

# Unimagazin

11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover

Forschungsmagazin der Leibniz Universität Hannover  
Ausgabe 03|04 • 2017

## Licht

Optische Technologien

# Zukunft mit Energie



Hochspannend

TenneT ist einer der größten Investoren der Energiewende. Wir schließen gigantische Offshore-Windparks an unser Stromnetz an und sind damit federführend in der Umsetzung der Energiewende. Um die neu hinzukommenden Herausforderungen zu meistern, suchen wir kaufmännische und technische Nachwuchskräfte, die sich gerne mit Engagement und Energie neuen Herausforderungen stellen. TenneT bietet damit vielseitige Arbeitsplätze in einer Branche mit hohem Zukunftspotenzial.

## Wir suchen

Nachwachskräfte mit Persönlichkeit und bieten beste Perspektiven für Hochschulabsolventen und Berufserfahrene (m/w) der Fachrichtungen

- **Elektro-/Energietechnik**
- **Maschinenbau**
- **Wirtschaftsingenieurwesen**
- **Wirtschaftswissenschaften**

Sie haben Freude daran, sich hochspannenden, abwechslungsreichen sowie verantwortungsvollen und herausfordernden Aufgaben in einem wachsenden Unternehmen zu stellen.

Auch wünschen Sie sich ein Arbeitsumfeld, das von Offenheit und gestalterischen Freiräumen geprägt ist, und in dem sich Eigenverantwortung und Teamgeist ergänzen, dann werden Sie Teil unseres Teams und machen mit uns die Energiewende wahr!

## Interessiert an hochspannenden Jobs?

Die Stellenangebote unserer verschiedenen Standorte und die Möglichkeit zur Online-Bewerbung finden Sie auf unserer Homepage unter **www.tennet.eu**



TenneT ist ein führender europäischer Übertragungsnetzbetreiber. Mit mehr als 22.000 Kilometern Hoch- und Höchstspannungsleitungen bieten wir 41 Millionen Endverbrauchern in den Niederlanden und Deutschland rund um die Uhr eine zuverlässige und sichere Stromversorgung. TenneT ist einer der größten europäischen Investoren in nationale und grenzübergreifende Energieinfrastruktur an Land und auf See. Mit über 3.000 Mitarbeitern fördern wir die Integration des nordwesteuropäischen Strommarktes und ermöglichen die Energiewende in Deutschland und Europa.

**Taking power further**

## Editorial

LIEBE LESERIN, LIEBER LESER,

gerade im Winter fällt einem auf, wie wichtig das Licht für uns Menschen ist. Ohne Licht geht es nicht. Und doch ist das sichtbare Licht nur ein ganz kleiner Teil der elektromagnetischen Strahlung, nämlich der Teil, den das Auge wahrnehmen kann. Diese sichtbare Strahlung besteht aus schwingenden Energieeinheiten, die wir als hell und farbig wahrnehmen. Von anderen elektromagnetischen Strahlungen unterscheidet sie sich lediglich durch ihre Wellenlänge. In dem Forschungsgebiet der Optischen Technologien werden die außergewöhnlichen Eigenschaften des Lichts in der gesamten Breite der wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten genutzt: die Erzeugung, Verstärkung, For-

mung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht. Darüber hinaus kommen optische Methoden in der Messtechnik, der Materialbearbeitung sowie der Datenbearbeitung und -speicherung zum Einsatz. Zu den Optischen Technologien zählen unter anderem die Forschungsfelder Lasertechnik, Optoelektronik, Bildgebende und Medizinische Optik, Optische Analytik und Optofluidik sowie Integrierte Optik und Photonik.

Die Optischen Technologien sind mittlerweile eine der wichtigsten Zukunftsbranchen des 21. Jahrhunderts und tragen wesentlich zum technologischen Fortschritt bei. Vom Scanner an der Ladenkasse bis zum Einsatz des Lasers in der Automobilindustrie, der Kommunikationstechnologie und der Medizin – die technische Nutzung von Licht gehört bereits heute zum Alltag, vielfach in Verbindung mit Elektronik.

Damit sind die Optischen Technologien als Querschnittstechnologie einer der Innovationstreiber für Wirtschaft und Gesellschaft und bilden die Basis für wichtige Entwicklungen unter anderem im Maschinen-, Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau, der Mikro- und Optoelektronik, der Beleuchtungstechnik sowie der Pharma- und Medizinproduktindustrie.

In Hannover beschäftigen sich rund 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Leibniz Universität mit diesen Forschungsfeldern – angesiedelt beim Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien, den Fakultäten für Mathematik und Physik sowie für Maschinenbau. Das aktuelle Unimagazin bietet einen Einblick in die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten optischer Verfahren und Technologien. So geht es unter anderem um die Fahrzeugbeleuchtung bei selbstfahrenden Automobilen, um Smartphones, die das Gesundheitswesen revolutionieren können, aber auch um die Messung von Mikroplastik im Trinkwasser, die Untersuchung von Leberflecken oder das Drucken von Nanopartikeln und lebenden Zellen mit Lasern.



Viel Freude beim Lesen wünscht Ihnen

Prof. Dr. Volker Epping  
Präsident der  
Leibniz Universität Hannover

# Realisierungs- probleme?

**Vielleicht sollten Sie  
vorher mit uns sprechen.**

LASEROPTIK bietet seit 35 Jahren Erfahrung in der Produktion hochwertiger Laserspiegel.

Von der Entwicklungsphase über die Prototypen bis zur Serienfertigung können Sie in allen Stadien auf unsere begleitende, kompetente Beratung zählen.

So können Sie bereits im Vorfeld der Produktion die richtigen Entscheidungen treffen und sicher sein, dass Ihre Laser-Projekte auf einer soliden Basis stehen.

In unserem Arbeitsspektrum von 120 nm bis 10,6  $\mu\text{m}$  beschichten wir mit unterschiedlichen Verfahren: konventionell (TE, EBE), ionenunterstützt (IAD, IP), mit Sputtertechnik (MS, IBS) und seit 2017 auch mit Atomlagenabscheidung (ALD).

Wir helfen Ihnen mit unseren Hochleistungskomponenten bei der Entwicklung maßgeschneiderter, zukunftssträchtiger Lösungen.

Unsere qualifizierten Beschichtungsexperten sind Ansprechpartner aus der Praxis für die Praxis. Sie kennen die Anforderungen an die optischen Komponenten für Ihre Wellenlängen.

Einzelstücke und Serien fertigen wir nach den gleichen strengen Qualitätsstandards.

Von dieser Kompetenz profitieren weltweit führende Entwicklungsteams und Forschungslabors in allen Bereichen der Lasertechnologie – von der ersten Skizze bis zum industriereifen Produkt.



**Für bessere Hochleistungsschichten.**

*Von Anfang an.*

Laseroptik GmbH  
Horster Straße 20, D-30826 Garbsen  
Telefon (0 51 31) 45 97-0, Fax 45 97 20  
eMail: [service@laseroptik.de](mailto:service@laseroptik.de)

**eShop und Konfigurator:**  
[www.laseroptik.de/loop](http://www.laseroptik.de/loop)



# Licht

## OPTISCHE TECHNOLOGIEN

### Unimagazin

Forschungsmagazin der Leibniz  
Universität Hannover • ISSN 1616-4075

### Herausgeber

Das Präsidium der Leibniz Universität  
Hannover

### Redaktion

Monika Wegener (Leitung),  
Dr. Anette Schröder

### Anschrift der Redaktion

Leibniz Universität Hannover  
Alumnibüro  
Welfengarten 1  
D-30167 Hannover

### Anzeigenverwaltung/Herstellung

ALPHA Informationsgesellschaft mbH  
Finkenstr. 10  
D-68623 Lampertheim  
Telefon: 06206 939-0  
Telefax: 06206 939-232  
Internet: www.alphapublic.de

### Titelabbildung

Institut für Quantenoptik der Leibniz  
Universität Hannover

Das Forschungsmagazin Unimagazin  
erscheint zweimal im Jahr. Nachdruck  
einzelner Artikel, auch auszugsweise,  
nur mit Genehmigung der Redaktion.  
Für den Inhalt der Beiträge sind die  
jeweiligen Autoren verantwortlich.

### Uwe Morgner

Institut für Quantenoptik der Leibniz Uni-  
versität Hannover

- 6 ..... **Ultraschnelle Vorgänge in der Mikrowelt**  
Die Lasermessung  
als Schlüssel zum Verstehen

- 10 .... **10 Jahre Hannoversches Zentrum  
für Optische Technologien HOT**

Maik Rahlves | Axel Günther |  
Maher Rezem | Christian Kelb |  
Eduard Reithmeier | Bernhard Roth  
Institut für Mess- und Regelungstechnik,  
Hannoversches Zentrum für Optische  
Technologien

- 12 .... **Auf dem Weg zur künstlichen Haut**  
Lichtwellenleiterfolie zum optischen  
Messen von Druck und Temperatur

Ann Britt Petermann | Merve Wollweber |  
Bernhard Roth | Uwe Morgner  
Institut für Quantenoptik,  
Hannoversches Zentrum für Optische  
Technologien

- 16 .... **Analytik mit flüsterndem Licht**  
Zur Entwicklung neuer Sensorsysteme

Kort Bremer | Johanna-Gabriela Walter |  
Maik Rahlves | Rima Rifai | Bernhard Roth  
Institut für Technische Chemie,  
Hannoversches Zentrum für Optische  
Technologien

- 20 .... **Labordiagnostik für jedermann**  
Wie Smartphones das Gesundheitswesen  
revolutionieren können

Ann-Kathrin Kniggendorf |  
Christoph Wetzel | Michael Tomanek |  
Bernhard Roth  
Hannoversches Zentrum für Optische  
Technologien

- 24 .... **Mikroplastik im Trinkwasser**  
Online-Kontrolle für trinkwasser-  
verarbeitende Betriebe

Jenny Stritzel | Arthur Varkentin |  
Elias Blumenröther | Maik Rahlves |  
Merve Wollweber | Uwe Morgner |  
Bernhard Roth  
Institut für Quantenoptik,  
Hannoversches Zentrum für Optische  
Technologien

- 28 .... **Nur ein Leberfleck!**  
Oder doch Hautkrebs?

### Benno Wilke

Albert Einstein Institut

- 32 .... **Ein neues Fenster zum Weltall**  
Stabilisierte Hochleistungslaser für die  
Gravitationswellendetektion

Maike Diana Lachmann | Ernst M. Rasel  
Institut für Quantenoptik

- 36 .... **Meilenstein in der Quantenphysik**  
Erstmals Bose-Einstein Kondensate im All

- 41 .... **Laser Zentrum Hannover e.V.:**  
**Light for Innovation**

Detlev Ristau | Henrik Ehlers | Marco Jupé  
Institut für Quantenoptik,  
Laser Zentrum Hannover e.V.

- 42 .... **Unauffällig, aber wirksam**  
Die Optische Dünnschichttechnologie

Lothar Koch | Martin Duderstadt |  
Urs Zywiets | Boris Chichkov  
Institut für Quantenoptik,  
Laser Zentrum Hannover e.V.

- 46 .... **Der Laser als hochpräzises Werkzeug**  
Über das Drucken von Nanopartikeln und  
lebenden Zellen

Bettina Altmann | Christian Pape |  
Eduard Reithmeier  
Institut für Mess- und Regelungstechnik

- 50 .... **Der optomechanische Bilderdrotator**  
Optisch drehend messen

Roland Lachmayer | Gerolf Kloppenburg |  
Alexander Wolf | Marvin Knöchelmann |  
Peer-Phillip Ley  
Institut für Produktentwicklung und  
Gerätebau

- 54 .... **Autonomes Fahren und Beleuchtung**  
Sind heutige Scheinwerfer gut genug für  
selbstfahrende Autos?

- 58 .... **Projekt Hymnos: »Das virtuelle Labor«**

Ludger Overmeyer | Sebastian Dikty |  
Welm Pätzold | Yixiao Wang |  
Sebastian Bengsch  
Institut für Quantenoptik, Institut für  
Transport- und Automatisierungstechnik,  
Institut für Mikroproduktionstechnik

- 60 .... **Der Sonderforschungsbereich  
Transregio 123**  
Zur Erforschung funktionaler Polymer-  
optiken

- 64 .... **Promotionsprogramm Tailored Light**

- 66 .... **Personalia und Preise**



Sprachkurse • Prüfungen • Übersetzungen

Hannover spricht inlingua



inlingua Sprachschule Hannover GmbH  
Andreastraße 3 / Ecke Schillerstraße  
D-30159 Hannover

Telefon 0511 - 32 45 80  
Fax. 0511 - 3 63 29 31  
info@inlingua-hannover.de



www.inlingua-hannover.de



Abtl. Jochen Lemper, Hannover, Abtl. Ausstellungen The Stern of Antarctica, seit 1995  
© Jochen Lemper / V&S Bildagentur Bonn 2017

29. November 2017 bis 18. Februar 2018

# JOCHEN LEMPERT

SPRENGEL MUSEUM HANNOVER  
www.sprengel-museum.de

Nieder-sächsische  
Sperrkassenstiftung

Sparkasse  
Hannover  
„Gehören zum Wohl der  
Lebenden. Open-Minded.“



## DIK – Kompetenz in Kautschuk und Elastomeren

Das DIK bietet ein breites Forschungs- und Leistungsspektrum

- Werkstoffcharakterisierung
- Neue Materialien
- Werkstoffentwicklung
- Lebensdauervorhersage/Alterung
- Aus- und Weiterbildung
- Simulation
- Umweltaspekte
- „Leachables“ in Polymerwerkstoffen

**Kautschuk-Herbst-Kolloquium  
6.–8. November 2018**



Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V.

30519 Hannover  
Eupener Straße 33  
Tel: +49 511/84201-16  
PR-DIK@DIKkautschuk.de



**Labor**  
Herman Nzalli

**Fertigung**  
Jana Kallmeyer

**Entwicklung**  
Viktor Bauer

# WE INNOVATE! DAMIT SICH ERFINDERGEIST UNBEGRENZT AUSBREITEN KANN.

Hochmoderne Technologien, richtungsweisende Lösungen und internationale Präsenz – dafür steht WAGO. Und für mehr als 7.500 ambitionierte Menschen weltweit, die Innovation zu ihrer Passion gemacht haben und gemeinsam exzellente Arbeit leisten. Als einer der führenden Anbieter von elektrischer Verbindungs- und Automatisierungstechnik bieten wir Ihnen individuelle Entwicklungschancen in einem familiären Umfeld.

Finden Sie in unserem Stellenportal den Job, der zu Ihnen passt.

[www.wago.com/karriere](http://www.wago.com/karriere)



Ausgezeichneter Arbeitgeber

www.tuv.com  
ID 9108622832



# Ultraschnelle Vorgänge in der Mikrowelt

## DIE LASERMESSUNG ALS SCHLÜSSEL ZUM VERSTEHEN

Die Prozesse der Mikrowelt laufen in rasender Geschwindigkeit ab – unvorstellbar schnell von einem Zustand in den nächsten. Mit ultrakurzen Lichtblitzen aus neuen Lasern sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit und auch an der Leibniz Universität in der Lage, – diese Vorgänge zu erfassen und zu verstehen.

