



Fraunhofer

IPM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK IPM



2017 2018

JAHRESBERICHT

MESSEN · KONTROLLIEREN · OPTIMIEREN

<< **Titelbild** Kameras und Laserscanner erfassen große Strukturen wie etwa Straßen oder Gebäude. Die 3D-Daten werden mithilfe von lernenden Algorithmen automatisiert ausgewertet. Auf der linken Seite sind die fusionierten Daten aus Kamera und Laserscanner dargestellt, auf der rechten Seite die entsprechend klassifizierten Daten. Jede Farbe repräsentiert dabei eine eigene Objektklasse (z. B. Fahrzeug oder Straßenoberfläche).



► PRODUKTIONSKONTROLLE

► OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

► GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

► THERMISCHE ENERGIEWANDLER



»Maschinelles Lernen beflügelt die Messtechnik«

< Prof. Dr. Karsten Buse,
Institutsleiter

Sehr geehrte Kunden, sehr geehrte Partner,

maschinelles Lernen hat einen Innovationssturm ausgelöst und dringt in immer neue Anwendungsfelder vor. Heute werden lernende Algorithmen auch dort eingesetzt, wo sie zunächst oftmals kritisch bewertet oder gar als »Voodoo« abgetan wurden, weil Entscheidungen, die aus künstlichen neuronalen Netzen abgeleitet werden, nicht stringent nachvollziehbar sind. Mittlerweile hat sich die Einstellung geändert: Maschinelles Lernen erreicht eine hohe Zuverlässigkeit, verbreitet sich mehr und mehr und beflügelt die Messtechnik. Seit 2017 setzen wir die Technik, hier besonders das »Deep Learning«, sehr erfolgreich zur Erkennung und Klassifizierung von Objekten in 3D-Punktwolken ein. Trainiert werden die Systeme, indem Menschen sie mit geeigneten interpretierten Datensätzen füttern. So erzielen sie eine sehr hohe Zuverlässigkeit. Und die Geschwindigkeit, mit der Daten nun automatisch interpretiert werden können, ist dramatisch gestiegen, die Anwendungsmöglichkeiten haben sich vervielfacht.

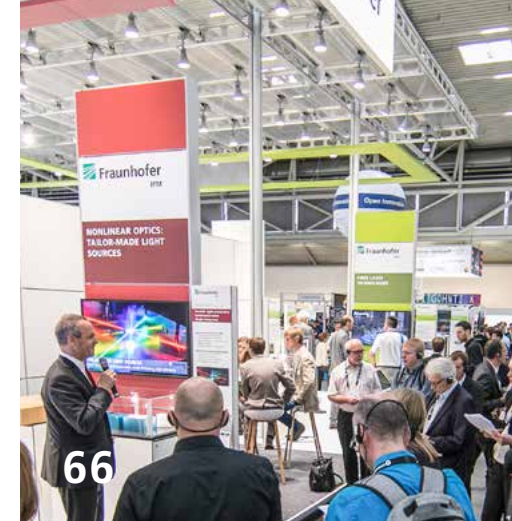
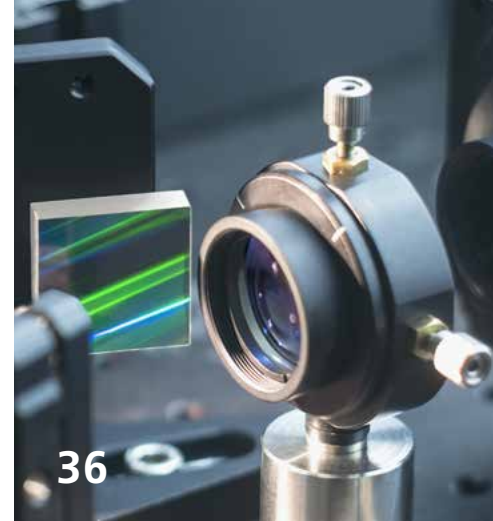
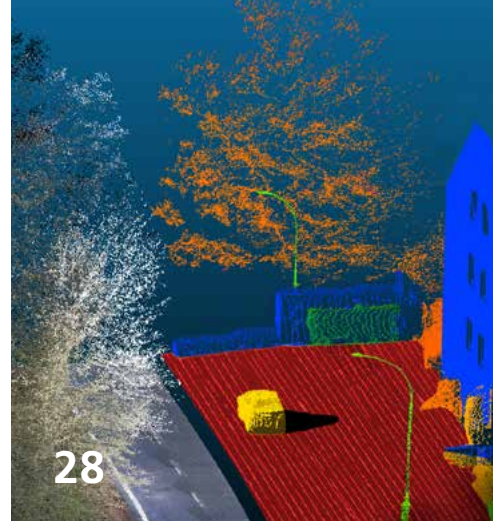
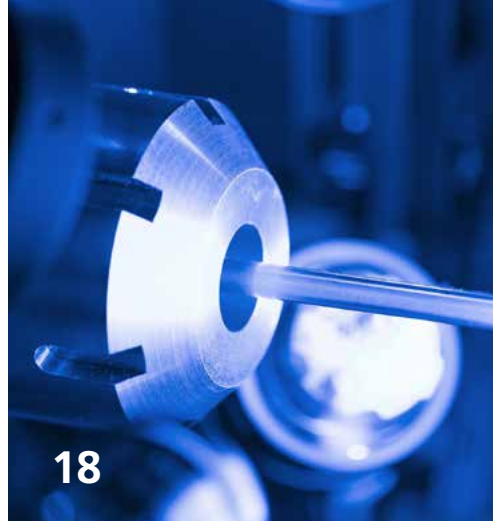
Inzwischen bieten wir unseren Kunden über die schnellsten und genauesten Messsysteme hinaus, für die Fraunhofer IPM weltweit bekannt ist, immer häufiger auch die automatisierte Interpretation von Daten an – bis hin zu abgeleiteten »Ja«- oder »Nein«-Entscheidungen für die Fertigungskontrolle oder Sicherheitstechnik. Neben klassischen Algorithmen birgt das maschinelle Lernen auf diesem Gebiet gewaltige Potentiale. Dieser Teilbereich der künstlichen Intelligenz wird in den nächsten Jahren noch zu vielen Überraschungen führen und die Welt verändern. So lassen sich voraussichtlich künftig Maschinen durch Lernzyklen einfach und schnell auf die Qualitätssicherung neuer Produkte trainieren. Viele preiswerte Gassensoren können zusammengeschaltet werden und nach einem Training zahlreiche Gase zuverlässig »riechen«, was heute noch teuren Spektrometern oder Chromatogra-

phen vorbehalten ist, um nur zwei Beispiele zu nennen. Auch wenn die Datenverarbeitung an Bedeutung gewinnt: Entscheidend ist und bleibt in der überwiegenden Zahl der Fälle selbstverständlich die Qualität der Messung an sich.

Unser Jahresbericht informiert Sie über neue Entwicklungen aus den Laboren unseres Instituts. Mit einer Auswahl an Projektbeispielen laden wir Sie ein zum Nachdenken und Nachfragen, weniger im Sinne einer Rückschau denn als Basis für zukünftige Ideen. Tauchen Sie ein in die technischen Kniffe und Applikationen, die dazu geführt haben, dass 2017 für Fraunhofer IPM fachlich und wirtschaftlich eines der produktivsten und besten Jahre in der Institutsgeschichte wurde. Unter anderem ist es gelungen, Oberflächen auch an steilen Flanken mikrometergenau zu messen – Voraussetzung für die hochgenaue optische Verzahnungsmessung. Die optische Oberflächenanalytik haben wir auf die Kontrolle der Beölung von Blechen erweitert. Unsere Laserscanner helfen – mit maschinellem Lernen – bei der Vermessung von Großbaustellen und können durch den Einsatz von zwei Farben jetzt nicht nur Formen, sondern auch Feuchtigkeit »sehen«, was z. B. für die Tunnelinspektion wichtig ist. Halbleiter-Gassensoren werden Schritt für Schritt zuverlässiger, mit Anwendungspotentialen z. B. in der Frischeüberwachung von Lebensmitteln. Materialien spielen weiter eine große Rolle, und zwar sowohl die Messung von Materialeigenschaften als auch deren Hightech-Anwendung. Beispiele sind Kristalle für optische Isolatoren in Lasersystemen, thermoelektrische Materialien als »Energy Harvester« für die Steuerung von Kleinfeuerungsanlagen sowie kalorische Materialien als Basis für neuartige, kältemittelfreie und hocheffiziente Wärmepumpen.

Viel Freude beim Stöbern und Entdecken wünscht
Ihnen Ihr

Karsten Buse



INHALT

3	EDITORIAL
6	ORGANISATION
8	BETRIEBSHAUSHALT PERSONAL
9	INTERN
11	MAGAZIN
16	INTERVIEW

18 PRODUKTIONSKONTROLLE

20	INLINE-MESSTECHNIK Die Gruppe im Überblick
22	INLINE-MESSTECHNIK Holographie in Bewegung: 3D-Daten Zeile für Zeile
24	OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK Die Gruppe im Überblick
26	OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK Quantitative Beschichtungskontrolle am Band

28 OBJEKT- UND FORMERFASSUNG

30	LASER SCANNING Die Gruppe im Überblick
32	LASER SCANNING Baufortschritt: aus der Luft erfasst, automatisch ausgewertet
34	LASER SCANNING Tunnelblick: Sensor erfasst Zustand von Tunnelbauwrken

36 GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE

38	INTEGRIERTE SENSORSYSTEME Die Gruppe im Überblick
40	INTEGRIERTE SENSORSYSTEME Sensor überwacht Reifeprozesse in Obstlagern
42	SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK Die Gruppe im Überblick
44	SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK Neuartige Faraday-Isolatoren für bessere Laserquellen
46	THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME Die Gruppe im Überblick
48	THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME Materialeigenschaften zuverlässig bestimmen

50 THERMISCHE ENERGIEWANDLER

52	KALORIK UND THERMOELEKTRIK Die Gruppe im Überblick
54	KALORIK UND THERMOELEKTRIK Nano-BHKW: Strom aus dem Kachelofen
56	KALORIK UND THERMOELEKTRIK Effiziente Hotspot-Kühlung
58	FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT
60	PARTNER NETZWERKE
61	PUBLIKATIONEN
65	DOKTORARBEITEN PATENTE
66	MESSEN VORSCHAU
68	VERANSTALTUNGEN UND WORKSHOPS VORSCHAU
69	IMPRESSUM



ORGANISATION

INSTITUTSLEITUNG



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



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

REFERENTEN UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



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



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



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

PRODUKTIONSKONTROLLE



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



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



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

OBJEKT- UND FORMERFASSUNG



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



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

GAS- UND PROZESSTECHNOLOGIE



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



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



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



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

THERMISCHE ENERGIEWANDLER



Abteilungsleiter
Dr. Olaf Schäfer-Welsen
T +49 761 8857 - 173
olaf.schaefer-welsen@ipm.fraunhofer.de



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

TECHNISCHE DIENSTE



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



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



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



Gebäude und Technik
Clemens Faller
T +49 761 8857 - 214
clemens.faller@ipm.fraunhofer.de

VERWALTUNG UND IT



Verwaltungsleiter
Wolfgang Oesterling
T +49 761 8857 - 120
wolfgang.oesterling@ipm.fraunhofer.de



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



Informations- und Telekommunikationstechnik
Gerd Kühner
T +49 761 8857 - 226
gerd.kuehner@ipm.fraunhofer.de



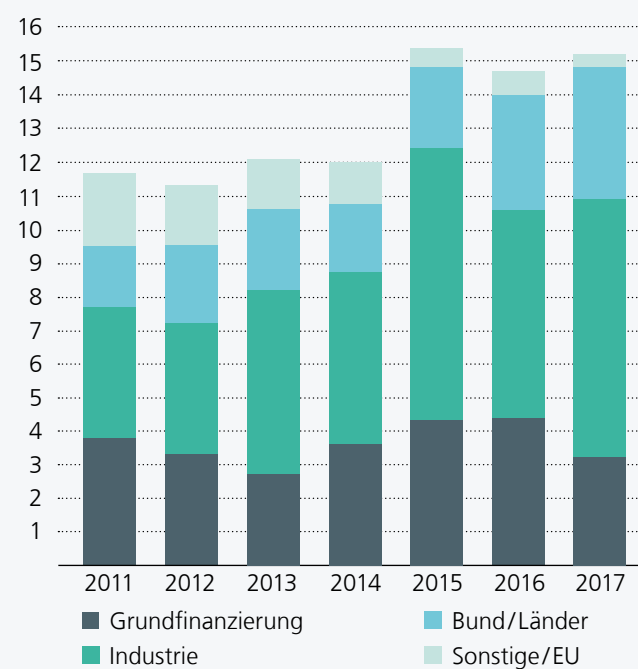
Personal
Anneliese Macalister-Smith
T +49 761 8857 - 112
anneliese.macalister-smith@ipm.fraunhofer.de



> Mit dem Grundstein wurde auch eine Zeitkapsel vergraben. Darin unter anderem: zwei Tageszeitungen, Euro-Münzen, Instituts- und Gebäudedokumente sowie Teile verschiedener Messsysteme.



Betriebshaushalt 2011 bis 2017 in Mio. Euro*



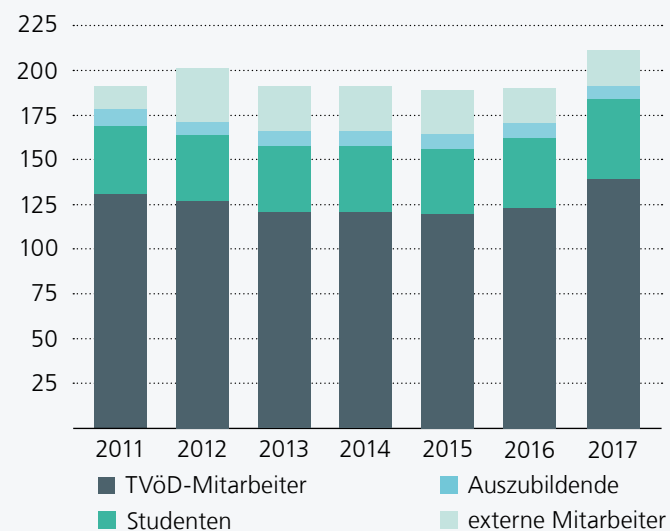
DIE ZAHLEN

Betriebshaushalt

Der Betriebshaushalt 2017 betrug 15,2 Millionen Euro und setzte sich zusammen aus Industrieerlösen, Erlösen aus öffentlich geförderten Projekten sowie der Grundfinanzierung. Der Anteil der externen Finanzierung, bestehend aus externen öffentlichen Geldern und Industrieerlösen, lag 2017 bei 79 Prozent bzw. 12 Millionen Euro. Die Industrieerlöse machten mit 7,6 Millionen Euro einen Anteil von 50,5 Prozent am Betriebshaushalt aus.

**Zum Jahresbeginn 2017 wurde die Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung« am Standort Kaiserslautern einem anderen Fraunhofer-Institut zugeordnet. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden daher die Werte des Standorts Kaiserslautern in beiden Diagrammen für die Jahre 2011 bis 2016 rückwirkend herausgerechnet.*

Personalentwicklung 2011 bis 2017*



Personal

Insgesamt 139 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter waren Ende 2017 im Rahmen des Tarifvertrags für den öffentlichen Dienst (TVöD) bei Fraunhofer IPM beschäftigt. Außerdem arbeiten am Institut rund 55 Studierende und Berufseinsteiger, davon 45 Master- und Bachelorstudierende sowie sieben Auszubildende. Zusätzlich sind etwa 20 externe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie zahlreiche Praktikantinnen und Praktikanten und Hilfskräfte am Fraunhofer IPM tätig. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter verteilen sich auf drei grundlegende Bereiche: Rund 50 Prozent der Beschäftigten arbeiten als wissenschaftliche Mitarbeiter, 35 Prozent als Ingenieure und technische Mitarbeiter sowie 15 Prozent als Angestellte im Bereich Infrastruktur und Werkstatt.

NEUBAU: GRUNDSTEIN GELEGT

Am 4. Juli 2017 wurde nach mehr als vier Jahren Planung der Grundstein für das neue Institutsgebäude gelegt.

An der Zeremonie nahmen Vertreter des Landes, der Stadt Freiburg, der Universität Freiburg, der Fraunhofer-Gesellschaft und der ausführenden Architekten sowie zahlreiche Institutsangehörige teil. Mit einer Nutzfläche von 7.500 m² wird das Gebäude den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen

deutlich mehr Platz und bessere Forschungsbedingungen bieten. Der neue Standort auf dem Campus der Technischen Fakultät verstärkt die Vernetzung mit der Universität Freiburg und schafft ein attraktives Studien-, Forschungs- und Arbeitsumfeld. Die Kosten für den Neubau belaufen sich auf rund 43,1 Millionen Euro. Sie werden zu jeweils 25 Prozent als Sonderfinanzierung von Bund und

Land und zu 50 Prozent aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) getragen. Weitere 14 Millionen Euro stellen Bund und Land anteilig zu je 50 Prozent als Sonderinvestitionsmittel für die Erschließung und Erstaussstattung bereit. Anfang 2020 soll das Gebäude bezugsfertig sein. In das bisherige Institutsgebäude wird das benachbarte Fraunhofer ISE einziehen.



UNSER KURATORIUM

2017 konnten wir sechs neue Mitglieder aus Forschung und Industrie für unser Kuratorium gewinnen. Vier Kuratoren schieden turnusmäßig aus dem Gremium aus. Die Vertreterinnen und Vertreter dieses erweiterten Kuratoriums werden neue Impulse zur strategischen Ausrichtung des Instituts beisteuern und der Institutsleitung beratend zur Seite stehen.

Vorsitzender

Dr. Manfred Jagiella, Endress + Hauser Conducta GmbH & Co. KG

Dr. Hans Eggers, Bundesministerium für Bildung und Forschung

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

Mitglieder

Dr. Lutz Aschke, TRUMPF Gruppe, Geschäftsbereich Lasertechnik

Dr. Jürgen Gieshoff, Umicore AG & Co. KG

Dr. Volker Nussbaumer, Deutsche Telekom AG

Prof. Dr. Frank Boochs, Hochschule Mainz, Fachbereich Geoinformatik & Vermessung

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

Dr. Stefan Raible, AMS Business Line Environmental Sensors

Dr. Bernd Dallmann, Freiburg WirtschaftsimmobiliengmbH & Co. KG

Dr. Mathias Jonas, Internationale Hydrographische Organisation

Prof. Dr. Michael Totzeck, Carl Zeiss AG

Gerhard Kleinpeter, BMW AG

Prof. Dr. Ulrike Wallrabe, Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



> SOLAR ist die am längsten auf der ISS operierende Forschungsmission.



PROFESSUREN AN DER UNIVERSITÄT FREIBURG

Fraunhofer IPM ist mit zwei Professuren am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg vertreten. Im April 2017 trat Prof. Dr. Alexander Reiterer am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) die Professur für »Monitoring von Großstrukturen« an, die Fraunhofer IPM zusammen mit der Universität Freiburg neu eingerichtet hat. An diesen Professuren werden Forschungsarbeiten durchgeführt, deren Ergebnisse zusammen mit Fraunhofer IPM der Anwendung zugeführt werden.

INSTITUT FÜR MIKROSYSTEMTECHNIK – IMTEK

Professur für Optische Systeme Prof. Dr. Karsten Buse

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

Spezialisierungsmöglichkeit »Photonics« wurde in den Studienplan für den Masterstudiengang Mikrosystemtechnik aufgenommen.

Professur für Gassensoren Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

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

der Forschung stehen miniaturisierte, energiesparende Gasmesssysteme. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung preisgünstiger und energiesparender mikrosystemtechnischer Sensoren.



INSTITUT FÜR NACHHALTIGE TECHNISCHE SYSTEME – INATECH

Professur für Monitoring von Großstrukturen Prof. Dr. Alexander Reiterer

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

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

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



SOLACES: NEUN JAHRE AUF DER ISS

Neun Jahre lang lieferte das von Fraunhofer IPM entwickelte Sonnenspektrometer SolACES von der Weltraumstation ISS aus Messdaten zur Sonnenaktivität.

Als Teil der Forschungsmission SOLAR, die 2017 endete, wurde das Experiment am 15. Februar 2017 im Brüsseler Kontrollzentrum B.USOC feierlich deaktiviert. SolACES wurde für die Messung extrem ultravioletter (EUV)-Strahlung eingesetzt, die von der Atmosphäre absorbiert wird und sich daher nicht von der Erde aus messen lässt. Die hohe Messgenauigkeit war ausschlaggebend dafür, dass die europäische Weltraumbehörde ESA die Laufzeit des Experiments zweimal auf insgesamt neun Jahre verlängert hat. Die von SolACES ermittelten Daten fließen in die Berechnungen moderner Klimamodelle ein. EUV-Strahlung steht in direktem Zusammenhang mit der Sonnenaktivität und erlaubt somit Rückschlüsse auf den solaren Energieeintrag in unser Klimasystem.



ERFOLGREICH BEI INDUSTRIE-AKQUISITIONEN ...

Gleich dreimal gewann Fraunhofer IPM im Jahr 2017 die »Kundenakquise des Monats« innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft.

