus einem speziell angepassten UAV und der entsprechenden Sensorik, kann problemlos an kritischen Orten eingesetzt werden und dabei Daten in kurzen Zeitabständen sammeln.

Auf UAVs installierte Messsysteme haben großes Potenzial: Ob schwer zugängliches Gelände oder für den Menschen kritische Umgebungen – UAV-getragene Systeme können überall dort wichtige Daten sammeln, wo Messungen vom Boden aus nicht möglich sind.

2 Ein multi-spektrales Kamerasystem erlaubt die Vitalitätsbestimmung von Pflanzen. Es besteht aus vier Kameras, die Daten in unterschiedlichen spektralen Bereichen erfassen.



1 Erfassung komplexer Strukturen aus der Luft. Ein Flächenbereich von mehreren 100m² kann in weniger als zehn Minuten erfasst, prozessiert und visualisiert werden.

»Wir entwickeln Messtechnik für höchste Ansprüche.«

Im Geschäftsfeld »Gas- und Prozesstechnologie« entwickelt und fertigt Fraunhofer IPM Mess- und Regelsysteme nach kundenspezifischen Anforderungen. Kurze Messzeiten, hohe Präzision und Zuverlässigkeit, auch unter extremen Bedingungen, zeichnen diese Systeme aus. Zu den Kompetenzen gehören unter anderem laserspektroskopische Verfahren für die Gasanalytik, energieeffiziente Gassensoren, Partikelmesstechnik sowie thermische Sensoren und Systeme. Die Bandbreite der Anwendungen ist groß: Sie reicht von der Abgasanalyse über die Transportüberwachung von Lebensmitteln bis hin zu Sensoren und Systemen zur Messung kleinster Temperaturunterschiede.

KONTAKT

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

Integrierte Sensorsysteme

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

Thermische Messtechnik und Systeme

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

Spektroskopie und Prozessanalytik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung spektroskopischer Systeme zur Detektion und Analyse von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. Dabei nutzen die Wissenschaftler ihre langjährige Erfahrung in der Abgas-, Brenngas- und Partikelmesstechnik. Methoden wie die Raman-, ATR- oder Laserspektroskopie werden für Laboruntersuchungen, Entwicklung von Prototypen bis hin zur Kleinserienfertigung verwendet.

THEMEN

- ▶ Abgasmessung
- ▶ Brandgasdetektion und Katastrophenschutz
- ▶ Luft- und Lebensmittelqualität
- ▶ Öl-Qualitätskontrolle
- ▶ industrielle Prozessüberwachung (Gaszusammensetzung)

KOMPETENZEN

- ▶ optische Spektroskopie
- ▶ Gas-, Partikel-, Flüssigkeits- und thermische Sensorik und Messsysteme
- ▶ Mikrosystemtechnik
- ▶ Simulationen für Thermodynamik, Strömung und Optik

Moderne Gaslabore am
Fraunhofer IPM – für eine
Vielfalt an Messaufgaben.



INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Miniaturisierte photoakustische Gasmesssysteme

Fraunhofer IPM hat ein neuartiges, kompaktes und kostengünstiges Messsystem zur Detektion von Kohlendioxid entwickelt. Es beruht auf dem Prinzip der Photoakustik und kombiniert eine miniaturisierte Mess- und Detektionskammer mit einem thermischen Strahler und einem speziell gekapselten Mikrofon.

Ob in der Werkstatt, im Konferenzraum, im Auto oder Zug: Eine Überwachung des Raumklimas ist überall dort wichtig, wo sich viele Menschen in geschlossenen Räumen aufhalten. Durch das Ausatmen der anwesenden Personen kann sich die Luftqualität in einem Raum in wenigen Minuten drastisch verschlechtern. Schon eine moderate Erhöhung des CO₂-Gehalts verursacht Müdigkeit und Konzentrationsstörungen. Eine starke Erhöhung führt zu Schwindel und Kopfschmerzen. Für eine bedarfsgerechte Raumlüftung sollte die Kohlendioxid-Konzentration im Raum bekannt sein. Nur so kann verhindert werden, dass sie zu stark ansteigt. Nebenbei spart eine effizient gesteuerte Lüftung Heizenergie.

Fraunhofer IPM hat zur Detektion von CO₂ in Innenräumen ein miniaturisiertes photoakustisches Gasmesssystem entwickelt. Das System kombiniert eine miniaturisierte Mess- und Detektionskammer mit einem modulierbaren thermischen Strahler und einem speziell gekapselten Mikrofon. Der handelsübliche optische Aufbau sowie entsprechende Komponenten, beispielsweise ein MEMS-Mikrofon (MEMS: Micro-Electro-Mechanical-Systems) aus der Mobilfunktechnik, machen das Sensorsystem flexibel im Einsatz. Durch die Verwendung dieser Massenbauteile sind die Systemkosten sehr gering. Dank Miniaturisierung und Integration der Systemkomponenten

kommt der Sensor mit sehr wenig Energie aus. Ein weiterer Vorteil des Systems ist die Selektivität der Gasmessung durch den besonderen 2-Kammer-Aufbau.

Aus Licht wird Schall

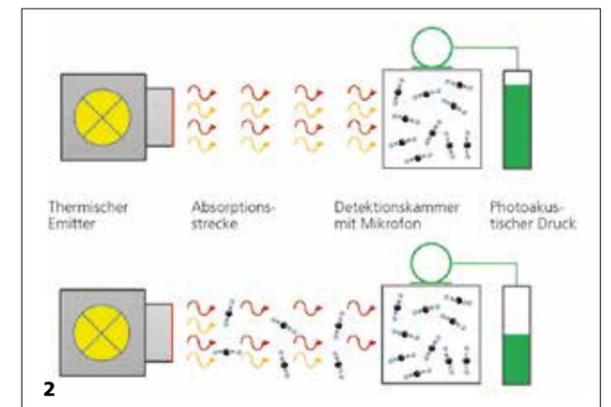
Das Messsystem beruht auf dem photoakustischen Effekt. Dieser wurde erstmals von Alexander Bell, dem »Erfinder« des Telefons, beschrieben. Der Effekt beschreibt die Umwandlung von Lichtenergie in Schall durch Absorption durch Gasmoleküle. Die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Moleküle wird bei photoakustischen Messungen mithilfe eines Druckumformers direkt über die aus der Absorption resultierende Druckerhöhung gemessen. Es ist daher kein Strahlungsdetektor nötig, wie er in anderen Infrarot-Messsystemen eingesetzt wird. Die Entstehung des photoakustischen Signals lässt sich durch verschiedene Phasen veranschaulichen: Zunächst wird die elektromagnetische Strahlung bei ganz bestimmten Wellenlängen von den Molekülen absorbiert. Die resultierende Energieerhöhung äußert sich in einer schnelleren Bewegung der Moleküle, was zur Druckerhöhung im System führt. Diese Druckerhöhung lässt sich in einer geschlossenen Kammer mit einem Mikrofon als Schallwelle messen. Die Lichtenergie wurde in Schall umgewandelt.

MINIATURISIERTE GASMESSSYSTEME

Fraunhofer IPM steht für langjährige Erfahrung in der Entwicklung, Konzeptionierung, Charakterisierung und Herstellung miniaturisierter Sensoren und Systeme für die Gasmess-technik. Gassensoren überwachen industrielle Prozesse, spüren Leckagen auf oder regeln das Raumklima. Dank ausgefeilter Technologien messen die Sensoren auch unter anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig und präzise.

1 Die Luftqualität im Fahrzeuginnenraum kann mithilfe photoakustischer Gassensor-Systeme überwacht werden.

2 Funktionsprinzip des photoakustischen Messsystems mit einem 2-Kammer-Aufbau. Auf der Absorptionsstrecke wird die Umgebungsluft gemessen. In der Detektionskammer wird das zu messende Gas selbst als gaselektiver Detektor eingesetzt.



Messprinzip erlaubt kompakte Systeme

Herkömmliche Systeme zur Raumluftüberwachung sind teuer und temperaturempfindlich. Das von Fraunhofer IPM entwickelte System bietet die Möglichkeit, den Strahlungsdetektor durch ein handelsübliches Mikrofon zu ersetzen und somit die Kosten des Messsystems deutlich zu senken. Die Abstände zwischen den Komponenten und damit der optische Weg können bei einem photoakustischen Sensor deutlich kleiner sein als bei vergleichbaren Absorptionsmessmethoden. Miniaturisierte, kostengünstige photoakustische Messsysteme, gefertigt in großen Stückzahlen, bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten: Die kleinen

3 Hoher CO₂-Gehalt ist schlecht fürs Klima. Das gilt auch für Innenräume. Ein besonders kompakter und preiswerter CO₂-Sensor beruht auf dem Prinzip der Photoakustik.

Systeme sorgen nicht nur im Konferenzraum für gutes Klima, sie schaffen auch überall dort Sicherheit, wo in geschlossenen Räumen CO₂ entstehen kann – etwa in Schankanlagen, Kühl- und Gefrieranlagen, Weinkellern, bei klinischen Anwendungen oder in industriellen Fertigungsprozessen. Hier bedeutet eine zu hohe CO₂-Konzentration eine ernste gesundheitliche Gefahr.



THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

Elektronische Zungen schmecken den Unterschied

Das menschliche Gehirn kann tausende verschiedene Lebensmittel ganz intuitiv unterscheiden. Dies geschieht auf Basis einer Mustererkennung, die verschiedene sensorische Signale der Zunge in Sekundenbruchteilen im Gehirn erzeugen. Vergleichbares wird auch in der Messtechnik angewendet: Die Kombination von thermischer und elektrischer Impedanz-Spektroskopie erlaubt es zum Beispiel, mit dem passenden Auswerteverfahren Flüssigkeitseigenschaften in Prozessen sicher zu erkennen.

Auf den ersten Blick erscheint die menschliche Sinnesleistung und Informationsverarbeitung beim Essen eher trivial: Die Zunge ermittelt Geschmack, Temperatur und Beschaffenheit von Speisen und Getränken. Und im Zusammenspiel mit den Sinneseindrücken der Geruchszellen sowie der Sehzellen in der Netzhaut kann der Mensch unglaublich viele verschiedene Speisen recht zuverlässig unterscheiden – sogar das Aufschlüsseln einzelner Komponenten eines Gerichts ist für geübte Gaumen kein Problem. Erst beim genauen Hinsehen erkennt man die Höchstleistung von Sinneszellen und Gehirn. Hochkomplex und gleichzeitig effizient muss die Verschaltung und gemeinsame Auswertung der unterschiedlichsten Sensorsignale sein, damit der Geschmack einer Speise erkannt werden kann.

Verglichen dazu sind heute übliche elektronische Sensoren geradezu simpel. Fraunhofer IPM entwickelt derzeit neuartige Sensorkonzepte auf Basis der kombinierten elektrischen und thermischen Impedanzspektroskopie. Damit kann das Messprinzip – Materialien am Geschmack zu erkennen – auf die Überwachung technischer Prozesse übertragen werden.