Ein Professor vom Institut für Quantenoptik gibt einen Einblick.

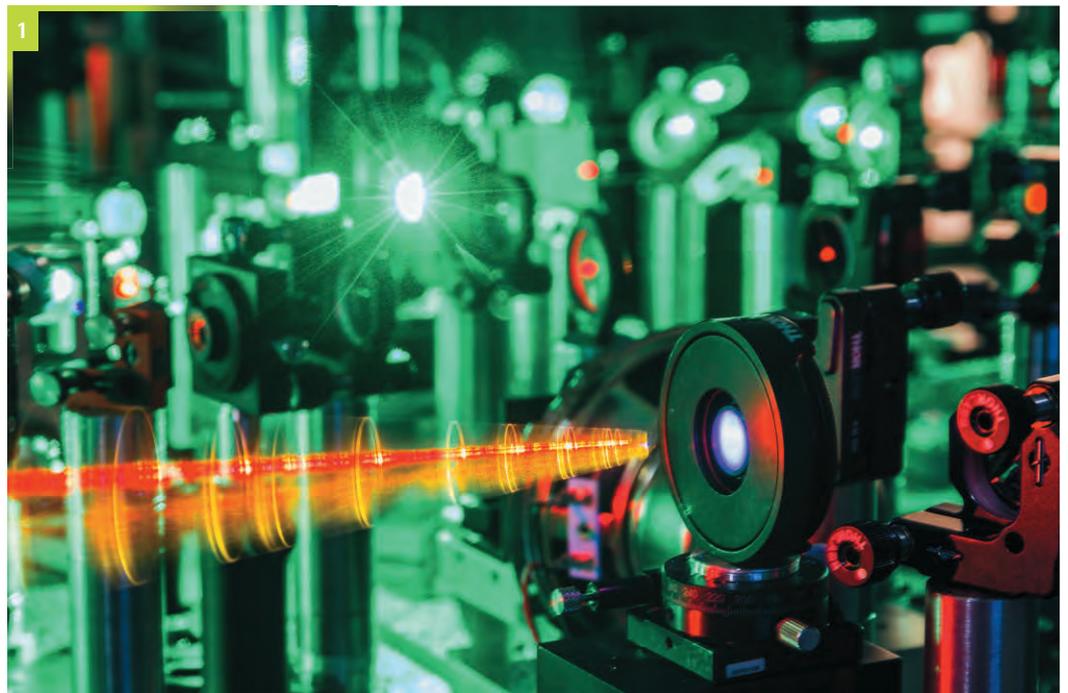


Abbildung 1  
Frequenzkonversion von ultraviolett in sichtbares Laserlicht in einem speziellen Kristall. Das Licht wird kegelförmig abgestrahlt.

Quelle: Institut für Quantenoptik

Der Laser ist ein außergewöhnliches Instrument. Laseroptik spannt den weiten Bogen von Experimenten mit einzelnen Lichtteilchen (Photonen) bis hin zur Physik mit extrem hohen Intensitäten. In keinem anderen Forschungsfeld werden die Größen bis an die äußeren Ränder der Einheitenskalen – von Atto- bis Peta- – ausgereizt. Nirgends sonst wird so deutlich, dass unserer Sprache adäquate Superlative fehlen, so dass verstärkende Präfixe wie ultra-, super-, oder hyper- in der Laserforschung allgegenwärtig sind. So gibt es kaum naturwissenschaftliche Bereiche, die nicht in substantieller

Weise von den kohärenten Photonen des Lasers profitieren. In den Foki hochintensiver Laserpulse finden wir extreme Bedingungen vor: Spitzenleistungen von Terawatt, magnetische Flussdichten mit Tausenden von Tesla, Lichtdrücke von Gigapascal und Temperaturen von Megakelvin sind heute mit kommerziell erhältlichen Laserquellen erreichbar.

Hohe Intensitäten erhält man, indem man möglichst viele Lichtteilchen (= Photonen) auf kleinstem Raum konzentriert. Das ist möglich, da Photonen ungeladene Teilchen sind, die sich nicht gegenseitig absto-

ßen. Darüber hinaus sind Photonen Bosonen, also Teilchen mit ganzzahligem Spin, die im Gegensatz zu den Fermionen mit halbzahligem Spin alle denselben Zustand besetzen dürfen. Dem gegenüber sind Elektronen geladene Fermionen, die mit keiner Technik in Raum und Zeit so konzentriert werden können wie Photonen. Um diese extremen Photonenkonzentrationen tatsächlich zu realisieren, müssen die Lichtteilchen in Raum und Zeit verdichtet werden. Die Verdichtung im Raum ist allein limitiert durch das Heisenbergsche Unschärfeprinzip, das besagt, dass ein Teilchen nicht gleichzeitig

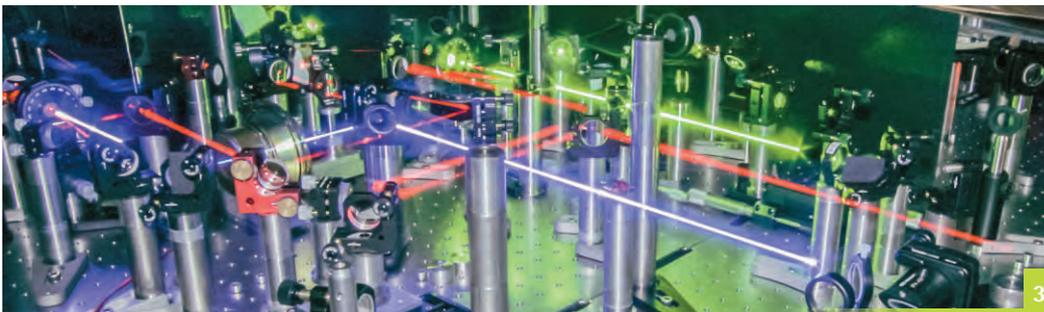
in Ort und Impuls (also Geschwindigkeit) festgelegt werden kann. Eine klare Lokalisierung geht immer mit einer unscharfen Geschwindigkeit einher und umgekehrt. Möchte man einen harten Fokus produzieren, muss eine große Geschwindigkeitsunschärfe, also ein breiter stumpfer Lichtkegel vor und nach dem Fokus zugelassen werden. Je größer der Kegelwinkel, desto größer die »Numerische Apertur« (NA). Mit hoher NA kann also hart im Raum fokussiert werden. Auch die Fokussierung in der Zeit wird von Heisenberg limitiert. Hier ist es die Unschärfe zwischen Energie und Zeit. Möchte man ein Photon in einem winzigen Zeitfenster lokalisieren, muss in Kauf genommen werden, dass seine Energie (= seine Farbe) unscharf ist. Völlig analog zur

Lokalisierungsgrenzen der Photonen in Zeit beziehungsweise in Ausbreitungsrichtung von Nanosekunden ( $1\text{ns} = 10^{-9}\text{ sec.}$ ) auf Sub-Femtosekunden ( $1\text{fs} = 10^{-15}\text{ sec.}$ ) konsequent mit einer Größenordnung pro Dekade gefallen. Während man Nanosekunden auch noch mit Elektronenpulsen auflösen kann, konnten die schneller ablaufenden Effekte der Natur erst nach dem entsprechenden Fortschritt der Laserphysik analysiert werden.

Und tatsächlich ist unsere Mikrowelt voller Prozesse, die auf Piko-, Femto- und Attosekunden-Zeitskalen ablaufen ( $1\text{ps} = 10^{-12}\text{ sec.}$ ,  $1\text{as} = 10^{-18}\text{ sec.}$ ): Moleküle rotieren in Pikosekunden, Moleküle vibrieren in Femtosekunden, Elektronen bewegen sich in Molekülen innerhalb von

Röntgenstrahlung. Mit diesem Superlaser wird es möglich sein, große Moleküle, aber auch Viren und Bakterien zu durchleuchten, sie zu »röntgen« und ihre innere Struktur zu analysieren. Der intensive Puls – von dem 27.000 pro Sekunde erzeugt werden können – zerstört das Molekül, aber da er so kurz ist, entsteht das Foto in kurzer Zeit vor der Zerstörung, dass jegliche Bewegung der beteiligten Atome eingefroren ist. Man erwartet wesentliche neue Einsichten in die Struktur von Großmolekülen mit Relevanz für Chemie, Materialwissenschaft, Biochemie, Biologie, Pharmazie und Medizin und lässt sich dieses 1,2 Milliarden Euro in einer gemeinsamen europäischen Anstrengung kosten.

Der größte gepulste Laser steht in Kalifornien in den



Raumdimension müssen also viele Farben angeboten werden, um einen harten Zeitfokus zu realisieren.

Jetzt verlassen wir das Teilchenbild und denken im Wellenbild: Perfekt scharfe Lichtverteilungen im Fokus und perfekt kurze Lichtverteilungen in der Zeit sind nur bei perfekt interferierenden Teilwellen möglich; diese in Raum und Zeit perfekten Wellen produziert allein der Laser. Nur damit können die hohen Intensitäten erzeugt werden. Das hat man sofort nach der Erfindung des Lasers im Jahre 1960 erkannt, und seitdem ist die Pulsdauer, das sind die

Attosekunden von einem Ort zum anderen, von einem Zustand zum nächsten. Die Lasermessung dieser ultraschnellen Vorgänge ist der Schlüssel zum Verstehen der vielfältigen Dynamik der Mikrowelt.

In Hamburg wurde just am 1. September der XFEL feierlich eingeweiht, der »Europäische Extreme Freie-Elektronenlaser«, eine 3,4 km lange Röhre (siehe *Abbildung X*), die in Hamburg beginnt und in Schleswig-Holstein in einer fußballfeldgroßen Experimentierhalle tief unter der Erde endet. Er erzeugt erstmalig Femtosekundenimpulse aus harter

USA, die »National Ignition Facility« – in der Größe einer großen Fabrikhalle. Seine Pulse sind im Gegensatz zum XFEL wesentlich länger und auch nicht im Röntgenbereich angesiedelt. Dafür haben sie viel mehr Energie (einige Megajoule pro Puls). 192 einzelne Großlaser strahlen dabei aus allen Raumrichtungen zeitgleich auf eine kleine Probe. Der dabei entstehende extreme Druck durch die vielen Photonen überwindet die Abstoßung zwischen den positiv geladenen Atomkernen und führt zu ihrer Verschmelzung. Dieser Laser dient der Erforschung der kontrollierten Kernfusion, kann im Durch-

Abbildung 2  
Blick in den 3,4 km langen Beschleunigertunnel des Europäischen Freie-Elektronen-Laser für Röntgenlicht (XFEL) in Hamburg.

Quelle: Institut für Quantenoptik

Abbildung 3  
Gepulste Laserstrahlung verschiedener Wellenlänge in einem typischen Experimentieraufbau.

Quelle: Institut für Quantenoptik



#### Prof. Dr. Uwe Morgner

Jahrgang 1967, ist seit 2004 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2013 ist er Sprecher des Vorstandes des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der extrem kurzen Pulse aus Lasern sowie deren Anwendung in Biophotonik und Grundlagenforschung. Kontakt: [morgner@iqo.uni-hannover.de](mailto:morgner@iqo.uni-hannover.de)

schnitt nur einmal pro Tag abgefeuert werden und hat auch weit über eine Milliarde US-Dollar gekostet.

Hier in Hannover am Institut für Quantenoptik (IQ) wird mit kleinerem Budget aber nicht weniger interessant geforscht. In der Arbeitsgruppe »Ultrafast Optics« steht die Forschung an neuen Laserquellen von Femto- und Sub-Femtosekundenpulsen im Schwerpunkt (siehe *Abbildungen 1 bis 4*). Im Rahmen von Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten erforschen junge Studierende neue Typen gepulster Laser. Von den innovativen Laserquellen profitieren viele Folge- und Kooperationsprojekte in Spektroskopie, Manipulation von Materie, Mikroskopie und Sensorik.

Ein angewandtes Projekt zum Beispiel beschäftigt sich in Kooperation mit dem Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) und einigen Firmen mit der schnellen Detektion von Mikroplastik-Verunreinigungen in Trinkwasser. Der exzessive Einsatz von Plastik in der Verpackungsindustrie sorgt für ständig wachsende massive Umweltverschmutzung – insbesondere da die typischen Kunststoffe in Jahrzehnten noch nicht verrotten sind. Unvorstellbare Mengen an Plastikabfall gelangen versehentlich oder unbeabsichtigt in Flüsse und Meere, wo sie

langsam in immer kleinere Partikel zermahlen werden. Diese Mikro- und Nanometer großen Plastikpartikel gelangen nun zunehmend zurück ins Trinkwasser und in die Nahrungskette. Auf dieses relativ neue Phänomen sind Wasserwerke und Getränkeindustrie nicht eingestellt und suchen nach verlässlichen Möglichkeiten, die Kunststoff-Schwebeteilchen zu erkennen und zu vermessen. So erhofft man sich Informationen über das Ausmaß der Verunreinigung. Der gepulste Laser ist dabei ein präzises und leistungsstarkes Werkzeug, auch kleinste Partikel nachzuweisen (siehe den Beitrag »Mikroplastik in meinem Trinkwasser« in diesem Heft).

In einem eher grundlegend physikalisch orientierten Beispielprojekt geht es um die Untersuchung der Elektronendynamik in Festkörpern. Die Elektronen der Atomhülle in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern schwingen mit der Lichtwelle hin- und her, weil sie so leicht sind. Bei hohen Intensitäten werden die schwingenden aber gebundenen Elektronen so weit ausgelenkt, dass sie durch die Nähe des Nachbaratoms komplizierte Flugbahnen durchlaufen. Beschleunigte Elektronen strahlen Licht ab, und so entsteht im Medium durch die kollektive Bewegung der Elektronen auf den »nichtlinearen« Trajektorien Licht mit neuen

Farben. Diese nichtlineare Frequenzkonversion wird seit Jahrzehnten angewandt, trotzdem sind die Details der Elektronenbewegung, insbesondere die Reaktion absorbierender Medien auf einen ultrakurzen Lichtimpuls Gegenstand aktueller Forschung. Diese Effekte dauern Femtosekunden oder weniger, sind daher nur schwer zu vermessen.