Das Ranking erfasst monatlich den jeweils höchsten eingeworbenen Auftrag aus der Wirtschaft. Im Februar erteilte ein Hersteller von Abgasmesssystemen der Gruppe »Spektroskopie und Prozessanalytik« um Dr. Raimund Brunner einen Auftrag über mehr als 526.000 Euro. Im Oktober erhielt das Laserscanning-Team um Prof. Alexander Reiterer den Zuschlag für Bahn-Messsysteme im Wert von knapp

1,3 Millionen Euro von der niederländischen EURAILSCOUT Inspection & Analysis B.V. Im Folgemonat beauftragte ein Telekommunikationskonzern dieselbe Gruppe mit der Entwicklung einer Auswertungssoftware für 3D-Messdaten im Wert von rund 1,47 Millionen Euro. Damit verkauft das Institut erstmals eine reine Software-Entwicklung. Aufträge aus der Industrie bilden einen wesentlichen Anteil im Finanzierungsmix der Fraunhofer-Gesellschaft. Fraunhofer IPM erwirtschaftete im Jahr 2017 rund 7,6 Millionen Euro aus der Wirtschaft.

... UND BEI ÖFFENTLICH GEFÖRDERTEN PROJEKTEN

Fünf öffentlich geförderte Projekte und Fraunhofer-Projekte mit einem Volumen von jeweils mehr als einer Million Euro gingen 2017 an den Start.

Im von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Projekt TOXIG entwickelt Fraunhofer IPM gemeinsam mit weiteren Fraunhofer-Instituten ein System zur Detektion toxischer Gase auf Basis des Farbumschlag-Prinzips. Mit 1,3 Millionen Euro fördert die Fraunhofer-Gesellschaft ein Projekt zur Entwicklung eines optischen Messverfahrens, das die Geometrie und Oberfläche von Halbzeugen im freien Fall messen wird. Das Institut war mit Bewerbungen bei

gleich zwei »Leitprojekten« erfolgreich, mit denen die Fraunhofer-Gesellschaft institutsübergreifend Forschungsvorhaben zu strategisch wichtigen Themen mit dem Ziel einer raschen Markteinführung fördert: Im Projekt eHarsh entsteht eine Technologie-Plattform für besonders robuste Sensorsysteme. QUILT bündelt die Expertise von sechs Instituten, um neue Erkenntnisse in der Quantentechnologie für das Quantenimaging nutzbar zu machen. Im vom BMWi geförderten Projekt MagMed entwickeln Wissenschaftler am Institut gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich eine Technologie zur kältemittelfreien Kühlung.



> Forschen für die Zukunft: Dieser Androide zierte die Einladung der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute zur Industriewoche Baden-Württemberg 2017



GASSENSOR-WORKSHOP: NEUE EINSATZGEBIETE FÜR GASSENSOREN

An die einhundert Expertinnen und Experten trafen sich am 16. März 2017 am Fraunhofer IPM, um zukünftige Anwendungen und technologische Trends in der Gassensorik zu diskutieren.

Werden wir Gassensoren künftig in Smartphones oder Kleidern mit uns tragen? Welche Anforderungen an die Gassensorik stellen neue internationale Abgas-Prüfstandards? Fragen wie diese standen auf der Tagesordnung des 7. Gassensor-Workshops am Institut. Das thematische Spektrum der



Im Rahmen einer Ausstellung zeigten zahlreiche Firmen neue Sensoren und Systeme.

Fachvorträge reichte von komplexen spektroskopischen Systemen für die industrielle Prozessanalytik bis zu miniaturisierten Gassensoren für den Einsatz im häuslichen Alltag. Der Workshop hat sich inzwischen als Treffpunkt der Gassensor-Community fest etabliert und findet alle zwei Jahre statt. Nächster Termin ist der 14. März 2019.



KALORIK-WORKSHOP: NEUE TECHNOLOGIEN FÜR DIE KÄLTETECHNIK



Großes Interesse an alternativen Kältetechniken: Tobias Hess demonstriert einen kalorischen Kühlkreislauf.

Gemeinsam mit dem Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Verein e.V. organisierte Fraunhofer IPM am 28. März 2017 erstmalig den »Kalorik-Workshop – Festkörperbasiertes Kühlen und Heizen«. Knapp 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus Industrie und Forschung kamen nach Freiburg, um Chancen und technologische Herausforderungen von Wärmepumpen auf Basis kalorischer Materialien zu erörtern. Festkörperbasierte Kältesysteme gelten als aussichtsreiche Technologie für die Klima- und Kältetechnik der Zukunft. Fortschritte bei der Entwicklung mag-

neto-, elasto- oder elektrokolorischer Materialien rücken den Bau solcher Kältesysteme in greifbare Nähe. Sie sind effizient, geräuscharm und arbeiten ohne klima- und gesundheitsschädliche Kältemittel. Fraunhofer IPM präsentierte im Rahmen des Workshops eine elastokalorische Wärmepumpe und ein Heatpipe-Konzept zur effizienteren Wärmeabfuhr im kalorischen Kühlkreislauf.



WORKSHOP LASER-SPEKTROSKOPIE

Trends in der Laserspektroskopie waren Thema des gleichnamigen Workshops, den Fraunhofer IPM am 28. November 2017 ausrichtete.

Mehr als 50 Teilnehmerinnen und Teilnehmer diskutierten über Innovationen im Bereich Laserlichtquellen und neue Anwendungsmöglichkeiten für laserbasierte Spektrometer. Auf der Tagesordnung standen Fortschritte bei Interband-Kaskaden-Lasern (ICL), optisch parametrischen Oszillatoren (OPO), Quantenkaskadenlasern (QCL) und Frequenzkämmen. Sie schaffen die Voraussetzung dafür, die Zusammensetzung von Gasen und Flüssigkeiten empfindlicher und präziser zu messen. Die Quantensensorik verspricht einen weiteren Sprung bei der Empfindlichkeit laserspektroskopischer Messverfahren. Von Seiten der Industrie wurden neue Anwendungen präsentiert, beispielsweise in der medizinischen Diagnostik. Mit dem Workshop verabschiedete Fraunhofer IPM einen seiner langjährigen Mitarbeiter in den Ruhestand: Dr. Armin Lambrecht war seit mehr als 30 Jahren in verschiedenen Funktionen für das Institut tätig und trieb als Leiter der heutigen Abteilung »Gas- und Prozesstechnologie« und deren Vorgängerabteilungen die Arbeiten auf dem Gebiet der Laserspektroskopie entscheidend voran.

INDUSTRIE TRIFFT FORSCHUNG



Als Forschungspartner für die Industrie waren die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute mit zwei Veranstaltungen während der Industriewoche Baden-Württemberg vertreten.

Im Rahmen eines Industrieforums für geladene Gäste zeigten Fraunhofer-Vertreter gemeinsam mit den jeweiligen Industriepartnern anhand konkreter Projekte, was Forschung für Unternehmen vor Ort leisten kann. Für diese Abendveranstaltung am 21. Juni 2017 stellte die Sparkasse Freiburg die Meckelhalle in der Innenstadt zur Verfügung. In denselben Räumen fand am Tag darauf eine interaktive Ausstellung für die Öffentlichkeit statt, die zeigte, welche Rolle angewandte Forschung in unserem Alltag spielt: Ausgestellt wurden unter anderem ein Modell einer Fahrzeugcrash-Anlage, ein System zur Trinkwasserüberwachung, innovative Kühltechniken und Flüssigkristalle als

Was leistet Forschung für die Unternehmen vor Ort? Wissenschaftler und Unternehmensvertreter berichteten in Tandem-Vorträgen über gemeinsame Projekte.



Schmierstoffe. Rund 120 Schülerinnen und Schüler der örtlichen Gymnasien nahmen an den gesonderten Führungen teil. Die Industriewoche Baden-Württemberg wurde vom Landesministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau initiiert. Sie fand erstmalig vom 19. bis 25. Juni 2017 im gesamten Land statt. Auf dem Programm standen Veranstaltungen und Aktionen in Unternehmen, Institutionen und Verbänden. Partner der Fraunhofer-Veranstaltungen waren die Sparkasse Freiburg und die IHK Südlicher Oberrhein.



> Fraunhofer-Präsident Prof. Dr. Reimund Neugebauer (2.v.r.) gratuliert den Preisträgern Dr. Markus Fratz (links), Dr. Alexander Bertz (2.v.l.) und Dr. Tobias Beckmann (rechts) zur Auszeichnung.



SCHULE TRIFFT FORSCHUNG

Mit Girls' Day, BOGY und TOP BORS bietet Fraunhofer IPM regelmäßig Gelegenheit, einen Blick hinter die Kulissen eines Forschungsinstituts zu werfen.

Zum 17. Mal beteiligte sich das Institut am bundesweiten Mädchen-Zukunftstag. Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen verschiedener Abteilungen nahmen sich einen Tag lang Zeit, zwölf Schülerinnen für technische Themen zu begeistern. Im Rahmen der Initiativen BOGY (Berufs- und Studienorientierung, Gymnasien) und (TOP BORS) (Themenorientiertes Projekt Berufsorientierung, Realschule) verbrachten 2017 rund 15 Schülerinnen und Schüler jeweils eine Woche in den Laboren und Werkstätten des Instituts. »Das Praktikum hat mir weit mehr als nur neues spannendes Wissen gebracht«, formulierte eine Teilnehmerin in ihrem Abschlussbericht. »Es gab mir Einblick in eine mögliche berufliche Zukunft.«



Nachwuchsförderung: Schülerinnen experimentieren mit Reinraum-Techniken.

KÖNNT IHR LASERSCHWERTER BAUEN?



Siebzehn Schülerinnen und Schüler der Grundschule Witt-nau kamen im Oktober 2017 im Rahmen eines Zeitungsprojekts ans Institut – und stellten viele neugierige Fragen.

Die Dritt- und Viertklässler waren als Nachwuchsjournalisten der Badischen Zeitung unterwegs, um das Institut zu erkunden. Zu sehen gab es einiges in den Laboren: Der Blick durch ein Rasterelektronen-Mikroskop zeigte ein Fliegenauge und einen Schmetterlingsflügel in beeindruckender Vergrößerung. In der Werkstatt konnten die Kinder sehen, wie aus einem Computermodell in der Fräse ein Bauteil entsteht. Im Gaslabor demonstrierte Dr. Carolin Pannek, wie bestimmte Gase in einer Flüssigkeit einen Farbumschlag auslösen. Das

Zum Anfassen: Sensorkugeln für den Einsatz in Katastrophen-Szenarien. Ihre Eindrücke hielten die Kinder in einem selbst gestalteten Buch fest, das Institutsleiter Karsten Buse als Dank überreicht wurde.

Team Laserscanning präsentierte Freiburgs vermutlich längstes Aquarium, in dem Unterwasser-Scanner getestet werden. Wie man 3D-Formen schnell und präzise vermessen kann, zeigte Dr. Markus Leidinger, indem er einige der Gäste mit einem Laserscanner vermaß. Laser üben – Star Wars sei Dank – denn auch eine besondere Faszination auf die Kinder aus: Im Laserlabor konnten die Schüler Laserlicht in unterschiedlichen Farben bestaunen. Die Frage nach dem Laserschwert musste allerdings leider abschlägig beantwortet werden.

FRAUNHOFER-PREIS FÜR DIGITALE HOLOGRAPHIE IM PRODUKTIONSTAKT

Für die Entwicklung eines digital-holographischen Messsystems zur Bauteilprüfung wurde ein Fraunhofer IPM-Team mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis ausgezeichnet.

Das von Dr. Alexander Bertz, Dr. Tobias Beckmann und Dr. Markus Fratz entwickelte Messsystem erfasst Oberflächen und Mikrodefekte an Bauteilen während der Produktion. Dazu nutzen die Wissenschaftler eine hochgenaue 3D-Messmethode: die digitale Mehrwellenlängenholographie. Dieses Verfahren war bisher zu langsam und

erschütterungsempfindlich für den Einsatz in der industriellen Produktion. Den Wissenschaftlern gelang es, die digitale Holographie industrietauglich zu machen. Im Gegensatz zu herkömmlichen digital-holographischen Systemen, die eine einzige Wellenlänge zur interferometrischen Messung nutzen, arbeitet das Fraunhofer IPM-System mit Laserlicht unterschiedlicher Wellenlängen und verrechnet die entstehenden Bilder miteinander. Zur Auswertung wurden Rechenschritte so parallelisiert, dass sie die komplette

Leistung einer High-End-Grafikkarte nutzen. Dadurch ist das System so schnell, dass Gegenstände innerhalb von Sekundenbruchteilen auf den Mikrometer genau vermessen werden können. Damit ist erstmals eine vollständige, mikrometergenaue Bauteilkontrolle in der Fertigungslinie möglich. Das System ist das weltweit schnellste Messsystem für flächige topographische Messungen. Es wurde für einen mittelständischen Automobilzulieferer entwickelt.

»AWARD ZUR BLECHEXPO«

Für ein bildgebendes Inline-Messsystem zur Blechbeölung wurden Fraunhofer IPM und die Raziol Zibulla & Sohn GmbH mit dem »Award zur Blechexpo 2017« ausgezeichnet.

Ein am Institut entwickelter Fluoreszenz-Scanner erstellt erstmals direkt in der Fertigungslinie ein vollflächiges Befettungsbild der gesamten Blechoberfläche. Dazu rastert ein UV-Laser die Blechoberfläche punktwise ab, indem das Laserlicht mithilfe eines Polygonspiegels über die gesamte Blechbreite quer zur Vorschubrichtung bewegt wird. Unter UV-Licht zeigen die meisten in der Blechverarbeitung

verwendeten Öle eine starke Fluoreszenzaktivität. Eine spektrale Auswertung der Fluoreszenzsignale gibt Aufschluss über Dicke und Homogenität der Ölschicht und liefert kontrastreiche Messbilder. Gemeinsam mit dem Industriepartner Raziol hat Fraunhofer IPM das Messsystem in Sprühanlagen für die Blechbeölung integriert. Die exakte Dosierung und vollflächige Aufbringung dünner Ölfilme spielen eine wichtige Rolle bei der Umformung und beim Korrosionsschutz von Blechen. Das System ermöglicht eine 100-Prozent-Qualitätskontrolle und eine echte Prozesskontrolle bei der Blechbeölung.



Der Innovationspreis wurde im Rahmen der Fachmesse Blechexpo verliehen. Mit im Bild Dr. Albrecht Brandenburg (hintere Reihe r.) und Dipl.-Ing. Philipp Holz (vordere Reihe l.), die das System entwickelten.

> Stephan Fetzner: »Für mich war schnell klar: Das wird was!«

>> »Der Markttrend in Richtung kleinere Geräte kommt uns auch bei stationären Rollenprüfständen zugute«, sagt Fetzner. »Auch dort wollen Kunden kompakte Lösungen.«



»Der Teufel steckt immer im Detail«

Im Auftrag von AVL Emission Test Systems GmbH entwickelt Fraunhofer IPM Abgasmesssysteme für die Motorenentwicklung. Speziell geht es um die Messung von Distickstoffmonoxid. Seit über acht Jahren arbeiten beide Partner in Entwicklungsprojekten zusammen – inzwischen auch darüber hinaus in der Trendanalyse und Technologiefrüherkennung. Stephan Fetzner ist Teamleiter in der Entwicklung für Gerätesteuerung und Analytik bei AVL Emission Test Systems GmbH in Gaggenau.

Herr Fetzner, was genau macht AVL ETS?

Am Standort Gaggenau entwickeln und produzieren wir Abgasmesssysteme zur Motorenentwicklung. Unsere SESAM-Messsysteme messen alle wichtigen Abgaskomponenten im Rohabgas. Speziell entwickeln wir dort auch Lachgas-Messsysteme mit Quantenkaskadenlasern (QCL). Das sind relativ neue Systeme, die wir gemeinsam mit Fraunhofer IPM in den Markt gebracht haben.

Wie kam es zur Zusammenarbeit mit Fraunhofer IPM?

Rückblickend ist das aus unserer Sicht eine Erfolgsgeschichte: Wir kannten Fraunhofer IPM schon aus kleineren Projekten zu Wasserstoffsensoren. Mitte 2010 waren wir dann auf der Suche nach dem richtigen Partner, um hochgenau Lachgas mittels Laserspektroskopie zu detektieren. Die Kompetenz des Fraunhofer IPM in dieser neuen Technologie hat uns dann überzeugt.

Welchen Erwartungen hatten Sie zu Projektbeginn?

Die benötigte Technologie war zu der Zeit noch sehr jung. Wir hatten uns vorgenommen, eine Nachweisgrenze für Lachgas von unter 10 ppb und Querempfindlichkeitsfreiheit von anderen Abgaskomponenten zu schaffen. Dazu mussten wir möglichst rasch die Frage beantworten: Bekommen

wir das überhaupt hin? Daher war das erste Messsystem ein simples Rohr mit einem Laser und Detektor, der Aufbau unstrukturiert; jede Komponente wurde extra angesteuert mit eigenem Display, Versorgung und vielen Kabeln. Heute sieht das System natürlich ganz anders aus: vollintegriert in ein Industriegehäuse, mit integrierter Auswertung und Datenschnittstelle. Aber als wir mit dem ersten Aufbau von Fraunhofer IPM die Spezifikationen gleich recht gut hinbekommen haben, war für mich schnell klar: »Das wird was!«

Was haben Sie in der gemeinsamen Arbeit am meisten zu schätzen gelernt?

Das Fachwissen der Fraunhofer-Kollegen: Die sehr guten Kenntnisse über die Laserspektroskopie haben uns sehr geholfen, ein Gerät zu entwickeln, das von Beginn an keine ersten Kinderkrankheiten gehabt hat. Die Messgeräte haben eigentlich vom Stand weg so funktioniert, wie wir uns das vorgestellt haben.

Wie wichtig waren die kurzen Wege zwischen Gaggenau und Freiburg?

Immer wenn es nötig war, einen Prototyp zu uns zu bringen oder mit einem System von uns nach Freiburg zu gehen, hat uns die Nähe sehr geholfen. Ideen konnten recht spon-

Die **AVL EMISSION TEST SYSTEMS GMBH** ist ein Tochterunternehmen der AVL List GmbH, dem weltweit größten, unabhängigen Unternehmen für die Entwicklung, Simulation und Prüftechnik von Antriebssystemen für Pkw, Nutzfahrzeuge und Großmotoren. Die AVL Emission Test Systems GmbH befasst sich mit der Entwicklung und Produktion von Gasanalyse-Systemen, Messsystemen und Automatisierungssystemen zur Bestimmung von Motor- oder Fahrzeugabgasen sowie von Verdunstungsemissionen. Standorte des Unternehmens sind Neuss, Gaggenau, Graz und Plymouth. Am Standort Gaggenau beschäftigt die AVL Emission Test Systems GmbH rund 110 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

tan im Labor ausprobiert werden. Sehr angenehm war, dass beide Seiten immer schnell und flexibel reagiert haben. Bei einer Neuentwicklung steckt der Teufel immer im Detail.

Hat sich AVL ETS durch Fraunhofer IPM neue Märkte erschlossen?

Das eigentliche Marktpotential hat der Gesetzgeber geschaffen, indem er die Emissionen von Lachgas reglementiert hat. Wir hatten jedoch keine befriedigende Lösung dafür. Die Konkurrenz war uns ein wenig voraus. Diese Lücke im Portfolio konnten wir mit Fraunhofer IPM schnell schließen. Dabei war uns wichtig, dass wir das Know-how selber in der Hand haben, um auf Kundenwünsche schnell reagieren zu können. Das haben wir gut hinbekommen.

In welche Richtung entwickelt sich Ihr Geschäftsfeld?

Ein starker Markttrend geht in Richtung mobile Geräte: Unsere Kunden möchten immer kleinere Geräte, mit geringem Energieverbrauch und nach Möglichkeit kalibrierfrei. Stichwort: real drive emission. Dieser Miniaturisierungstrend kommt uns auch bei stationären Prüfständen zugute. Auch dort wollen Kunden kompakte Lösungen. Für uns heißt das: mit weniger Messgas die gleiche Leistung erreichen, z. B. was die Ansprechzeiten angeht.

Wann lohnt sich ein externer Forschungspartner?

Das lohnt sich immer dann, wenn man eine neue Technologie relativ schnell in den Markt bringen möchte. Allein

hätten wir uns erst einarbeiten müssen. Das hätte Jahre gebraucht. Gemeinsam konnten wir unsere Köpfe zusammenstecken: So haben sich unsere Kompetenzen bei der Messtechnik, Serienfertigung, Elektronik- und Softwareentwicklung sehr gut ergänzt. Während der Zusammenarbeit sind einige Patente entstanden, die in den Messsystemen weltweit eingesetzt werden. Der Austausch ist dabei immer sehr offen: Sogar auf Managementebene finden jährliche Meetings statt. Dort sprechen wir neue Technologien und Ideen durch und überlegen, welche Chancen sich für uns ergeben. So entstand über die Jahre eine fruchtbare und vertrauensvolle Partnerschaft.

Vielen Dank für das Gespräch!



Prüfstände für die Motorenentwicklung liefern wichtige Erkenntnisse, um Verbrennungsmotoren noch effizienter zu machen.



»Wir bringen Messverfahren vom Labor in die Produktion.«

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

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

Gruppe Inline-Messtechnik

- ▶ Oberflächeninspektion
- ▶ Maßhaltigkeitsprüfung
- ▶ markierungsfreie Bauteilidentifikation

Gruppe Optische Oberflächenanalytik

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

< Ein optisches Messsystem erkennt mikrometergroße Defekte auf Drahtoberflächen während der Produktion.



KONTAKT

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



GRUPPE INLINE-MESSTECHNIK

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

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

KOMPETENZEN

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

ANWENDUNGEN

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

>> Der digital-holographische Sensor HoloCut vermisst Bauteiloberflächen direkt in der Werkzeugmaschine.