Messtechnik kommt auf den Geschmack

Die elektrische Impedanzspektroskopie ist ein altbewährtes Werkzeug, um Eigenschaften von Flüssigkeiten zu messen, die auf der elektrischen Leitfähigkeit beruhen. Ein Problem dabei: Die verwendeten Messstrukturen sind aufgrund ihrer Größe sehr empfindlich im Hinblick auf störende Ablagerungen. Diese können die Messstrukturen von der Flüssigkeit separieren. In realen Prozessen sind solche Anlagerungen aber meist nicht zu vermeiden. Hier setzen Wissenschaftler am Fraunhofer IPM auf einen gänzlich neuen Ansatz: Durch zusätzliche Sensoren zur thermischen Impedanzspektroskopie werden solche Beläge als Änderung des thermischen Kontakts zwischen Messzunge und Flüssigkeit registriert.

Kombinierte Messdaten schaffen Klarheit

Dies ist aber noch nicht alles: Die thermische Impedanzmessung kann darüber hinaus genutzt werden, um Änderungen in den thermischen Eigenschaften der Flüssigkeit zu detektieren. Diese sind direkt mit weiteren Eigenschaften wie zum Beispiel der Viskosität verknüpft.

DIE IMPEDANZSPEKTROSKOPIE wird in Physik und Materialwissenschaften zur Untersuchung verschiedenster Materialien und Leitfähigkeitsmechanismen verwendet. Bei der elektrischen Impedanzspektroskopie werden Wechselstromwiderstände in Abhängigkeit von der Frequenz des Wechselstroms bestimmt. Untersucht man statt der elektrischen Leitfähigkeit die Wärmeleitfähigkeit eines Materials, so kann man auch von einer »thermischen Impedanzspektroskopie« sprechen. Die Kombination beider Methoden erlaubt eine zuverlässigere Aussage über die Eigenschaften von Flüssigkeiten in Prozessen.

1 Im Vergleich zur menschlichen Zunge sind elektronische geradezu einfach im Aufbau.

Durch die Kombination mehrerer thermischer Messstrukturen lassen sich außerdem Fließgeschwindigkeit und -richtung messen.

Derzeit entwickeln die Wissenschaftler am Fraunhofer IPM innovative Messkonzepte, die durch die Kombination diverser Sensoren die Alterung von Ölen und die Versottung und andere Vorgänge in chemischen Reaktoren messen sollen. Dazu werden manche Messstrukturen speziell mit reaktiven Beschichtungen versehen. Bei der Kombination liegt das besondere Augenmerk – wie beim menschlichen

Gehirn – in der Analyse und Verknüpfung der einzelnen gewonnenen Sensorsignale. Denn für die menschliche und die elektronische Zunge gilt gleichermaßen: Erst die Kombination verschiedener Geschmacksinformationen bringt das richtige Ergebnis. Ja, die Suppe ist versalzen. Oder: Ja, das Hydrauliköl muss gewechselt werden.

2 Neuartige Sensorkonzepte auf Basis der kombinierten elektrischen und thermischen Impedanzspektroskopie können Eigenschaften von Flüssigkeiten sicher erkennen.





SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

Hochgenaue Brenngasanalyse mittels Infrarotspektroskopie

Starke Schwankungen in der Erdgasqualität sind mittlerweile auch in Deutschland weit verbreitet. Deshalb wird es immer wichtiger, die Gaszusammensetzung regelmäßig und zuverlässig zu bestimmen. Fraunhofer IPM hat für die Firma RMA Mess- und Regeltechnik GmbH & Co. KG das Messsystem »EcoSpectro« entwickelt, das die Erdgasbeschaffenheit schnell und genau detektiert.

Schwankungen in der Gaszusammensetzung und damit qualitative Unterschiede von Erdgas werden immer größer. Grund dafür ist, dass zunehmend Gase verschiedener Anbieter von unterschiedlicher Beschaffenheit ins deutsche Erdgasnetz eingespeist werden. 90 Prozent des in Deutschland verbrauchten Erdgases kommen aus dem Ausland: Der Großteil aus Russland, Norwegen und den Niederlanden. Ergänzt wird dieser Mix durch die Einspeisung von Biogas und in Zukunft auch Wasserstoff, der nach dem Power-to-Gas-Prinzip als Zwischenspeicher für überschüssigen Strom aus volatilen Energiequellen wie Wind- und Photovoltaikanlagen dient. Über die Qualität des Gases entscheidet maßgeblich der Brennwert. Für den Kunden berechnet sich der Gaspreis aus geliefertem Gasvolumen und Brennwert. Letzterer ist keine konstante Größe und schwankt mit unterschiedlicher Gaszusammensetzung – schließlich ist Erdgas ein Naturprodukt. Früher wurde der Brennwert des Gases durch Verbrennung in einem Kalorimeter bestimmt. Heute wird an Verteilerstellen im Gasnetz oder bei industriellen Verbrauchern die Gaschromatographie verwendet, eine Methode mit vielen Nachteilen: Gaschromatographen sind teuer in der Anschaffung und aufwendig im Betrieb. Sie arbeiten relativ langsam und benötigen Trägergase.

Spektral messen – chemometrisch analysieren

Fraunhofer IPM hat ein neuartiges Brenngas-Messsystem auf Basis der Infrarotspektroskopie entwickelt, das gegenüber klassischen Gaschromatographen viele Vorteile hat. Das für die Firma RMA entwickelte Messsystem »Eco-Spectro« ist in der Lage, Kohlenwasserstoffe bis C6+, CO₂, N₂ und je nach Option auch Wasserstoff und Sauerstoff quantitativ zu bestimmen. All jene Gase im Gemisch, die nicht infrarotaktiv sind, werden über zusätzliche integrierte Sensoren detektiert. Weitere Vorteile des Systems: Der »EcoSpectro« misst die Gasbeschaffenheit im Minutentakt. Da er keine Trägergase benötigt, ist das Messsystem im Unterhalt deutlich günstiger als ein Gaschromatograph.

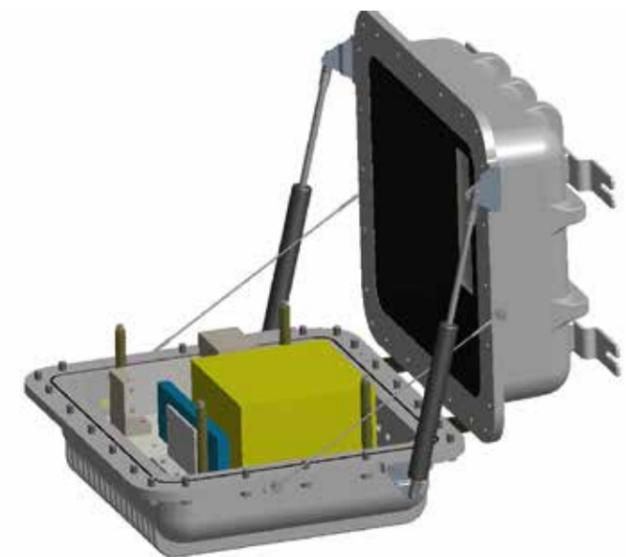
Zur automatischen Auswertung der Spektren nutzt das System ein neuartiges chemometrisches Verfahren. Mit diesem lassen sich auch höherwertige Kohlenwasserstoffe bis hin zu Hexan aus den Spektren herauslesen – sehr genau und automatisch. Im Zusammenspiel mit aufwendigen Maßnahmen zur Stabilisierung des Infrarotspektrometers und entsprechend gutem Signal-Rausch-Verhältnis der Spektren gelingt es, mit dem mathematischen Verfahren die enorme Bandbreite der Gaskonzentrationen von über 70 Prozent

(Methan) bis in den Bereich von 100 ppm (höhere Kohlenwasserstoffe wie Pentane und Hexane) aus einzelnen Spektren herauszulesen. Die verschiedenen Isomere der Kohlenwasserstoffe vervielfachen dabei die Anzahl zu erfassender Gase; beispielsweise können die Pentane als n-Pentan, iso-Pentan oder neo-Pentan vorliegen, sodass insgesamt über zehn verschiedene Gaskomponenten spektroskopisch erfasst werden müssen. Fraunhofer IPM nutzt chemometrische Verfahren in der Spektroskopie seit vielen Jahren, um Stoffzusammensetzungen exakt mathematisch modellieren zu können – auch bei sehr großen Datenmengen.

Gasmesstechnik der neuen Generation

Gas ist der Schlüssel für eine ökonomisch und ökologisch erfolgreiche Energiewende, darauf hat Fraunhofer IPM in den vergangenen Jahren immer wieder hingewiesen. Systeme zur kontinuierlichen Bestimmung von Gaszusammensetzungen und Gasbeschaffenheit wie »EcoSpectro« sind dabei wichtige Bausteine für eine zukunftsfähige ökonomische Gasversorgung.

WAS STECKT IN UNSEREM ERDGAS? Erdgas ist ein Naturprodukt. Es besteht zu 70 bis 90 Prozent aus Methan, daneben aus Ethan, Propan, Butan und weiteren Kohlenwasserstoffen. Meist sind Stickstoff und Kohlenstoffdioxid im Erdgas enthalten. Ein klarer Vorteil von Erdgas gegenüber Erdöl oder Kohle sind deutlich niedrigere Schadstoffemissionen bei der Verbrennung und geringere CO₂-Emissionen. Erdgas ist nach Mineralöl der zweitwichtigste Primärenergieträger im deutschen Energiemix.



2

1 Erdgas aus unterschiedlichen Quellen wird ins Erdgasnetz eingespeist. Der Brennwert des Gases schwankt mit der Gaszusammensetzung.

2 »EcoSpectro« bestimmt die Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Sauerstoff in Gasgemischen im Minutentakt.

»Wir machen mehr aus Materialien.«

Im Geschäftsfeld »Funktionelle Materialien und Systeme« erzeugen und optimieren wir Materialien mit besonderen physikalischen Eigenschaften und entwickeln daraus Systeme. Zu den Materialien zählen: *nichtlinear-optische Materialien*, zum Beispiel für die Entwicklung neuartiger Laser mit durchstimmbarer Wellenlänge; *thermoelektrische Materialien* zur direkten Wandlung von Abwärme in elektrischen Strom und *magneto- und elektrokolorische Materialien* für effiziente und kältemittelfreie Wärmepumpen und Kühlsysteme.

Nichtlineare Optik

Schwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung neuartiger Laserquellen und Detektoren auf Basis nichtlinearer optischer Materialien. Diese ermöglichen beispielsweise die Addition oder Subtraktion unterschiedlicher Lichtwellenlängen, sodass daraus andere, auch veränderbare Wellenlängen entstehen. Dadurch werden weit abstimmbare Laserlichtquellen und empfindliche Infrarot-Detektionssysteme realisierbar, die zum Beispiel in hochempfindlichen Spektroskopie-Systemen eingesetzt werden. Durch Messung geringster Restabsorptionen in hochtransparenten Materialien gelingt die Charakterisierung systemrelevanter Komponenten für Hochleistungslaser und für die nichtlineare Optik.