Auch andere Beiträge dieses Heftes thematisieren die Anwendungen ultrakurzer Laserpulse, insbesondere in Biophotonik, Mikro-Materialbearbeitung oder Nanotechnologie: Zum Beispiel die Beiträge über Mikroplastik im Trinkwasser, zum Drucken von Nanopartikeln und lebenden Zellen mit dem Laser sowie den Kurztext über das virtuelle Labor und das Verbundprojekt HYMNOS. Allein dieser kleine hannoversche Ausschnitt demonstriert bereits eindrücklich die vielfältige Anwendbarkeit der gepulsten Lasertechnologie. So hat sich in den letzten zwanzig Jahren ein stark wachsender Milliardenmarkt entwickelt, über den diese Quellen einer breiten Anwenderschicht kommerziell zugänglich gemacht werden. Insbesondere in Deutschland und Europa sind einige wichtige Laserfirmen und deren Zulieferer beheimatet. Das eröffnet interessante Kooperationsmöglichkeiten im Bereich angewandter Forschung, das bietet aber auch exzellente Perspektiven für die Absolventinnen und Absolventen der Physik oder der Optischen Technologien. Beide Studiengänge werden mittlerweile auf Englisch angeboten und ziehen eine große Zahl an internationalen Bewerbern nach Hannover. Sie bekommen hier nicht nur eine solide theoretische und praktische Ausbildung in der Optik, sondern auch die Perspektive auf einen guten Arbeitsplatz in einer Zukunftstechnologie.

#### Abbildung 4

Ein gepulster Laserstrahl wird in der Luft fokussiert. Seine Intensität ist so groß, dass die Luftmoleküle auseinandergerissen werden. Die schnelle Bewegung der Elektronen erzeugt einen hellen Blitz. Quelle: Institut für Quantenoptik



Freiraum für Leistung.



Jetzt starten. Nicht warten.  
Traineeprogramm sichern.

Mit Hochschul-Partnerschaften schaffen wir Win-Win-Situationen für Studierende, Lehrstühle, Fachbereiche und die NORD/LB als attraktiven, fairen Arbeitgeber. Mehrwerte und Grundlagen für Karriere-Chancen in unserem Haus bieten z. B. Stipendienprogramme, Hochschul-Praktika, Kooperationen mit Bachelor-/Masterthesis, Forschungsprojekte und NORD/LB Alumni. Nach Studienabschluss können **Trainee-Programme** die Möglichkeit eröffnen, erste Verantwortung in einem dynamischen, leistungsorientierten Berufsumfeld zu übernehmen.

Weitere Infos und ausgeschriebene Stellen unter: [www.nordlb.de/traineeship](http://www.nordlb.de/traineeship)

# 10 Jahre Hannoversches Zentrum für Optische Technologien HOT

## INTERDISZIPLINARITÄT ALS SCHLÜSSEL FÜR INNOVATION UND ANWENDUNGEN

Das Hannoversche Zentrum für Optische Technologien (HOT) ist ein fachübergreifendes Forschungszentrum der Leibniz Universität Hannover im Bereich der optischen und photonischen Technologien. Es ist aus einer Initiative von Instituten und Forschungseinrichtungen der Fakultäten für Maschinenbau und für Mathematik und Physik der Leibniz Universität Hannover und des Laser Zentrums Hannover hervorgegangen und hat zum Ziel, die einzelnen Fachkompetenzen in diesem Bereich zu bündeln, neue Forschungswege zu schaffen und diese für Forschung, Lehre und Wissenstransfer nutzbar zu machen.

Zehn Jahre Forschungszentrum HOT – das bedeutet daher auch zehn Jahre interdisziplinäre Zusammenarbeit von Instituten der Leibniz Universität und Instituten, Zentren und Unternehmen der Region mit dem Ziel, innovative Konzepte in der Optik und Photonik zur Anwendung zu bringen.

Die Gebiete der Optik und Photonik gehören zu den wichtigsten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts und tragen wesentlich zum technologischen Fortschritt bei. Vom Smartphone als modernem Medizinlabor über intelligente Sensoren für das Zustandsmonitoring von Gebäuden, der Suche nach Mikroplastiken im Trinkwasser oder der Entwicklung nichtinvasiver Methoden zur Hautkrebsdiagnose – die außergewöhnlichen Eigenschaften des Lichts versprechen neuartige Lösungen für vielfältige Herausforderungen in Technologie und Gesellschaft. Das Hannoversche Zentrum für Optische Technologien HOT ist ein Nukleus dieser Trends und arbeitet intensiv an der Erforschung der neuen, zukunftssträchtigen Technologien. Es betreibt sowohl

Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung und fördert den Wissens- und Technologietransfer zwischen den beteiligten 18 Mitgliedsinstituten.

Unter dem Dach des HOT arbeiten derzeit etwa 30 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Physik, Maschinenbau, Mathematik, Informatik und Elektrotechnik zusammen an innovativen Forschungsthemen, deren enormes Anwendungspotenzial zum Beispiel für Automobilindustrie, Kommunikation oder Medizin nur in der Kooperation der verschiedenen Disziplinen ausgeschöpft werden kann. Beispielhaft sind der SFB/TRR 123 »PlanOS«, der Schwerpunkt »Hymnos«, das Promotionsprogramm »Tailored Light«, das BMBF-Vorhaben »MeDiOO«, das Verbundvorhaben »Optimus« sowie das EXIST-Vorhaben »SmartSens«.

Das HOT ist Ansprechpartner für Industrie und mittelständische Unternehmen in Fragen der optischen Technologien und bildet die Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft in der Region. In der Lehre koordiniert es den internationalen Masterstudiengang Optische Technologien, der die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses einfließen lässt.

**Prof. Bernhard Roth** ist Wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien (HOT) der Leibniz Universität Hannover.

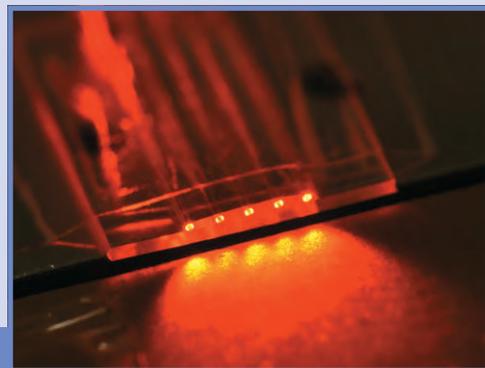
Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)

### Strategische Forschungsfelder des HOT



1

Strategische Forschungsthemenfelder des HOT.



2

Polymeroptisches Wellenleiter-Array zur verteilten, hochfunktionalen Sensorik für Medizin und Produktionstechnik.



## WERTE

### ARBEITEN BEI COHERENT – VIELES SPRICHT DAFÜR!

Coherent und ROFIN sind jetzt zusammen das weltweit größte Laserunternehmen. Mehr als 5.000 Mitarbeiter in über 40 Ländern arbeiten an führenden Photonik-Lösungen für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen.

» Wir sind erfolgreich, weil wir nicht nur unsere Produkte kontinuierlich weiterentwickeln, auch unsere Mitarbeiter werden immer besser. Dass wir dabei auf den Einzelnen eingehen, ist für uns ebenso selbstverständlich, wie der wertschätzende Umgang miteinander, der die Atmosphäre bei Coherent prägt. «

**Coherent LaserSystems GmbH & Co. KG**  
Hans-Böckler-Str. 12 ■ 37079 Göttingen ■ [www.coherent.com](http://www.coherent.com)

## STANDORTE



Deutschland: Lübeck, Hamburg, Göttingen, Mainz, Dieburg, Kaiserslautern, Gilching, Günding, Starnberg, Freiburg, Overath und Zorneding

**pco.**

# on the cutting edge

leading manufacturer  
in sCMOS, high-speed and intensified  
camera technology

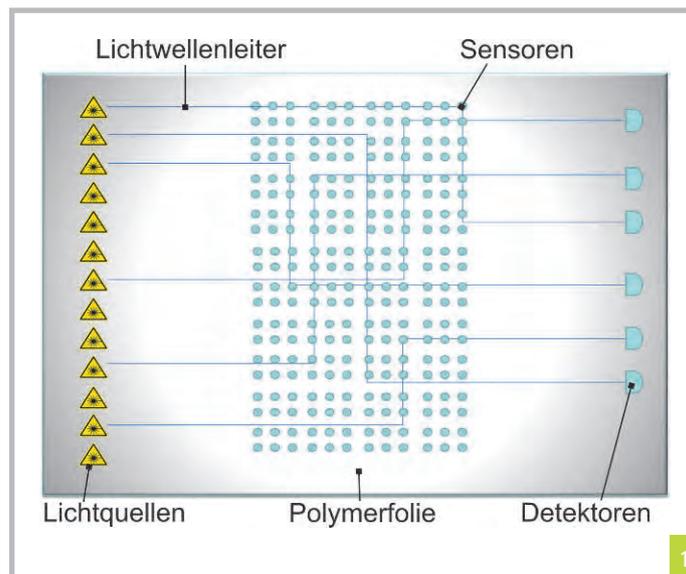
[www.pco.de](http://www.pco.de)

# Auf dem Weg zur künstlichen Haut

## LICHTWELLENLEITERFOLIE ZUM OPTISCHEN MESSEN VON DRUCK UND TEMPERATUR

Licht ist ein idealer Träger für Informationen: Schneller als klassische elektrische Übertragung, ungestört durch äußere elektromagnetische Einflüsse und leitbar in kostengünstigen Materialien wie Plexiglas®.

Am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) wird erforscht, wie Licht in dünnen Plastikfolien geleitet und zur Übertragung von Information sowie zum Erfassen von Messgrößen wie Temperatur und Dehnung genutzt werden kann.



Wir leben in einer Zeit der schnellen Veränderungen, die nicht zuletzt auch durch den immensen technologischen Fortschritt des 20. und 21. Jahrhunderts geprägt ist. Moderne Computer ermöglichen schnelle Berechnungen und Smartphones gewährleisten den nahezu unbegrenzten Zugang zu Informationen unabhängig von unserem Aufenthaltsort. Parallel zu den technologischen Entwicklungen muss sich die Gesellschaft noch ganz anderen Herausforderungen stellen: globale Klimaveränderungen, demografischer Wandel und steigende Bevölkerung, nachhaltige Energie- und Gesundheitsversorgung sowie neue Verkehrskonzepte, um nur einige zu nennen. Ein großes Problem ist beispielsweise die Versor-

gung der Menschen mit Trinkwasser. Um den Bedarf einer innovativen und kostengünstigen Analytik wie etwa der Trinkwasseranalyse oder auch der Gesundheitsüberwachung zu gewährleisten, sind echtzeitfähige und kontinuierlich betriebene, vernetzte Systeme erforderlich. Sowohl Datenübertragung als auch biochemische Analytik werden heutzutage vielfach durch integrierte photonische Systeme oder Schaltkreise (PICs – engl. für Photonic Integrated Circuits) ermöglicht. Dabei handelt es sich zumeist um kleine Lichtwellenleiterstrukturen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern bis zu einigen hundert Nanometern. Solche Lichtwellenleiter bestehen aus zwei Komponenten: Einem Kern, der das Licht

leitet und einem Mantel, der den Kern umgibt. Kern und Mantel können Nanostrukturen wie etwa kleine Gitter enthalten, die es ermöglichen, Messgrößen wie Temperatur oder auch Dehnung verlässlich und sensitiv zu bestimmen. Wird der Wellenleiterkern freigelegt und entsprechend präpariert, lassen sich auch chemische oder biologische Stoffe hochspezifisch detektieren. PICs lassen sich zudem zur Überwachung der Trinkwasserqualität oder zur Blutanalyse verwenden.

### Von komplexer Silizium-photonik zur kostengünstigen optischen Plastikfolie

Heutzutage wird der Großteil photonischer Schaltkreise aus Materialien hergestellt, die beispielsweise von der Computerindustrie genutzt werden. Dies sind insbesondere Silizium aber auch Verbundstoffe wie Siliziumnitrid oder auch Siliziumoxid, das sogenannte Quarzglas. Allerdings ist die Verwendung solcher Materialien nicht nur mit hohen Materialkosten, sondern auch mit hohen Herstellungs- und Anlagenkosten verbunden, die sich nur rentieren, wenn ein Produkt millionenfach hergestellt wird. Am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) werden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Transregios 123

»Planare Optronische Systeme (PlanOS)« innovative Herstellungstechnologien und Sensorkonzepte erforscht, die die kostengünstige und dabei flexible, aber auch hochdurchsatzfähige Herstellung photonischer Schaltkreise erlauben (Abbildung 1). Dies wird zum einen durch die Verwendung von kommerziell verfügbaren und kostengünstigen Polymeren, wie beispielsweise Plexiglas und zum anderen durch die Entwicklung neuartiger Polymere mit spezifisch eingestellten mechanischen, thermischen und optischen Eigenschaften ermöglicht. Letzteres erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Versehen mit Lichtquellen, Detektoren und Sensorelementen können solche Plastikfolien nicht nur zur Datenübertragung, sondern, aufgebracht auf Oberflächen, auch zum Messen von Temperatur, Dehnung und Feuchtigkeit eingesetzt werden.

### Imprintverfahren für Mikro- und Nanostrukturen – Hochdurchsatzfähige Technologien für maßgeschneiderte Fertigung

Zur Herstellung der optischen Sensorfolie setzen wir thermische Imprintverfahren ein, die ebenfalls zur Erzeugung von Hologrammen und Sicherheitsstrukturen, wie sie sich auf Ausweisen oder Führerscheinen befinden, genutzt werden (Abbildung 2). Die großflächige Fabrikation von Wellenleitern beginnt zunächst mit dem Prägen von Mikrokanälen in Polymerfolien. Hierfür werden ein Stempel aus Silizium und die zu strukturierende Polymerfolie aufgeheizt, bis die Folie formbar wird. Anschließend wird der Stempel mit definierter Kraft in die Folie gepresst. Nach Abkühlen werden Folie

und Stempel wieder getrennt. Um Lichtleitung zu ermöglichen, müssen in einem weiteren Schritt die Mikrokanäle mit einem weiteren Polymer mit höherem Brechungsindex gefüllt werden. Hierfür wird ein Epoxidharz in die Kanäle gefüllt, das überflüssige Harz mit einer Rasierklinge abgezogen und anschließend das in den Kanälen verbleibende Harz durch Bestrahlung mit

in die Wellenleiterfolie zu leiten, scheinen auf den ersten Blick einfach, stellen aber in der Praxis häufig ein schwieriges Problem dar. Für Halbleiterlaser oder Leuchtdioden werden zumeist kleine Mikrospiegel zur Lichtkopplung in Wellenleitern mit Querschnittsgrößen von mehreren 10  $\mu\text{m}$  verwendet. Bei Wellenleitern mit kleinen Querschnittsgrößen um 1  $\mu\text{m}$

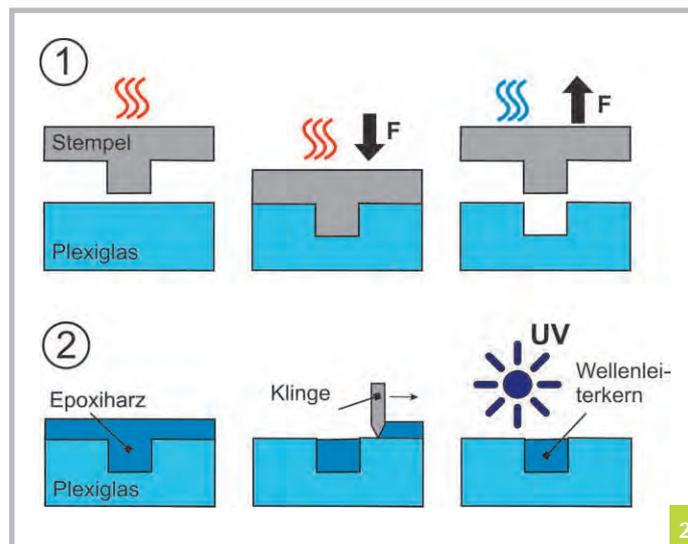


Abbildung 1  
Konzept der planaren Sensorfolie: Ein flexible Polymerfolie dient als Substrat für Lichtwellenleiter, Lichtquellen, Detektoren und Sensorstrukturen.