SPEZIFIKATIONEN

AUTOMATISIERTE VISUALKONTROLLE

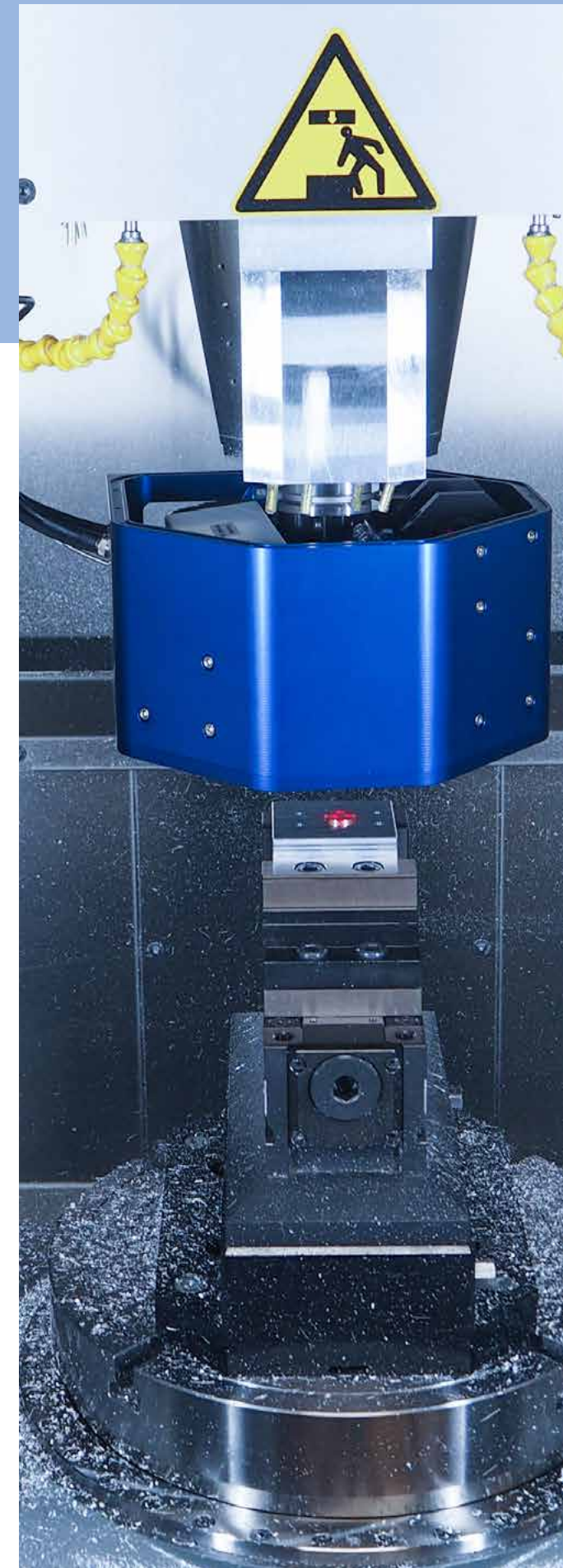
- ▶ 100-Prozent-Oberflächenkontrolle von Drähten bei 30 m/s Produktionsgeschwindigkeit
- ▶ vollständige Prüfung komplex geformter Schmiede- und Gussteile
- ▶ kundenspezifische Systeme für raue Produktionsumgebungen
- ▶ Inline-Prüfung von Geometrie und Oberfläche

MASSHALTIGKEITSPRÜFUNG

- ▶ hochpräzise Messung von Funktionsflächen in der Linie bzw. direkt in der Werkzeugmaschine
- ▶ 100 Millionen 3D-Punkte pro Sekunde
- ▶ Arbeitsabstand bis ca. 300 mm realisierbar
- ▶ 30 × 30 mm² Messfeldgröße
- ▶ absolute Höhenmessgenauigkeit (< 1 µm)
- ▶ laterale Auflösung (< 10 µm)

MARKIERUNGSFREIE BAUTEILIDENTIFIKATION

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





< Ein neuartiger holographischer Zeilensensor erfasst die 3D-Oberflächeninformation eines Metallzylinders in Bewegung. Verschiebungen von bis zu einem Zentimeter pro Sekunde sind heute schon möglich, ohne die interferometrische Messung zu stören.

GEFÖRDERT VOM BMBF
Förderkennzeichen: 13N14009
Verbundprojekt: Dynamisch-holographisches
Messverfahren zur Erfassung metallischer
Freiformflächen (HoloMotion)



Federal Ministry
of Education
and Research

GRUPPE INLINE-MESSTECHNIK

Holographie in Bewegung: 3D-Daten Zeile für Zeile

In den letzten Jahren konnte Fraunhofer IPM ein extrem schnelles, mikrometergenaues 3D-Inline-Messverfahren in der Industrie etablieren: die digitale Holographie. Zur Messung muss der Prüfling dabei stillstehen. Jetzt zeigt Fraunhofer IPM erstmals, dass sich Oberflächen auch in Bewegung holographisch erfassen lassen – mithilfe eines Zeilensensors.

Bei der flächigen und mikrometergenauen Oberflächenmessung hat Fraunhofer IPM in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt: Die Systemfamilien HoloTop und HoloCut erfassen heute schon 3D-Oberflächen von Prüflingen in der Fertigungslinie bzw. direkt in der Werkzeugmaschine. Das dabei zugrundeliegende Messverfahren ist die digitale Mehrwellenlängenholographie. Zur Messung werden mithilfe mehrerer schmalbandiger Laser im Rechner verschiedene synthetische Wellenlängen generiert. So kann ein breites Messspektrum erschlossen werden – je nach Rauigkeit der Oberfläche vom (Sub-) Mikrometer- bis in den Millimeterbereich. Damit die Messung jedoch gelingen kann, müssen Sensor und Prüfobjekt für eine Zehntelsekunde vollständig ruhen. Schon kleinste Relativbewegungen von zehn Nanometern während der Aufnahme würden die Messung beeinträchtigen.

Dynamisch messen – zeilenweise

Doch was ist, wenn selbst dieses kurze Innehalten produktionsbedingt gar nicht möglich ist? Wenn sich z. B. der Prüfling kontinuierlich bewegt und das Handling für die ruhende Aufnahme zu viel Zeit kosten würde? Laut Lehrmeinung sollte ein interferometrisches Messverfahren

wie die Holographie dann eigentlich unmöglich sein. Dass dem jedoch nicht so ist, beweist Fraunhofer IPM seit Kurzem durch einen neuen, patentierten Ansatz. Drei Dinge sind dabei entscheidend: die Auswahl der Blende, die 3D-Rekonstruktion aus nur einem Hologramm und die Bewegungsrichtung des Objekts. Damit konnte Fraunhofer IPM erstmals einen holographischen Sensor aufbauen, der eine Objektoberfläche in Bewegung Zeile für Zeile rekonstruiert (Abb. oben). Die 3D-Daten der vollständigen Oberfläche werden durch Überlagerung der einzelnen Zeilen im Rechner erzeugt (Abb. rechts). Verschiebungen um einen Zentimeter pro Sekunde stellen für den neuen Sensor schon heute kein Problem mehr dar. Das ist revolutionär und wird der digitalen Mehrwellenlängenholographie schon bald viele neue Anwendungen erschließen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer IPM wollen die Messgeschwindigkeiten noch weiter steigern und so in Zukunft bei noch höheren Objektgeschwindigkeiten ebenso präzise 3D-Daten erfassen.

Holographie mit mehreren Wellenlängen

Auch der neuartige holographische Zeilensensor basiert – wie eingangs angedeutet – auf dem Prinzip der digitalen

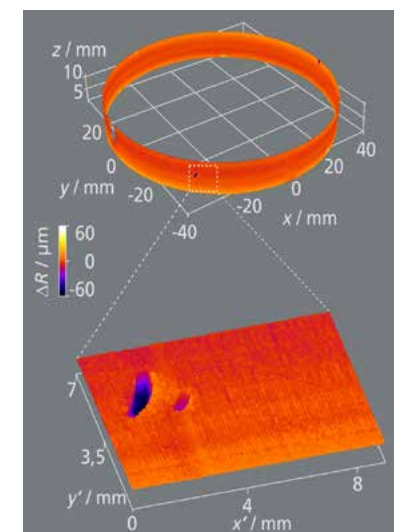
Bei der **DIGITALEN HOLOGRAPHIE** wird neben der beim Foto üblichen räumlichen Intensitätsverteilung des Lichts zusätzlich auch die Phaseninformation des Lichts erfasst. Voraussetzung hierfür ist eine kohärente Lichtquelle – typischerweise ein Laser. Wird die Oberfläche eines Prüflings mit Laserlicht beleuchtet, ist in der Phasenverteilung der rückgestreuten Lichtwelle die Form des Prüflings gespeichert. Durch die interferometrische Aufzeichnung und anschließende digitale Rekonstruktion wird diese Information zugänglich und genutzt, um Oberflächen dreidimensional zu vermessen. Das Grundprinzip der Holographie geht auf eine Erfindung von Dennis Gabor aus dem Jahr 1948 zurück, für die er 1971 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde.

Mehrwellenlängenholographie. Im Gegensatz zur klassischen Interferometrie oder Holographie mit nur einer Laserwellenlänge können mit der Mehrwellenlängenholographie auch optisch raue Oberflächen vermessen werden. Das auf rauen Oberflächen entstehende Speckle-Rauschen, das die quantitative Phasenauswertung zur Topographiebestimmung normalerweise unmöglich macht, wird durch die numerische Rekonstruktion bei verschiedenen Wellenlängen eliminiert. Dabei entsteht eine Phasenkarte bei der Schwebefrequenz der Einzelwellenlängen, die die Information über die Topographie des beleuchteten Objekts enthält. Die rechenaufwändige digital-holographische Rekonstruktion der komplexwertigen Wellenfelder, in denen die Prüflingstopographie gespeichert ist, erfolgt auf modernen Grafikkarten und wurde in den vergangenen Jahren um mehrere Größenordnungen beschleunigt. 3D-Sensoren der von Fraunhofer IPM entwickelten HoloTop-Familie werten mehr als 100 Millionen 3D-Messpunkte pro Sekunde aus und besitzen damit hinsichtlich Genauigkeit und Geschwindigkeit eine Alleinstellung.

Neue Anwendungen für die Holographie

Die Kombination aus hoher Genauigkeit, koaxialer Messung und Robustheit gegenüber Bewegung wird dem neuen Holographiesensor viele neue Anwendungen eröffnen, die sich heute gar nicht oder nur sehr aufwändig bedienen

lassen. Dazu zählt beispielsweise die 100-Prozent-Kontrolle von Endlosware auf 3D-Mikrodefekte, die hochgenaue Geometrieprüfung von Druckgussteilen oder auch die präzise Vermessung von Verzahnungen. Letzteres ist sicherlich die anspruchsvollste Aufgabe: Schon statisch ist die optische Vermessung metallischer Verzahnungen – je nach Neigungswinkel und Oberflächenbeschaffenheit – sehr herausfordernd. Gelingt es aber mit dem neuen Sensor, Zahnradflanken während der Drehung holographisch vollständig zu erfassen, so würde das die Verzahnungsmessung revolutionieren. Ein solches Messsystem wäre am Markt konkurrenzlos.



Die 3D-Oberfläche des Metallzylinders wurde in Bewegung zeilenweise erfasst (Bild S. 22 oben). Die Höhenabweichung vom Sollzylinder wird mikrometergenau gemessen – selbst feinste Bearbeitungsspuren und Defekte werden detektiert.



GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

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

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

KOMPETENZEN

schnelle, ortsauflösende Fluoreszenzmesstechnik mit kundenspezifisch entwickelten Beleuchtungssystemen | Laserinduzierte Plasmaspektroskopie zur Oberflächenanalytik nichttransparenter Medien | Entwicklung endoskopischer Techniken unter Nutzung spektraler Informationen | Inline-Mikroskopiesysteme mit Gerätesteuerung und Datenauswertung | »Shortwave-Infrared«-Analyse: Nutzung spektraler Abhängigkeit von Absorptions- und Streueigenschaften zur Materialanalyse | Auswertung von biochemischen Reaktionen auf der Basis von Fluoreszenz-Markern

ANWENDUNGEN

Inline-Reinheitskontrolle – macht Verunreinigungen auf Bauteilen sichtbar | Erkennung von Defekten und Beschichtungen an Oberflächen | flächige Ölauf-lagenmessung von Bandwaren und komplex geformten Bauteilen in der Produktion | Echtheitsprüfung durch Analyse fluoreszierender Pigmente | Mikroskopie im Produktionstakt, z. B. 100-Prozent-Prüfung von Schlüsselkomponenten in Medizinprodukten | stoffspezifische Erkennung von Materialien an Oberflächen | in-vitro Diagnosesysteme

>> Der inlinefähige F-Scanner prüft die Reinheit von Bauteiloberflächen mithilfe von Fluoreszenz-Messtechnik.

SPEZIFIKATIONEN

REINHEITSKONTROLLE UND BESCHICHTUNGSPRÜFUNG

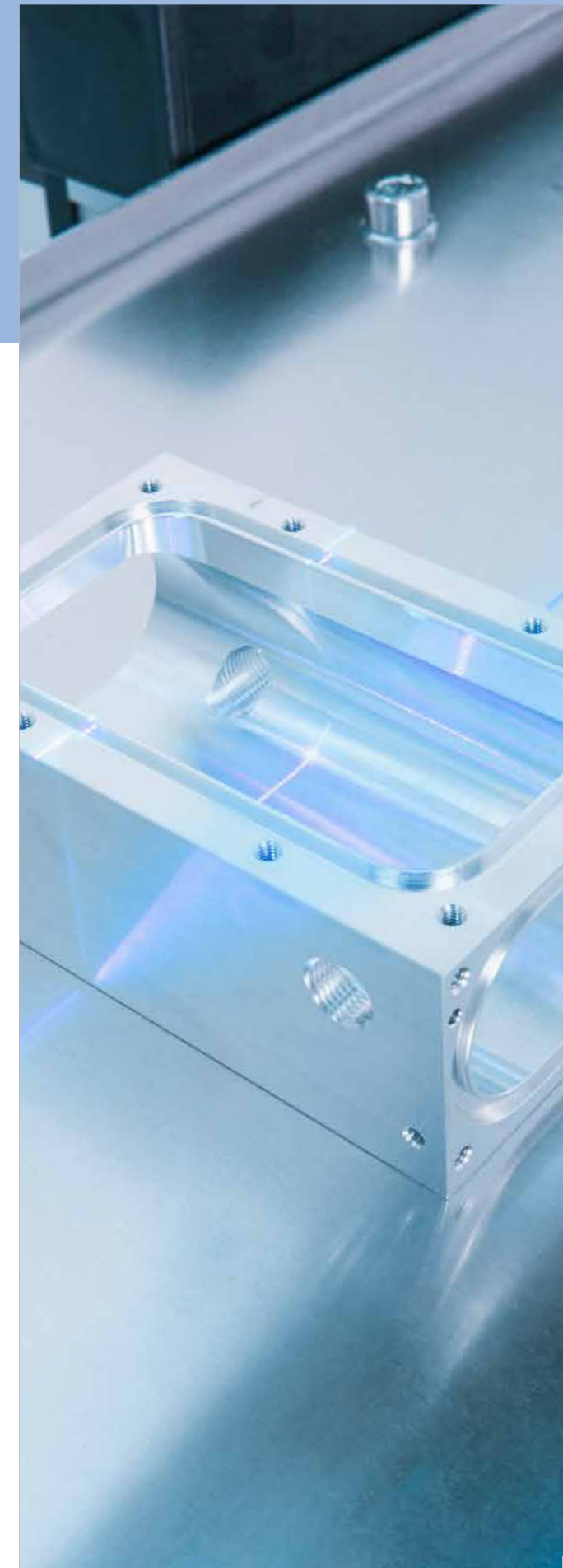
- ▶ Auswertung von Position, Form und Menge filmischer Verunreinigungen im Produktionstakt
- ▶ bildgebende Messung von Prozesshilfsstoffen wie Öle, Fette oder Reinigungsmittel (Nachweisgrenze bei Standardölen: 0,01 g/m²)
- ▶ Kamerasystem: Sichtfeld einige cm², Auflösung 20 µm
- ▶ Scannersystem: Sichtfeld einige m², Auflösung 500 µm

INLINE-MIKROSKOPIE

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

LASERINDUZIERTES PLASMASPEKTROSKOPIE

- ▶ berührungslose Materialanalyse an Oberflächen
- ▶ Dickenmessung mikrometerdünner funktionaler Schichten
- ▶ Charakterisierung nanometerdünner Korrosionsschutzschichten in der Produktionslinie
- ▶ Nachweis von Beschichtungsbestandteilen bis in den ppm-Bereich





< Dank vollflächiger Messung der Oberfläche können nicht nur Änderungen von Schichtendicken sondern auch Strukturen detektiert werden, so z.B. Tröpfchen.

GRUPPE OPTISCHE OBERFLÄCHENANALYTIK

Quantitative Beschichtungskontrolle am Band

Bei vielen Produkten sind dünne Beschichtungen und deren Beschaffenheit qualitätsbestimmend. Lack, Umformöl, Haftvermittler oder andere Funktionsbeschichtungen werden meist mit hoher Geschwindigkeit und oft auch großflächig aufgetragen. Fraunhofer IPM entwickelt Messsysteme, um solche Schichten quantitativ und qualitativ zu kontrollieren – vollflächig, schnell und direkt in der Produktionslinie.

Viele Fertigungsschritte müssen heutzutage immer häufiger und mit immer höherer Präzision geprüft werden. Dazu zählen auch alle Oberflächenbeschichtungen, die für die Qualität eines Produkts ausschlaggebend sind. Denn nur optimal aufgebrachte Schichten – wie z. B. Lack oder Korrosionsschutzöl – erfüllen auch ihren Zweck. Fraunhofer IPM hat daher bildgebende Messsysteme entwickelt, die eine quantitative Kontrolle von Beschichtungen erlauben – und das direkt am Band in der Produktion.

Beispiel: Ölaufagenmessung

Gängige Inline-Messsysteme zur Bestimmung der Ölaufage messen punktförmig. Sie werden quer zur Vorschubrichtung über die Oberfläche der Bandware geführt. Beim schnellen Vorschub ergibt sich somit eine zickzack-förmige Messlinie, die die Oberfläche nur teilweise erfasst. Es entstehen Zwischenräume, die sich zu kritischen Messlücken von bis zu 100 Quadratmetern aufsummieren. Um wirklich sicher zu sein, wie gut die Qualität einer Beschichtung in der Fläche ist, muss die Homogenität und Dicke der Schicht vollflächig erfasst werden. Aus diesem Grund werden in den Messsystemen von Fraunhofer IPM schnelle Laserscan-

ner eingesetzt. Selbst bei einem Vorschub von mehreren Metern pro Sekunde können damit 100 Prozent der Oberfläche unmittelbar in der Produktion analysiert werden.

Vollflächige Messung mit dem F-Scanner

Der schnelle Laserscanner des F-Scanners erlaubt eine orts aufgelöste 100-Prozent-Kontrolle großer Flächen am Band. Das Messsystem zeichnet rund 400 Linien pro Sekunde auf und erlaubt je nach Bandgeschwindigkeit eine Ortsauflösung von wenigen Millimetern. Diese Methode ermöglicht einen hohen Flächendurchsatz bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit. Dank des kollimierten Laserstrahls besitzt das System eine hohe Schärfentiefe. Neben der Überwachung von Bandware können so auch Problemstellen bei komplexen Bauteilgeometrien zuverlässig erkannt werden.

Fluoreszenz macht Verborgenes sichtbar

Beim F-Scanner rastert der Laserscanner die Oberfläche punktwise mit UV-Licht ab. Bei diesen Wellenlängen zeigen viele organische Materialien, insbesondere Fette, Öle, Polymere, Trennmittel und transparente Lacke, eine starke

FLUORESZENZ bezeichnet die Emission von Licht, die viele, meist organische Materialien nach Anregung durch energiereiches UV-Licht zeigen. Das spontan emittierte Fluoreszenzlicht hat eine größere Wellenlänge als das vorher absorbierte UV-Licht und kann mittels Filterung getrennt von diesem detektiert und ausgewertet werden. So lassen sich quantitative Aussagen über Schichtbelegungen machen.

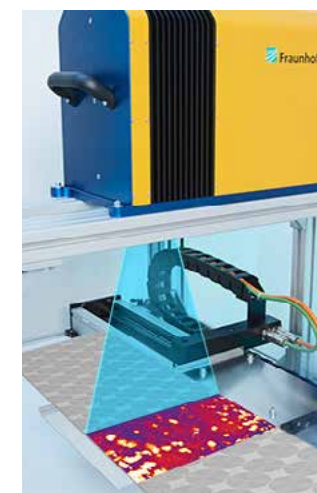
Fluoreszenzaktivität. Sie wandeln einen Teil des UV-Lichts in sichtbares Licht um. Als Messsignal werden diese Fluoreszenzsignale detektiert, interpretiert und zu einem orts aufgelösten Gesamtbild zusammengesetzt.

Die Fluoreszenz der Schichtmaterialien wird so ausgewertet, dass kontrastreiche und eindeutige Messbilder zur Dicke und Homogenität der Beschichtung auf der gesamten Oberfläche entstehen. Mit entsprechender Kalibrierung lässt sich die Beschichtung einer Oberfläche mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05 \text{ g/m}^2$ kontrollieren; die Nachweisgrenze liegt im Bereich von $0,01 \text{ g/m}^2$. Fraunhofer IPM setzt die bildgebende Fluoreszenzmesstechnik bereits in verschiedenen Applikationen ein, so z. B. zur Detektion unerwünschter Rückstände von Schmiermitteln, Klebern, Reinigern oder Fotolacken, zur Analyse der Beölung von Metallbändern oder auch zur Überwachung funktioneller Beschichtungen wie z. B. Haftvermittlern.