Thermoelektrik

Die Gruppe befasst sich mit der Konditionierung neuer thermoelektrischer Materialien und entwickelt daraus thermoelektrische Module – zur Abwärmeverstromung, zur Versorgung energieautarker Sensoren oder für den Einsatz als Hochleistungs-Peltierkühler. Simulation und Systemkompetenz werden genutzt, um prototypisch komplette Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie oder zum Thermomanagement kritischer Hardware zu entwickeln, aufzubauen und im Feldversuch zu testen. Darüber hinaus optimiert die Gruppe kundenspezifische thermoelektrische Materialien und Module für Forschung und industrielle Entwicklung.

Magnetokalorik und Elektrokolorik

Die Gruppe befasst sich mit der Entwicklung innovativer Kühlsysteme auf Basis magneto- und elektrokolorischer Materialien. Diese erwärmen sich oder kühlen sich ab, wenn sie magnetischen oder elektrischen Wechselfeldern ausgesetzt werden. Auf Basis dieser neuartigen Materialien werden Kühlsysteme realisiert, die im Vergleich zu herkömmlichen kompressorbasierten Kühltechniken effizienter und deutlich umweltfreundlicher sind, da keine Kältemittel eingesetzt werden.

KONTAKT

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

Bild Magazin mit thermoelektrischen Schenkeln.

THEMEN

- ▶ weit abstimmbare Laserlichtquellen für die Spektroskopie
- ▶ Charakterisierung von optischen Materialien und Halbleitern
- ▶ elektrische Energie aus Abwärme
- ▶ energieautarke Sensoren und Systeme
- ▶ Messsysteme zur Bestimmung thermischer und elektrischer Materialeigenschaften
- ▶ effiziente, kältemittelfreie Kühlsysteme

KOMPETENZEN

- ▶ Konditionierung und Charakterisierung funktioneller Materialien
- ▶ Frequenzkonversion zur Lichterzeugung und -detektion
- ▶ Messung geringster Absorptionen
- ▶ thermisches Management (Heatpipes, Peltier-Elemente)
- ▶ spezielle elektrische und thermische Kontaktierung
- ▶ FEM-Simulationen
- ▶ Systemdesign und -entwicklung



NICHTLINEARE OPTIK

Eine Silizium-Kamera für das Mittlere Infrarot

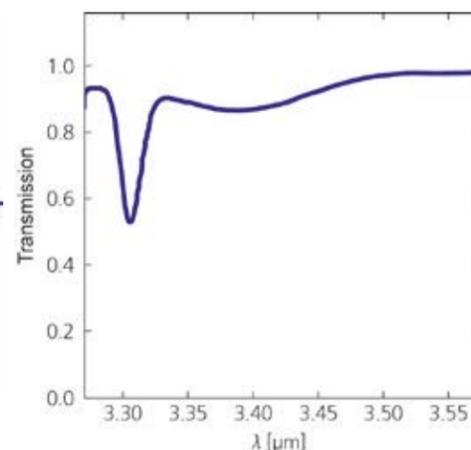
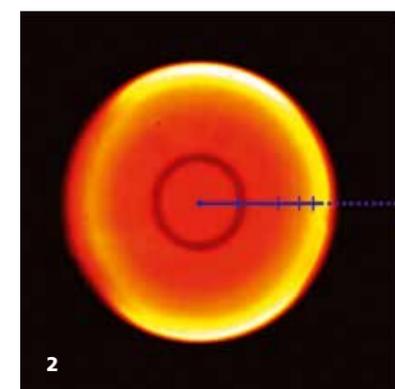
Fraunhofer IPM hat ein spezielles Kameraobjektiv entwickelt. Es verwandelt kostengünstige siliziumbasierte Digitalkameras in sensitive, schnelle Infrarotkameras. Die Wissenschaftler nutzen dabei das Verfahren der Frequenzkonversion.

Klassische Infrarotkameras für den mittel- (3–5 μm) und langwelligen (8–12 μm) Spektralbereich werden heutzutage häufig für Messaufgaben in technischen Prozessen oder in der Sicherheitstechnik eingesetzt. Verglichen mit siliziumbasierten Kameras für den sichtbaren Bereich sind sie jedoch in Bezug auf Empfindlichkeit und zeitliche Auflösung noch immer deutlich unterlegen. Die verwendeten Spezialhalbleiter erfordern eine kryogene Kühlung; dadurch sind die Kameras technologisch aufwendig und teuer. Fraunhofer IPM hat nun im Rahmen des Projekts »LITRAN« gemeinsam mit drei weiteren Fraunhofer-Instituten eine neue Generation schneller Kameras für das Mittlere Infrarot (MIR) entwickelt, die auf

Spezialhalbleiter verzichten können. Dazu werden herkömmliche, siliziumbasierte Kameras mit einem speziellen »aktiven« Objektiv ausgestattet.

Von MIR zu NIR

Herzstück dieses »aktiven« Objektivs ist ein MIR-NIR-Konverter. Durch lasergepumpte Summenfrequenzbildung erfolgt die Transformation des MIR-Signals in den NIR-Bereich (700–900 nm). Die ungewöhnliche Idee dabei: Nicht der Sensor wird »fit« gemacht für das Licht, sondern das Licht für die Kamera! Der Prozess der Frequenzkonversion ist zwar



2 Der LITRAN-Bildkonverter als Spektrometer: Das Licht eines thermischen Strahlers passiert eine mit Methan gefüllte Gaszelle und wird von der LITRAN-Kamera aufgenommen. Das Kamerabild wird in ein Spektrum umgerechnet. Aus dem Ringmuster lassen sich Wellenlänge und Stärke der Methanabsorption bestimmen.

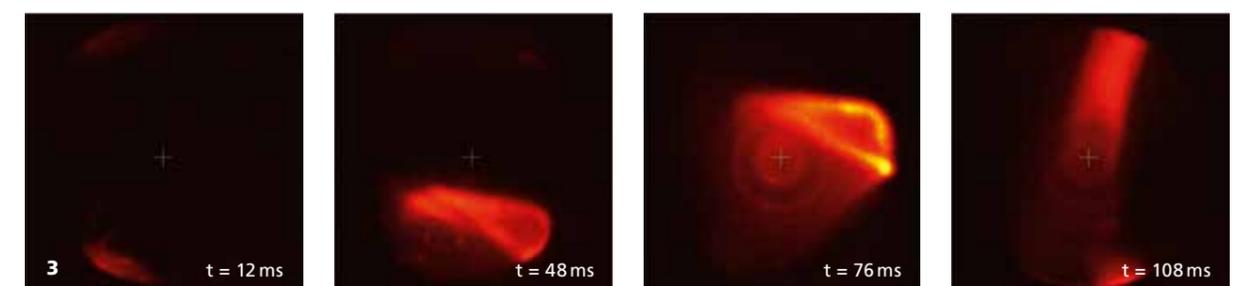
NICHTLINEARE FREQUENZKONVERSION

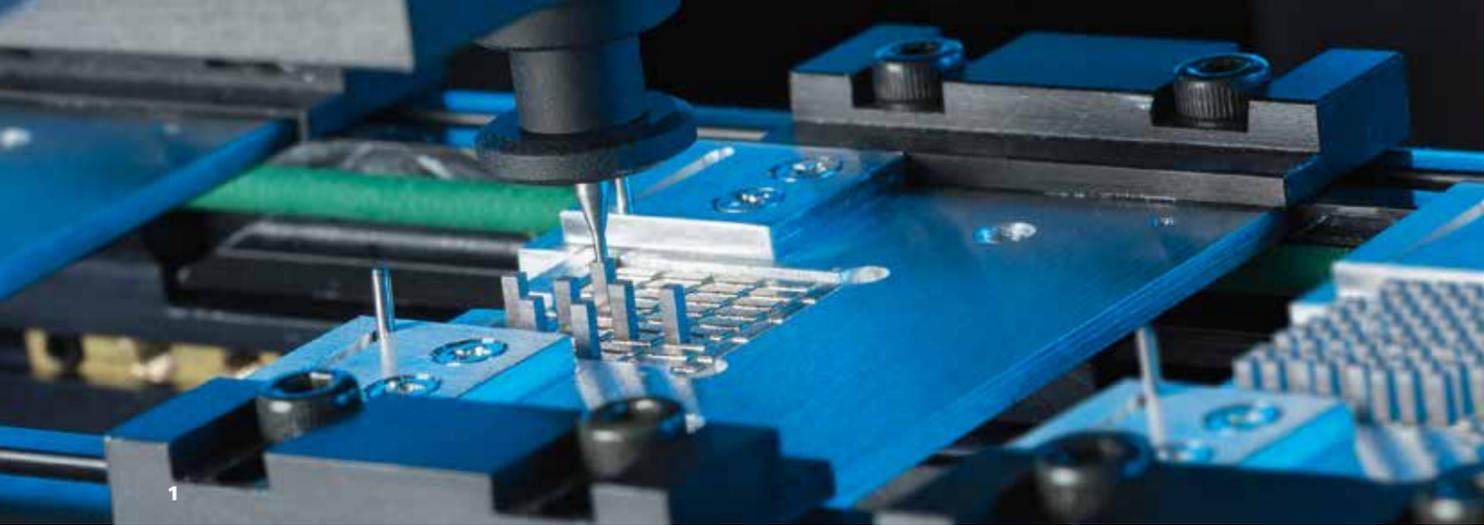
Bei der Bestrahlung geeigneter nichtlinear-optischer Materialien entsteht unter bestimmten Bedingungen Licht mit neuen Wellenlängen. Ein Standardbeispiel ist die Erzeugung von Licht mit der doppelten Frequenz, d. h. der halben Wellenlänge des Ausgangslichts. So wird das grüne Licht eines Laserpointers (532 nm) durch Frequenzverdopplung eines Lasers erzeugt, der eigentlich infrarotes Licht mit einer Wellenlänge von 1064 nm emittiert.

bereits seit Langem bekannt, jedoch war die Effizienz bisher für den praktischen Einsatz viel zu gering. Dank neuer Materialien für den Pumplaser und den Konverterkristall werden jetzt Konversionseffizienzen im Prozentbereich erreicht, die neue Anwendungen möglich machen. Die konvertierten NIR-Photonen werden mit am Markt verfügbaren siliziumbasierten Bildsensoren hochempfindlich und schnell detektiert – und das ohne aufwendige kryogene Kühlung. Ihre Stärken spielt die Kamera besonders bei der spektral aufgelösten Infrarot-Bildgebung aus. Die physikalischen Eigenschaften der Konversion sorgen dafür, dass das aktive Objektiv wie ein einstellbarer schmalbandiger Infrarot-Filter wirkt. So werden Wellenlängenselektive Messungen mit hohem Kontrast im Mittleren Infrarot möglich. Das um Größenordnungen geringere Dunkelrauschen der NIR-Detektoren hat zudem das

Potenzial für äußerst rauscharme und empfindliche Aufnahmen. Gemeinsam mit Partnern erkundet Fraunhofer IPM das Anwendungspotenzial der neuen Kamera unter anderem bei der Ferndetektion von Methanemissionen oder der Prozesskontrolle in der Kunststoffindustrie. Die schnelle und empfindliche Messtechnik, gepaart mit dem Verzicht auf teure Infrarot-Bildsensoren, eröffnet neue Einsatzperspektiven für die bildgebende Analytik im Infrarot-Bereich.