Abbildung 2  
Schematische Darstellung des thermischen Imprint Verfahrens (1) und Rakelprozess (2) zur Herstellung von Lichtwellenleiter in dünnen Polymerfolien: Zunächst wird eine Grabenstruktur in die Polymerfolie geprägt (1) und anschließend mit einem Epoxidharz gefüllt (2), das nach UV-Aushärtung Licht führt.

UV-Licht ausgehärtet. Hierdurch entstehen flexible und somit biegbare Polymerfolien mit einzelnen Lichtwellenleitern (Abbildung 3).

### Lichterzeugung und Lichterfassung in der Folie

Um Lichtwellenleiterfolien zur Datenübertragung und für Sensoranwendungen nutzen zu können, sind zusätzlich Lichtquellen, Detektoren und Sensorelemente in der Folie notwendig. Als Lichtquellen werden entweder Halbleiterlaser im Mikrometermaßstab, wie sie aus der Optoelektronik bekannt sind oder auch organische Leuchtdioden (OLED), die auch in Flachbildschirmen eingesetzt werden, verwendet. Konzepte, um Licht von den Lichtquellen

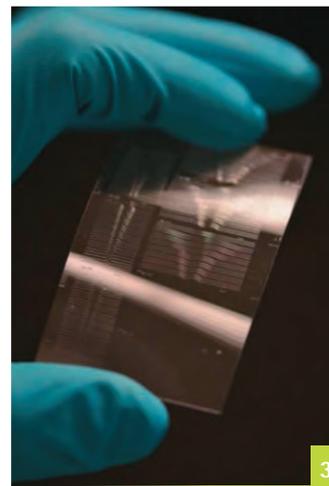


Abbildung 3  
Durch thermisches Imprint hergestelltes Lichtwellenleitersubstrat aus Plexiglas® mit verschiedenen Wellenleiterstrukturen.

werden Gitterstrukturen eingesetzt, die das Licht aufgrund ihrer Strukturgrößen im Nanometerbereich in den Wellenleiter beugen, vergleichbar mit der Aufspaltung von Licht in Regenbogenfar-

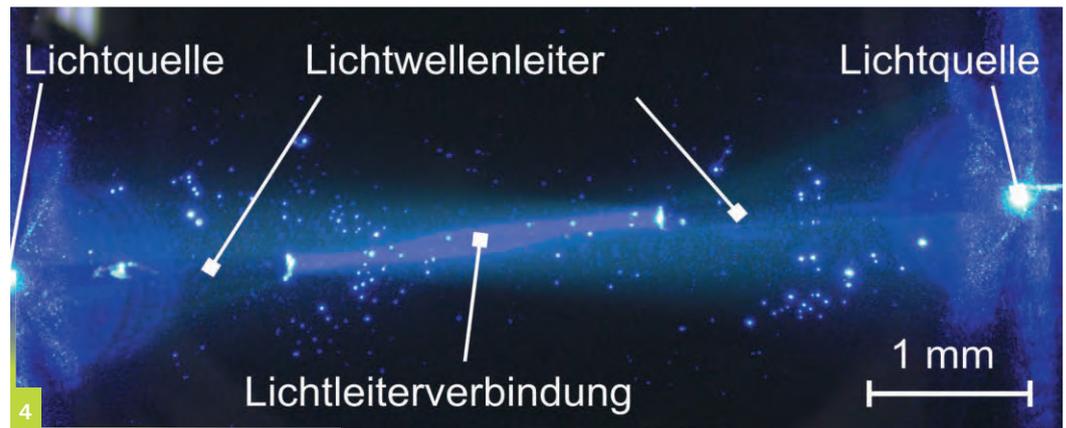
ben bei der Betrachtung der Unterseite einer CD. Dabei muss die Lichtquelle sehr präzise auf oder vor dem Wellenleiter platziert sein, damit das Licht im Wellenleiter geführt wird. Moderne Pick-and-Place-Maschinen, die zur Platzierung in der mikroelektronischen Fertigung eingesetzt werden, erreichen in der Regel

sendet, sodass sie sich überlappen. Wird zusätzlich ein spezielles Epoxidharz zwischen die beiden optischen Komponenten eingebracht, so schreibt sich ein Wellenleiter automatisch entlang des Überlappbereichs der beiden Lichtstrahlen und schafft somit eine optimale optische Verbindung.

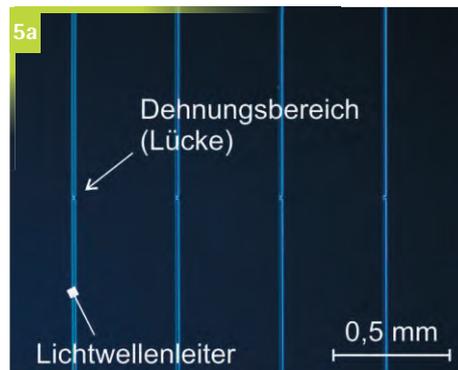
wickelt, die schematisch in *Abbildung 5* dargestellt sind und auf einer intensitätsbasierten beziehungsweise chromatischen Lichtmodulation beruhen.

Der intensitätsbasierte Dehnungssensor (*Abbildung 5, links*) basiert auf einem simplen Konzept: Er besteht aus

**Abbildung 4**  
Mikroskopaufnahme einer sich in Epoxidharz selbstschreibenden Verbindung: Licht wird in zwei Lichtwellenleiter eingekoppelt, die sich in Epoxidharz befinden – durch Photopolymerisation entsteht eine Lichtleiterverbindung im Überlapp der beiden aus den Lichtwellenleitern austretenden Lichtkegel.



**Abbildung 5**  
Mikroskopaufnahme der Dehnungssensoren in Plexiglasfolie: Intensitätsbasierter Sensor mit Dehnungslücke in Wellenleiter (links) und chromatisch arbeitender Sensor – Auslesewellenleiter nehmen das durch das Gitter in Regenbogenfarben aufgesplante Licht auf (rechts).



Genauigkeiten von  $\mu\text{m}$ . Da selbst solche kleinen Abweichungen zu großen Koppelverlusten führen, wurde am HOT eine innovative Koppelstruktur entwickelt, die sich selbst den optimalen Weg zwischen den Komponenten und eine nahezu verlustfreie Verbindung zwischen zwei gegeneinander versetzten optischen Elementen herstellt, wie am Beispiel zweier Glasfasern in *Abbildung 4* dargestellt. Zur Erzeugung solcher Verbindungen werden zwei Lichtstrahlen von den beiden zu verbindenden optischen Komponenten ausge-

#### Hochsensitive optische Sensoren in der Plastikfolie

Werden zu den Lichtquellen und Detektoren noch Sensorelemente in die Folie integriert, so können Messgrößen wie Temperatur oder auch Dehnung sensitiv erfasst werden. Ein klassisches Beispiel für eine Messaufgabe im Monitoring-Bereich ist die Dehnungs- oder Verformungsmessung. Im Rahmen des Transregios 123 PlanOS wurden am HOT neben Sensoren zur Temperatur- und Brechungsindexmessung zwei innovative Dehnungssensoren ent-

mehreren parallel verlaufenden Wellenleitern, die durch eine Lücke unterbrochen werden. Je größer diese Lücke ausfällt, umso schlechter ist die Einkopplung des Lichts in den fortführenden Wellenleiter. Wird die Folie nun unter Belastung gedehnt oder verformt, kommt es zu einem messbaren Intensitätsabfall am Ende der Wellenleiterstruktur. Der chromatische Sensor (*Abbildung 5, rechts*) hingegen beruht auf den zuvor beschriebenen optischen Gittern. Strahlt man Licht über einen Wellenleiter auf ein in die Folie eingeschriebenes,

senkrecht Gitter ein, wird dieses gebeugt und in seine Spektralfarben zerlegt. Erfolgt nun eine Dehnung des Gitters über eine von außen auf die Folie wirkende Kraft, wird auch das Spektrum räumlich auseinander gezogen; daraus entsteht das Messsignal. Über die fächerförmig angeordneten Wellenleiter hinter dem Gitter wird das gebeugte Licht weitergeleitet und ausgewertet. Anhand der Änderung der detektierten Regenbogenfarbe am Ende des Wellenleiters kann die tatsächliche Verformung der Folie bestimmt werden.

#### Vom Structural Health Monitoring zur Künstlichen Haut

Der Vorteil der polymerbasierten, optischen Sensorfolie ist neben der kostengünstigen Herstellbarkeit auch das breite Einsatzspektrum. So können solche Folien in beanspruchte Bauteile wie Flugzeugflügel integriert werden und verlässlich Informationen über die strukturelle Integrität des Bauteils in Echtzeit liefern, bekannt unter dem Begriff »Structural Health Monitoring«. Hierdurch wird ein wesentlicher Beitrag zur Sicherheit geleistet. Perspektivisch können solche Folien aber nicht nur für technische Anwendungen eingesetzt werden, sondern bilden die Grundlage für medizinische Implantate wie beispielsweise künstliche Haut.



#### Dr.-Ing. Maik Rahlves

Jahrgang 1978, ist seit 2011 Leiter der Arbeitsgruppe »Angewandte Optik« am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT). Seine Forschungsinteressen umfassen optische Messtechnik, Diffraktive Optik, Holographie und Polymerphotonik. Kontakt: [maik.rahlves@hot.uni-hannover.de](mailto:maik.rahlves@hot.uni-hannover.de)



#### M. Sc. Axel Günther

Jahrgang 1986, ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Dort beschäftigt er sich mit der polymerbasierten Mikrooptik und der Charakterisierung optisch transparenter Materialien. Kontakt: [axel.guenther@hot.uni-hannover.de](mailto:axel.guenther@hot.uni-hannover.de)



#### Dipl.-Ing. Maher Rezem

Jahrgang 1983, ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Dort beschäftigt er sich mit der Produktion von polymerbasierten mikrooptischen Komponenten durch Replikationsprozesse. Kontakt: [maher.rezem@hot.uni-hannover.de](mailto:maher.rezem@hot.uni-hannover.de)



#### Dipl.-Ing. Christian Kelb

Jahrgang 1985, ist seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotionsstudent am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Dort beschäftigt er sich überwiegend mit der Herstellung von polymeroptischen Dehnungssensoren durch verschiedene Methoden der Massenproduktion. Kontakt: [christian.kelb@hot.uni-hannover.de](mailto:christian.kelb@hot.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Jahrgang 1957, ist seit 1996 Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik und seit 2006 Mitglied des Vorstands des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen umfassen industrielle und medizinische Bildgebung, Akustik, Fertigungsmesstechnik und Regelungstechnik. Kontakt: [sekretariat@imr.uni-hannover.de](mailto:sekretariat@imr.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr. Bernhard Roth

Jahrgang 1970, ist seit 2012 wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien und seit 2014 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, Fasersensorik, medizinische Optik, Bio- und Polymerphotonik sowie Optiksimulation. Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)

# Analytik mit flüsterndem Licht

ZUR ENTWICKLUNG NEUER SENSORSYSTEME

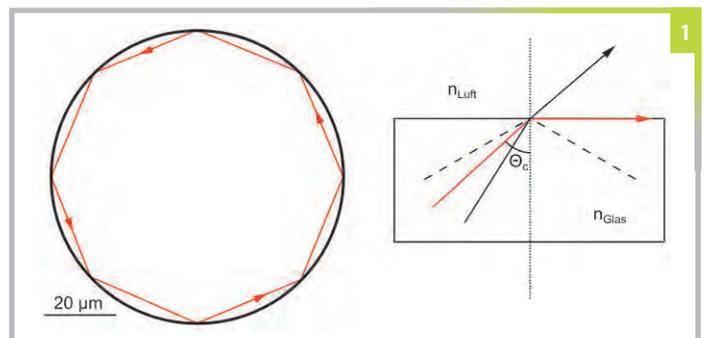
Biomoleküle kommen in allen Lebewesen vor. Bei medizinischen Untersuchungen können sie daher selbst in kleinster Konzentration diagnostische Hinweise geben. Am Hannoverschen Zentrum für Optischen Technologien (HOT) entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für solche und ähnliche Anwendungen hochempfindliche Sensoren.

Für medizinische Diagnosen werden häufig Proben von Körperflüssigkeiten auf bestimmte Biomoleküle hin untersucht. Das können zum Beispiel Antikörper sein, die charakteristisch für ein bestimmtes Krankheitsbild sind, bestimmte Hormone wie bei einem Schwangerschaftstest, aber auch Moleküle, die bei der Einschätzung von Gesundheitsrisiken helfen, wie zum Beispiel Cholesterin.

Für die Untersuchungen ist es häufig wichtig, dass selbst kleinste Konzentrationen dieser Biomoleküle in den Tests zuverlässig erkannt werden können.

Neuartige Sensorsysteme auf Basis von optischen Resonatoren haben sich in den vergangenen Jahren zu einer der sensitivsten Technologien im Bereich der Detektion von Biomolekülen entwickelt. Einer ihrer großen Vorteile ist, dass sie alle Voraussetzungen für die Realisierung von miniaturisierten Testsystemen (lab-on-a-chip, »Labortests im Mikrochip«) der nächsten Generation erfüllen: Marker-freie Detektion mit Empfindlichkeiten bis hin zur Einzelmoleküldetektion, parallele Detektion von verschiedenen Biomolekülen, Einsatz in wässrigen Umgebungen sowie die Möglichkeit der kosteneffizienten Integration in Mikrochips.