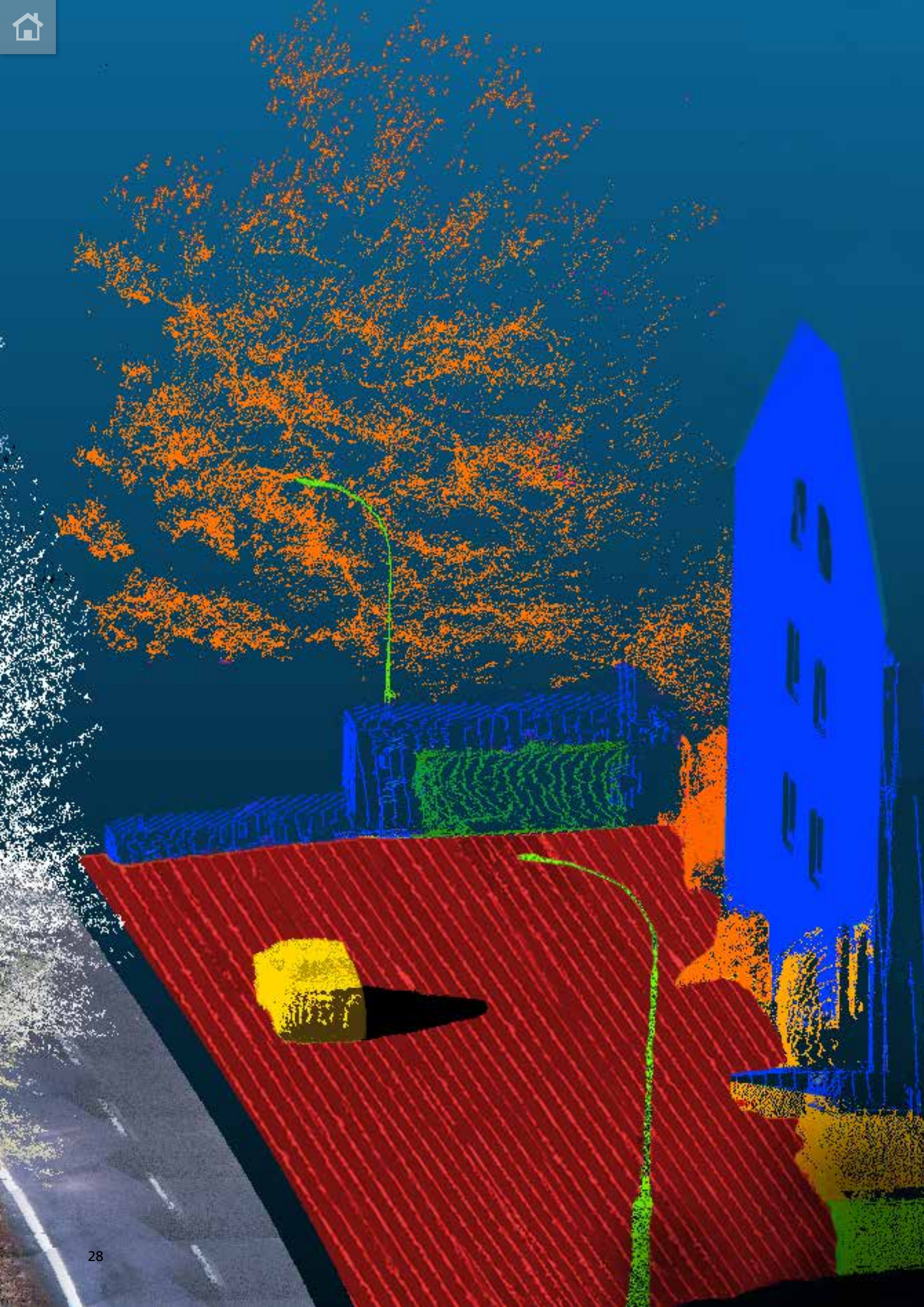
Maßgeschneiderte Systeme – mit optimierter Bildverarbeitung

Abhängig von der jeweiligen Messaufgabe stellt Fraunhofer IPM die Scanner-Konfiguration kundenspezifisch zusammen. Berücksichtigt werden dabei die Bandabmessungen, die Bandgeschwindigkeit, der verfügbare Bauraum und die zu detektierenden Stoffe. Die messtechnische Hardware ist aber nur ein Teil des Gesamtsystems. Mindestens ebenso wichtig ist die automatisierte Bildverarbeitung: Die Systeme

von Fraunhofer IPM werten die Fluoreszenzbilder mittels Mustererkennung in Echtzeit aus. Über- oder unterschreiten Belegungen einen definierten Grenzwert, wird der nächste Prozessschritt entsprechend angepasst: Das Bauteil wird aussortiert, gereinigt oder erneut beschichtet. Auf diese Weise hilft die orts aufgelöste Auswertung, Produktionsabläufe optimal zu prüfen, zu dokumentieren und dadurch dauerhaft zu optimieren. Dass dies auch in der Praxis bestens gelingt, beweist die Auszeichnung mit dem »Award zur Blechexpo 2017« in der Kategorie »Prozesskontrolle und Qualitätssicherung« (siehe S. 15). Fraunhofer IPM wurde gemeinsam mit der Firma Raziol Zibulla & Sohn GmbH für das erste System ausgezeichnet, bei dem mithilfe des F-Scanners die Ölaufage geregelt aufgetragen wird.



Der F-Scanner detektiert Schichten quantitativ anhand des Fluoreszenzsignals des aufgetragenen Materials. Die Auswertung erfolgt in Echtzeit und ermöglicht so eine automatisierte Prozessoptimierung.



»Wir erfassen 3D-Daten und werten sie automatisiert aus.«

Im Geschäftsfeld »Objekt- und Formerfassung« entstehen Systeme zur dreidimensionalen Erfassung der Geometrie und Lage von Objekten. Dazu entwickeln wir nicht nur Laserscanner, sondern auch maßgeschneiderte Beleuchtungs- und Kamerasysteme. 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. Objekte und Formen werden über einen weiten Größenbereich erfasst: von wenigen Zentimetern 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 und unter Wasser.

Eine zunehmend wichtige Rolle spielt die effiziente Auswertung der Messdaten. Vor diesem Hintergrund entwickeln wir lernende Algorithmen, die auf dem Konzept des »Deep Learning« umgesetzt werden.

Gruppe Laser Scanning

- ▶ Systeme für die Bahn
- ▶ Systeme für die Straße
- ▶ Messen unter schwierigen Bedingungen
- ▶ automatisierte 3D-Dateninterpretation

< Kameras und Laserscanner erfassen große Strukturen wie etwa Straßen oder Gebäude. Die 3D-Daten werden mithilfe von lernenden Algorithmen automatisiert ausgewertet.



KONTAKT

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



GRUPPE LASER SCANNING

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

Forschungsschwerpunkt 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 Laser-scanning erfordert eine präzise Positions- und Lageerkennung des Messsystems. Die Gruppe entwickelt hierfür spezielle, kamerabasierte Verfahren, die – eigenständig oder in Kombination mit konventioneller Inertialsensorik – eine Zuordnung der Daten zu einem festen lokalen Koordinatensystem ermöglichen.

KOMPETENZEN

Lichtlaufzeit-Messsysteme erfassen Distanzen submillimetergenau | schnelle Laserscanner ermöglichen das Abtasten der Umgebung | kleine und leichte Laserscanner-Messsysteme für mobile Plattformen

ANWENDUNGEN

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

>> Installiert auf einer Drohne vermisst ein Laserscanner-System die Frontseite des Staufener Rathauses, an dem infolge von Geothermiebohrungen Risse aufgetreten waren.

SPEZIFIKATIONEN

SYSTEME FÜR DIE BAHN

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

SYSTEME FÜR DIE STRASSE

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

AUTONOME SYSTEME

- ▶ Distanzen auch unter schwierigen Bedingungen erfassen (u. a. in trüben Medien, bei Nebel)
- ▶ 3D-Messdaten interpretieren, u. a. durch »Deep Learning«
- ▶ komplexe Messsysteme miniaturisieren für den Einsatz auf autonomen Fahrzeugen: Gesamtgewicht unter 2 kg
- ▶ Position mobiler Messsysteme bestimmen mit visueller Odometrie, Positionierungs- und Orientierungssystemen





< Für eine bessere Planung und Dokumentation nehmen Kameras und Laserscanner große Baustellen-areale aus der Luft auf.

GRUPPE LASER SCANNING

Baufortschritt: aus der Luft erfasst, automatisch ausgewertet

Auf Großbaustellen herrscht Dynamik: Große Mengen an Material und Objekten werden täglich bewegt. Ein von Fraunhofer IPM für die STRABAG AG entwickelter Laserscanner erfasst Verkehrswege-Baustellen aus der Luft, um diese Veränderungen zu dokumentieren. Die 3D-Daten werden mit einer eigens entwickelten Software automatisch ausgewertet.

Für Baudienstleister wie die STRABAG AG ist es wichtig, den Projektfortschritt auf Großbaustellen zu überwachen und zu dokumentieren. Projektmanager im Baugewerbe arbeiten dabei zunehmend mit digitalen Daten und spezieller Software. Diese sind die Basis für die sogenannte Bauwerksdatenmodellierung (Building Information Modeling, BIM), die dabei hilft, Bauprojekte optimal zu planen und zu realisieren.

Auf Großbaustellen, etwa im Verkehrswegebau, werden seit einiger Zeit mit Kameras ausgestattete Drohnen eingesetzt, um den Baustellenstatus zu dokumentieren. Alle paar Tage überfliegen sie das Areal und liefern so eine Vielzahl an Informationen: Position und Größe von Asphalt- oder Kiesflächen, Leitplanken, Bordsteinkanten, Kanaldeckeln oder Bäumen ebenso wie Bestand und Lagerort von Baumaterialien oder Baustelleninventar. Ausgewertet werden die aus den Kamerabildern berechneten 3D-Daten heute »manuell«, also durch Sichtprüfung. Diesen Prozess effizienter zu gestalten, ist das Ziel eines gemeinsamen Projekts von STRABAG und Fraunhofer IPM.

Objekte in 3D-Punktwolken sicher erkennen

Ein von Fraunhofer IPM entwickeltes Messsystem, das neben Kameras auch einen Laserscanner nutzt und auf einer UAV-Plattform (Unmanned Aerial Vehicle) installiert ist, liefert neben Kameradaten direkt eine georeferenzierte 3D-Punktwolke. Das zwei Kilogramm leichte augensichere Messsystem erfasst ein Areal von mehreren hundert Quadratmetern in weniger als zehn Minuten. Quer zur Flugrichtung erzeugt der Laserscanner bis zu 60 Messprofile pro Sekunde mit jeweils 1.000 Messpunkten. Die Präzision einer Einzelpunktmessung liegt dabei bei rund 1 cm.

Die 3D-Daten des Scanners bieten zwei wesentliche Vorteile: Im Unterschied zu Kamerabildern durchdringen die Messstrahlen Vegetation, sodass auch Bodenpunkte unter Bäumen oder Sträuchern erfasst werden. Zudem entfallen störende Schatteneffekte, wie sie bei reinen Kamerasystemen unvermeidlich sind. Gleichzeitig bilden die vom Scanner erzeugten 3D-Punktwolken, ergänzt durch RGB-Information aus Bildern, die beste Grundlage für eine automatisierte Auswertung der Messdaten. Bis dato gleicht die Auswertung der Messbilder einem Prozess, wie man ihn vom »Malen nach Zahlen« kennt: Die 3D-Punktwolke wird ausgewertet, indem Objekte manuell extrahiert werden.

TRAININGSDATENSATZ FÜR KÜNSTLICHE NEURONALE NETZE (KNN): Zur Erstellung eines Trainingsdatensatzes werden tausende Datensätze, die prototypische Elemente eines Baustellenszenarios enthalten, manuell annotiert: Alle Randbereiche eines relevanten Objekts, z. B. einer Laterne oder eines Baumes, werden pixelgenau markiert. So entstehen prototypische Polygonflächen, die vordefinierten Objektklassen zugeordnet werden. Diese annotierten Flächen dienen als Eingabemuster für das KNN und erzeugen später durch Wiedererkennen von Geometrie, Farbe und anderer beschreibender Parameter das jeweils zugehörige Ausgabemuster, also eine bestimmte Objektklasse. Für das Annotieren der Daten hat Fraunhofer IPM ein Softwaretool entwickelt, das diesen Prozess effizient gestaltet.

Diesen Prozess der Dateninterpretation sollen in Zukunft speziell designte lernfähige Algorithmen übernehmen, die nach dem Konzept des »Deep Learning« auf Basis künstlicher neuronaler Netze (KNN) arbeiten. In seinem Ursprungszustand gleicht ein solches KNN einem bloßen Gerüst aus künstlichen neuronalen Verbindungen. Auf die spätere Klassifizierungsaufgabe wird das KNN mit einem speziell generierten Trainingsdatensatz vorbereitet, denn nur bekannte Objekte können zuverlässig identifiziert werden.

Klassifiziertes 3D-Modell des Baustellengeländes

Voraussetzung für die automatisierte Datenauswertung ist neben dem Training des KNN die sinnvolle Aufbereitung der Eingabedaten. Geschickt fusionierte Kamera- und Scannerdaten bilden eine ideale Datenbasis. Die Kameradaten schließen mögliche Lücken in der 3D-Punktwolke und liefern zusätzliche Farbinformationen. Anhand der Tiefeninformationen aus der 3D-Punktwolke wiederum lassen sich zum Beispiel überlappende Objekte besser unterscheiden, als dies allein anhand von Kameradaten möglich wäre. Ein von Fraunhofer IPM entwickeltes Framework projiziert die Scannerdaten zuverlässig und genau in die Bilder der Farbkameras. So wird jedem RGB-Bild der Szene ein entsprechender Tiefenkanal zugeordnet. Mit so aufbereiteten RGB-D(epth)-Daten und einem trainierten Netz erweist sich

die Datenauswertung als sehr robust gegenüber Objektvariationen, Aufnahmewinkel und Lichtverhältnissen. Und das ist entscheidend: Denn keine Baustelle gleicht der anderen und keine Messung findet bei kontrollierten Umgebungsbedingungen statt. Der Projektpartner Strabag erhält ein ausführbares Programmpaket, das klassifizierte Datensätze im Industrieformat LAS erzeugt, die sich nach Bedarf mit anderen Daten – z. B. BIM- oder CAD-Daten – verknüpfen lassen. So entsteht eine digitale Datengrundlage für das effiziente Management großer Bauvorhaben.



Bereit zum Abflug: Ein STRABAG-Mitarbeiter bereitet den Start der Drohne vor. Die aufgenommenen Daten werden später automatisch ausgewertet.



< Ein neuartiges Messsystem wird Geometrie, Oberflächenstruktur und Bewuchs in Tunnelbauwerken zukünftig in einem Messdurchgang vermessen.

GRUPPE LASER SCANNING

Tunnelblick: Sensor erfasst Zustand von Tunnelbauwerken

Ein laserbasierter multispektraler Sensor wird zukünftig Geometrie, Oberflächenstruktur, Feuchte und Bewuchs in Tunnelbauwerken gleichzeitig erfassen. Das System wird alle relevanten Parameter im Zuge einer einzigen Messfahrt bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h ermitteln. Inspektion und Instandhaltung von Tunneln lassen sich so wesentlich effizienter und kostengünstiger durchführen.

Gerade in Mitteleuropa sind Tunnel kritische Transitverbindungen, sowohl für den Personen- als auch den Warenverkehr. Aber auch im Abwassersystem oder als Zugangsschächte im Bergbau kommt ihnen eine wichtige Bedeutung zu. Allein in Deutschland müssen über vierhundert Straßen-, Eisenbahn- und U-Bahn-Tunnel regelmäßig überprüft werden – einige davon sind viele Jahrzehnte alt. Hinzu kommen rund 250.000 Kilometer tunnelähnliche Bauwerke im Kanalnetz. Die Kosten für Wartung und Instandsetzung der Tunnel reichen allein in Deutschland Jahr für Jahr an die Milliarden-Euro-Grenze. Fraunhofer IPM entwickelt im Rahmen des Fraunhofer-internen Projekts IncaS (IntracavityScan) einen multispektralen Sensor, der die Kosten für Tunnelinspektionen deutlich senken wird – bei gleichzeitig verbesserter Qualität der Messdaten.

Mehrwellenlängen-Messung

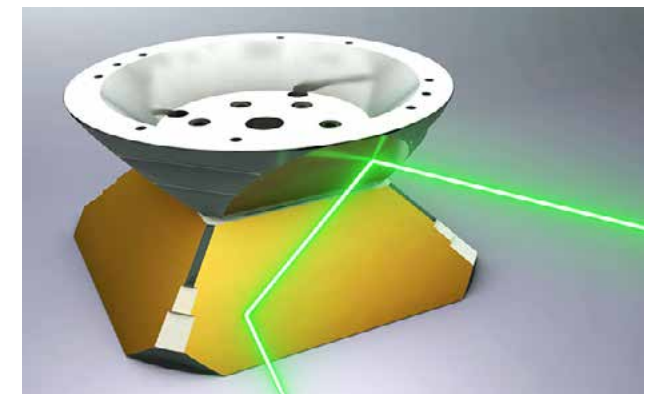
Die Wissenschaftler nutzen ein neuartiges Laserscanner-Design für eine Messung mit mehreren Wellenlängen, deren Messdaten miteinander kombiniert werden. So werden 3D-Geometrie, Oberflächenstruktur, Feuchte und Bewuchs im Tunnel lückenlos und schnell in einem Messvorgang erfasst. Das Messsystem arbeitet bei hohen

Fahrgeschwindigkeiten, sodass eine Sperrung während der Zustandserfassung nicht länger nötig sein wird. Die Bauwerksgeometrie wird über die Laufzeit des rückgestreuten Lichts eines Lasers vermessen. Bis zu zwei Millionen Messpunkte pro Sekunde sorgen dabei für eine hohe Auflösung. Zur Messung der Oberflächenfeuchtigkeit kommen zwei Laser unterschiedlicher Wellenlänge (1,3 bzw. 1,45 μm) zum Einsatz, deren Licht unterschiedlich stark, aber sehr spezifisch von Wasser absorbiert werden. Der Feuchtwert ergibt sich aus der Intensitätsanalyse der beiden Signale. Aus den Geometrie- und Feuchtedaten lassen sich Informationen über Vegetation, etwa Moos- oder Algenbewuchs ableiten. Oberflächen-Strukturmerkmale werden anhand der Intensität des rückgestreuten Lichts detektiert. Dazu bedarf es einer hohen räumlichen Auflösung, um ein fotorealistisches Abbild der zum Teil nur wenige Millimeter breiten Risse in der Oberflächenstruktur zu erzeugen. Der Laser leuchtet dazu das Objekt parallel zur Fahrtrichtung linienförmig aus. Eine speziell angepasste Empfangsoptik bildet die Signale flächenhaft ab und erzeugt somit ein durchgängiges Grauwertbild der Oberfläche. Mit dieser von Fraunhofer IPM patentierten Technik wird eine Auflösung von 1,5 mm x 1,5 mm bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 80 km/h erreicht.

TUNNELINSPEKTION – STAND DER TECHNIK: Geometrie, Oberflächenstruktur der Bauwerkswände, Bewuchs und Wandfeuchte in Tunneln werden turnusgemäß alle fünf Jahre inspiziert. Zur Messung der Geometrie werden heute vorwiegend statische Laserscanner eingesetzt, die an zahlreichen Stellen im Tunnel positioniert werden. Einige wenige Systeme messen von mobilen Plattformen aus, zumeist auf handgeschobenen Messwagen. Risse und Feuchte werden mithilfe von Kameras, Hohlstellen mithilfe eines speziellen Hammers erfasst. Alle bestehenden Verfahren sind zeit- und personalintensiv und erfordern eine Vollsperrung des Bauwerks – mit weitreichenden wirtschaftlichen Folgen.