3 Der LITRAN-Bildkonverter als schnelle Kamera: Infrarotaufnahmen (bei ca. 3 μm) der Ausbildung einer (Feuerzeug-) Gasflamme. Neben der Kontur der Flamme ist das thermische Leuchten des heißen Wasserdampfes in der Umgebung der Flamme zu sehen. Dieser emittiert Infrarotstrahlung bei einzelnen Wellenlängen, die im Bild als Ringmuster erkennbar sind.





THERMoeLEKTRIK

Hochtemperatur-Module: erste Schritte zur Serienfertigung

Thermoelektrische Module sind Hightech-Produkte – und werden zum Großteil in Handarbeit gefertigt. Mit einem Laborprozess zur teilautomatisierten Fertigung von Hochtemperatur-Modulen macht Fraunhofer IPM nun einen ersten Schritt in Richtung industrielle Modulproduktion.

Die weltweite Nachfrage nach thermoelektrischen Modulen ist in den vergangenen Jahren stark gestiegen. Vielversprechend ist vor allem der Markt für Hochtemperatur-Module, die zur Nutzung von Abwärme bei Temperaturen weit über 250 °C eingesetzt werden. Am Fraunhofer IPM arbeitet eine der weltweit führenden Forschungsgruppen auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Module.

Dank entscheidender Fortschritte in Forschung und Entwicklung sind heute thermoelektrische Materialien für diese hohen Anwendungstemperaturen verfügbar und in großem Maßstab produzierbar – dazu zählen u. a. Halb-Heusler-Verbindungen, Skutterudite sowie Silizide. Diese neuen Materialien nutzt Fraunhofer IPM für den Bau thermoelektrischer Module, die in stationäre Anwendungen wie BHKW oder mobile Systeme wie Fahrzeuge integriert werden. Bei der Herstellung von Hochtemperatur-Modulen erfolgen bisher noch immer viele Prozessschritte von Hand. Bestrebungen, die Fertigung thermoelektrischer Module zu automatisieren, beschränkten sich bis dato auf Raumtemperatur-Module, die schon seit Jahrzehnten kommerziell erhältlich sind. Die Fertigung der neuen thermoelektrischen Hochtemperatur-Module wird nun erstmalig am Fraunhofer IPM größtenteils automatisiert.

Fingerspitzengefühl und Konzentration

Thermoelektrische Module bestehen aus n- und p-leitenden Materialien, den so genannten Schenkeln, die thermisch parallel und elektrisch in Reihe geschaltet sind. Die Wandlung der Abwärme basiert auf dem so genannten Seebeck-Effekt: Ein Wärmefluss durch das Modul erzeugt einen elektrischen Strom. Damit dies effizient geschieht, werden die Schenkel auf ein Material mit möglichst hoher elektrischer Leitfähigkeit kontaktiert. Das Modul schließt nach außen beidseitig mit dünnen Keramikplatten ab. Die Modulherstellung umfasst im Wesentlichen folgende Prozessschritte: Die zylinderförmigen Materialrohlinge werden auf Maß geschliffen und zu Schenkeln gesägt. Diese werden dann durch Löten oder Schweißen mit den elektrischen Kontakten verbunden.

Vor allem beim manuellen Positionieren der Schenkel sind Fingerspitzengefühl und Konzentration gefragt: Bis zu 80 Schenkel pro Modul, jeder einzelne mit einer Kantenlängen von zirka einem Millimeter, werden unter dem Mikroskop mithilfe einer Pinzette von Hand auf das Kontaktmaterial positioniert. N- und p-leitende Schenkel, die optisch kaum voneinander zu unterscheiden sind, müssen schachbrettartig angeordnet sein. Ist auch nur ein Schenkel am falschen Platz, so funktioniert das fertige Modul nicht.

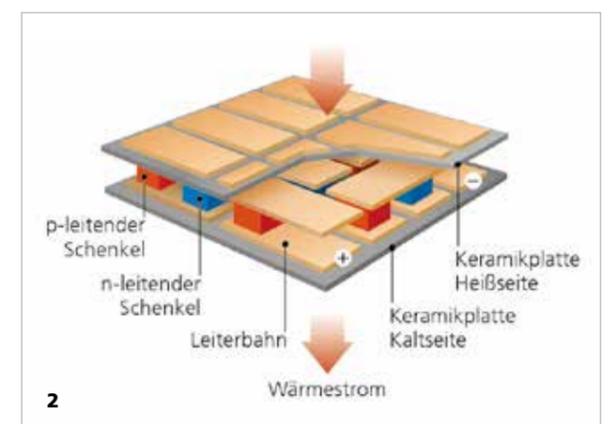
ENERGIEEFFIZIENZ DURCH »ENERGY HARVESTING« Thermoelektrische Module wandeln Wärme in elektrische Energie. Die robusten, wartungsarmen Wandler sind geeignet, Strom aus Abwärme von Verbrennungsmotoren, Kraftwerken oder Industrieanlagen zu gewinnen. Energie, die heute zumeist ungenutzt bleibt. Thermoelektrisches »Energy Harvesting« kann dabei helfen, die Energieeffizienz solcher Prozesse deutlich zu steigern.

Eine Positionsgenauigkeit von rund 0,1 Millimeter ist nötig, um die Funktionsfähigkeit der Module zu gewährleisten. Alle Schritte müssen deshalb mit höchster Präzision erfolgen. Der gesamte Kontaktierungsvorgang inklusive Löttemperatur, Lotmenge und Prozessierung muss reproduzierbar und präzise durchgeführt werden.

Automatisierung und Messtechnik

Mit dem Modulbauprozess, den Fraunhofer IPM Anfang 2016 in Betrieb nahm, sind nun viele Fertigungsschritte automatisiert: Eine automatische Präzisionssäge sorgt für exakt gefertigte Schenkel. Die Positionierung der Schenkel übernimmt ein Setzautomat. Ein am Institut entwickelter automatischer Löt Aufbau steuert den Lötvorgang präzise und effizient. Zur Qualitätssicherung wird der Herstellungsprozess an verschiedenen Stellen durch speziell angepasste Messtechnik überwacht: Elektrische Leitfähigkeit und Seebeck-Koeffizient der Materialrohlinge werden bestimmt, die Form der Schenkel nach dem Sägen wird kontrolliert und die fertigen Module auf die gewünschten elektrischen Eigenschaften wie beispielsweise den Innenwiderstand getestet. Dabei kommen zum Großteil von Fraunhofer IPM entwickelte Messsysteme zum Einsatz, die bei Bedarf eine hundertprozentige Kontrolle in Echtzeit ermöglichen.

1 Der Setzroboter platziert die Schenkel präzise auf die Keramikplatte. Ein Modul besteht aus bis zu 80 schachbrettartig angeordneten Schenkeln aus n- und p-leitenden thermoelektrische Materialien.

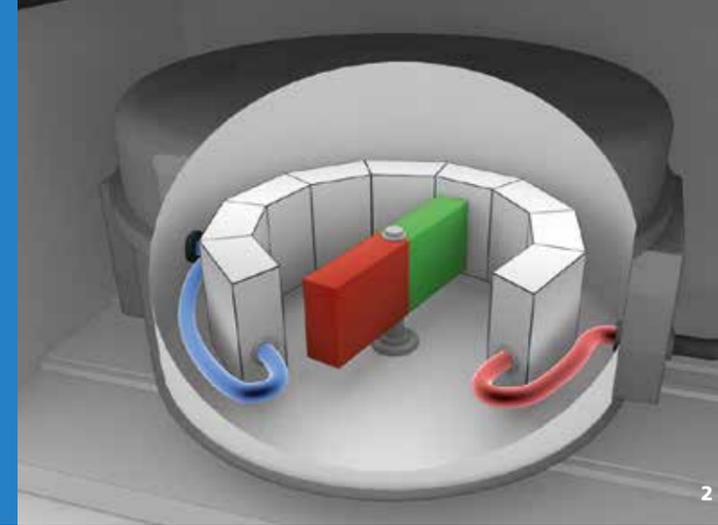


2 Aufbau eines thermoelektrischen Moduls.

Fraunhofer IPM macht mit der Inbetriebnahme der teilautomatisierten Kleinserienfertigung und der Steigerung der Produktionskapazität auf mehrere tausend Stück pro Jahr einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Etablierung industrieller Modulbau-Prozesse und niedrigerer Modulpreise.



1 + 2 So könnte ein magnetokalorisches Kühlsystem aussehen. Im Inneren erzeugt ein sich drehender Permanentmagnet ein magnetisches Feld, sodass die in Reihe geschalteten magnetokalorischen Segmente zyklisch erwärmt und wieder abgekühlt werden.



MAGNETOKALORIK UND ELEKTROKALORIK

Effizienter Wärmeübertrag im magnetokalorischen Kühlkreislauf

Magnetokalorische Kühltechnik gilt als heißer Kandidat, wenn es um effiziente und weniger umweltschädliche Alternativen zur Kompressor-Kühlung geht. Entscheidend für eine zukünftige Markttauglichkeit ist es, den Wärmeübertrag zwischen einem magnetokalorischen Material und einer Wärmeübertragungseinheit möglichst effizient zu realisieren. Fraunhofer IPM hat dazu ein neues Konzept entwickelt, das auf sogenannten Heatpipes basiert.

Bei der Kühltechnik setzen die Hersteller fast ausschließlich auf Kompressoren. Die für den Betrieb der Systeme notwendigen Kältemittel sind allerdings umwelt- und/oder gesundheitsschädlich und werden daher EU-weit immer weiter reglementiert oder auch verboten. Magnetokalorische Kühlzyklen könnten in Zukunft um bis zu 30 Prozent effizientere Kühlsysteme ermöglichen. Solche Systeme sind grundsätzlich wartungs- und geräuscharm und kommen ohne den Einsatz der umstrittenen Kältemittel aus.