Dabei macht man sich ein sehr simples Konzept zunutze: die



Flüstergaleriemoden, die als eine der bekanntesten Ausprägungen optischer Resonatoren gelten. Zuerst wurde das Phänomen der Flüstergaleriemoden, besser bekannt unter ihrem englischen Namen »whispering gallery modes« (Kurzform: WGM) von Lord Rayleigh 1878 am Beispiel der Flüstergalerie in der St. Paul's Cathedral in London für Schallwellen beschrieben. In etwa 30 Meter Höhe an der Kuppelbasis befindet sich ein Umlauf mit einem Durchmesser von 34 Metern. In dieser Galerie können geflüsterte Worte auch von einem Zuhörer auf der gegenüberliegenden Galerieseite verstanden werden. Grund hierfür ist, dass durch die Geometrie der Kuppel der Schall entlang der gekrümmten Wände mit geringen Verlusten auf die gegenüberliegende Seite zum Zuhörer geführt werden kann. Analog zu dem Einschluss des Schalls in der Flüstergalerie wird auch der Lichteinschluss in optischen Resonatoren als

»whispering gallery modes« bezeichnet. Aufgrund der internen Totalreflexion wird das Licht entlang des Umfangs des Resonators geführt, sodass die Lichtwelle nach einem vollen Umlauf mit sich selbst konstruktiv interferieren kann. Konstruktive Interferenz bedeutet schließlich, dass es zu einer verstärkenden Überlagerung von zwei oder mehreren Teilwellen kommt. Sie ist nicht für alle Wellenlängen  $\lambda$  möglich, sondern nur für die Wellenlängen, die einem Vielfachen  $N$  des optischen Weges im Resonator entsprechen. Diese Wellenlängen beziehungsweise Frequenzen werden Resonanzwellenlängen oder Resonanzfrequenzen genannt.

Zu den einfachsten Geometrien solcher Resonatoren, die dazu dienen, das Licht einzuschließen, gehören rotations-symmetrische Geometrien wie Kugeln, Ringe oder Toroi-de. Ihre Durchmesser liegen im Bereich von 1–100  $\mu\text{m}$

(Mikrometer). Der Lichteinschluss in diesen Resonatoren erfolgt durch wiederholte interne Totalreflexion an den äußeren Grenzflächen der Strukturen. Totalreflexion tritt auf, wenn ein Lichtstrahl bei einem Übergang von einem optisch dichteren Medium, wie zum Beispiel Glas mit einem Brechungsindex  $n_{\text{Glas}}$ , zu einem optisch dünneren Medium, wie Luft mit dem Brechungsindex  $n_{\text{Luft}}$ , einen

und dem umgebenden Brechungsindex.

Der entscheidende Vorteil von WGM-basierten Sensoren gegenüber anderen Sensorprinzipien ist, dass das Licht auf kleinem Volumen sehr lange gespeichert und verstärkt werden kann. Es besteht somit eine lange Wechselwirkungszeit zwischen dem Licht und der zu detektierenden Messgröße. Wie lange das Licht im Resonator

Kratzer, kleine Partikel oder sonstige Rauheiten verursacht. Sie entstehen zum Beispiel bei der Herstellung oder durch Kontaminationen mit Staubpartikeln. Häufig wird Glas als Resonatormaterial eingesetzt, da damit besonders gute Oberflächenqualitäten möglich sind. Jedoch ist die Herstellung von qualitativ hochwertigen Glasresonatoren sowie das Vermeiden von Kontaminationen sowohl kosten- als auch zeitintensiv.

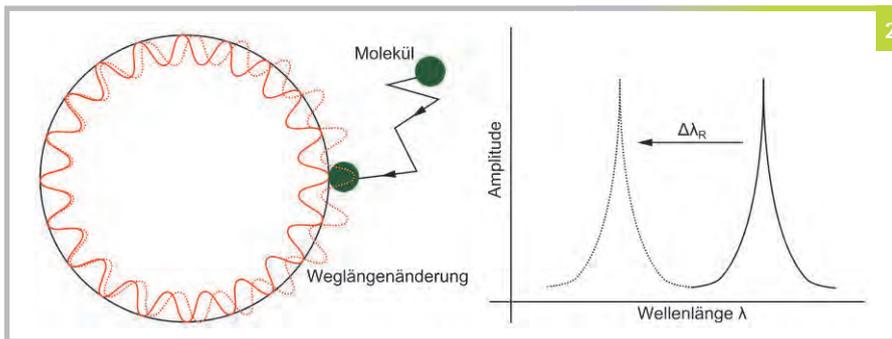


Abbildung 1  
Interne Totalreflexion des Lichts in einer Mikrokugel und einem Prisma. Licht, das unter einem flachen Winkel aus dem Glas auf die Oberfläche zur Luft auftritt, wird in das Glas zurückreflektiert.

Einfallswinkel  $\theta$  größer als dem Grenzwinkel  $\theta_c = \arcsin(n_{\text{Luft}}/n_{\text{Glas}})$  der Totalreflexion aufweist, siehe *Abbildung 1*.

Doch warum kann ein solcher WGM-basierter Resonator für die Detektion unterschiedlichster Messgrößen, wie Druck, Temperatur oder sogar einzelner Moleküle verwendet werden? Statt einer komplexen mathematischen Beschreibung ist auch eine anschauliche Erklärung hilfreich. Wie bereits erwähnt, ist eine Wellenlänge  $\lambda$  immer dann eine Resonanzwellenlänge  $\lambda_R$  eines Resonators, wenn sie einem Vielfachen  $N$  des optischen Weges entspricht. Wird eine Kugel als Resonator benutzt, hängt diese Weglänge von ihrem Radius  $R$  ab. Somit führt eine Veränderung des Radius  $\Delta R$ , zum Beispiel durch die Anlagerung eines Moleküls, zu einer Verschiebung in der Resonanzwellenlänge  $\Delta\lambda_R$ , siehe *Abbildung 2*. Tatsächlich hängt die Resonanzwellenlänge von vielen weiteren Faktoren ab, wie etwa der Resonatorgeometrie

verbleibt, beschreibt der Qualitätsfaktor. In WGM-Resonatoren erreicht dieser Werte von bis zu  $10^9$ . Dies entspricht zum Beispiel bei rotem Licht (mit einer Wellenlänge von 638 nm) und einem Resonatorradius von 20  $\mu\text{m}$  etwa  $5 \cdot 10^6$  Umläufen des Feldes im Resonator. Mit jedem Umlauf des Lichts um die Kugel wird dabei sozusagen wieder festgestellt, dass das zu messende Molekül auf der Oberfläche sitzt und den Umfang der Kugel vergrößert – mehr als eine Million Mal wird also in diesem Beispiel das eine Molekül durch den WGM-Sensor detektiert, so dass es sicher nicht »übersehen« wird. Für eine erfolgreiche praktische Anwendung von WGM-basierten Resonatoren müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden: Die Speicherzeit des Lichts und somit die Sensitivität des Resonators werden im Wesentlichen durch Streuverluste im Material begrenzt. Diese Streuverluste werden unter anderem durch Inhomogenitäten der Resonatoroberfläche wie

Unser Ziel war es daher, einen einfach herzustellenden, kostengünstigen und gegenüber Kontaminationen wenig anfälligen Sensor zu realisieren. Um dieses zu erreichen, sollte der Sensor polymer- statt glasbasiert sein. Problematisch bei der Verwendung von Polymeren ist, dass die Oberflächenqualität üblicherweise deutlich geringer als bei vergleichbaren Glassensoren ist. Um trotzdem gute Sensorsysteme realisieren zu können, verwenden wir nicht nur einen einzigen Resonator, sondern viele Resonatoren gleichzeitig und nutzen daher den sich ergebenden Multiplexvorteil [1] – also eine höhere Messsicherheit durch Vielfachmessung. *Abbildung 3* zeigt den aufgebauten Sensor schematisch. Kommerziell erhältliche Polymer-Kugeln aus PMMA, die einen Durchmesser im Bereich weniger 10 Mikrometer haben, werden auf einem dünnen PMMA-Plättchen (Substrat) platziert. Laserlicht wird mittels interner Totalreflexion im

Abbildung 2  
Die Anlagerung eines Biomoleküls – zum Beispiel eines Proteins – an die Oberfläche einer Mikrokugel führt zu einer Verlängerung des optischen Weges und kann durch eine Verschiebung der Resonanzwellenlängen detektiert werden.

Abbildung 3  
Schematische Darstellung des realisierten Sensors. Abhängig von der eingestrahnten Wellenlänge ändert sich das Intensitätsmuster der Kugeln.

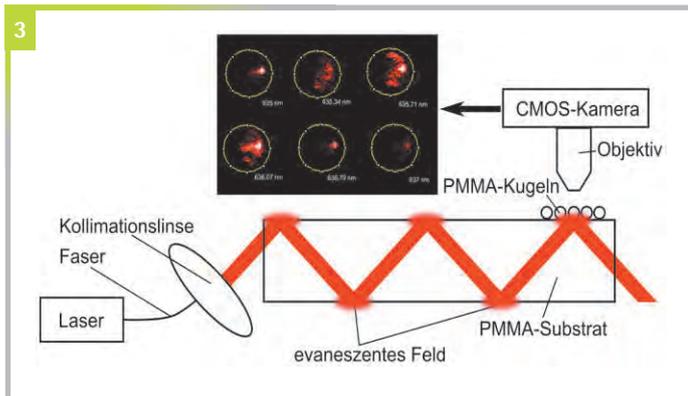


Abbildung 4  
Modenkarte für 10 unterschiedliche Kugeln. Die Bildnummer korreliert mit der eingestrahnten Wellenlänge. Die Bestimmung einer unbekanntes Wellenlänge (636 nm) erfolgt über das Minimum der Korrelationsfunktion.

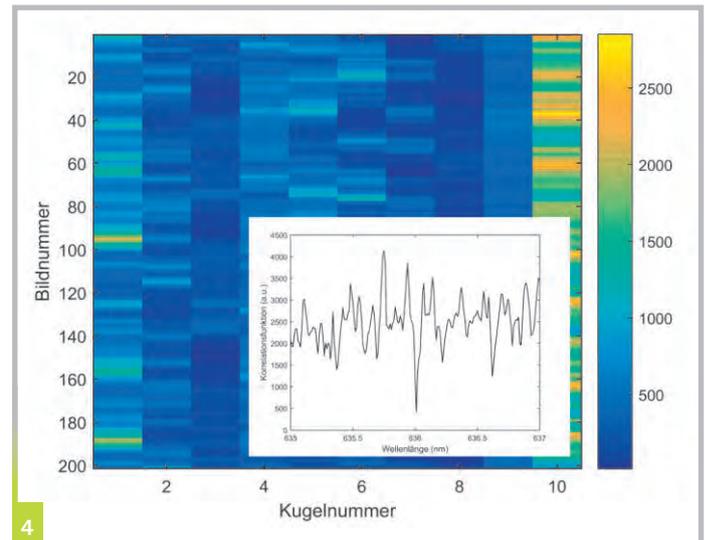
Substrat geführt und kann in den aufliegenden PMMA-Kugeln WGMs anregen. Da die Kugeln nicht alle gleich groß sind, findet nur bei bestimmten Kugeln eine Kopplung statt. Wird die eingestrahlte Wellenlänge variiert, werden andere Kugeln angeregt. Das heißt, dass sich abhängig von der eingestrahnten

Wellenlänge immer ein unterschiedliches Muster von angeregten und nicht angeregten Kugeln ergibt, siehe *Abbildung 3*. Diese Intensitätsverteilung kann nun mit einer handelsüblichen CMOS-Kamera, die sich oberhalb des Substrats befindet, detektiert werden.

Die Funktionsweise dieses Sensors lässt sich besonders gut am Beispiel der Bestimmung unbekannter Wellenlängen von elektromagnetischer Strahlung erläutern. Dafür muss der Sensor zunächst einmalig kalibriert werden: Das bedeutet, dass die eingestrahlte Wellenlänge durchgestimmt und bei jeder Wellenlänge ein Intensitätsprofil der Kugeln aufgenommen wird. Die Intensitätswerte der einzelnen Kugeln werden anschließend in einer so genannten Modenkarte gespeichert. Auf der x-Achse der Modenkarte wird die Kugelnummer aufgetragen und auf der y-Achse die Wellenlänge. *Abbildung 4* zeigt eine solche Modenkarte für 18 unterschiedliche Kugeln.

Um eine unbekanntes Wellenlänge zu bestimmen, wird das Intensitätsprofil der Kugeln bei dieser Wellenlänge aufgenommen und über eine Korrelationsfunktion mit der Modenkarte verglichen. Die Korrelationsfunktion hat ein Minimum bei der Wellenlänge, bei der das Intensitätsprofil der unbekanntes Wel-

messungen, ist es unter anderem notwendig, Feuchtigkeitsänderungen zu vermeiden. Dies ist entweder durch das Aufbringen von Schutzschichten oder durch das Verwenden mehrerer voneinander getrennter Kugelarrays möglich. Ein Sensorarray dient dann für die Temperaturmessung und ein weiteres Array wird



lenlänge mit einem Intensitätsprofil aus der Modenkarte am besten übereinstimmt, siehe *Abbildung 4*. Bei der Bestimmung anderer Messgrößen wie Temperatur oder Feuchtigkeit ist das Vorgehen ähnlich. Zunächst wird eine Modenkarte erstellt, sie enthält die Intensitätsprofile bei bekannten Temperaturen beziehungsweise Feuchtigkeiten. Über die Korrelationsfunktion kann anschließend das Intensitätsprofil bei einer unbekanntes Temperatur oder Feuchtigkeit mit der Modenkarte verglichen werden [2].

Das von uns entwickelte Sensorsystem ist somit einfach herzustellen, kostengünstig und vielseitig einsetzbar. Problematisch sind wie bei allen WGM-basierten Sensoren die auftretenden Querempfindlichkeiten. Um zum Beispiel Temperaturen zuverlässig zu

als Referenz verwendet. Für die Detektion bestimmter (Bio-)Moleküle ist es notwendig, den WGM-Sensor zu funktionalisieren, um eine spezifische Anlagerung der Moleküle zu ermöglichen.

In Zukunft soll das entwickelte Sensorsystem für breite Anwendungen in der Lebenswissenschaft und Analytik eingesetzt werden. Beispielsweise kann die Konzentration von Kontaminanten in Nahrungsmitteln oder in der Umwelt untersucht werden. Weiterhin eignet sich das System für den Einsatz in der Medizin, zum Beispiel beim Nachweis von Krankheiten. Voraussetzung hierfür ist aber, dass die verlässliche Herstellung der Sensorsysteme mittels hochdurchsatzfähiger Prozesstechnik realisiert und eine spezifische Funktionalisierung erreicht werden können.