Innovatives Scanner-Design für echte 360°-Abtastung und Mehrwellenlängen-Messung

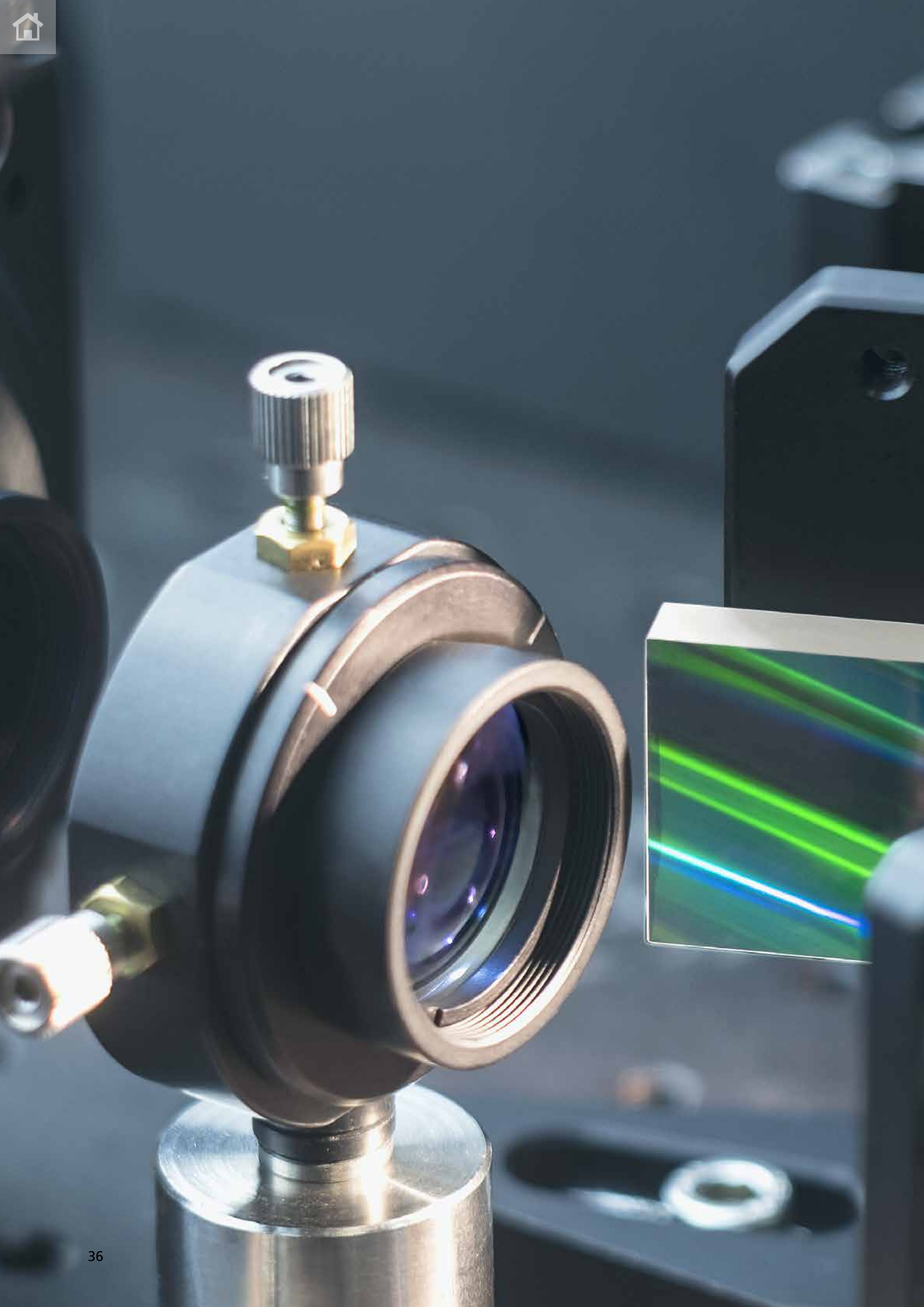
Eine speziell entwickelte Scanvorrichtung in Form eines Doppelpyramidenstumpfs ermöglicht es erstmals, Laserstrahlen mehrerer Wellenlängen zeitlich synchron und in ihrer Abbildung verzerrungsfrei einzusetzen (s. Skizze). Dies ist bei bisher verfügbaren Laserscannern nicht möglich, da die Lichtwege nicht klar getrennt werden können. Erstmals wird auch eine echte 360°-Abtastung möglich sein. Bisher sorgten mechanische Befestigungen für Abschattungen und machten Mehrfachmessungen erforderlich. Für ein durchgängiges 3D-Modell müssen dabei die Daten mehrerer Messungen fusioniert werden – ein fehleranfälliger Prozess, der mit dem neuen System entfällt. Der Doppelpyramidenstumpf hat vier Facetten, die jeweils einen Winkelbereich von etwas weniger als 180° abdecken, um Artefakte in den Kantenbereichen zu vermeiden. Aufgrund dieser speziellen Geometrie verdoppelt sich die Scangeschwindigkeit im Verhältnis zur Rotationsgeschwindigkeit, sodass bisher unerreichte Scanfrequenzen möglich sind. Bis zu vier identische Lasersysteme sowie entsprechende Detektionseinheiten können sternförmig um die Ablenkeinheit angeordnet werden und so die volle Winkelabdeckung gewährleisten. Das Design gewährleistet eine zeitlich und räumlich perfekt korrelierte Datenaufnahme und ermöglicht die Nutzung speziell geformter Laserstrahlen. Für eine



Für Messungen mit mehreren Wellenlängen und die geforderte 360°-Abtastung wurde eine speziell geformte Ablenkeinheit konzipiert. Zusätzlich gewährleistet sie eine verzerrungsfreie Projektion der insgesamt acht Laserlinien an der Tunnelwand. Hier wird beispielhaft ein Strahl gezeigt.

flächige Abtastung und aus Gründen der Augensicherheit wird der Strahl linienförmig aufgeweitet.

Das System wird das erste Messsystem für die Hohlrauminspektion sein, das sämtliche relevanten Parameter gleichzeitig, schnell und hochaufgelöst misst. Es ermöglicht durch eine perfekte Datensynchronisierung den Vergleich mit vorherigen Messungen, sodass auch geringe Veränderungen am Bauwerk rechtzeitig erkannt werden.



»Smarte Sensoren werden Einzug in unseren Alltag halten.«

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

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

Gruppe Integrierte Sensorsysteme

- ▶ gassensitive Materialien
- ▶ mikrooptische Komponenten
- ▶ miniaturisierte Gassensorsysteme

Gruppe Spektroskopie und Prozessanalytik

- ▶ spektroskopische Analytik
- ▶ optische Systeme
- ▶ nichtlineare Optik

Gruppe Thermische Messtechnik und Systeme

- ▶ maßgeschneiderte Mikrostrukturen
- ▶ thermische Messsysteme
- ▶ Simulation physikalischer Prozesse

< Gitter-Spektrometer weisen Licht aus dem mittleren Infrarot über nichtlinear-optische Prozesse mit Siliziumdetektoren nach – schnell und effizient.



KONTAKT

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



GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe ist die Entwicklung funktionaler, gas-sensitiver Materialien und Oberflächen sowie miniaturisierter Gassensorsysteme. Dazu werden Sensortechnologie und Elektronik in kompakten und kostengünstigen Mikrosystemen kombiniert.

KOMPETENZEN

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

ANWENDUNGEN

effiziente Lüftungstechnik durch den selektiven Nachweis von Gasen wie CO_2 | frühzeitige Detektion toxischer Gase wie CO , NO_2 und NH_3 | Qualitätskontrolle von Lebensmitteln im Lager oder auf dem Transportweg

>> In unseren Gaslaboren testen wir Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit von Gassensoren. Dabei können bis zu acht Prüfgase gleichzeitig beaufschlagt werden.

SPEZIFIKATIONEN

GASSENSITIVE MATERIALIEN

- Materialsynthese und -verarbeitung, Schichtdicken von wenigen nm bis mehreren μm , Beschichtung auf mikrostrukturierten Substraten (MEMS)
- Halbleiter-Gassensoren: Metalloxidschichten wie SnO_2 , WO_3 oder $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_{3+z}$ mit katalytischen Zusätzen
- kolorimetrische Gassensoren: u. a. Farbumschlagsmaterialien für CO , NO_2 und NH_3

MIKROOPTISCHE KOMPONENTEN

- Infrarot-Strahler für einen Wellenlängenbereich von 5 bis 12 μm , z. B. modulierbar
- Infrarot-Detektoren für einen Wellenlängenbereich von 3 bis 5 μm , z. B. aus PbSe
- diffraktive Optiken, z. B. Fresnel-Linsen aus Silizium oder Komponenten für IR-Emitter

MINIATURISIERTE GASSENSORSYSTEME

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





< Die Verluste während der Lagerung von Frischobst sind hoch. Ein Messsystem überwacht die Konzentration von Reifegasen und schafft so die Voraussetzung für eine optimierte Lagerung.

GRUPPE INTEGRIERTE SENSORSYSTEME

Sensor überwacht Reifeprozesse in Obstlagern

Mehr als hundert Komponenten bestimmen das Aroma von Früchten. Beim Verzehr ist dieses Aroma ein wichtiges Qualitätskriterium. Für die Lebensmittelindustrie liefert der Duftcocktail wertvolle Informationen, zum Beispiel über das Reifestadium von Früchten. Fraunhofer IPM entwickelt gemeinsam mit Industriepartnern ein miniaturisiertes Messsystem für die Detektion von Obst-Reifegasen, das unter anderem in Fruchtlagern zum Einsatz kommen soll.

In Deutschland verderben laut einer Studie des WWF über zehn Prozent der Obsternte während des Transports oder der Lagerung. Klimaaoptimierte Lagerbedingungen können diese Nachernteverluste deutlich verringern und so den materiellen und finanziellen Schaden minimieren. Voraussetzung dafür ist es, die Gaszusammensetzung in den Lagerräumen genau zu kennen: Erhöhte Konzentrationen bestimmter Gase beispielsweise weisen auf eine vorzeitige Fruchtreifung hin, die den Verderb der Ware zur Folge haben kann. Auch Bakterien- oder Pilzbefall lässt sich in vielen Fällen aus den Gaskonzentrationen ablesen.

Die Entwicklung von Sensorik, die relevante Gase in Fruchtlagern kontinuierlich misst, ist das Ziel des Eurostars-Projekts »FreshFruitLab«. Geeignete Messtechnik ist notwendig, um Reifeprozesse und Produktionsschritte gezielt zu steuern, etwa durch Zuführen von Reifegasen oder durch gezielten Luftaustausch. Gemeinsam mit der Scemtec Transponder Technology GmbH und der niederländischen Environmental Monitoring Systems EMS B.V. entwickelt Fraunhofer IPM ein miniaturisiertes Gassensorsystem für das Monitoring von Obst-Reifeprozessen. Im Projekt stehen zunächst charakteristische Reifegase von Äpfeln, Birnen und Kiwis im Vor-

dergrund. Das Messsystem ist grundsätzlich für eine große Bandbreite an lebensmittelrelevanten Gasen ausgelegt und kann zukünftig auf breiter Basis zur Qualitätssicherung in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden.

Gaschromatographie plus Halbleiter-Gassensoren

Die Wissenschaftler setzen für die empfindliche Fruchtreifeüberwachung auf eine Kombination aus Gaschromatographie (GC) und Halbleiter-Gassensoren (HL) als Detektoren. Um die Vielzahl der auftretenden Gase zu erfassen, werden kommerzielle chromatographische Trennsäulen mit sehr hohen Trennleistungen verwendet. Siliziumbasierte, mikromechanisch hergestellte GC-Systeme sind heute kommerziell erhältlich. Als Detektoren werden in der Regel Wärmeleitfähigkeits- oder Surface-Acoustic-Wave-Sensoren verwendet. Für den FreshFruitLab-Sensor setzt Fraunhofer IPM auf HL-Gassensoren als Detektoren, um so die Nachweisempfindlichkeit vom ppm- bis in den ppb-Bereich zu steigern. HL-Gassensoren reagieren auf fast alle reduzierenden und oxidierenden Gase und ermöglichen somit nicht nur die Detektion von Spurengasen, sondern auch die Analyse komplexer Aromen.

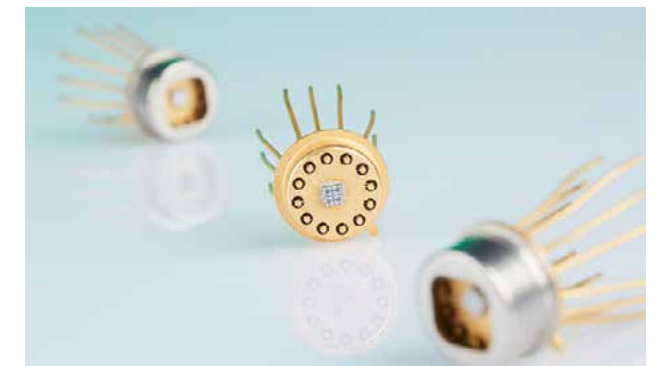
GASCHROMATOGRAPHIE (GC): Die menschliche Nase ist ein sehr empfindlicher Sensor für flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC). Die Humansensorik wird daher auch heute noch gerne genutzt, um die Bestandteile in einem Gemisch flüchtiger Gase zu identifizieren. Als analytisches Verfahren für die Charakterisierung von VOC hat sich die GC etabliert. Bei diesem aufwändigen Verfahren werden Proben verdampft und anschließend in einer Trennsäule in ihre Einzelkomponenten zerlegt. Seit Anfang der 1980er Jahre werden kompakte und preiswerte GC-Systeme mit mikrosystemtechnischen Verfahren hergestellt.

Indikator für die Fruchtreife sind flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC). Beim Reife-Monitoring von Äpfeln, Birnen und Kiwis spielen vor allem kurzkettige Kohlenwasserstoffe von C2 bis C4 eine Rolle. Zusätzlich sind Komponenten wie Formaldehyd, Methylmercaptan, Trimethylamin sowie Schwefelverbindungen für die Lebensmittelüberwachung interessant. Als geeignete gassensitive Metalloxide für die empfindliche Detektion dieser VOC wurden Zinnoxid mit Platin- bzw. Palladiumbeimischung, Lanthan-Indium-Oxid, Wolframoxid und Chrom-Titan-Oxid identifiziert. Das Sensorlayout sieht vier HL-Gassensoren auf Basis dieser Metalloxide vor, sodass eine hohe Bandbreite an relevanten Gasen detektiert werden kann. Zur Selektivitätssteigerung ist jedes Sensorelement separat heizbar und auf einer separaten Sensorplattform platziert. Die gassensitiven Flächen sind $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ groß. Das Sensorarray hat eine Gesamtfläche von $1,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$.

»Low power« – hohe Sensitivität

Für einen »low power« Sensor werden die HL-Gassensoren auf mikrostrukturierten Silizium-Substraten (sog. Micro-Hotplates) in Form speziell entwickelter, druckfähiger Metalloxid-Tinten abgeschieden. Ein photolithographischer Prozess entfällt. Die besonders porösen gedruckten Schichten sorgen für ein günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und damit für eine höhere Empfindlichkeit. Der

Sensor benötigt 15 Milliwatt für eine Betriebstemperatur von 400°C , sodass ein Batteriebetrieb grundsätzlich möglich ist. So entsteht ein kostengünstiges, kompaktes und robustes Gerät, das für spezifische Messaufgaben konfiguriert und als tragbare oder stationäre Einheit in Obstlagern eingesetzt werden kann. Die Sensitivität des Systems ist vergleichbar mit der Genauigkeit komplexer Labor-Gaschromatographen, die bisher vereinzelt zur Überwachung von Obstreifeprozessen getestet wurden. Was Genauigkeit und Objektivität betrifft, wird der Sensor die menschliche Nase in jedem Fall übertreffen.



Der Halbleiter-Gassensor detektiert flüchtige organische Verbindungen bis in den ppb-Bereich. Die vier gassensitiven Flächen (je $45 \times 45 \mu\text{m}^2$) sind auf $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ großen Micro-Hotplates aufgebracht.



GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

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

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

KOMPETENZEN

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

ANWENDUNGEN

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

>> Mithilfe von Multi-Reflexions-Messzellen lassen sich Gase sehr empfindlich spektroskopisch messen.

SPEZIFIKATIONEN

SPEKTROSKOPISCHE ANALYTIK

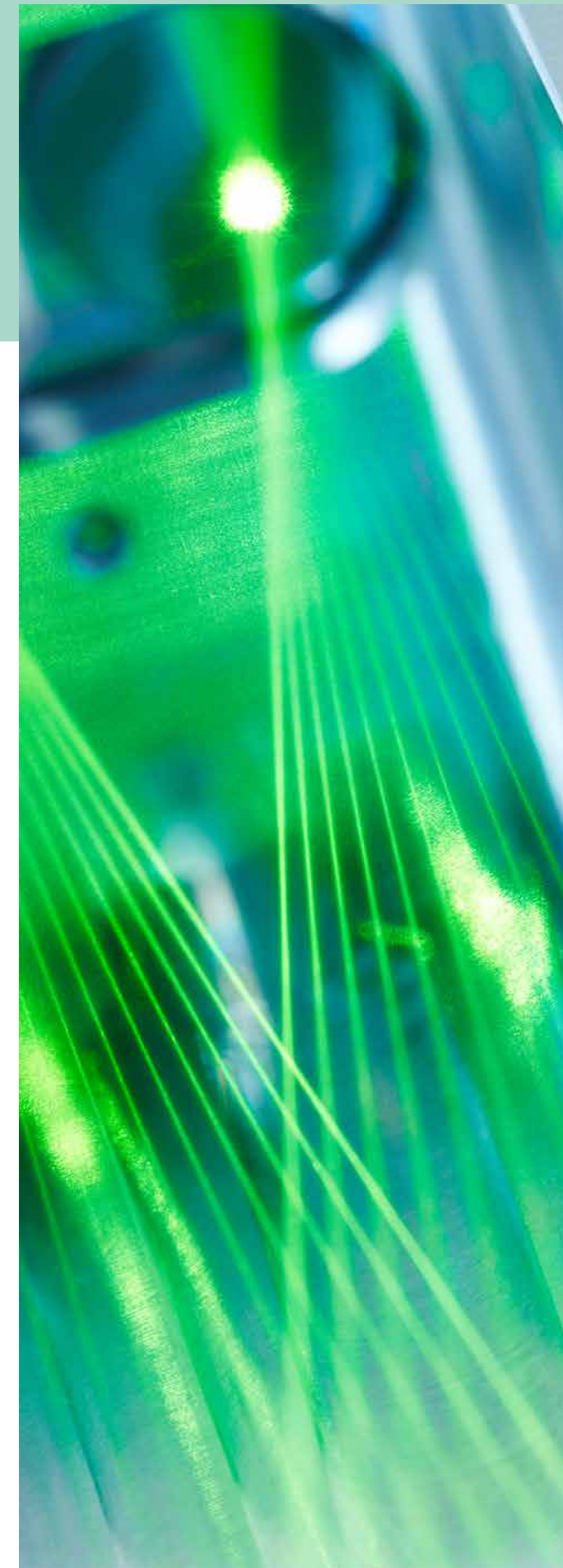
- ▶ optische Spurengasanalysatoren auf Basis von Quantenkaskadenlasern (QCL): Empfindlichkeit 10 ppb bei N_2O oder NH_3 und 10 ppm bei O_2
- ▶ Raman-Spektroskopie: Analyse von Flüssigkeiten, biologischen Zellen oder Gasen
- ▶ ATR-Spektroskopie: Gaskonzentrationen in Flüssigkeiten bis in den ppm-Bereich messen
- ▶ Laser-Absorptionsspektroskopie: Restabsorptionen in Materialien bis 1 ppm bestimmen
- ▶ chemometrische Methoden zur Analyse von Messdaten

OPTISCHE SYSTEME

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

NICHTLINEARE OPTIK

- ▶ optisch-parametrische Oszillatoren: von 450 nm bis 5 μm durchstimmbar, 10 mW bis 2 W Ausgangsleistung (wellenlängenabhängig), 1 MHz Linienbreite
- ▶ Frequenzverdopplung: über 50 % Konversionseffizienz
- ▶ MIR-NIR-Konversion: Aufnahme von MIR-Prozessdaten mit mehr als 5.000 Spektren pro Sekunde





< Faraday-Isolatoren aus innovativen Materialien spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Hochleistungslasern. Mit neuen Verfahren lassen sich die Absorptionseigenschaften der Materialien sehr genau charakterisieren.

GRUPPE SPEKTROSKOPIE UND PROZESSANALYTIK

Neuartige Faraday-Isolatoren für bessere Laserquellen

Bei modernen Lasersystemen spielen maßgeschneiderte Faraday-Isolatoren eine immer wichtigere Rolle. Faraday-Isolatoren sind optische Komponenten, die wie eine optische Diode wirken: Sie lassen Licht nur in eine Richtung hindurch. Der Laser wird so vor schädlichen optischen Rückkopplungen geschützt. Ein am Fraunhofer IPM weiterentwickeltes Messverfahren unterstützt die Materialentwicklung und Qualitätsprüfung von Faraday-Isolatoren.

Faraday-Isolatoren gehören zu den Schlüsselbausteinen vieler moderner Lasersysteme, bei denen Rückreflexe einen negativen Einfluss auf den Laserbetrieb haben können. Das gilt z. B. für leistungsstarke Ultrakurzpuls-Scheibenlaser und Faserlaser genauso wie für miniaturisierte Diodenlaser-Oszillator-Verstärker-Systeme für quantensorische Anwendungen. Alle diese Lasersysteme erfahren gegenwärtig eine rasche Entwicklung. Das aktuell dominierende Faraday-Isolator-Material – insbesondere im Bereich der 1- μm -Hochleistungslaser – ist Terbium-Gallium-Granat ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$). Das Problem dabei: Schon mit den Leistungsparametern aktueller Lasersysteme stößt dieses Material an seine Grenzen.

Neue Materialien für neue Leistungsbereiche

Faraday-Isolatoren aus innovativen Materialien wie z. B. Kalium-Terbium-Fluorid ($\text{KTb}_3\text{F}_{10}$) könnten in Zukunft die Entwicklung von Hochleistungslasern und kompakten Diodenlasersystemen mit ganz neuen Qualitäten erlauben. Derartige Materialien werden im BMBF-Projekt IsoNova entwickelt und untersucht. Projektpartner sind – neben Fraunhofer IPM – das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung im Forschungsverbund Berlin e.V., das Forschungsinstitut für

mineralische und metallische Werkstoffe, Edelsteine/Edelmetalle (FEE) in Idar-Oberstein, die Trumpf Laser GmbH in Schramberg und die TOPTICA Photonics AG in Gräfelfing. Das Konsortium deckt die gesamte Wertschöpfungskette ab – von der Entwicklung der Kristallzucht bis hin zur Evaluierung kompletter Faraday-Isolatoren im Laser-Dauertest.