Effizienzsprung bei Materialien

Magnetokalorische (MK) Materialien erwärmen sich bei Einwirkung eines magnetischen Felds und kühlen sich nach dessen Entfernen wieder ab. Zum Aufbau eines Kühlzyklus wird ein Magnetfeld an das MK-Material angelegt. Das erwärmte Material wird mit einer Wärmesenke verbunden, um die entstandene Wärme abzuführen. Wird das Magnetfeld entfernt, so kühlt sich das MK-Material ab. Die Temperatur liegt dabei unter der Ausgangstemperatur. Das Material wird nun mit einer zu kühlenden Stelle verbunden und kann Wärme aufnehmen, bis es wieder die Ausgangstemperatur erreicht hat. Magnetokalorische Kühlkreisläufe wurden

bereits in den 1970er Jahren realisiert. Dank immer effizienterer MK-Materialien sind heute magnetokalorisch arbeitende Wärmepumpen mit einer Pumpleistung von mehreren Kilowatt grundsätzlich möglich. Im Rahmen des Projekts »MagCon« (Magnetokalorik: Entwicklung kältemittelfreier, hocheffizienter Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen) entwickeln Wissenschaftler am Institut gemeinsam mit Kollegen des Fraunhofer IFAM den Prototyp eines magnetokalorischen Kühlkreislaufs mit einem neuen, patentierten Wärmeübertragungskonzept, das nach dem Heatpipe-Prinzip funktioniert. Ziel ist das weltweit erste kältemittelfreie System mit einer Wärmepumpleistung von 300W, einem Temperaturhub von 35 K und einer Leistungszahl über 5.

Heatpipes für schnelle Wärmeübertragung

Entscheidend für den Wirkungsgrad eines magnetischen Kühlzyklus ist die Effizienz der Wärmeübertragung zwischen MK-Material und Wärmeübertragungseinheit. Bisherige Prototypen basieren auf dem »Active Magnetic Regeneration« (AMR) Konzept. Dabei wird das MK-Material zur Wärmeübertragung mit einem gepumpten Fluid umspült. Ein niedriger Wärmeübertragskoeffizient und die daraus

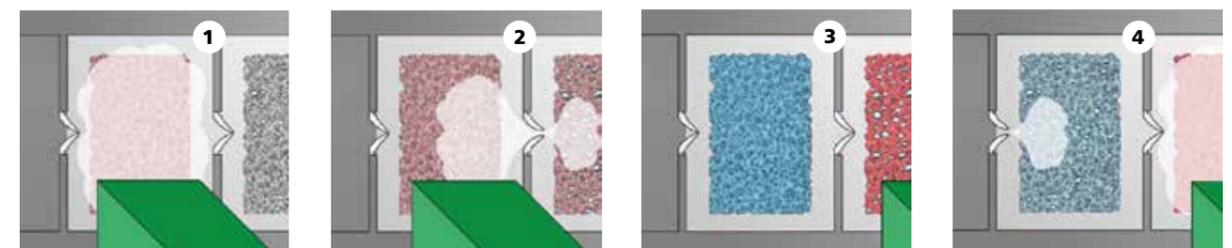
resultierende niedrige Zyklusfrequenz sowie die hohe erforderliche Pumpenergie machen AMR-Konzepte insgesamt ineffizient. Bei dem von Fraunhofer IPM entwickelten Heatpipe-Konzept zum Wärmeübertrag wird Wärme passiv durch das Verdampfen und Kondensieren eines Fluids in einem hermetisch abgeschlossenen Volumen übertragen. Solche auch Thermosiphon genannten Wärmeübertragungseinheiten werden beispielsweise in Solarkollektoren oder in der Computerkühlung eingesetzt. Die Nutzung des Heatpipe-Konzepts zur Realisierung eines magnetokalorischen Kühlzyklus ist neu.

Das Ganze funktioniert effizient und schnell: Durch das Verdampfen eines Fluids, beispielsweise Wasser oder Ethanol, an der Wärmequelle und anschließendes Kondensieren an der Wärmesenke können Wärmeübergangskoeffizienten

erreicht werden, die um Größenordnungen höher sind als bei herkömmlicher Wärmeübertragung mittels Wärmeleitung oder Konvektion. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass der Transport der thermischen Energie von einem der wenige Zentimeter großen magnetokalorischen Segmente zum nächsten im Bereich von Millisekunden erfolgt. Daher lassen sich grundsätzlich Kühlzyklen mit einer Frequenz von mehr als 10Hz aufbauen. Fraunhofer IPM realisiert die Heatpipes als thermische Dioden, die den Wärmefluss in nur einer Richtung gewährleisten. Effiziente, kältemittelfreie Wärmepumpen auf Basis eines magnetokalorischen Zyklus haben das Potenzial, die Kühltechnik zu revolutionieren. Das Charmante daran: Magnetokalorische Wärmepumpen lassen sich ebenso als Heizung nutzen – und könnten so ein wichtiger Baustein für die Klimatechnik der Zukunft sein.

MAGNETOKALORISCHER KÜHLKREISLAUF

Die Wärme wird nach dem Prinzip einer thermischen Diode in nur eine Richtung »weitergeschoben«. Durch die im Magnetfeld erzeugte Wärme verdampft Flüssigkeit im MK-Material (1). Der Druck im Segment steigt. Das Überdruckventil öffnet sich, sodass Dampf in das Nachbarelement gelangt (2). Nach Abschalten des Magneten kühlt das MK-Material auf unter die Ausgangstemperatur ab (3). Der Dampfdruck sinkt. Es entsteht ein Unterdruck gegenüber dem vorangehenden Segment. Gasförmiges Fluid strömt nach, Wärme wird aus dem vorangehenden Segment aufgenommen (4).



FORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 67 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,1 Milliarden Euro. Davon fallen über 1,8 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

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

stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

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

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

www.fraunhofer.de

FRAUNHOFER IPM

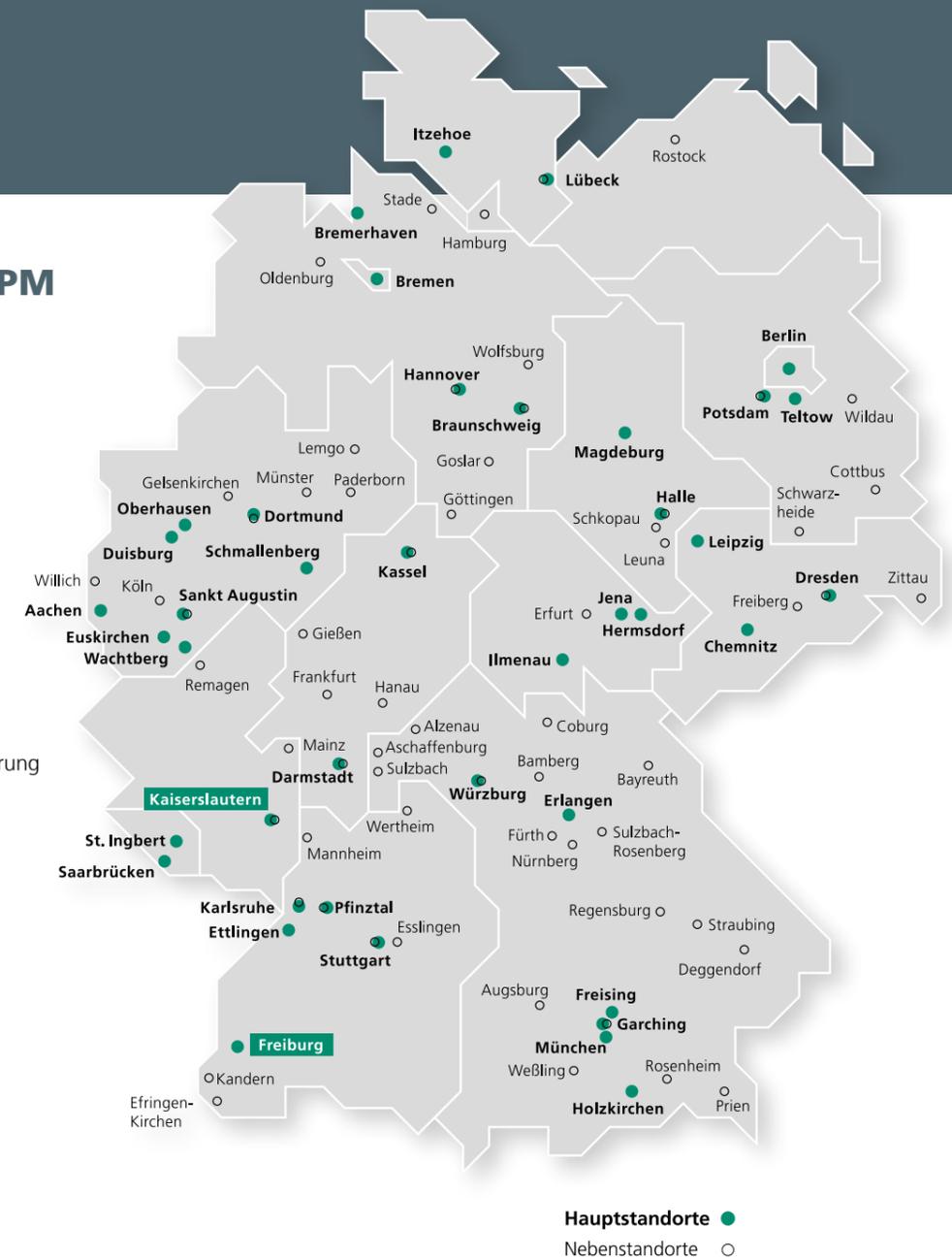
Freiburg

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8
79100 Freiburg
T +49 761 8857 -0
F +49 761 8857 -224
info@ipm.fraunhofer.de

Kaiserslautern

Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Abteilung Materialcharakterisierung
und -prüfung
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
T +49 631 2057 40-00
F +49 631 2057 40-03
info@ipm.fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de



UNSERE PARTNER

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

Fraunhofer-Gesellschaft

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

International

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

Deutschland

- AMA Fachverband für Sensorik
- Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA
- Biovalley Deutschland e.V.
- BBA-BW – Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
- CAST e.V. – Competence Center for Applied Security
- CNA Cluster Bahntechnik e.V.
- DGZfP – Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
- DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- DTG – Deutsche Thermoelektrik Gesellschaft e.V.
- DTZ – Deutsches Terahertz-Zentrum e.V.
- FAIM – Forum Angewandte Informatik und Mikrosystemtechnik e.V.
- LR BW – Forum Luft- und Raumfahrt Baden-Württemberg e.V.
- GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker
- Green City Freiburg Regional Cluster
- Strategische Partner - Klimaschutz am Oberrhein e.V.
- microTEC Südwest e.V.
- Nano-Zentrum Euregio Bodensee e.V.
- Draht-Welt Südwestfalen – netzwerkdraht e.V.
- Optence e.V. Kompetenznetz Optische Technologien Hessen und Rheinland-Pfalz
- Photonics BW Innovationsnetz für Optische Technologien
- SPECTARIS – Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V.
- Science Alliance Kaiserslautern e.V.
- VDIWDE – GMA Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik
- VDMA – Photovoltaik-Produktionsmittel; E-Batterie
- VDSI – Verband für Sicherheit, Gesundheit und Umweltschutz bei der Arbeit e.V.