## Literatur

- [1] Petermann, A. B., Varkentin, A., Roth, B., Morgner, U., Meinhardt-Wollweber, M. (2016). All-polymer whispering gallery mode sensor system. *Optics Express*, 24(6), 6052-6062. <https://doi.org/10.1364/OE.24.006052>
- [2] Petermann, A. B., Rezem, M., Roth, B., Morgner, U., Meinhardt-Wollweber, M. (2016). Surface-immobilized whispering gallery mode resonator spheres for optical sensing. *Sensors and Actuators A*, 252, 82-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2016.11.006>

**Dr. Ann Britt Petermann**

Jahrgang 1989, war von 2014 bis 2017 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Ihre Forschungsinteressen liegen im Bereich optischer Sensorik auf Basis von Resonatoren und auch Faser-Bragg-Gittern. Kontakt über: [vera.vollmert@hot.uni-hannover.de](mailto:vera.vollmert@hot.uni-hannover.de)

**Dr. Merve Wollweber**

Jahrgang 1976, ist seit 2010 Arbeitsgruppenleiterin für Laserspektroskopie und Lebenswissenschaften am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Ihre Forschungsinteressen reichen von der Optoakustik und Ramanspektroskopie bis hin zu Fasersensoren. Kontakt: [merve.wollweber@hot.uni-hannover.de](mailto:merve.wollweber@hot.uni-hannover.de)

**Prof. Dr. Bernhard Roth**

Jahrgang 1970, ist seit 2012 wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien und seit 2014 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, Fasersensorik, medizinische Optik, Bio- und Polymerphotonik sowie Optiksimulationen. Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)

**Prof. Dr. Uwe Morgner**

Jahrgang 1967, ist seit 2004 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2013 ist er Sprecher des Vorstandes des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der extrem kurzen Pulse aus Lasern sowie deren Anwendung in Biophotonik und Grundlagenforschung. Kontakt: [morgner@iqo.uni-hannover.de](mailto:morgner@iqo.uni-hannover.de)



## Join our Team

Die Digitalisierung unserer Welt ist nicht mehr aufzuhalten. Unsere Lösungen zur Erfassung und Nutzung exakter raumbezogener Daten sind ein unverzichtbarer Teil dieser Veränderung.

Werde auch **DU** ein Gestalter des digitalen Wandels!

Wir leben flache Hierarchien, flexible Arbeitszeiten und eine angenehme Arbeitsatmosphäre.

Bewirb Dich jetzt: [leica-geosystems.com/karriere](http://leica-geosystems.com/karriere)

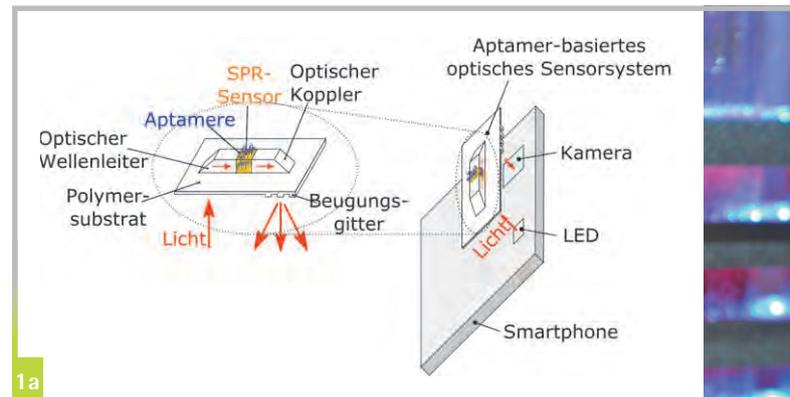
- when it has to be right **Leica**  
Geosystems

# Labordiagnostik für jedermann

## WIE SMARTPHONES DAS GESUNDHEITSWESEN REVOLUTIONIEREN KÖNNEN

Handliche multifunktionale Diagnosegeräte werden in Zukunft eine immer stärkere Rolle im Gesundheitswesen spielen. Ein Team vom Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien und der Technischen Chemie arbeitet an optischen Biosensoren, die auf ein Smartphone aufgesteckt werden können, um zukünftig eine patientennahe Labordiagnostik zu ermöglichen.

Ein Smartphone gehört mittlerweile für die meisten Menschen zum Alltag. So besaßen 2016 bereits 49 Millionen Deutsche ein Smartphone<sup>1</sup> und der weltweite Bestand wird für 2020 auf mehr als 2,87 Milliarden geschätzt<sup>2</sup>. Durch ihre globale Verbreitung und die rasante technologische Weiterentwicklung zu leistungsstärkeren Geräten werden Smartphones immer häufiger im Bereich der patientennahen Labordiagnostik eingesetzt. Externe elektrische Auswertegeräte für Smartphones, beispielsweise in Form von Blutzuckermessgeräten, sind bereits kommerziell verfügbar. Weitere Ansätze reichen von dem einfachen Abfotografieren eines Streifenschnelltests und der Auswertung mit einer Smartphone-App bis hin zur holografischen Mikroskopie. Dank des enormen Fortschritts in den optischen und photonischen Technologien rücken integrierte Ansätze in den Vordergrund, die dank der einzigartigen Eigenschaften des Lichts hochpräzise und spezifisch zum Nachweise von Krankheiten eingesetzt werden können. Diese Ansätze erschließen zudem Anwendungen in Telemedizin und vernetzter Medizin und eignen sich zur Bedienung durch Laien. Das könnte mittelfristig zu einer wahren Revolution in der Medizin führen: mobile und hochfunktionelle Diagnostikgeräte, für jedermann verfügbar und einsetzbar, vor



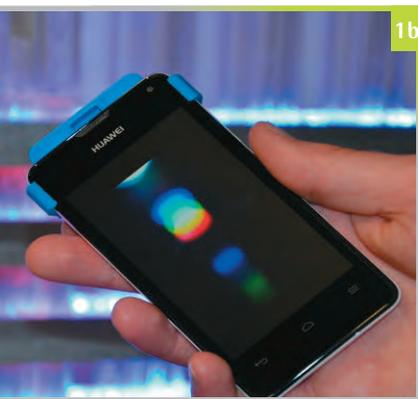
allem auch in abgelegenen oder weniger entwickelten Gebieten und Ländern, in Katastrophengebieten oder bei der Kontrolle von chronischen Krankheiten durch die Patienten zuhause. Damit einhergehen auch enorme Zeit- und Kosteneinsparungen für Ärzte und Patienten sowie das Gesundheitswesen im Allgemeinen.

Ein hochfunktionales optisches System zur Anwendung mit einem Smartphone wird derzeit am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) gemeinsam mit dem Institut für Technische Chemie (TCI) entwickelt. Durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und des Europäischen Sozialfonds (ESF) wird in einem EXIST-Forschungstransfervorhaben ein Smartphone-gestütztes optisches Schnelltestverfahren entwickelt, das als vielseitige Plattform im Bereich der pa-

tientennahen Labordiagnostik etabliert werden soll. Der Fokus liegt auf der Bereitstellung von spezifischen Schnelltestverfahren für diagnostische Anwendungen, die zunächst am Beispiel ausgewählter medizinisch relevanter Marker wie CRP (C-reaktives Protein) und BNP (B-typ natriuretisches Peptid) realisiert werden sollen. CRP ist ein Entzündungsmarker, der zur Differenzierung von bakteriellen und viralen Erkrankungen eingesetzt wird, um eine unnötige Antibiotikagabe zu vermeiden und der zudem in der Verlaufskontrolle chronisch entzündlicher Erkrankungen breiten Einsatz findet. Hingegen weisen erhöhte BNP-Werte auf Schädigungen am Herzen und insbesondere auf eine Herzinsuffizienz hin. Die Herzinsuffizienz ist eine der häufigsten internistischen Erkrankungen in Deutschland und einer der häufigsten Beratungsanlässe in einer allgemein medizinischen Praxis.

### Diagnostik mit dem Handy

Das Konzept des Smartphone-gestützten Schnelltest-Sensors ist sehr simpel, siehe *Abbildung 1*. Die Grundlage des Sensorsystems bildet ein funktionalisierter, planar-polymer-optischer Wellenleitersensor auf Basis von Oberflächenplasmonenresonanz (SPR). Bei der SPR werden freie Elektronen in einem Metall wie Gold oder Silber an einer Grenz-



funktionalisierung eingesetzt, da diese im Vergleich zu Antikörpern mehrere Vorteile bieten: Sie sind langzeitstabil, pH- und temperaturunempfindlich und können vollsynthetisch hergestellt werden. Das finale SPR-Sensorsystem soll als eine auf ein Smartphone aufsteckbare Schnelltest-Einheit ausgebildet sein. Im Gehäuse des aufsteckbaren Schnelltests ist auch ein mikrofluidisches System integriert, das eine hygienische Probenhandhabung sowie den automatischen Probentransport hin zur Sensoreinheit ermöglicht. Der Sensor kann so beispielsweise zur Blutanalyse eingesetzt und ähnlich angewendet werden wie ein handelsüblicher Insulintest. Zur Blutanalyse wird ein Finger mit einer kleinen Nadel angestochen und der entstehende Blutstropfen auf den auf das Smartphone aufgesteckte Sensor gegeben. Der Sensor wird anschließend mittels Smartphone-App ausgelesen und das Ergebnis auf dem Display angezeigt.

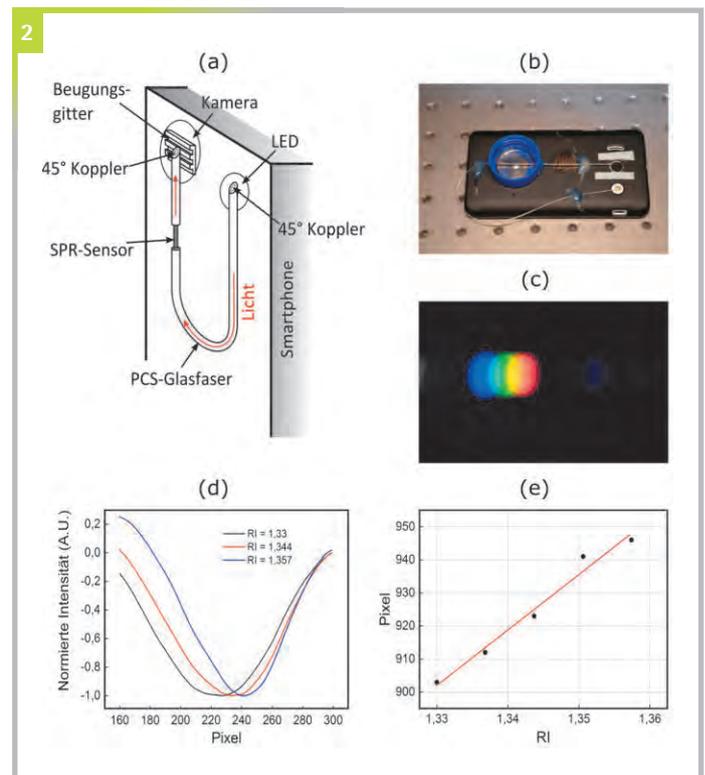
### Der neue Ansatz für Biosensoren: Licht und Elektronen im Zusammenspiel

fläche mit beispielsweise Luft von Licht einer bestimmten Wellenlänge (Lichtfarbe) zu Oszillationen angeregt. Wird weißes Licht in den SPR-Sensor gekoppelt, wird eine bestimmte Lichtfarbe herausgefiltert. Diese hängt unter anderem auch von einer im Sensor befindlichen Flüssigkeit ab. Zusätzlich kann der Metallfilm zum Beispiel durch Aptamere oder Antikörper funktionalisiert werden. Durch Bindung des nachzuweisenden Analyten an die Oberflächenfunktionalisierung des Sensors wird eine Änderung der SPR herbeiführt, welche mit Hilfe der LED und der Kamera des Smartphones spektral detektiert werden kann. Die Spezifität des Sensors wird durch die verwendete Oberflächenfunktionalisierung bestimmt und kann somit flexibel für vielfältige Anwendungen ausgelegt werden. Im Rahmen unseres Vorhabens werden Aptamere zur Oberflächen-

Die prinzipielle Realisierbarkeit der neuartigen Sensorplattform konnte im Rahmen von systematischen Studien überzeugend nachgewiesen werden. Dazu wurde zunächst untersucht, ob ein optischer SPR-Wellenleitersensor mit Hilfe eines herkömmlichen Smartphones betrieben und verlässlich ausgewertet werden kann (Schematische Darstellung in *Abbildung 2a*). Für das Experiment wurde eine 25 cm lange, optische Plastic Cladding Silica (PCS)-Glasfaser verwendet. Der SPR-Sensor wurde durch eine etwa 1 cm lange Silberbeschichtung des 400  $\mu\text{m}$  Glasfaserkerns realisiert. Diese Beschichtung ist nur wenige

10 nm dick und wurde chemisch mit Hilfe einer sogenannten Tollensprobe realisiert. Des Weiteren wurden die Enden der Glasfaser in einem Winkel von 45 Grad angeschliffen und jeweils vor der Smartphone-LED beziehungsweise -kamera mit Hilfe von Klebstoff fixiert (*Abbildung 2b*). Anhand eines Beugungsgitters, das zwischen Glasfaserende und Smartphone-Kamera platziert wurde,

Abbildung 1 Konzept des Smartphone-gestützten optischen Schnelltestverfahrens (a) und eine mögliche Gestaltungsform des Endproduktes (b).



konnte das Spektrum des SPR-Sensors auf der Smartphone-Kamera abgebildet werden (*Abbildung 2c*). Durch die dadurch vorgenommene spektrale Zerlegung kann das SPR-Signal detektiert und eine Änderung der Umgebungsbrechzahl durch Verschiebung der SPR-Wellenlänge gemessen werden (*Abbildung 2d* und *Abbildung 2e*). Mit diesem sehr einfachen System konnte bereits eine Empfindlichkeit von  $5,96 \cdot 10^{-4}$  Brechzahlseinheiten/Kamerapixel erzielt werden<sup>3</sup>. Die Empfindlichkeit des Sensors für Brechungsindex-

Abbildung 2 Vorarbeiten zum optischen Sensorsystem für Smartphones: SPR-Sensorsystem bestehend aus diskreten optischen Komponenten (a, b); Spektrum des SPR-Sensorsystems aufgezeichnet mit der Smartphone-Kamera (c); Detektion der SPR mit Hilfe des Beugungsgitters und der Smartphone-Kamera (d); Nachweis, dass die spektrale Verschiebung der SPR aufgrund von Umgebungsbrechzahländerungen mit Hilfe des Smartphones detektiert werden kann (d, e).

unterschiede ist ein direktes Maß dafür, in welchen geringen Mengen noch erkannt werden können. Damit der Sensor jedoch bestimmte Stoffe selektiv über den Brechungsindex nachweisen kann, muss seine Oberfläche zusätzlich noch mit einer Funktionalisierungsschicht versehen werden, an die die zu detektierenden Stoffe andocken können und so den Brechungsindex verändern.

### Simple Prägen für komplexe Sensoren

Für die Herstellung der Sensoren sind zwei Faktoren entscheidend: Erstens muss der Herstellungsprozess für die Massenproduktion tauglich und, zweitens, müssen kleinste Strukturen im Sub-Mikromaßstab herstellbar sein, die mehr als hundertmal kleiner als das menschliche Haar sind. Aufgrund dieser Randbedingungen setzen wir thermische Imprintverfahren ein,

Kraft gepresst, anschließend gekühlt und vom Polymer entformt. Als Plastikmaterial können handelsübliche Materialien wie beispielsweise Plexiglas® verwendet werden. Für die Herstellung des planaroptischen Plasmonensensors werden kleine Kanäle mit einem rechteckigen Querschnitt von  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$  in dünne Kunststoffolien geprägt und anschließend mit Epoxidharzkleber gefüllt. Nach dem Aushärten dient das Epoxidharz als Lichtwellenleiter, in dem Licht geführt werden kann. Um plasmonische Sensoren herzustellen, wird zudem eine  $40 \text{ nm}$  ( $0.00004 \text{ mm}$ ) dicke Goldschicht auf den Sensor abgeschieden.