Durch die Wahl geeigneter Materialien und durch die Züchtung qualitativ hochwertiger Kristalle für Isolatoren sollen die limitierenden Effekte für den Betrieb soweit reduziert werden, dass bei wesentlichen Einsatz-Kenngrößen wie Leistungsfestigkeit oder Bauvolumen eine Verbesserung um eine Größenordnung erreicht wird.

Bei Hochleistungslasern wie den Ultrakurzpuls-Scheibenlasern verhindern vor allem thermische Effekte den Schritt in die nächste Leistungsstufe. Die Absorption selbst eines sehr kleinen Teils der Laserleistung im Rotatormaterial führt zu Temperaturerhöhungen und Temperaturgradienten im Bauteil. In deren Folge bildet sich eine thermische Linse aus, die Strahlqualität verschlechtert sich und die Isolationswirkung des Faraday-Isolators nimmt ab. Da die Effekte mit der Laserleistung skalieren, kann nicht mehr der gesamte

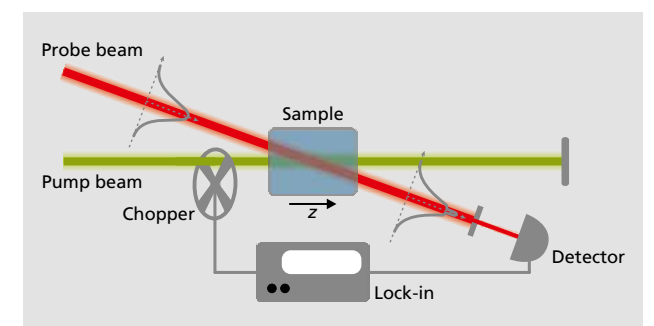
FARADAY-ISOLATOREN sind optische Bauelemente, die die Lichttransmission nur in eine Richtung erlauben. Die Lichtausbreitung in die Gegenrichtung wird blockiert. Diese Diodencharakteristik erhält man durch einen Faraday-Rotator, der sich zwischen zwei um 45° gedrehten Polarisatoren befindet. Die richtungsabhängige Transmission entsteht durch die Drehung der Polarisationssebene der Lichtwelle im Rotator in Verbindung mit zwei gekreuzten Polarisatoren. Erreicht wird dies durch die Anordnung des Rotatormaterials in einem axialen magnetischen Feld (Faraday-Effekt).

Leistungsbereich mit gleichbleibenden Strahlparametern abgedeckt werden: Der Faraday-Isolator wird so zum Flaschenhals bei der Entwicklung und dem Einsatz neuer Lasersysteme. Eine ähnliche Relevanz hat der Isolator bei der notwendigen Miniaturisierung von Lasersystemen für quantenoptische Anwendungen. Diese scheitert heute an der Baugröße der optischen Isolatoren. Durch die Entwicklung neuartiger Kristalle wie beispielsweise Cadmium-Mangan-Tellurid (CdMnTe) können die optischen Isolatoren und damit die Lasersysteme insbesondere für den sichtbaren Spektralbereich deutlich kleiner und damit robuster, tragbar sowie preisgünstiger werden.

Absorptionsspektroskopie an Faraday-Isolatoren

Die Aufgabe von Fraunhofer IPM im Projektkonsortium besteht nun darin, die neuen Materialien hinsichtlich ihrer Absorptionseigenschaften zu charakterisieren. Schlüssel dazu ist ein am Fraunhofer IPM weiterentwickeltes Messverfahren: die Photothermal Common-Path Interferometry (PCI). Diese Methode wird im Projekt an die speziellen Anforderungen der zu untersuchenden Materialien angepasst. Sie eignet sich zur Bestimmung von Restabsorptionen in optischen Materialien bis in den ppm-Bereich. Durch die Kombination mit weit abstimmbaren Laserlichtquellen, die am Fraunhofer IPM zur Produktreife gebracht wurden, lassen sich die Absorptionmessungen auch an neuen Materialien referenzprobenfrei skalieren. Zudem können die Messungen durch die Aufnahme von Absorptionsspektren

über die Qualitätskontrolle hinaus wertvolle Informationen für die Technologieentwicklung liefern. Bei der Materialentwicklung nimmt das Absorptionsmessverfahren daher eine analytische Schlüsselrolle ein: Kein zweites Standardverfahren erfüllt alle notwendigen messtechnischen Anforderungen im Hinblick auf die spektrale Abdeckung und die Nachweisgrenze hinsichtlich geringer Absorptionen.



Die Photothermal Common-Path Interferometry (PCI) ist ein empfindliches Absorptionsmessverfahren. PCI nutzt eigentlich unerwünschte thermische Absorptionseffekte in Materialien zur quantitative Bestimmung. Ein starker Pumplaser (grün) durchstrahlt das Material. Ein Teil der Leistung wird absorbiert, führt zu lokaler Erwärmung und damit zu lokaler thermischer Ausdehnung. Der Brechungsindex ändert sich. Dies wird vom Abfragelaser (rot) detektiert. Materialabhängig können absorbierte Leistungen von rund $10 \mu\text{W}$ detektiert werden.



GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

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

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

>> Mikrokolorimeter auf biegsamen Polyimid-Folien messen verschiedene physikalische Parameter wie z.B. Temperatur, thermische und elektrische Leitfähigkeit oder Wärmekapazität von Materialien.

KOMPETENZEN

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

ANWENDUNGEN

kostengünstige Fluidsensorik auf Polymersubstraten, z. B. zur Überwachung der Ölqualität | Modellierung und Validierung von Energiespeichern für geothermische Anwendungen

SPEZIFIKATIONEN

MASSGESCHNEIDERTE MIKROSTRUKTUREN

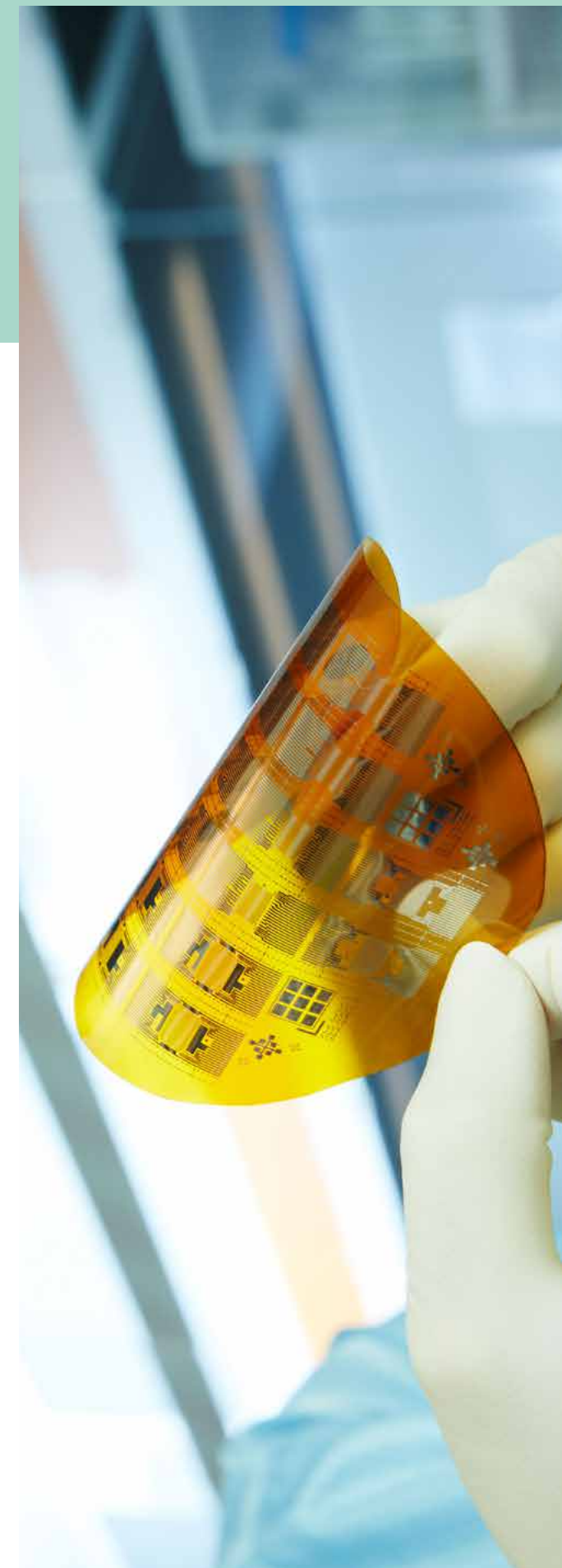
- ▶ Mikrostrukturen für organische Elektronik, Heizer und Mikrofluidik mit Strukturgrößen von typischerweise 1 µm
- ▶ Thermopile-Sensoren, kalorimetrische Sensoren
- ▶ thermische Sensoren zur Bestimmung von Materialparametern, insbesondere Wärmeleitfähigkeit
- ▶ elektronische Zungen

THERMISCHE MESSSYSTEME

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

SIMULATION PHYSIKALISCHER PROZESSE

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





< Das von Fraunhofer IPM entwickelte Messgerät SRX-vdP misst Seebeck-Koeffizienten und elektrische Leitfähigkeit von Materialien simultan. Die PTB nutzt das System zur Definition von Referenzmaterialien.

GRUPPE THERMISCHE MESSTECHNIK UND SYSTEME

Materialeigenschaften zuverlässig bestimmen

Die Validität und Reproduzierbarkeit von Materialmessungen sind nur so gut wie die Methoden und Geräte, die zur Messung eingesetzt werden. Damit diese Methoden nachvollziehbar und rückführbar sind, entwickelt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Standardmessverfahren und Kalibrierproben. Am Fraunhofer IPM wurde für die PTB nun bereits die zweite Generation eines Teststands zur Charakterisierung von thermoelektrischen Materialien und Halbleitern entwickelt.

Das von Fraunhofer IPM für die PTB entwickelte Messgerät SRX-vdP misst den Seebeck-Koeffizienten und die elektrische Leitfähigkeit von Materialien simultan und mit sehr geringen Messunsicherheiten. Für die neue Generation dieses Messgeräts wurde vor allem die Messung der elektrischen Leitfähigkeit optimiert. Dazu nutzt das System die Vorteile dreier unterschiedlicher Messverfahren. Entstanden ist ein einzigartiges Messgerät, mit dem sich vergleichbare Aussagen über die Materialeigenschaften von Halbleitern treffen lassen.

Messbedingungen und -ablauf flexibel einstellen

In einer gasdichten Messkammer lässt sich die Messatmosphäre exakt einstellen. Angesichts der so definierten Messbedingungen liefert das System reproduzierbare Messwerte, die sich auf international normierte SI-Einheiten und die Internationale Temperaturskala ITS90 rückführen lassen. Mithilfe des Systems definiert die PTB Referenzmaterialproben, die für die Kalibrierung kommerzieller Messgeräte verschiedener Hersteller genutzt werden können. Neben Bulk-Materialien können mithilfe des SRX-vdP auch dünne Schichten gemessen werden, für deren

Charakterisierung zuvor alternative Messaufbauten oder spezielle Adapter notwendig waren. Neben runden Proben ab 10 mm Durchmesser können auch quadratische Proben ab einer Kantenlänge von 10 mm gemessen werden. Diese Probengeometrien haben einen besonderen Vorteil: Weitere Messungen, etwa die Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit mittels Laserlicht-Flash-Analyse (LFA) oder die Messung der Ladungsträgerkonzentration mittels Hall-Messung, können an derselben Probe durchgeführt werden. Die Messungen können in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 800 °C durchgeführt werden.

Messmethode passend zum Material

Die elektrische Leitfähigkeit wird mittels 4-Punkt-Methode (van-der-Pauw-Messanordnung) anhand von vier Thermo-Elementen an der Probenunterseite bestimmt. Unterhalb der beiden Probenenden sind Mikroheizer angebracht, die Temperaturgradienten in beide Probenrichtungen erzeugen. Die resultierende Spannung wird mittels Thermo-Elementdrähten gemessen und anschließend für die Berechnung des Seebeck-Koeffizienten herangezogen. Darüber hinaus wird die Homogenität des Temperaturgradienten in der Pro-

DIREKTE MESSUNGEN, die sich auf Naturkonstanten zurückführen lassen und Absolutwerte liefern, sind verlässlicher als indirekte Messungen, die mit Referenzwerten arbeiten. Handelsübliche Systeme zur Charakterisierung thermoelektrischer Materialien nutzen relative Messungen zur Bestimmung der Materialgüte. Diverse Referenzmaterialien werden dazu mittels validierter Messaufbauten vermessen und als Kalibrierstandard festgelegt. Jeder kann diese Proben erwerben und so seine eigene Messtechnik validieren. Solange dies mit großer Sorgfalt geschieht, ist es möglich, mit verschiedensten Messeinrichtungen reproduzierbar dieselben Ergebnisse zu messen. Eine Vielzahl verschiedener Kalibrierproben ist dazu erforderlich – je nach Geometrie und Materialeigenschaften.

be über die beiden zusätzlichen Thermo-Elemente überprüft. Dies dient ebenfalls zur Ermittlung potentieller Fehlmessungen. Bei jedem Temperaturschritt wird die elektrische Leitfähigkeit auf bis zu drei unterschiedliche Arten bestimmt. Jede der drei Messmethoden weist abhängig vom Material bestimmte Vor- und Nachteile auf. Die Kombination der drei Methoden führt insgesamt zu einer höheren Qualität der Messungen. Beim sogenannten Delta-Mode-Verfahren werden verschiedene Ströme über die beiden Stromkontakte mehrfach kurz auf die Probe aufgebracht. Dies geschieht in beide Probenrichtungen. Die entsprechenden Spannungen an der Probe werden gemessen; daraus wird der Widerstand der Probe ermittelt. Beim Sweep-Verfahren wird eine Wechselspannung an die Probe angelegt und der fließende Strom gemessen. Aus der so gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinie wird der Widerstand ermittelt. Das dritte, sogenannte AC-Messverfahren nutzt eine hochpräzise AC-Widerstandsmessbrücke, die den Probenwiderstand mittels Lock-in-Technik auch bei sehr kleinen Strömen exakt bestimmen kann. Dadurch ergibt sich eine große Anzahl an Messpunkten, sodass eine Qualitätsprüfung vor und während der Messung aller Temperaturstufen möglich ist. Durch die feste Position der Thermo-Elemente entfällt die für gewöhnlich notwendige umständliche Abstandsmessung. Der Ausschluss dieser Fehlerquelle bei der Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit führt zu einer deutlichen Erhöhung von Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der

Messergebnisse. Die einzelnen Messintervalle und -wiederholungen sowie die Auswahl des passenden Messverfahrens lassen sich flexibel programmieren. Die Vorteile des Systems weiß auch die Industrie zu schätzen: gleichzeitige Messung von Seebeck-Effekt und elektrischer Leitfähigkeit, Flexibilität in Bezug auf Messbedingungen und Auswahl der passenden Messmethode für das jeweilige Material. Einige der im PTB-System genutzten Verfahren sind bereits in den Laborgeräten eines Industriepartners im täglichen Einsatz und werden zukünftig in die Weiterentwicklung von Labor-messgeräten einfließen.



Das Messsystem SRX-vdP kombiniert verschiedene Messmethoden, die zuvor bereits einzeln in kommerziellen Labormessgeräten zur Materialcharakterisierung eingesetzt wurden.



GESCHÄFTSFELD THERMISCHE ENERGIEWANDLER

»Wir wandeln Energie – innovativ und effizient.«

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

Durch Einsatz dieser Materialien in Wärmepumpen, Kühlsystemen und Generatoren entstehen besonders umweltfreundliche, kostengünstige und langlebige Systeme. Darüber hinaus werden neue Arten von Heatpipes zum effizienten Wärmetransport konzipiert, gebaut und charakterisiert.

Gruppe Kalorik und Thermoelektrik

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

< Elastokalorische Materialien
eignen sich zum Aufbau
effizienter Kühlsysteme.



KONTAKT

Dr. Olaf Schäfer-Welsen
Abteilungsleiter
T +49 761 8857 - 173
olaf.schaefer-welsen@
ipm.fraunhofer.de



GRUPPE KALORIK UND THERMOELEKTRIK

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

Forschungsschwerpunkt der Gruppe sind kalorische und thermoelektrische Materialien zum Aufbau innovativer Systeme zur Kühlung, Temperaturkontrolle und Wärmeverstromung. Ziel ist es, Wärmepumpen, Kühlsysteme und Generatoren durch Einsatz dieser Materialien besonders effizient und umweltfreundlich zu realisieren. Für unsere Arbeit greifen wir auf mehr als 20 Jahre Erfahrung in der Materialsynthese und weitreichendes Know-how zu spezieller Messtechnik, Simulation, Modulbau und Systemintegration zurück.

KOMPETENZEN

Magneto-, elektro- und elastokalorische Systeme zum effizienten Kühlen und Heizen | pulsierende Heatpipes für den effizienten Abtransport thermischer Energie aus Hotspots | kostengünstige Herstellung thermoelektrischer Module

ANWENDUNGEN

Kühlung von Laborgeräten auf Basis kalorischer Systeme | optimiertes, thermisches Management zur Minimierung des Ausfallrisikos elektronischer Bauteile | thermoelektrische Generatoren zur Steigerung der elektrischen Effizienz in Blockheizkraftwerken (BHKW)

>> Heatpipes transportieren
Wärme passiv und äußerst effizient.

SPEZIFIKATIONEN

KÜHLEN UND HEIZEN

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

THERMISCHES MANAGEMENT

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

ABWÄRME VERSTROMEN

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





< Ausgerüstet mit einem thermoelektrischen Generator liefern Kaminöfen in Zukunft neben Wärme auch Strom, der für Regelungstechnik oder Smarthome-Anwendungen genutzt werden kann.

GRUPPE KALORIK UND THERMOELEKTRIK

Nano-BHKW: Strom aus dem Kachelofen

Mithilfe thermoelektrischer Elemente lässt sich die Abwärme von Kamin- und Kachelöfen künftig in Strom wandeln. Damit wird es möglich, diese mit elektrischer Regelungstechnik auszustatten und in ein Smarthome einzubinden. Auch ließen sich durch eine geregelte Verbrennung die Emissionen der Kleinfeuerungsanlagen deutlich reduzieren.

Kamin- oder Kachelöfen könnten künftig mehr liefern als wohlige Wärme: elektrischen Strom. Möglich ist dies dank thermoelektrischer Generatoren (TEG), die Wärme in elektrischen Strom wandeln. TEG sind bisher in einigen Nischenanwendungen am Markt etabliert, aber höchstens für Betriebstemperaturen zwischen 250 und 300 °C geeignet. Mit den am Fraunhofer IPM entwickelten TEG sind Temperaturen von mehr als 500 °C und die direkte Integration im Bereich der Brennkammer möglich. So können Kleinfeuerungsanlagen künftig zu einem kleinen Kraftwerk erweitert werden, das neben Wärme auch Strom erzeugt – ein Nano-BHKW.

Die Hochtemperatur-TEG bestehen aus Halb-Heusler-Legierungen. Die einzelnen thermoelektrischen Module werden zu größeren Baugruppen verknüpft. Diese erreichen eine Flächenleistungsdichte von bis zu 1,5 Watt pro Quadrat-zentimeter. Der Wirkungsgrad liegt bei fünf Prozent. Dadurch wird es möglich, diese TEG in Öfen schon bei einer geringen Leistung von nur vier Kilowatt einzusetzen; also auch dann, wenn nur die Glut glimmt. Besonders groß ist die Stromausbeute in Kachelöfen, die als Heizungsunterstützung an den Heizkreislauf angeschlossen sind. Hier kann der TEG zwischen dem heißen Brennraum und der

kühlen Wasserleitung in der Außenhaut des Kamins installiert werden. Dadurch ergibt sich eine große Temperaturdifferenz, die den Wirkungsgrad erhöht.

Energieautark, smart vernetzt und emissionsarm

Der so erzeugte Strom kann vielfältig genutzt werden: zur Versorgung von elektrischen Kleingeräten, von Mess- und Regeltechnik für die Betriebssteuerung und Verbrennungsoptimierung, aber auch zur Einbindung der Öfen in das Smarthome. Schon geringe Temperaturgefälle reichen hierbei aus, um den dafür notwendigen Energiebedarf von etwa 10 bis 50 Watt zu decken. Ist die Stromproduktion größer, können beispielsweise auch ein Smartphone oder eine LED-Beleuchtung versorgt werden. Überschüssiger Strom kann in einer Batterie zwischengespeichert werden, sodass eine kontinuierliche Stromversorgung gewährleistet ist.

In Gebieten, die keine flächendeckende Stromversorgung haben, wohl aber über Holz verfügen, z. B. in Teilen Kanadas oder Skandinaviens, können so künftig Kleinfeuerungsanlagen mit einer elektrischen Steuerung versehen werden. Auch Pelletheizungen könnten stromunabhängig selbstständig den Pelletnachschub regeln oder ihre Heiz-

HEUSLERSCHE LEGIERUNGEN sind nach dem deutschen Chemiker und Ingenieur Friedrich Heusler benannt, der im Jahr 1903 zum ersten Mal den Effekt beschrieb, dass eine Mischung aus den drei nichtmagnetischen Metallen Kupfer, Mangan und Aluminium eine Legierung ergibt, die ferromagnetische Eigenschaften besitzt. Halb-Heusler-Verbindungen sind davon abgeleitete Legierungen, die zwar nicht ferromagnetisch sind, aber halbleitende Eigenschaften haben. Dass solche Halb-Heusler-Legierungen robust genug für Hochtemperaturanwendungen sind, haben die Arbeiten am Fraunhofer IPM gezeigt.

leistung über Raumthermostate steuern. Im intelligent vernetzten Smarthome lassen sich zukünftig neben Licht-, Heizungs- und Lüftungstechnik auch Kachelöfen einbinden, die bisher völlig unregelt Wärme erzeugen. Ausgestattet mit einem TEG und einem kleinen Regelmodul könnte die Feuerungsstätte künftig bei sinkender Raumtemperatur den optimalen Zeitpunkt zum Holznachlegen signalisieren oder die Heizungsanlage herunterfahren, sobald die Temperatur einen definierten Wert überschreitet.