PUBLIKATIONEN 2015

- Palka, N.; Panowicz, R.; Ospald, F.; Beigang, R.
3D non-destructive imaging of punctures in polyethylene composite armor by THz time domain spectroscopy
Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 36 (8), 770-788 (2015)
- Theuer, M.; Hennig, S.; Ferstl, W.; Konz, W.; Lambrecht, A.
ATR-Photometer zur Bestimmung der Isocyanatkonzentration in Prozessanwendungen
Technisches Messen: TM 82 (1), 16-23 (2015)
- Jonuscheit, J.
Berührungslos und zerstörungsfrei - Keramiken charakterisieren mit Terahertz-Wellen
Ceramic forum international: CFI. Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 92 (9), D11-D15 (2015)
- Meisenheimer, S. K.; Fürst, J. U.; Werner, C.; Beckmann, T.; Buse, K.; Breunig, I.
Broadband infrared spectroscopy using optical parametric oscillation in a radially-poled whispering gallery resonator
Optics Express 23 (18), 24042-24047 (2015)
- Eifler, M.; Seewig, J.; Hering, J.; Freymann, G. von
Calibration of z-axis linearity for arbitrary optical topography measuring instruments
Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX, Paper 952510 (2015)
- Regus, M.; Mankovsky, S.; Polesya, S.; Kuhn, G.; Ditto, J.; Schürmann, U.; Jacquot, A.; Bartholomé, K.; Näther, C.; Winkler, M.; König, J. D.; Böttner, H.; Kienle, L.; Johnson, D. C.; Ebert, H.; Bensch, W.
Characterization of Cr-rich Cr-Sb multilayer films: Syntheses of a new metastable phase using modulated elemental reactants
Journal of Solid State Chemistry 230, 254-265 (2015)
- Pannek, C.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
Colorimetric materials for gas selective sensing in low-power applications
18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS 2015, 1452-1455 (2015)

- Leidinger, M.; Fieberg, S.; Waasem, N.; Kühnemann, F.; Buse, K.; Breunig, I.
Comparative study on three highly sensitive absorption measurement techniques characterizing lithium niobate over its entire transparent spectral range
Optics Express 23 (17), 21690-21705 (2015)
- Werner, C. S.; Buse, K.; Breunig, I.
Continuous-wave whispering-gallery optical parametric oscillator for high-resolution spectroscopy
Optics Letters 40 (5), 772-775 (2015)
- Revel, G. M.; Arnesano, M.; Pietroni, F.; Frick, J.; Reichert, M.; Schmitt, K.; Huber, J.; Ebermann, M.; Battista, U.; Alessi, F.
Cost-effective technologies to control indoor air quality and comfort in energy efficient building retrofitting
Environmental Engineering and Management Journal 14 (7), 1487-1494 (2015)
- Freymann, G. von; Jonuscheit, J.
Die Entwicklung der Terahertz-Technik - vom Hype zum Markt
Photonik (2), 32-35 (2015)
- Krimi, S.; Klier, J.; Ellrich, F.; Jonuscheit, J.; Urbansky, R.; Beigang, R.; Freymann, G. von
An evolutionary algorithm based approach to improve the limits of minimum thickness measurements of multi-layered automotive paints
40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2015. Vol. 2, 739 (2015)
- Schmidtke, G.
Extreme ultraviolet spectral irradiance measurements since 1946
History of Geo- and Space Sciences: HGSS 6 (1), 3-22 (2015)
- Tafti, M. Y.; Saleemi, M.; Toprak, M. S.; Johnsson, M.; Jacquot, A.; Jäggle, M.; Muhammed, M.
Fabrication and characterization of nanostructured thermoelectric $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Sb}_3$
Open Chemistry 13 (1), 629-635 (2015)

Winkler, M.; Dankwort, T.; Schürmann, U.; Liu, X.; König, J. D.; Kienle, L.; Bensch, W.; Böttner, H.; Bartholomé, K. **Fabrication and comprehensive structural and transport property characterization of nanoalloyed nanostructured V_2VI_3 thin film materials**
in: Eibl, O. (Hrsg.): *Thermoelectric Bi_2Te_3 Nanomaterials*, 55-72 (2015)

Urban, G.; Wöllenstein, J.; Kieninger, J. **Guest Editorial. Procedia Engineering**
Procedia Engineering 120, 1-2 (2015)

Baccouche, B.; Baktash, N.; Clemens, J.; Natale, A.; Jonuscheit, J.; Friederich, F. **High resolution terahertz volume inspection using a rectangular dielectric rod antenna in transceiver configuration**
40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2015. Vol. 1, 59-60 (2015)

Leidinger, M.; Buse, K.; Breunig, I. **Highly sensitive absorption measurements in lithium niobate using whispering gallery resonators**
Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIV, Paper 93471D, 6 (2015)

Schmidtke, G. **History of extreme ultraviolet solar measurements in XX-XXI centuries: From balloons to the International Space Station as instrumental platforms**
Journal of Optical Technology 82 (3), 185-196 (2015)

Sandner, T.; Baulig, C.; Grasshoff, T.; Wildenhain, M.; Schwarzenberg, M.; Dahlmann, H.-G.; Schwarzer, S. **Hybrid assembled micro scanner array with large aperture and their system integration for a 3D ToF laser camera**
MOEMS and Miniaturized Systems XIV, Paper 937505 (2015)

Warring, U.; Schätz, T.; Kießling, J.; Kühnemann, F.; Waasem, N.; Sprenger, T. **Im Einsatz für Ionenfänger: Eine neue Laserlichtquelle stellt die benötigten Wellenlängen für Experimente mit unterschiedlichen Atomen, Molekülen und Ionen zur Verfügung**
Physik-Journal 14 (6), 74-75 (2015)

Leidinger, M.; Buse, K.; Breunig, I. **Impurity limitations of the quality factor of whispering gallery resonators made of lithium niobate**
European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, Paper CE 9 4 (2015)

Klier, J.; Torosyan, G.; Schreiner, N. S.; Molter, D.; Ellrich, F.; Zouaghi, W.; Peytavit, E.; Lampin, J. F.; Beigang, R.; Jonuscheit, J.; Freymann, G. von **Influence of substrate material on radiation characteristics of THz photoconductive emitters**
International Journal of Antennas and Propagation: IJAP, Art. 540175 (2015)

Wang, H. S.; Bai, S. Q.; Chen, L. D.; Cuenat, A.; Joshi, G.; Kleinke, H.; König, J.; Lee, H. W.; Martin, J.; Oh, M. W.; Porter, W. D.; Ren, Z. F.; Salvador, J.; Sharp, J.; Taylor, P.; Thompson, A. J.; Tseng, Y. C. **International round-robin study of the thermoelectric transport properties of an n-type half-Heusler compound from 300 K to 773 K**
Journal of Electronic Materials 44 (11), 4482-4491 (2015)

Jacobi, C.; Unglaub, C.; Schmidtke, G.; Schäfer, R.; Brunner, R.; Woods, T.; Jakowski, N. **Ionospheric ionization calculated from combined SolACES-SDO/EVE solar EUV spectra and comparison with global TEC at different time scales**
Geophysical Research Abstracts. Online journal 17, Paper EGU2015-3557 (2015)

Miernik, A.; Eilers, Y.; Nuese, C.; Bolwien, C.; Lambrecht, A.; Hesse, A.; Rassweiler, J. J.; Schlager, D.; Wilhelm, K.; Wetterauer, U.; Schoenthaler, M. **Is in vivo analysis of urinary stone composition feasible? Evaluation of an experimental setup of a Raman system coupled to commercial lithotripsy laser fibers**
World Journal of Urology 33 (10), 1593-1599 (2015)

Reiterer, A.; Höfler, H. **Laserscanning auf dem Weg zu einem ausgereiften mobilen Messsystem**
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN 122 (10), 297-299 (2015)

Fieberg, S.; Streit, L.; Kiessling, J.; Becker, P.; Bohatý, L.; Kühnemann, F.; Buse, K. **Lithium niobate: Wavelength and temperature dependence of the thermo-optic coefficient in the visible and near infrared**
Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIV, Paper 93471C (2015)

Fürst, J. U.; Breunig, I.; Buse, K.; Becker, P.; Liebertz, J.; Bohatý, L. **Lithium tetraborate whispering gallery resonator for second-harmonic generation into the ultraviolet**
European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, Paper CD 10 3 (2015)

Burkov, A. T.; Konstantinov, P. P.; Fedorov, M. I.; Manoli, M.; Kyratsi, T.; Tarantik, K.; Jäggle, M. **Long-time stability of $Mg_2(Si-Sn-Ge)$ - based thermoelectrics under large temperature gradient conditions**
Materials Today. Proceedings 2 (2), 596-601 (2015)

Scholz, L.; Ortiz Perez, A.; Knobelspies, S.; Wöllenstein, J.; Palzer, S. **MID-IR LED-based, photoacoustic CO_2 sensor**
Procedia Engineering 120, 1233-1236 (2015)

Huber, J.; Ambs, A.; Wöllenstein, J. **Miniaturized photoacoustic carbon dioxide sensor with integrated temperature compensation for room climate monitoring**
Procedia Engineering 120, 283-288 (2015)

Lindorf, M.; Rohrmann, H.; Katona, G. L.; Beke, D. L.; Pernau, H.-F.; Albrecht, M. **Nanostructured SiGe thin films obtained through MIC processing**
Materials Today. Proceedings 2 (2), 557-565 (2015)

Hoeh, M. A.; Neu, J.; Schmitt, K.; Rahm, M. **Optical tuning of ultra-thin, silicon-based flexible metamaterial membranes in the terahertz regime**
Optical Materials Express 5 (2), 408-415 (2015)

Vogel, M.; Chumak, A. V.; Waller, E. H.; Langner, T.; Vasyuchka, V. I.; Hillebrands, B.; Freymann, G. von **Optically reconfigurable magnetic materials**
Nature Physics 11 (6), 487-491 (2015)

Huber, J.; Wöllenstein, J. **Photoacoustic CO_2 sensor system - design and potential for miniaturization and integration in silicon**
Smart Sensors, Actuators, and MEMS VII; Cyber Physical Systems, Paper 951715 (2015)

Palka, N.; Krimi, S.; Ospald, F.; Miedzinska, D.; Gieleta, R.; Malek, M.; Beigang, R. **Precise determination of thicknesses of multilayer polyethylene composite materials by terahertz time-domain spectroscopy**
Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 36 (6), 578-596 (2015)

Jacquot, A.; Barb, Y.; Jäggle, M.; Firat, E. **Pressed-onto 3Omega method for measuring the thermal properties of gas diffusion layers of fuel cells and the like**
5th European PEFC and H2 Forum 2015. Proceedings. CD-ROM , Paper A0506 (2015)