#### Dr. Kurt Bremer

Jahrgang 1982, studierte Elektronik an der Hochschule Wismar und promovierte an der University of Limerick, Irland. Nach einem Postdoc an der City University London, England, arbeitet Kurt Bremer als Nachwuchsgruppenleiter am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Kontakt: [kort.bremer@hot.uni-hannover.de](mailto:kort.bremer@hot.uni-hannover.de)

#### DNA Strukturen sorgen für Spezifität und Flexibilität

Um das Sensorsystem in eine diagnostische Plattform zu überführen, ist eine Funktionalisierung der SPR-Sensoroberfläche notwendig. Dazu werden Aptamere verwendet.

Aptamere ist dabei wesentlich für die Spezifität des Sensorsystems: Die Struktur des Aptamers ist komplementär zu

Abbildung 3  
Das Aptamer wird auf dem Sensor immobilisiert und ein komplementäres Oligonukleotid wird an das Aptamer hybridisiert. Dieses Oligonukleotid wird durch das Target des Aptamers verdrängt, wodurch die optische Dichte über dem Sensor verringert wird (a). Dies kann als Verschiebung der Resonanz ausgelesen werden (b–d).

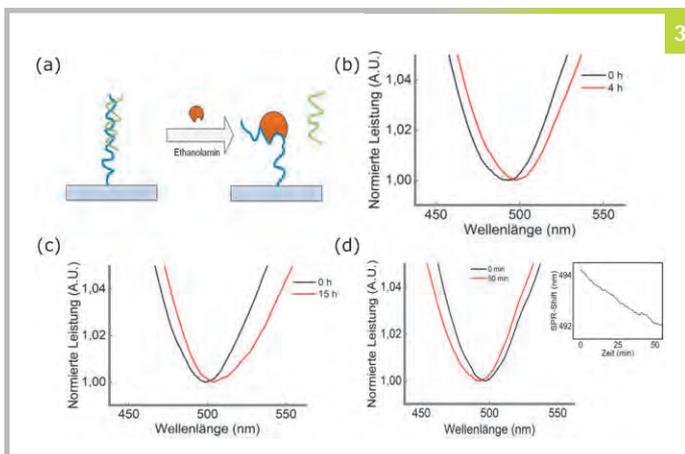
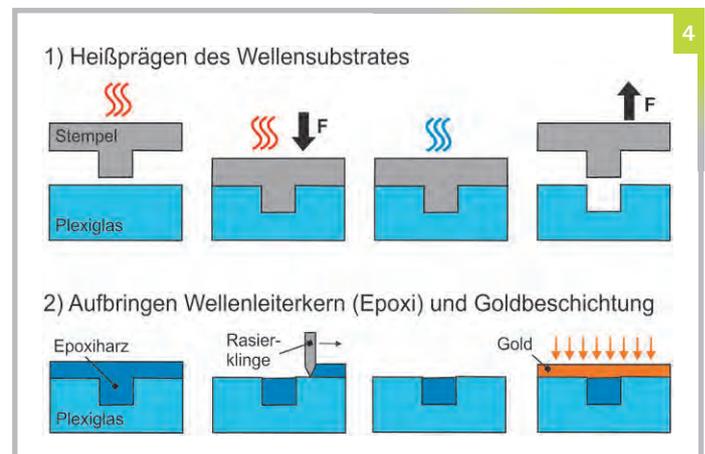


Abbildung 4  
Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Wellenleiter mit Goldschicht, dargestellt ist der Wellenleiterquerschnitt: 1) Heißprägen einer Grabenstruktur; 2) Füllen, Abziehen und Aushärten des Wellenleiterkerns aus Epoxidharz und anschließende Goldbeschichtung.

mit denen beispielsweise auch Hologramme auf Führerschein und Ausweisen hergestellt werden. Bei dem Verfahren wird eine inverse Masterstruktur, in unserem Fall aus Silizium, gezielt erhitzt und in ein thermisch formbares Polymer beziehungsweise Plastikmaterial mit einer definierten



Bei Aptameren handelt es sich um kurze synthetische Oligonukleotide, die aus denselben Grundbausteinen bestehen wie unsere Erbsubstanz. Diese DNA Moleküle sind in der Lage, sich in vielfältige, aber definierte dreidimensionale Strukturen zu falten. Die dreidimensionale Struktur der

der Struktur der Substanz, die mit dem Sensor nachgewiesen werden soll. Somit passen Aptamer und Zielstruktur zueinander wie ein Schlüssel in sein Schloss, wogegen andere Substanzen nicht vom Aptamer gebunden werden. Im Fall des Nachweises von diagnostisch relevanten Proteinen



#### Dr. Johanna-Gabriela Walter

Jahrgang 1975, studierte Chemie an der Leibniz Universität Hannover und ist Leiterin der Arbeitsgruppe Aptamere am Institut für Technische Chemie. Schwerpunkt der Arbeiten ist die Entwicklung von Aptamer-basierten Methoden für verschiedene biotechnologische und medizinische Anwendungen. Kontakt: [walter@iftc.uni-hannover.de](mailto:walter@iftc.uni-hannover.de)



#### Dr.-Ing. Maik Rahlves

Jahrgang 1978, ist seit 2011 Leiter der Arbeitsgruppe »Angewandte Optik« am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen umfassen Mikroskopie, Diffraktive Optik, Holographie und Polymerphotonik. Kontakt: [maik.rahlves@hot.uni-hannover.de](mailto:maik.rahlves@hot.uni-hannover.de)



#### Dipl.-Kffr. Rima Rifai

Jahrgang 1991, studierte BWL mit der Vertiefung Marketing an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald. Seit 2016 arbeitet sie am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) innerhalb eines mit dem EXIST-Forschungstransfer geförderten Gründerprojekts. Kontakt: [rima.rifai@hot.uni-hannover.de](mailto:rima.rifai@hot.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr. Bernhard Roth

Jahrgang 1970, ist seit 2012 wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien und seit 2014 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, Fasersensorik, medizinische Optik, Bio- und Polymerphotonik sowie Optiksimulation. Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)

führt die Bindung des Proteins an das Aptamer zu einer Erhöhung der optischen Dichte auf dem Sensor, welche sich als Verschiebung der SPR nachweisen lässt.

Um Aptamere auf dem SPR Sensor immobilisieren zu können, wird die Goldoberfläche zunächst mit einer selbst-assemblierenden Monolage (SAM) aus organischen Thiohlen beschichtet, an die anschließend das Aptamer chemisch gekoppelt wird. In Versuchen wurde dies mit einem Aptamer gegen das kleine Molekül Ethanolamin demonstriert. Da es sich bei Aptameren um DNA Moleküle handelt, ist es möglich ein komplementäres Oligonukleotid zu entwerfen, welches innerhalb des Aptamers an derselben Position bindet wie die eigentliche Zielstruktur des Aptamers. Dies ermöglicht einen einfachen kompetitiven Assay, bei dem die Zielstruktur das Oligonukleotid vom Aptamer verdrängt. Geschieht diese Verdrängung an der

Oberfläche des SPR Sensors, führt sie zu einer Abnahme der optischen Dichte über dem Sensor und somit zu einer Verschiebung des SPR Signals. So konnte auch die Detektion eines sehr kleinen Moleküls (Molekulargewicht Ethanolamin: 61 Da) realisiert werden, woraus sich perspektivisch auch diagnostische Anwendungen für die Detektion kleiner Moleküle (zum Beispiel bei der Bestimmung von Hormonen) ergeben.

Da Aptamere gegen verschiedene Zielstrukturen, wie Proteine und kleine Moleküle, aber auch ganze Zellen generiert werden können, können durch Verwendung entsprechender Aptamere Sensoren für unterschiedlichste Anwendungen flexibel bereit gestellt werden.

#### Patientennahe Diagnostik für alle

Der große Vorteil des neuen SPR-Sensorsystems ist, dass es

keine zusätzlichen optischen und elektrischen Komponenten für den Betrieb benötigt und lediglich mit der LED und Smartphonekamera betrieben werden kann. Hierdurch ergeben sich ein erhebliches Miniaturisierungspotenzial sowie ein extrem einfach zu realisierender Aufbau, der lediglich aus einem optischen Wellenleitersensor, zwei optischen Kopplern und einem Beugungsgitter besteht. Zukünftig könnte das Sensorsystem zum Beispiel in die Smartphone-Schutzhülle integriert oder als polymeres Einwegsensorsystem in hohen Stückzahlen hergestellt werden. Je nach Funktionalisierung der SPR-Sensoroberfläche ist es möglich, das System zum Nachweis von diagnostischen Biomarkern im Bereich der patientennahen Labor Diagnostik einzusetzen. Auch Anwendungen in der Veterinärmedizin, der Lebensmittel- und Wasseranalytik sowie der Qualitätskontrolle in hochmodernen Produktionsumgebungen sind denkbar.

#### Verweise

- [1] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>
- [2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/309656/umfrage/prognose-zur-anzahl-der-smartphone-nutzer-weltweit/>
- [3] K. Bremer, B. Roth, »Fibre optic surface plasmon resonance sensor system designed for smartphones«, *Opt. Express* 23, 17179–17184 (2015)

# Mikroplastik im Trinkwasser

## ONLINE-KONTROLLE FÜR TRINKWASSERVERARBEITENDE BETRIEBE

Mikroplastik findet sich mittlerweile überall – sogar in unserem Trinkwasser. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Instituts für Quantenoptik und des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien (HOT) an der Leibniz Universität Hannover sind ein wichtiger Teil des Verbundprojekts OPTIMUS – einem Konsortium aus Unternehmen der Umweltmesstechnik, des Laserbaus sowie besorgten Trinkwasserverarbeitern aus ganz Deutschland – , das erstmals eine Online-Kontrolle auf Mikroplastik am fließenden Wasser ermöglichen wird.

Mikroplastik – für die meisten ist das gleichbedeutend mit den mikroskopisch kleinen Plastikperlen, die als schonendes Abriebmittel Zahncremes und Peelingprodukten beigemischt werden. Tatsächlich aber ist Mikroplastik viel mehr. Als Oberbegriff fasst es Kunststoffpartikel kleiner als 5 mm mit unterschiedlichsten Formen, Größen und Eigenschaften zusammen. Es entsteht zum Beispiel als unregelmäßige Teilchen durch Zerkleinerung oder Abnutzung größerer Plastikteile, als Krümel aus Reifen- und Pfannenabrieb, als Fasern beim Waschen von Kunst- und Mikrofaserstoffen zum Beispiel in Sport- und Outdoorbekleidung oder Fleece. Es wird bereits in Mikroform produziert und in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt, sei es in der bereits genannten Kosmetik zum Peeling oder aber als Stabilisator in Schmiermitteln. Die kleinsten dieser Partikel können durch das Verdau-

ungssystem ins Gewebe gelangen und hormonell wirksame Schadstoffe abgeben. In Muscheln und Fischen wurden bereits erhebliche Konzentrationen gefunden und damit einhergehende Entzündungsprozesse nachgewiesen. Besorgniserregend, da Mikroplastik im Wasser aller Kontinente und Meere nachgewiesen wurde. Die winzigen Kunststoffpartikel finden sich sogar im Grund- und Trinkwasser und somit in fast allen Lebensmitteln – vom Bier bis zum Brötchen, vom edlen Meersalz bis zum Krabben Salat. Und damit auch in uns.

Die Substanzpalette von Mikroplastik umfasst dabei so verschiedene Stoffe wie reißfestes Nylon, gummiartiges Silikon, weiches Polyethylen und sprödes Acrylglas. Es können schwimmende Styroporkügelchen aus Isolierverpackungen sein oder Teflonkrümel aus Pfannenabrieb, die

aufgrund ihres hohen Eigengewichts sofort sinken oder aber auch nur wenige Mikrometer dünne Fasern von der neuen Jogginghose oder dem seifenfreien Spültuch. Allen ist gemein, dass sie in der Umwelt kaum abbaubar sind und Umweltgifte wie Pestizide oder Weichmacher aufnehmen können. Außerdem sind viele besonders häufige Kunststoffsorten perfekte Aufwuchsflächen für Bakterien und Keime, so dass die Partikel auch oft von einem wahren Mikrobenrasen überzogen sind. Deshalb führen Mikroplastikpartikel im Wasser zu punktuellen Belastungsspitzen mit Giftstoffen und Keimen, selbst wenn das Wasser insgesamt die Grenzwerte für sauberes Trinkwasser einhält. Ob und welche Auswirkungen das auf Mensch und Tier hat, ist immer noch Gegenstand intensiver Forschung. Erste Erkenntnisse deuten aber darauf hin, dass gerade die kleineren Mikroplastik-

**Ramanspektroskopie** ■ Für Nicht-Physiker klingt das zunächst einmal reichlich exotisch, ist im Endeffekt aber nichts anderes als das Ausnutzen einer seltenen Form von Lichtstreuung. Wird Licht an Molekülen gestreut, so interagiert ein verschwindend geringer Prozentsatz der streuenden Photonen – etwa eins in 100 Millionen – mit den Schwingungen des Moleküls und wird dadurch in seiner Farbe verändert. Die jeweilige Farbveränderung wird durch die involvierte Molekülschwingung bestimmt, so dass sich über die neue Farbe des betroffenen Photons direkt Auskunft über die Schwingung des Moleküls ergibt. Wird nun intensives Licht nur einer Farbe, zum Beispiel eines grünen Lasers, zur Beleuchtung benutzt und das normal gestreute, grüne Licht mit einem starken Filter geblockt, verraten die übrigbleibenden Farblinien die im beleuchteten Molekül vorhandenen Schwingungen und damit seinen Aufbau. Raman Spektroskopie ermöglicht daher einen rein optischen, das heißt kontakt- und präparationsfreien Zugang zur chemischen Zusammensetzung von Stoffen auf molekularer Ebene.

partikel aufgenommen und im Gewebe eingelagert werden können.

Solange nicht-biologisch abbaubare Kunststoffe im Alltag großflächig Verwendung finden, entsteht weiter Mikroplastik, das in die Umwelt, unser Trinkwasser und damit unsere Lebensmittel gelangt. Um sichere Lebensmittel zu gewährleisten, ist daher eine ständige Kontrolle des Trink-

wassers auf Mikroplastik erforderlich. Dabei sind die Kunststoffsorte und die Anzahl, Größe und Form der Partikel entscheidend, um gezielt Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, die die Qualität und damit den Geschmack des Endprodukts unberührt lassen. Stichprobenentnahmen bieten hier nicht genügend Sicherheit, so dass eine echte Online-Kontrolle am fließenden Wasser erfolgen sollte.

Dazu müssen die Partikel aber in einem strömenden, durchaus wandelbaren Medium – unserem Trinkwasser – vor einem Hintergrund erlaubter Partikel und Substanzen zuverlässig erkannt werden und zwar selbst dann, wenn sie chemisch verunreinigt oder mit Bakterien bewachsen sind.