Die Ausstattung von Kleinfeuerungsanlagen mit TEG-Technik kann künftig auch dazu beitragen, Emissionen zu reduzieren. Der erzeugte Strom kann dazu genutzt werden, den Verbrennungsprozess mithilfe von Mess- und Steuerungstechnik zu optimieren. Das Regelmodul umfasst die notwendige Sensorik (u. a. Temperaturfühler, Lambda-sonde) und Aktoren. Es ist über eine einfache Sensorik in der Lage, verschiedene Betriebszustände zu erkennen und basierend darauf über ein Gebläse oder einen automatisierten Schieber die Luftführung der Anlage an den Bedarf anzupassen.

Vielversprechende Tests: TEG im Mikro-BHKW

Zuletzt wurde der Betrieb eines TEGs in einem kleinen Blockheizkraftwerk in Braunschweig getestet. Der Pilotversuch mit kommerziellen TEG auf Basis von Wismut-Tellurid verlief vielversprechend. Die Module erwiesen sich als stabil



Ein thermoelektrischer Hochtemperatur-Generator, eingebaut in eine Kleinfeuerungsanlage, kann den notwendigen Strom bereitstellen, um kleine Regelmodule zu betreiben, die z. B. den optimalen Zeitpunkt zum Holznachlegen signalisieren oder die Luftzufuhr optimieren.

und lieferten bis zu 500 Watt elektrische Energie – genug, um ein ganzes Gebäude mit Strom zu versorgen. Ein weiterer Versuch mit Halb-Heusler-Modulen in einem BHKW in der Region ist geplant; hier sollen die Module Abwärme bei Temperaturen bis um die 500 °C in Strom wandeln. Entsprechend könnten die Module künftig in Feuerungsanlagen für Einfamilienhäuser zum Einsatz kommen und dort aus Wärme Strom erzeugen.



< Speziell strukturierte Kupferplatten eignen sich zur Herstellung pulsierender Heatpipes, wie sie zur Kühlung von Hotspots benötigt werden.

GRUPPE KALORIK UND THERMOELEKTRIK

Effiziente Hotspot-Kühlung

Wenn Elektronikbauteile ausfallen, ist der Grund meist lokale Überhitzung: Über die Hälfte aller Defekte auf Leiterplattebene gehen auf schlechtes thermisches Management zurück. Vor allem in der Leistungselektronik wird eine effiziente Hotspot-Kühlung daher immer wichtiger. Speziell für diese Anwendung entwickelt Fraunhofer IPM eine neuartige Kühltechnologie – hocheffiziente Wärmespreizer auf Basis pulsierender Heatpipes.

Seit Jahrzehnten steigt die Rechenleistung elektronischer Bauteile dem Moore'schen Gesetz folgend exponentiell an. Damit einhergehend wächst auch die thermische Verlustleistung. Im Zuge der immer leistungsfähigeren Mikroelektronik bei gleichzeitig immer stärkerer Miniaturisierung haben bestimmte Komponenten, wie beispielsweise MOSFET-Transistoren, thermische Verluste von bis zu 100 Watt auf einer Fläche von nur einem Quadrat-zentimeter. Hier sind leistungsstarke Entwärmungskonzepte gefordert, die eine immer höhere Kühlleistung auf immer kleinerer Fläche gewährleisten.

Der ideale Wärmespreizer: passiv und leistungsstark

Bisherige passive Lösungen zur Entwärmung – wie z. B. Kupferplatten oder Keramiksubstrate – stoßen zunehmend an ihre Grenzen. Aktive Lösungen mit einer Luft- oder Wasserkühlung bringen dagegen zwar die erforderliche hohe Kühlleistung, sind aber meist zu groß, zu teuer oder zu fehleranfällig. Was fehlt ist eine kostengünstige, kompakte und hocheffiziente Technologie, um Verlustwärme gezielt von sogenannten Hotspots auf der Platine abzuführen. Ein idealer Wärmespreizer sollte punktuell gehäuft anfallende Wärme möglichst gleichmäßig auf eine große

Fläche verteilen und so Temperaturspitzen an kritischen Punkten verhindern.

Wärmespreizer mit integrierten Heatpipes stellen dank ihres niedrigen Wärmewiderstands einen vielversprechenden Technologieansatz dar. Sie werden seit Kurzem als passive Lösung zur Entwärmung von Hotspots auf Leiterplattebene eingesetzt, um Wärme parallel zur Leiterplattebene sehr effizient an einen Kühlkörper abzuführen. Doch für den großtechnischen Einsatz bleibt ein ungelöstes Problem: Die hohle Struktur von Standard-Heatpipes verhindert eine formschlüssige Integration in die Leiterplattenverbünde. Durch den Druck beim Verpressen der Leiterplattenstapel wird die Heatpipe oft deformiert oder sogar zerstört.

Pulsierende Heatpipes

Während bei Standard-Heatpipes der Rückfluss des Fluids zur Wärmequelle entweder durch die Schwerkraft oder über eine Kapillarstruktur erfolgt, besteht eine pulsierende Heatpipe aus vielen, dünnen, mäanderförmigen Windungen, die partiell mit Flüssigkeit befüllt und anschließend evakuiert werden. Solche Wärmespreizer mit integrierter pulsierender Heatpipe zeigen einen bis zu zehnmal geringeren ther-

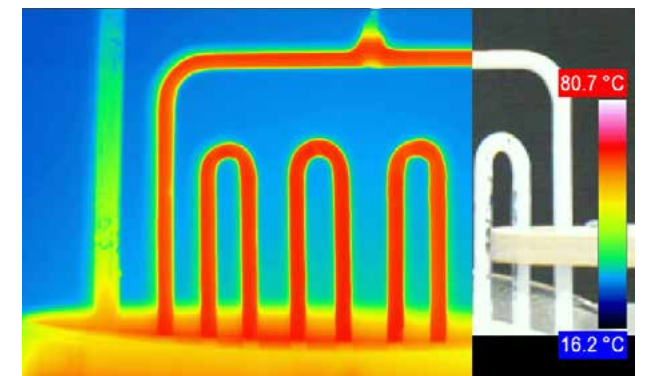
PULSIERENDE HEATPIPES können hohe Wärmeströme sehr effizient abführen. Sie zählen – so wie herkömmliche Kühlrippen auch – zur Klasse der passiven Kühlelemente, sind diesen jedoch in puncto Wärmetransport deutlich überlegen. Der Wärmetransport erfolgt hier über ein zweiphasiges Arbeitsmedium: Durch die Oberflächenspannung bilden sich zusammenhängende Segmente aus Fluid und Dampf. An der Heißeite dehnen sich die Dampfsegmente aus und schrumpfen bzw. kondensieren an der Kaltseite wieder. Dadurch liegen stets lokale Temperatur- und Druckunterschiede vor, die eine ständige, pulsierende Bewegung der Segmente verursachen. Die Bewegung der Segmente ermöglicht einen Fluid- und damit Wärmetransport von der Heiße- zur Kaltseite.

schen Widerstand als herkömmliche, aus Vollmaterial bestehende Wärmetauscher mit den gleichen Maßen – und das sogar bei Verlustleistungen von über 400 Watt. Am Problem der Empfindlichkeit gegenüber hohem Verpressungsdruck arbeitet Fraunhofer IPM gemeinsam mit dem Fraunhofer IZM: Eine neuartige planare Ausführung mit radialem Wärmetransport soll in Zukunft gleichzeitig die Verpressung und die Integration in die Leiterplatte erlauben.

Aktuelle Forschungen am Fraunhofer IPM zielen auf die weitere Optimierung von Design und Fertigung pulsierender Heatpipes, so zum Beispiel die Herstellung der Systeme per 3D-Druck. Dabei spielt auch die messtechnische Charakterisierung der Wärmespreizer eine wichtige Rolle. Hierfür entwickelt Fraunhofer IPM eine spezielle Mess- und Prüftechnik.

Kompakt, einfach, kostengünstig

Für die großtechnische Anwendung überzeugt das hier vorgestellte Kühlkonzept nicht nur durch seine hohe Kühlleistung. Als rein passive Kühlung ist dieser Wärmespreizer einfach, kompakt und kostengünstig und erfordert weder bewegliche Bauteile noch eine Stromversorgung. Der im Vergleich zu Standard-Heatpipes relativ kleine Hohlraum



Bei einer pulsierenden Heatpipe erfolgt der Rückfluss des Fluids zur Wärmequelle über dünne, mäanderförmige Windungen, die partiell mit Flüssigkeit befüllt und anschließend evakuiert werden.

macht pulsierende Heatpipes unempfindlich gegenüber hohen Drücken beim Pressprozess des Leiterplattenstapels. Gleichzeitig ist das Gesamtsystem aber leichter als heute übliche Wärmespreizer und mit einer Dicke von nur einem bis drei Millimetern sehr flach, äußerst kompakt und somit hervorragend in Leiterplattenstrukturen integrierbar. Besonders für eingebettete Leistungsbauteile erlaubt dies eine sehr gute thermische Ankopplung.



DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 25 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,3 Milliarden Euro. Davon fallen knapp 2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 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.

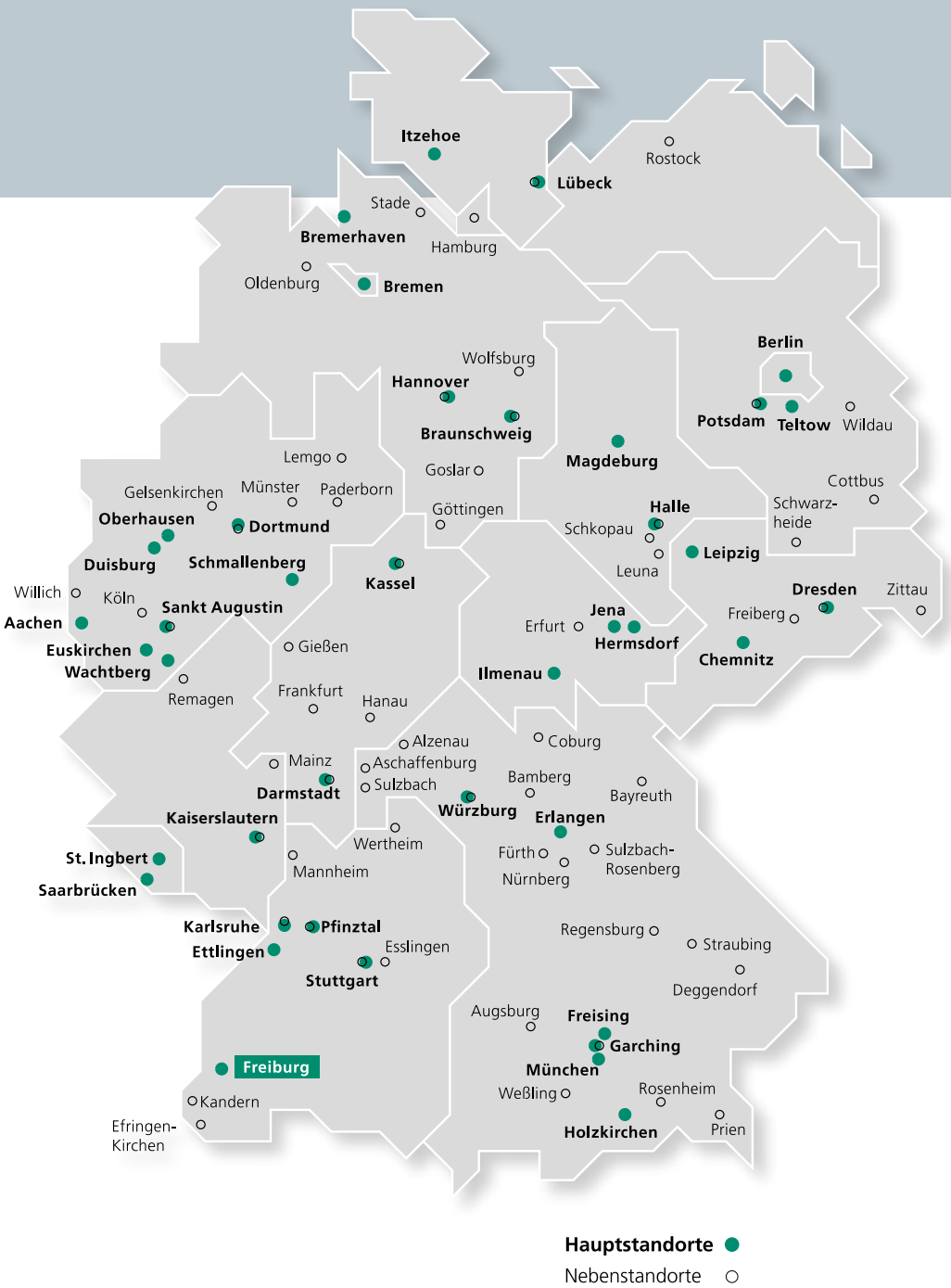
Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die 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
Fraunhofer-Institut für
Physikalische Messtechnik IPM
Heidenhofstraße 8
79110 Freiburg
T +49 761 8857-0
F +49 761 8857-224
info@ipm.fraunhofer.de

www.ipm.fraunhofer.de



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
- ETS – European Thermoelectric Society
- ITS – International Thermoelectric Society
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
- MRS – Material Research Society
- OSA – Optical Society of America

Deutschland

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

PUBLIKATIONEN 2017

Fratz, M.; Beckmann, T.

3D-Oberflächenmessung mit digitaler Mehrwellenlängen-Holographie

Sackewitz, M.; Fraunhofer-Allianz Vision [Hrsg.]: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung. Stuttgart, 2017, 195-197

Bartholomé, K.; König, J. D.; Pernau, H.-F.; Balke, B.

Abwärme als Energiequelle: Thermoelektrische Module

Physik in unserer Zeit 48 (2), 89-95, 2017

Eberhardt, A.; Ulmer, U.; Schmitt, K.; Wöllenstein, J.

Advanced white cell design for investigation of ethylene using a nondispersive infrared photometer

AMA Conferences 2017. Proceedings: SENSOR 2017, 18th International Conference on Sensors and Measurement Technology, IRS² 2017, 15th International Conference on Infrared Sensors & Systems. Wunstorf, 2017, 779-782

Stemmler, S.; Weinacker, H.; Reiterer, A.; Koch, B.

Algorithmen für die automatische Erkennung von Blattstörungen - eine geometrische Merkmalsextraktion zur Bewertung der Zustände einzelner Blätter

Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 124 (11-12), 370-377, 2017

Anisotropic and temperature-dependent thermal conductivity of PbI_2

Journal of Crystal Growth 466, 16-21, 2017

Wolf, R.; Zappe, H.; Buse, K.; Breunig, I.

Batch-processed high-Q integrated lithium-niobate-on-insulator ridge waveguide whispering-gallery resonators

IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

Wolf, R.; Breunig, I.; Zappe, H.; Buse, K.

Cascaded second-order optical nonlinearities in on-chip micro rings

Optics Express 25 (24), 29927-29933, 2017

Schmitt, K.; Tarantik, K.; Pannek, C.; Benito-Altamirano, I.; Casals, O.; Fabrega, C.; Romano-Rodriguez, A.; Wöllenstein, J.; Prades, J. D.

Colorimetric sensor for bad odor detection using automated color correction

Fonseca, Luis [Hrsg.]: Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII. Proceedings of SPIE 10246, Art. 102461F, 2017

Thalmann, M.; Pernau, H.-F.; Strunk, C.; Scheer, E.; Pietsch, T.

Comparison of cryogenic low-pass filters

Review of Scientific Instruments 88 (11), 114703, 2017

Breunig, I.; Fürst, J. U.; Hanka, K.; Buse, K.

Continuous-wave optical parametric oscillation tunable up to 8 μm wavelength

Photorefractive Photonics 2017. Journal of Physics. Conference Series 867, 012010, 2017

Meisenheimer, S.-K.; Fürst, J. U.; Buse, K.; Breunig, I.

Continuous-wave optical parametric oscillation tunable up to an 8 μm wavelength

Optica 4 (2), 189-192, 2017

Veenhuizen, K.; Stone, G. A.; Knabe, B.; Buse, K.; Dierolf, V.

Dependence of stoichiometry of lithium niobate nanocrystals on initial lithium to niobium ratios in the synthesis step

International Conference on Defects in Insulating Materials, ICDIM 2016. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering 169, 012022, 2017

Wittstock, V.; Scholz, L.; Bierer, B.; Ortiz Perez, A.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.

Design of a LED-based sensor for monitoring the lower explosion limit of methane

Sensors and Actuators B 247, 930-939, 2017

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

Digital holography on moving objects: Interference contrast as a function of velocity and aperture width

Applied Optics 56 (16), 4622-4628, 2017



Schiller, A.; Beckmann, T.; Fratz, M.; Belzer, D.; Bertz, A.; Carl, D.; Buse, K.
Digital holography on moving objects. Multiwave-length height measurements on inclined surfaces
Lehmann, P. H. [Hrsg.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Proceedings of SPIE 10329, Art. 103290D, 2017

Fratz, M.; Beckmann, T.; Schiller, A.; Seyler, T.; Bertz, A.; Carl, D.; Buse, K.
Digital holography: Evolution from a research topic to a versatile tool for the inline 100% 3D quality control in industry
AMA Conferences 2017. Proceedings: SENSOR 2017, 18th International Conference on Sensors and Measurement Technology, IRS² 2017, 15th International Conference on Infrared Sensors & Systems. Wunstorf, 2017, 286-289

Carl, D.
Digital-holographische 3D-Messtechnik
Sackewitz, M.; Fraunhofer-Allianz Vision [Hrsg.]: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung. Stuttgart, 2017, 134-137

Gobron, O.; Jung, K.; Galland, N.; Predehl, K.; Le Targat, R.; Ferrier, A.; Goldner, P.; Seidelin, S.; Coq, Y. le
Dispersive heterodyne probing method for laser frequency stabilization based on spectral hole burning in rare-earth doped crystals
Optics Express 25 (13), 15539-15548, 2017

Reiterer, A.; Predehl, K.; Leidinger, M.
Die Entwicklung von Laserscannern - Herausforderungen bei neuartigen Anwendungen
Terrestrisches Laserscanning, TLS 2017. DVW-Schriftenreihe 88, 9-21, 2017

Schäfer, R.; Schmidtke, G.; Strahl, T.; Pfeifer, M.; Brunner, R.
EUV data processing methods of the Solar Auto-Calibrating EUV Spectrometers (SolACES) aboard the International Space Station
Advances in Space Research 59 (9), 2207-2228, 2017

Lambrecht, A.; Maier, E.; Pernau, H.-F.; Strahl, T.; Herbst, J.
Gas leak detection by dilution of atmospheric oxygen
Sensors. Online Journal 17 (12), 2804, 2017

Werner, C. S.; Yoshiki, W.; Herr, S. J.; Breunig, I.; Buse, K.
Geometric tuning. Spectroscopy using whispering-gallery resonator frequency-synthesizers
Optica 4 (10), 1205-1208, 2017

Blug, A.; Saum, N.; Bertz, A.; Hofmann, A.
Inline-Oberflächenprüfung von Bahnware
Sackewitz, M.; Fraunhofer-Allianz Vision [Hrsg.]: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung. Stuttgart, 2017, 186-189

Palzer, S.; Wöllenstein, J.; Kneer, J.
Investigating the selective behaviour of CuO in gas sensing applications
7th Forum on New Materials 2016. Advances in Science and Technology 99, 33-39, 2017

Tarantik, K.; Schmitt, K.; Pannek, C.; Miensopest, L.; Wöllenstein, J.
Investigation of gasochromic rhodium complexes regarding their reactivity towards CO
Proceedings 1 (4), 454, 2017

Ersoez, B.; Bauersfeld, M.-L.; Wöllenstein, J.
Ionogel-based composite material for CO₂ sensing deposited on a chemiresistive transducer
Proceedings 1 (4), 314, 2017

Ziolkowski, P.; Boor, J. de; Stiewe, C.; Druschke, I.; Zabrocki, K.; Edler, F.; Haupt, S.; König, J. D.; Mueller, E. R.
Iron disilicide as high-temperature reference material for traceable measurements of Seebeck coefficient between 300 K and 800 K
Journal of Electronic Materials 46 (1), 51-63, 2017

Werner, C. S.; Herr, S.; Buse, K.; Sturman, B.; Soergel, E.; Razzaghi, C.; Breunig, I.
Large and accessible conductivity of charged domain walls in lithium niobate
Scientific Reports 7, 9862, 2017

Herr, S. J.; Buse, K.; Breunig, I.
Laser-active whispering-gallery resonators as versatile platform for optical three-wave mixing
IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

Gao, H.; Lyu, X.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Layer by layer deposition of colloidal SnO₂ nano particles
Proceedings 1 (4), 318, 2017

Herr, S. J.; Buse, K.; Breunig, I.
LED-pumped whispering-gallery laser
Photonics Research 5 (6), B34-B38, 2017