Fürst, J. U.; Buse, K.; Breunig, I.; Becker, P.; Liebertz, J.; Bohatý, L. **Second-harmonic generation of light at 245 nm in a lithium tetraborate whispering gallery resonator**
Optics Letters 40 (9), 1932-1935 (2015)

Rademacher, S.; Schmitt, K.; Mengers, M.; Wöllenstein, J. **Sensor network with energy efficient and low-cost gas sensor nodes for the detection of hazardous substances in the event of a disaster**
IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, WiSNet 2015. Proceedings, 59-61 (2015)

Siepchen, B.; Späth, B.; Drost, C.; Krishnakumar, V.; Kraft, C.; Winkler, M.; König, J.; Bartholomé, K.; Peng, S. **A simple Sb_2Te_3 back-contact process for CdTe solar cells**
Journal of Electronic Materials 44 (10), 3354-3359 (2015)

Baccouche, B.; Keil, A.; Kahl, M.; Bolivar, P. H.; Loeffler, T.; Jonuscheit, J.; Friederich, F. **A sparse array based sub-terahertz imaging system for volume inspection**
45th European Microwave Conference, EuMC 2015. Proceedings, 438-441 (2015)

Baccouche, B.; Kahl, M.; Keil, A.; Bolivar, P. H.; Loeffler, T.; Jonuscheit, J.; Friederich, F. **A sparse multistatic imaging system for terahertz volume inspection**
40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2015. Vol. 1, 284-285 (2015)

Renner, M.; Freymann, G. von
Spatial correlations and optical properties in three-dimensional deterministic aperiodic structures
 Scientific Reports 5, Art. 13129 (2015)

Elsarrag, E.; Pernau, H.-F.; Heuer, J.; Roshan, N.; Alhorr, Y.; Bartholomé, K.
Spectrum splitting for efficient utilization of solar radiation: A novel photovoltaic-thermoelectric power generation system
 Renewables 2, Art. 16 (2015)

Werner, C. S.; Buse, K.; Breunig, I.
Stabilization of a whispering-gallery optical-parametric oscillator: Mode-hop-free tuning and true continuous-wave operation
 European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, Paper CD 10 4 (2015)

Merrill, D. R.; Moore, D. B.; Ditto, J.; Sutherland, D. R.; Falmbigl, M.; Winkler, M.; Pernau, H. F.; Johnson, D. C.
The synthesis, structure, and electrical characterization of $(\text{SnSe})_{(1,2)}\text{Te}_2$
 European Journal of Inorganic Chemistry (1), 83-91 (2015)

Weimann, C.; Fratz, M.; Wölfelschneider, H.; Freude, W.; Höfler, H.; Koos, C.
Synthetic-wavelength interferometry improved with frequency calibration and unambiguity range extension
 Applied Optics 54 (20), 6334-6343 (2015)

Tafti, M. Y.; Saleemi, M.; Johnsson, M.; Jacquot, A.; Toprak, M. S.
Temperature dependent structure stability studies on thermoelectric $\text{Yb}_{0.025}\text{Fe}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{Sb}_3$
 MRS Proceedings, 1735, DOI: 10.1557/opl.2015.308 (2015)

Rämer, J.-M.; Freymann, G. von
A terahertz time-domain spectroscopy-based network analyzer
 Journal of Lightwave Technology 33 (2), 403-407 (2015)

Rämer, J.-M.; Freymann, G. von
Terahertz waveform generation for S21-parameter measurements using a fiber-coupled optical pulse shaper
 Optics Express 23 (24), 30872-30877 (2015)

König, J.; Winkler, M.; Dankwort, T.; Hansen, A.-L.; Pernau, H. F.; Duppel, V.; Jäggle, M.; Bartholomé, K.; Kienle, L.; Bensch, W.
Thermoelectric efficiency of $(1-x)(\text{GeTe})x(\text{Bi}_2\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{2.8})$ and implementation into highly performing thermoelectric power generators
 Dalton Transactions 44 (6), 2835-2843 (2015)

Tarantik, K.; König, J.; Jäggle, M.; Heuer, J.; Horzella, J.; Mahlke, A.; Vergez, M.; Bartholomé, K.
Thermoelectric modules based on silicides - development and characterization
 Materials Today. Proceedings 2 (2), 588-595 (2015)

Hohmann, J. K.; Renner, M.; Waller, E. H.; Freymann, G. von
Three-dimensional μ -printing: An enabling technology
 Advanced Optical Materials 3 (11), 1488-1507 (2015)

Knobelspies, S.; Bierer, B.; Wöllenstein, J.; Kneer, J.; Palzer, S.
Towards in-situ biogas sensing
 Procedia Engineering 120, 296-274 (2015)

Hackel, T.; Stein, D.; Maindorfer, I.; Lauer, M.; Reiterer, A.
Track detection in 3D laser scanning data of railway infrastructure
 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2015. Proceedings, 693-698 (2015)

Meisenheimer, S.-K.; Fürst, J. U.; Buse, K.; Breunig, I.
Wavelength tuning of optical parametric oscillation in whispering gallery resonators for infrared spectroscopy
 European Conference on Lasers and Electro-Optics 2015, Paper CD 4 4 (2015)

Schmidtke, G.; Avakyan, S. V.; Berdermann, J.; Bothmer, V.; Cessateur, G.; Ciraolo, L.; Didkovsky, L.; Dudok de Wit, T.; Eparvier, F. G.; Gottwald, A.; Haberreiter, M.; Hammer, R.; Jacobi, C.; Jakowski, N.; Kretzschmar, M.; Liliensten, J.; Pfeifer, M.; Radicella, S. M.; Schäfer, R.; Schmidt, W.; Solomon, S. C.; Thuillier, G.; Tobiska, W. K.; Wieman, S.; Woods, T. N.
Where does the Thermospheric Ionospheric GEospheric Research (TIGER) program go?
 Advances in Space Research 56 (8), 1547-1577 (2015)

Fürst, J. U.; Buse, K.; Breunig, I.; Becker, P.; Liebertz, J.; Bohatý, L.
Whispering gallery resonator from lithium tetraborate for nonlinear optics
 Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XIV, Paper 93470A (2015)

Rademacher, S.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.
Wireless gas sensor network for the spatially resolved measurement of hazardous gases in case of a disaster
 Procedia Engineering 120, 310-314 (2015)

Jonuscheit, J.
Zerstörungsfreie Mehrschichtanalyse: Lackinspektion mit Terahertz-Wellen
 JOT. Journal für Oberflächentechnik 55 (9), 62-65 (2015)

DOKTORARBEITEN 2015

Pannek, C.
Mikrosystem zur Brandgasdetektion nach dem Farbumschlagsprinzip
 Freiburg/Brsq., Univ., Diss.; Der Andere Verlag (2015)

Winkler, M.
Nanostructured thermoelectrics: Bi_2Te_3 / Sb_2Te_3 based superlattice systems fabricated by MBE and sputtering
 Tübingen, Univ., Diss. (2015)

ERTEILTE PATENTE 2015

Brunner, R.; Ulmer, U.; Fetzner, S.
Vorrichtung zur Bestimmung der Konzentration zumindest eines Gases in einem Probengasstrom mittels Infrarotabsorptionsspektroskopie
 DE102014100691

Rämer, J.-M.; Freymann, G. von
Vorrichtung und Verfahren zur optoelektrischen S-Parameter-Charakterisierung elektrischer Bauteile im Frequenzbereich oberhalb von 100 GHz
 DE102013112935

Ellrich, F.; Molter, D.; Fredebeul, C.; Platte, F.; Nalpantidis, K.
Verfahren zur Spektrometrie und Spektrometer
 DE102014100662

Molter, D.; Ellrich, F.; Hübsch, D.; Sprenger, T.
Verfahren zur Spektrometrie und Spektrometer
 DE102014101302

Mertsching, H.; Koch, S.; Thielecke, H.; Bolwien, C.; Sulz, G.
Anordnung und Verfahren zur Analyse biologischer Proben
 KR10-1493336 und CA 2669382

König, J.; Matheis, C.; Vetter, U.
Verfahren zur Herstellung eines thermoelektrischen Bauelements und thermoelektrisches Bauelement
 DE102008005694

Molter, D.; Ellrich, F.
Optische Anrege-/Abfrageanordnung
 DE102014105751

Reiterer, A.; Wölfelschneider, H.; Dimopoulos, N.; Höfler, H.
Vorrichtung zum Aufnehmen von überlagerten Distanz- und Intensitätsbildern
 DE102014201800

Lambrecht, A.
Vorrichtung und Verfahren zur berührungslosen Detektion eines nicht infrarotaktiven Zielgases
 DE102013101610

Schmidtke, G.; Pfeifer, M.; Brunner, R.
Messanordnung zur Erfassung extrem ultravioletter Strahlung im Weltall
 DE102013218842

Kaiser, C.; Weber, S.; Freymann, G. von
Optischer Analog-Digital-Wandler
 DE102014105139

Molter, D.
Optoelektronisches Hochfrequenzbauteil
 DE102013107265

Kießling, J.; Breunig, I.; Kühnemann, F.
Verfahren und Vorrichtung zur Frequenzkonversion und Verwendung eines optisch-parametrischen Kristalls
 DE102013214515



MESSEN

Control

Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung

Stuttgart, 05.–08.05.2015

Stand der Fraunhofer Allianz-Vision. Präsentiert wurden Systeme zur optischen 3D-Objektvermessung in der Produktion, zur bildgebenden Inline-Detektion von Restverschmutzungen sowie zur Inline-Schichtdickenmessung mittels Terahertz-Wellen.

E-MRS Spring Meeting

European Materials Research Society

Lille, 12.–14.05.2015

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

Sensor + Test

Die Messtechnik-Messe

Nürnberg, 19.–21.05.2015

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft. Fraunhofer IPM präsentierte mechanisch flexible Gas-, Flüssigkeits-, und Festkörpersensoren für verschiedene Anwendungen wie Food Chain Management, Automobil, Prozesskontrolle oder Biotechnologie.

Parts2Clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile- und Oberflächenreinigung

Stuttgart 09.–11.06.2015

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft. Restverschmutzungen auf Bauteilen – wie etwa Öle, Fotolacke oder Reinigungsmittel – bleiben oftmals unentdeckt, sind bei der weiteren Verarbeitung der Komponenten jedoch störend. Fraunhofer IPM präsentierte ein laserbasiertes, scannendes Messsystem, das die Eigen-

fluoreszenz der Stoffe nutzt, um Bauteiloberflächen auf Rückstände zu prüfen.

Achema

Weltforum und Internationale Leitmesse der Prozessindustrie

Frankfurt, 15.–19.06.2015

Fraunhofer IPM stellte Systeme zur Abgas-Analytik in Motorprüfständen, zur Gasferndetektion und zur Terahertz-Spektroskopie vor. Mitarbeiter des Instituts beteiligten sich mit vier Präsentationen am Kongress der Achema 2015.