Ortiz Perez, A.; Bierer, B.; Dinc, C.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Low-power odor-sensing network based on wake-up nodes
Proceedings 1 (4), 570, 2017

Bierer, B.; Dinc, M. C.; Gao, H.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
MEMS-based array for hydrogen sulfide detection employing a phase transition
Fonseca, Luis [Hrsg.]: Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII. Proceedings of SPIE 10246, Art. 102460D, 2017

Scholz, L.; Ortiz Perez, A.; Bierer, B.; Eaksen, P.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Miniature low-cost carbon dioxide sensor for mobile devices
IEEE Sensors Journal 17 (9), 2889-2895, 2017

Seyler, T.; Fratz, M.; Beckmann, T.; Bertz, A.; Carl, D.
Miniaturized multiwavelength digital holography sensor for extensive in-machine tool measurement
Lehmann, P. H. [Hrsg.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Proceedings of SPIE 10329, Art. 103290F, 2017

Opitz, F.; Treffinger, P.; Wöllenstein, J.
Modeling of radiative heat transfer in an electric arc furnace
Metallurgical and Materials Transactions B 48 (6), 3301-3315, 2017

Sandfort, V.; Trabold, B. M.; Abdolvand, A.; Bolwien, C.; Russell, P.; Wöllenstein, J.; Palzer, S.
Monitoring the Wobbe index of natural gas using fiber-enhanced Raman spectroscopy
Sensors. Online Journal 17 (12), 2714, 2017

Bartholomé, K.; Hess, T.; Winkler, M.; Mahlke, A.; König, J. D.
New concept for high-efficient cooling systems based on solid-state caloric materials as refrigerant
Junior, C. [Hrsg.]: Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery 2016. Cham, 2017, 178-186

Ortiz Perez, A.; Kallfaß-de Frenes, V.; Filbert, A.; Kneer, J.; Bierer, B.; Held, P.; Klein, P.; Wöllenstein, J.; Benyoucef, D.; Kallfaß, S.; Mescheder, U.; Palzer, S.
Odor-sensing system to support social participation of people suffering from incontinence
Sensors. Online Journal 17 (1), 58, 2017

Holz, P.; Lutz, C.; Brandenburg, A.
Optical scanner system for high resolution measurement of lubricant distributions on metal strips based on laser induced fluorescence
Lehmann, P. H. [Hrsg.]: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Proceedings of SPIE 10329, Art. 103292A, 2017

Werner, C. S.; Buse, K.; Breunig, I.
Piezo-tunable second-harmonic-generation in a whispering-gallery resonator
IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

Hoessbacher, C.; Josten, A.; Baeuerle, B.; Fedoryshyn, Y.; Hettrich, H.; Salamin, Y.; Heni, W.; Haffner, C.; Kaiser, C.; Schmid, R.; Elder, D. L.; Hillerkuss, D.; Möller, M.; Dalton, L. R.; Leuthold, J.
Plasmonic modulator with > 170 GHz bandwidth demonstrated at 100 GBd NRZ
Optics Express 25 (3), 1762-1768, 2017



Jia, Y.; Winkler, M.; Szabados, J.; Breunig, I.; Kirste, L.; Cimalla, V.; Zukauskaitė, A.; Buse, K.
Potassium tantalate-niobate mixed crystal thin films for applications in nonlinear integrated optics
Photorefractive Photonics 2017. Journal of Physics. Conference Series 867, 012020, 2017

Jia, Y.; Szabados, J.; Winkler, M.; Breunig, I.; Cimalla, V.; Kirste, L.; Zukauskaitė, A.; Buse, K.
Potassium-tantalate-niobate mixed crystal thin films for applications in nonlinear integrated optics
IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

Wolf, R.; Breunig, I.; Zappe, H.; Buse, K.
Q-factor enhancement of integrated lithium-niobate-on-insulator ridge waveguide whispering-gallery-mode resonators by surface polishing
Kudryashov, A.V. [Hrsg.]: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIX. Proceedings of SPIE 10090, Art. 1009002, 2017

Tarantik, K.; Kluge, M.; Bartholomé, K.; Geczi, E.; Vetter, U.; Vergez, M.; König, J. D.
Reproducibility and reliability in manufacturing new high-temperature thermoelectric modules
Junior, C. [Hrsg.]: Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery 2016. Cham, 2017, 109-115

Eberhardt, A.; Schmitt, K.; Wöllestein, J.
Rotating interference filter spectrometer for the detection of ethylene in the ripening process of climacteric fruit
19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS 2017. Piscataway, NJ, 2017, 1445-1448

Gao, H. Jia, H.; Bierer, B.; Wöllestein, J.; Lu, Y.; Palzer, S.
Scalable gas sensors fabrication to integrate metal oxide nanoparticles with well-defined shape and size
Sensors and Actuators B 249, 639-646, 2017

Herr, S.; Folwill, Y.; Buse, K.; Breunig, I.
Self-frequency doubling in a laser-active whispering-gallery resonator
Optics Letters 42 (13), 2627-2630, 2017

Wolf, S.; Trendle, T.; Kießling, J.; Herbst, J.; Buse, K.; Kühnemann, F.
Self-gated mid-infrared short pulse upconversion detection for gas sensing
Optics Express 25 (20), 24459-24468, 2017

Wolf, S.; Trendle, T.; Kießling, J.; Kühnemann, F.
Sensitive infrared detection through efficient pulsed upconversion for remote sensing applications
IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

Hansen, A.-L.; Dankwort, T.; Groß, H.; Etter, M.; König, J. D.; Düppel, V.; Kienle, L.; Bensch, W.
Structural properties of the thermoelectric material CuCrS₂ and of deintercalated CuxCrS₂ on different length scales: X-ray diffraction, pair distribution function and transmission electron microscopy studies
Journal of Materials Chemistry C 5 (36), 9331-9338, 2017

Pernau, H.-F.
Techniques for characterizing thermoelectric materials: Methods and the challenge of consistency
Pineda, D. D. [Hrsg.]: Thermoelectric Energy Conversion: Basic Concepts and Device Applications. Weinheim, 2017, 93-110

Jörg, C. I.; Letscher, F.; Fleischhauer, M.; Freymann, G. von
Temporal defects in photonic topological insulators
CLEO: QELS Fundamental Science, 2017, Art. FM2G.4

Jäggle, M.; Pernau, H.-F.; Pfützner, M.; Benkendorf, M.; Li, X.; Bartel, M.; Herm, O.; Drost, S.; Rutsch, D.; Jacquot, A.; Wöllestein, J.
Thermal-electrical impedance spectroscopy for fluid characterization
AMA Conferences 2017. Proceedings: SENSOR 2017, 18th International Conference on Sensors and Measurement Technology, IRS² 2017, 15th International Conference on Infrared Sensors & Systems. Wunstorf, 2017, 157-160

Moure, A.; Rull-Bravo, M.; Abad, B.; Campo, A. del; Munoz Rojo, M.; Aguirre, M. H.; Jacquot, A.; Fernandez, J. F.; Martin-Gonzalez, M.
Thermoelectric Skutterudite/oxide nanocomposites: Effective decoupling of electrical and thermal conductivity by functional interfaces
Nano Energy 31, 393-402, 2017

Hofmann, A.
Track & Trace ohne Markierung: Markierungsfreie Identifizierung und intrinsischer Fälschungsschutz in einem Schritt
Inspect 18 (1), 38-39, 2017

Reiterer, A.
Trends bei mobilen Laserscannern
Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 124 (11-12), 341, 2017

Wolf, S.; Kießling, J.; Kunz, M.; Popko, G.; Buse, K.; Kühnemann, F.
Upconversion-enabled array spectrometer for the mid-infrared, featuring kilohertz spectra acquisition rates
Optics Express 25 (13), 14504-14515, 2017

Breunig, I.
Whispering gallery optical parametric oscillators become mature
IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2017. CD-ROM. Piscataway, NJ, 2017, 1 S.

DOKTORARBEITEN 2017

Schäfer, R.
Charakterisierung von gasbasierten Absolutdetektoren für den EUV-Bereich
[Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2017]

Wolf, S.
Infrarotspektroskopie mittels nichtlinear-optischer Hochkonversion
[Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2017]

Rademacher, S.
Verteiltes Gassensornetzwerk für die orts aufgelöste Messung von Gasen im Katastrophenumfeld
Aachen, 2017 [Zugl.: Freiburg/Brsg., Univ., Diss., 2017]

ERTEILTE PATENTE 2017

Fratz, M.; Hofmann, A.
Optische Linse und Herstellungsverfahren
DE 10 2009 011 838

Winkler, M.; König, J.
Verfahren zum Herstellen einer elektrischen Kontaktschicht an einem mehrschichtigen, elektrischen Bauelement
DE 10 2014 007 890

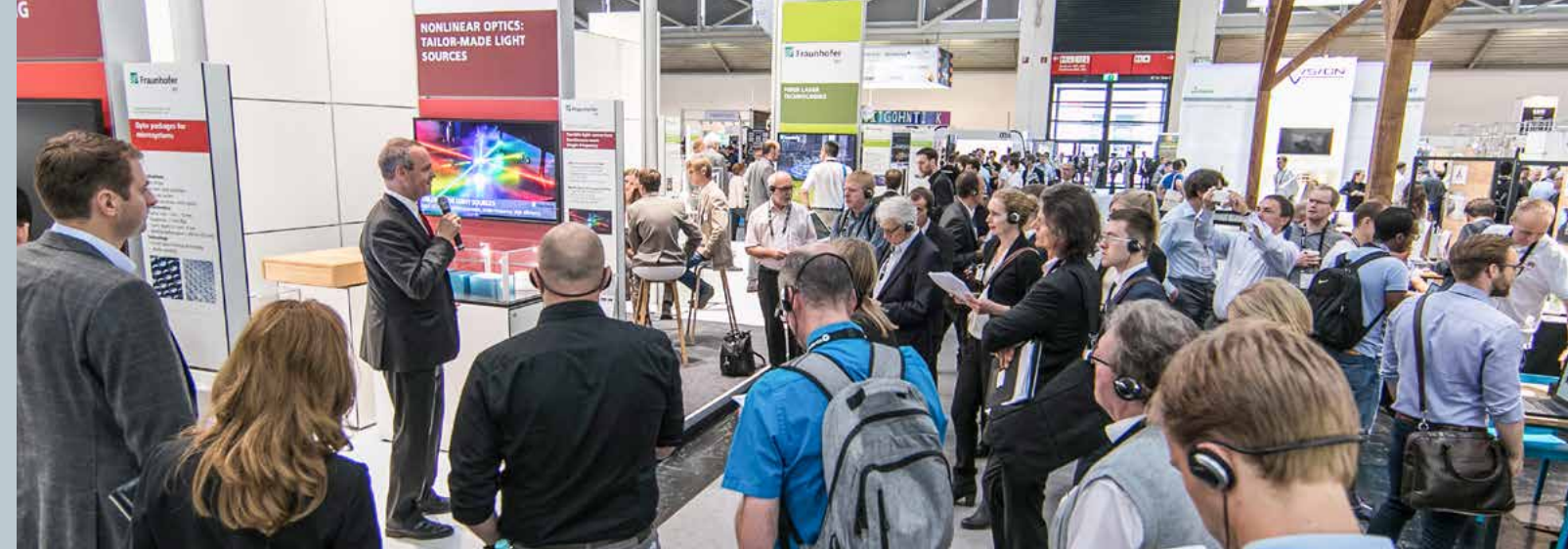
Blug, A.
Verfahren zur Zuordnung von Bildpunkten
DE 10 2009 006 089

Kießling, J.; Leidinger, M.; Kühnemann, F.
Vorrichtung und Verfahren zur nichtlinearen Frequenzkonversion elektromagnetischer Strahlung
DE 10 2016 112 343

Leidinger, M.; Kießling, J.; Kühnemann, F.
Wellenlängenmessvorrichtung und Verfahren zur Messung der Wellenlänge
DE 10 2016 107 501



> **LASER World of PHOTONICS:**
Dr. Frank Kühnemann stellt im
Rahmen des Presserundgangs eine
neue Generation von Laserlicht-
quellen vor, die am Fraunhofer IPM
entwickelt wurden.



MESSEN 2017

ISH

Weltleitmesse Erlebnisswelt Bad, Gebäude-, Energie-,
Klimatechnik, Erneuerbare Energien

Frankfurt, 14.3.2017–18.3.2017

Eigener Stand

Fraunhofer IPM präsentierte thermoelektrische Generato-
ren zur Wärmeverstromung, die in ganz verschiedenartigen
Anlagen eingesetzt werden können.

Control

Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung

Stuttgart, 9.5.2017–12.5.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Allianz Vision

Fraunhofer IPM stellte Inline-Messsysteme zur bildgeben-
den Oberflächeninspektion und zur markierungsfreien
Rückverfolgung vor.

SENSOR+TEST

Die Messtechnik-Messe

Nürnberg, 30.5.2017–1.6.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Gezeigt wurden energieeffiziente Gassensoren sowie
thermische Sensoren und Systeme für die Anwendung
in Sensornetzwerken. Darüber hinaus präsentierte das
Institut ein System zur markierungsfreien Rückverfolgung
von Halbzeugen.



LASER World of PHOTONICS

Weltleitmesse und Kongress für Komponenten,
Systeme und Anwendungen der Photonik

München, 26.6.2017–29.6.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Das Institut war mit Laserquellen und laserbasierten Mess-
und Analysesystemen für die Wissenschaft, für Produk-
tions-, Umwelt- und Sicherheitsanwendungen vertreten.
In der »Open Innovation-Area« der Universität Stuttgart
gab Fraunhofer IPM einen Einblick in den Entwicklungs-
stand der holographischen 3D-Inline-Messtechnik.

INTERGEO

Wissen und Handeln für die Erde

Berlin, 26.9.2017–28.9.2017

Eigener Stand

Fraunhofer IPM präsentierte erstmals den Lightweight
Airborne Profiler LAP, einen speziell für den Einsatz auf
fliegenden Plattformen entwickelten, besonders leichten
Laserscanner. Vorgestellt wurde außerdem ein »Deep
Learning Framework« zur automatisierten Auswertung
von 3D-Messdaten.

DeburringEXPO

Fachmesse für Entgrattechnologie und
Präzisionsoberflächen

Karlsruhe, 10.10.2017–12.10.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer IPM stellte optische Systeme und bildgebende
Verfahren vor, mit denen sich Oberflächen und 3D-Struk-
turen in der Produktion analysieren und Prozesse regeln
lassen. Die Systeme ermöglichen eine 100-Prozent-Echtzeit-
kontrolle. Im Rahmen eines Fachforums erläuterte Tobias
Seyler die Vorteile der digitalen Mehrwellenholographie bei
der mikrometergenauen Vermessung von Präzisionsoberflä-
chen und Restgraten.

parts2clean

Internationale Leitmesse für industrielle Teile-
und Oberflächenreinigung

Stuttgart, 24.10.2017–26.10.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Vorgestellt wurde der F-Scanner, ein bildgebendes Fluo-
reszenz-Messsystem Oberflächen-Reinheitskontrolle. Das
laserbasierte System misst Verunreinigungen auf
Bauteiloberflächen im Produktionstakt.

Blechexpo

Internationale Fachmesse für Blechbearbeitung

Stuttgart, 7.11.2017–10.11.2017

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer IPM war mit zwei Messsystemen vertreten:
»HoloTop« veranschaulichte die Leistungsfähigkeit digital-
holographischer Mikroskopie für die 3D-Inline-Vermessung
von Bauteilen. Für ein System zur Inline-Beölungsmessung
auf Basis eines Fluoreszenz-Laserscanners erhielten Fraun-
hofer IPM und der Entwicklungspartner Raziol Zibulla &
Sohn GmbH den »Award zur Blechexpo« in der Kategorie
Prozesskontrolle und Qualitätssicherung.

<< INTERGEO: Fraunhofer IPM präsentierte
erstmalig ein »Deep Learning Framework« zur
automatisierten Auswertung von 3D-Daten.

MESSEN 2018: VORSCHAU

Control

Stuttgart, 24.4.2018–27.4.2018

ACHEMA

Frankfurt, 11.6.2018–15.6.2018

SENSOR+TEST

Nürnberg, 26.6.2018–28.6.2018

InnoTrans

Berlin, 18.9.2018–21.9.2018

Chillventa

Nürnberg, 16.10.2018–18.10.2018

INTERGEO

Frankfurt, 16.10.2018–18.10.2018

parts2clean

Stuttgart, 23.10.2018–25.10.2018

euroBLECH

Hannover, 23.10.2018–26.10.2018



VERANSTALTUNGEN DER FREIBURGER FRAUNHOFER-INSTITUTE

Freiburger Wissenschaftsmarkt

Freiburg, 14.7.2017 – 15.7.2017

Auf dem Wissenschaftsmarkt erlebten tausende Besucher Forschung zum Anfassen. Die Veranstaltung wird von der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg gemeinsam mit der Freiburg Wirtschaft Touristik und Messe FWTM organisiert. Mit dabei waren auch die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute, die alltagsnahe Forschung präsentierten: Was passiert beim Fahrzeugcrash? Wie kann LED-Beleuchtung die Lebensqualität steigern? Wie optimiert man thermische Prozesse? Wie baut man Kühlschränke ohne schädliche Kältemittel? Was haben Reibwerte mit einer Carrera-Bahn zu tun? Der nächste Freiburger Wissenschaftsmarkt findet am 12. und 13. Juli 2019 statt.

Industriewoche Baden-Württemberg

Interaktive Ausstellung / Industrie-Forum

Sparkassen-FinanzZentrum Freiburg, 22.6.2017

Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der fünf Freiburger Fraunhofer-Institute erklärten im Rahmen der Industriewoche Baden-Württemberg 2017, wie bei Fraunhofer neue Technik entwickelt wird – Hand in Hand mit der Industrie. Neben einer Abendveranstaltung für geladene Gäste fanden Führungen für Schulklassen und eine Ausstellung für die Öffentlichkeit in den Räumen der Sparkasse Freiburg statt. Gemeinsam präsentierten die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute, was angewandte Forschung für Unternehmen vor Ort leistet.

VERANSTALTUNGEN UND WORKSHOPS AM FRAUNHOFER IPM

7. Gassensor-Workshop 2017

Fraunhofer IPM, 16.3.2017

Bereits zum siebten Mal hat Fraunhofer IPM die Gassensor-Community zu einem Workshop geladen. Neun Vortragende präsentierten Anwendungen und Trends in der Gassensor-Technologie. An die einhundert Expertinnen und Experten auf dem Gebiet der Gassensorik nutzen die Gelegenheit zum Informationsaustausch und Netzwerken.

Kalorik-Workshop 2017

Fraunhofer IPM, 28.3.2017

Infolge verstärkter Forschung und Fortschritte im Bereich kalorischer Materialien rückt der Bau besonders energieeffizienter kalorischer Kühlsysteme und Wärmepumpen in greifbare Nähe. Der von Fraunhofer IPM 2017 ins Leben gerufene Kalorik-Workshop bot 60 Teilnehmenden einen Überblick über die aktuellen Entwicklungen und Trends bei magneto-, elektro- und elastokalorischen Systemen.

Trends in der Laserspektroskopie – von den Quellen bis zur Anwendung

Fraunhofer IPM, 28.11.2017

Laser gehören heute zu den wichtigsten Werkzeugen der Optik – in Forschung und Industrie. Für anspruchsvolle Messaufgaben sind laserbasierte Spektrometer das System der Wahl, denn sie sind schnell, präzise und flexibel einsetzbar. Um die 50 Teilnehmer kamen, um neue Anwendungen klassischer Laserspektroskopie und Fortschritte bei der Entwicklung von Lichtquellen für die Spektroskopie zu diskutieren.

WORKSHOPS 2018: VORSCHAU

Industrieworkshop Optische Verzahnungsmessung

Fraunhofer IPM, 14.6.2018

MoLaS – Mobile Laser Scanning Technology Workshop

Fraunhofer IPM, 14.–15.11.2018

Fraunhofer IPM

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

www.ipm.fraunhofer.de

Anschrift der Redaktion

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

Redaktion

Holger Kock, Anja Strobel, Tim Schröder (S. 54-55)

Layout und Gestaltung

Sonja Aust, Adam Lipinski

Bildquellen

Adam Lipinski / Fraunhofer IPM (35)
Allesandro Colle / Shutterstock (34)
Annelie Schiller / Fraunhofer IPM (23)
Artistdesign29 / Shutterstock (60)
AVL ETS GmbH (16; 17)
Caroline Schmidt / STRABAG SE (33)
Chlorophylle / Fotolia (40)
Delpixel / Shutterstock (54)
Dominik Störk / Fraunhofer IPM (Titel; 28)
Escherich / Fraunhofer (15)
Holger Kock / Fraunhofer IPM (3; 6; 7; 12; 14; 18; 19; 22; 29; 31; 36; 37; 50; 51; 56; 68)
Kai-Uwe Wudtke (9; 13; 25; 26; 27; 39; 41; 43; 44; 47; 48; 49; 53)
Klaus D. Wolf / Fraunhofer ILT (67)
Markus Leidinger / Fraunhofer IPM (66)
Markus Winkler, David Rapp / Fraunhofer IPM (57)
NASA (11)
Ociacia / Shutterstock (13)
Olivia Herm / Fraunhofer IPM (14)
Sonja Aust / Fraunhofer IPM (45; 55)
TimSiegert-batcam / Fotolia (32)
Tobias Seyler / Fraunhofer IPM (21)
VBM, Sebastian Hauenstein (15)

Druck

Burger Druck GmbH, Waldkirch



© 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.