Intergeo

Kongress und Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement

Stuttgart, 15.–17.09.2015

Exponate auf der Intergeo 2015 waren der Clearance Profile Scanner CPS und das Modular Lightweight Measurement System MLM. Der CPS ist der weltweit schnellste Laserscanner zur Erfassung von Umgebungsgeometrien. Das modular aufgebaute MLM ist ein kleiner, leichter Laserscanner zur Erfassung von Infrastruktur für den Einsatz auf fliegenden Plattformen.

Deburring Expo

Fachmesse für Entgrat- und Poliertechnologie

Karlsruhe, 24.–26.06.2014

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft. Erstmals nahm Fraunhofer IPM als fachlicher Kooperationspartner am Fachforum der neu ins Leben gerufenen Deburring EXPO teil. Am Stand präsentiert wurde ein Messsystem für die 100-Prozent-Kontrolle, das Grate an metallenen Druckgussteilen mittels digital-holografischer Mehrwellenlängen-Interferometrie schnell und millimetergenau vermisst.

VERANSTALTUNGEN

Kick-Off Leistungszentrum

Freiburg, 06.03.2015

Eine Kooperation aus der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten.

Einweihung Neubau Fraunhofer IPM in Kaiserslautern

Kaiserslautern, Fraunhofer IPM, 14.04.2015

Offizielle Einweihung des Institutsgebäudes am Fraunhofer-Zentrum in Kaiserslautern.

Girls' Day

Freiburg, Fraunhofer IPM, 23.04.2015

Fraunhofer IPM beteiligte sich auch 2015 am jährlichen Girls' Day für Schülerinnen der Klassen 5 bis 10 und gab dabei Einblick in Berufe aus Technik, Informationstechnologie, Handwerk und Naturwissenschaften.

Kindernachmittag zum »Jahr des Lichts«

Freiburg, Fraunhofer IPM, 03.07.2015

Experimente rund um das Thema Licht standen im Mittelpunkt eines Kindernachmittags, den das Institut im Rahmen des »Internationalen Jahr des Lichts« veranstaltet hat.

Freiburger Wissenschaftsmarkt

Freiburg, Münsterplatz, 10.–11.07.2015

Gemeinsam mit den Freiburger Fraunhofer-Instituten präsentierte Fraunhofer IPM »Wissenschaft zum Anfassen« auf dem Freiburger Münsterplatz.

EUROSENSORS XXIX 2015

Freiburg, Konzerthaus, 06.–09.09.2015

Fraunhofer IPM hat die EUROSENSORS XXIX 2015 gemeinsam mit dem Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK in Freiburg organisiert. Die EUROSENSORS ist ein internationales Forum für Wissenschaftler, Studenten und Ingenieure rund um die Themen Sensoren, Aktoren, Mikro- und

Nanosysteme. Rund 550 Teilnehmerinnen und Teilnehmer besuchten die Veranstaltung.

8. Fraunhofer Vision-Technologietag

Stuttgart, Fraunhofer IPA, 14.–15.10.2015

Workshop mit begleitender Fachausstellung. Fraunhofer IPM präsentierte einen 3D-Sensor für die Produktion.

Sustainability Summit 2015

Freiburg, Konzerthaus, 19.–20.10.2015

Auftakt einer Konferenzreihe des Leistungszentrums Nachhaltigkeit zu den Themen »Energy«, »Materials«, »Resilience« und »Transformation«.

Optische 3D-Messtechnik für die Qualitätssicherung in der Produktion

Jena, Fraunhofer IOF, 25.–26.11.2015

Seminar und praktischer Teil. Vortrag von Dr. Tobias Beckmann zum Thema digital-holographische 3D-Messtechnik.



1 Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein (links) von Fraunhofer IPM und Prof. Dr. Gerald Urban vom Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK der Universität Freiburg waren Chairmen bei der EUROSENSORS.

WORKSHOPS IM FRAUNHOFER IPM

Gassensor-Workshop

Freiburg, Fraunhofer IPM, 10.09.2015

Intelligente Technologien für die Gasesstechnik:
Anwendungsorientierter Workshop für Wissenschaft
und Industrie.

Experten-Workshop »ZFP an Verbundwerkstoffen«

Kaiserslautern, Fraunhofer IPM, 10.09.2015

Workshop für Vertreter aus Industrie und Wissenschaft
zum Stand der Technik und zu Trends in der zerstörungs-
freien Prüfung und Produktion von Verbundwerkstoffen.

Berührungslose Feuchtemesstechnik

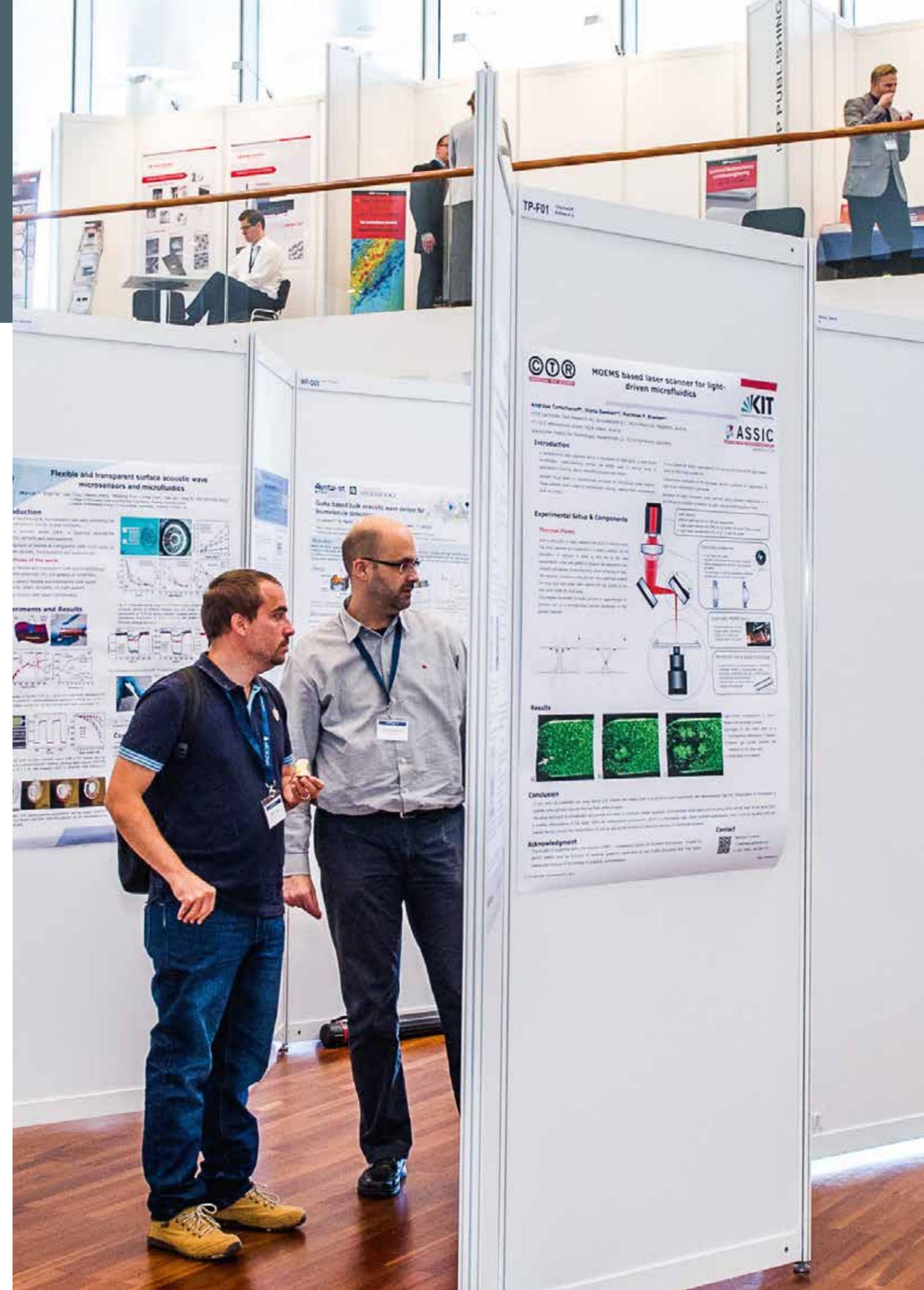
Freiburg, Fraunhofer IPM, 08.10.2015

Anwendungsorientierter Workshop für Vertreterinnen
und Vertreter aus Wissenschaft und Industrie.

QCL in der Industrie – aus dem Labor in den Prozess

Freiburg, Fraunhofer IPM, 12.11.2015

Anwendungsorientierter Workshop für Experten und
Interessierte aus Wissenschaft und Industrie.



Neben der internationalen Konferenz
EUROSENSORS (Bild) veranstaltete
Fraunhofer IPM 2015 vier Workshops.

Fraunhofer IPM

Freiburg

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

Kaiserslautern

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Abteilung Materialcharakterisierung und- prüfung
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
T +49 631 2057 40-00
F +49 631 2057 40-03
info@ipm.fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de

Anschrift der Redaktion

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

Redaktion

Holger Kock, Anja Strobel, Iris Erbach, Isabell Wiedle

Layout und Gestaltung

Rea Naber

Bildquellen

Andreas Hofmann (S. 19), Boehringer Ingelheim microParts GmbH (S. 6; 26; 27 Mitte), Daniel Hellweg (S. 52; 53), Fraunhofer IPM (S. 7; 36 ; 27 unten; 31; 33; 36; 48 unten; 49), Fraunhofer-Gesellschaft (S. 55), Hahn-Schickard, Stuttgart (S. 25), Helmut Stettin/Achema (S. 63), Holger Kock (S. 6; 8; 9; 13 ; 19; 20; 21; 22; 34; 37), Ilja Mašik/ Fotolia (S. 40), kister scheithauer gross architekten, ksg (S. 17), Klaus Polkowski (S. 8; 9; 12; 63; 65), Marc Müller/Fraunhofer (S. 15), Matthias Heyde/ Fraunhofer (S. 5), Nerijus Steponavicius/Fotolia (S. 44), Rainer Plendl / Shutterstock (S. 24), RMA Mess- und Regeltechnik GmbH & Co. KG (S. 45), Kai-Uwe Wudtke (S. 7; 38; 40; 41; 42; 43; 46; 48; 50), Stephan Lessoing (Cover, S. 6; 28; 30; 32), Tobias Beckmann (S. 14), Universität Freiburg, Technische Fakultät (S. 16)

Druck

schwarz auf weiß litho und druck GmbH, Freiburg

Dieser Bericht wurde auf klimaneutral hergestelltem Papier gedruckt.

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

Bei Abdruck oder Übersetzung ist die Einwilligung der Redaktion
erforderlich.