Das zu erreichen, hat sich das seit März 2016 vom Bundesforschungsministerium geförder-

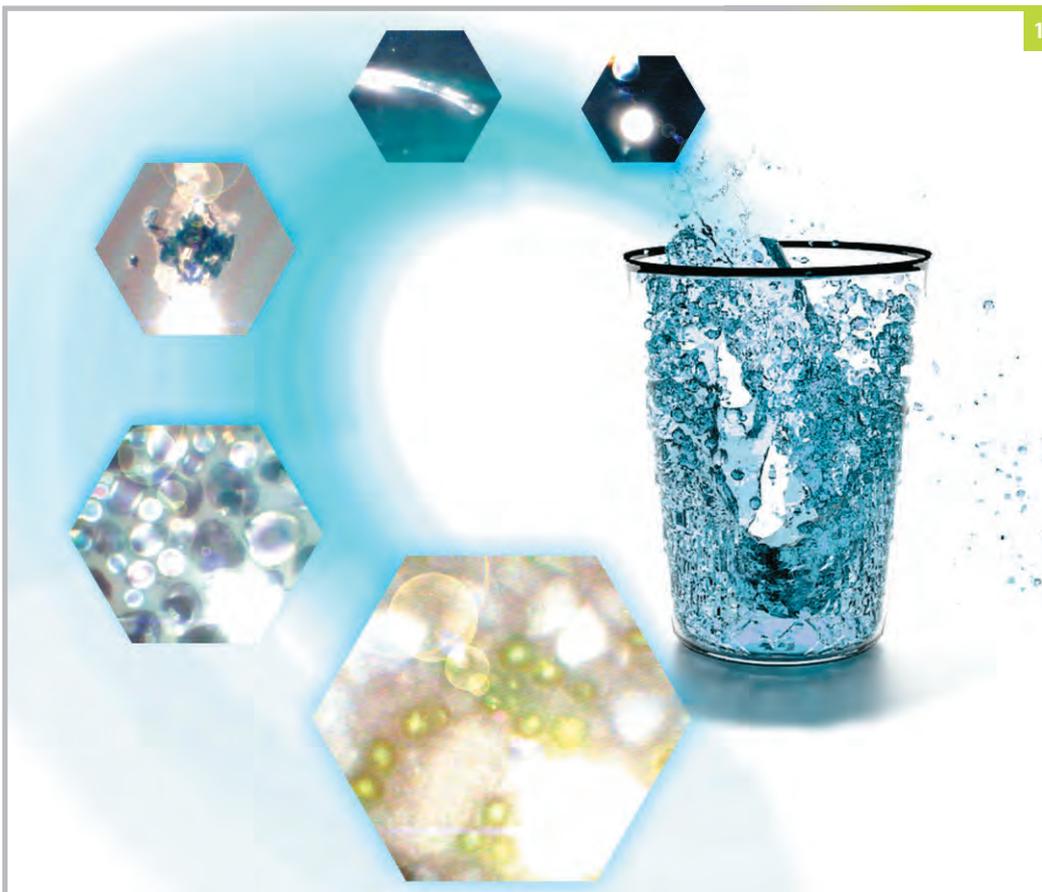


Abbildung 1  
Mikroplastik im Trinkwasser –  
viel mehr als Mikroperlen.  
Quelle: HOT

**Holografische Mikroskopie** ■ auch **Volumenmikroskopie** genannt, wird ebenfalls mit Laserlicht gemacht. Dabei wird ein Laserstrahl in einen Referenz- und einen Messstrahl geteilt. Der Messstrahl wird durch das auf Partikel zu untersuchende Volumen gelenkt, während der Referenzstrahl daran vorbeigeführt wird. Werden die beiden Strahlen im Anschluss daran wieder überlagert, entsteht ein Interferenzmuster, aus dem die Form und Lage des Partikels computergestützt berechnet werden kann. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der klassischen Mikroskopie ist, dass ein viel größeres Volumen überwacht werden kann und insbesondere die Ebene, in der sich das beobachtete Partikel befindet, vorher nicht bekannt sein muss.

te Verbundprojekt OPTIMUS auf die Fahnen geschrieben. OPTIMUS ist ein Konsortium aus Unternehmen der Umweltmesstechnik und des Laserbaus, besorgten Trinkwasserverarbeitern aus ganz Deutschland sowie dem Institut für Quantenoptik und dem Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) an der Leibniz Universität Hanno-

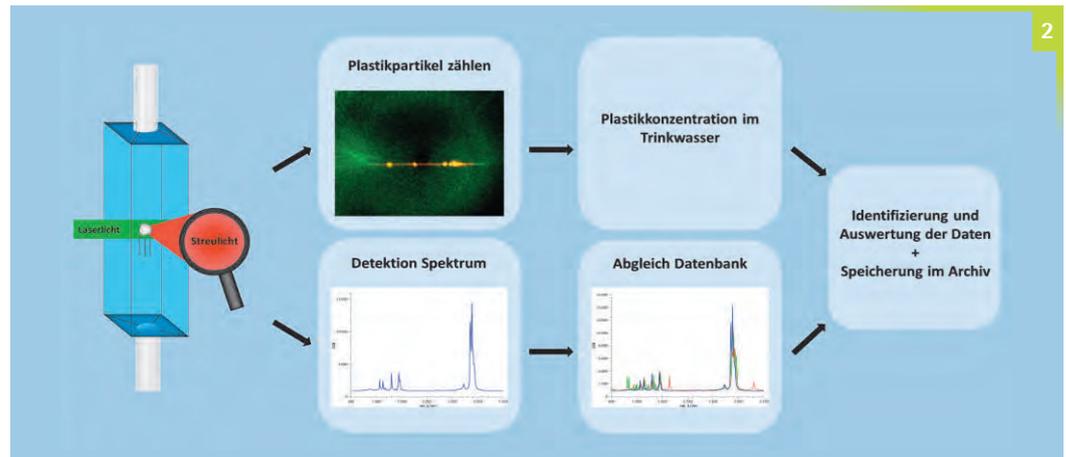


Abbildung 2  
Mikroplastiknachweis in fließendem Trinkwasser – Messprinzip.  
Quelle: HOT

ver, das sich insbesondere mit seiner Expertise in angewandter Ramanspektroskopie für die Kunststofferkennung im Fluss einbringt.

Die Trinkwasserkontrolle erfolgt dabei in zwei Stufen: In der ersten Stufe, die maßgeblich am HOT entwickelt wird, werden im Wasser transportierte Partikel erkannt, gezählt und mittels Ramanspektroskopie im Vorbeifließen auf ihren Kunststoffgehalt untersucht, während die Form der als Mikroplastik identifizierten Partikel mittels holografischer Mikroskopie in der zweiten Stufe bestimmt wird.

Der Grundaufbau ist dabei denkbar einfach gehalten, schon um Stabilität, Erreichbarkeit und einfache Bedienung durch nichtakademisches Personal zu ermöglichen. Zu untersuchendes Wasser wird aktiv durch eine verwirbelungsfreie Flusszelle gepumpt und dabei ständig mit einem Laser durchleuchtet. Das gestreute Licht wird dann rund um die Uhr automatisch mittels Ramanspektroskopie analysiert. Kunststoffe haben aufgrund ihrer vernetzten Molekülstruktur besonders intensive, kontrastreiche Ramanspektren, so dass auch kleinste Partikel erfasst und durch Abgleich mit einer Kunststoff-Ramanspektrendatenbank identifiziert

werden können. Für die als Mikroplastik identifizierten Partikel wird dann vollautomatisch die zweite Stufe aktiviert und Größe und Form des Mikroplastiks bestimmt, so dass das geplante Gerät dem Anwender alle Informationen zur Hand gibt, um die Quelle des Mikroplastiks einzugrenzen und geeignete Reinigungsmaßnahmen ergreifen zu können.

Parallel zur Ramanspektroskopie wird die Anzahl der durch die Flusszelle strömenden Partikel mit Hilfe einer einfachen Kamera gezählt und diese Partikel mit einer Detektionszeit versehen, so dass sie und ihre archivierten Ramanspektren sowie die in der zweiten Stufe mittels holografischer Mikroskopie bestimmte Partikelform eindeutig zugeordnet werden können. Insbesondere entsteht so auch ein Alarmkriterium, falls die Partikelanzahl pro Liter – von Mikroplastik oder allgemein aller Partikel – einen eingestellten Höchstwert überschreitet, ab dem das Wasser nicht mehr verwendet werden soll.

Die Fragen, die das HOT dabei für eine praktische Anwendung beantworten muss, sind vielfältig:

- Wie wirken Farbstoffe, Weichmacher und andere

chemische Beimengungen im Kunststoff auf die Detektierbarkeit von Mikroplastik im Trinkwasserstrom?

- Welchen Einfluss hat Bakterienbewuchs auf den Partikeln?
- Wie geht man mit nicht-kritischen Beimengungen wie Sand, Rostpartikeln oder Mikroalgen um, die alle ähnliche Größen und Formen aufweisen?
- Spielen die unterschiedlichen Trinkwasserzusammensetzungen eine Rolle?
- Wie wirkt sich eine längere Verweildauer des Mikroplastiks in der Umwelt auf die Partikel aus?

Und natürlich sind all diese Fragen abhängig von der Kunststoffsorte.

Es gibt also noch viel zu tun, um nach Abschluss des Projekts einen tragbaren, vielseitig anwendbaren und dennoch auch für kleinere Betriebe bezahlbaren Trinkwasser-Monitor auf den Markt zu bringen, der gerade diesen Unternehmen, die sich die aufwändigen Laboruntersuchungen nicht leisten können, ein Mittel an die Hand geben wird, etwaige Mikroplastikquellen in ihrem Fertigungszyklus aufzuspüren oder aber die Mikroplastikfreiheit ihrer Produkte zu garantieren.



**Dr. Ann-Kathrin Kniggendorf**  
Jahrgang 1972, ist seit 2011 Teil des wissenschaftlichen Stabes am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Ihre Forschungsinteressen liegen im Bereich angewandter Laser- und Raman-spektroskopie sowie dem Einsatz optischer Technologien in den Umwelt- und Lebenswissenschaften. Seit 2016 bearbeitet Sie das Projekt OPTIMUS am HOT. Kontakt: [ann.kathrin.kniggendorf@hot.uni-hannover.de](mailto:ann.kathrin.kniggendorf@hot.uni-hannover.de)



**Christoph Wetzel, B. Sc.**  
Jahrgang 1992, studiert an der Leibniz Universität Hannover Physik und ist seit 2017 als Masterand am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien im Projekt OPTIMUS tätig. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Biophotonik, Laserspektroskopie und Optik. Kontakt: [christoph.wetzel@hot.uni-hannover.de](mailto:christoph.wetzel@hot.uni-hannover.de)



**Michael Tomanek, B. Sc.**  
Jahrgang 1991, ist seit 2011 Physikstudent an der Leibniz Universität Hannover und seit Anfang 2017 als Masterand am Hannoverschen Institut für Optische Technologien tätig. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, medizinische Optik sowie Bio- und Polymerphotonik. Kontakt: [michael.tomanek@hot.uni-hannover.de](mailto:michael.tomanek@hot.uni-hannover.de)



**Prof. Dr. Bernhard Roth**  
Jahrgang 1970, ist seit 2012 wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien und seit 2014 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, Fasersensorik, medizinische Optik, Bio- und Polymerphotonik sowie Optiksimation. Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)



HANNOVER

### 20 Jahre Partner-Hotel der Leibniz Universität Hannover

**42 moderne Zimmer** ■ **Gute Anbindung zu allen Fakultäten!**  
UNI-Sonderpreise: ■ Classic Einzelzimmer 72,00 Euro  
■ Classic Einzelzimmer Garten 79,00 Euro  
■ Doppel-/Zweibettzimmer 98,00 Euro  
■ Inklusive Vital-Frühstücksbuffet und W-Lan  
*Erfragen Sie unsere Gruppenrabatte!*

#### Hotel in Herrenhausen

Markgrafstraße 5  
30419 Hannover  
Tel.: 0511 - 7907 600  
Fax: 0511 - 7907 698  
[info@hotel-in-herrenhausen.de](mailto:info@hotel-in-herrenhausen.de)  
[www.hotel-in-herrenhausen.de](http://www.hotel-in-herrenhausen.de)

»Schlüsselerlebnisse gesucht!«

Nour, 19 Jahre, Ägypten

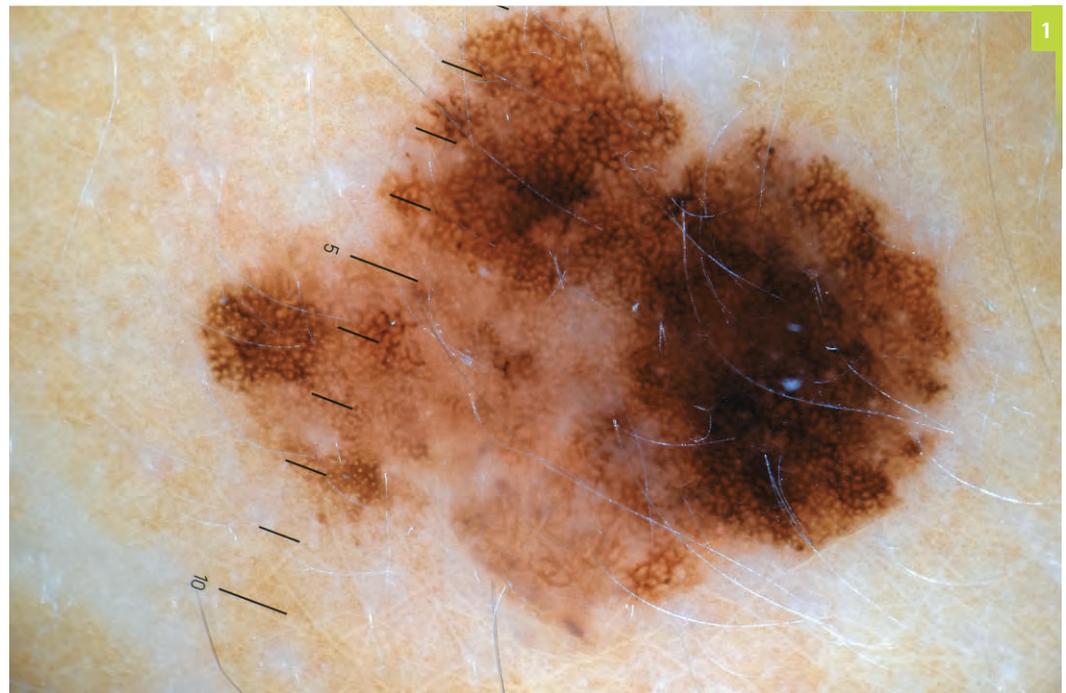
Internationale Studierende suchen Wohnraum  
E-Mail: [zimmer@studentenwerk-hannover.de](mailto:zimmer@studentenwerk-hannover.de)

/NiTIAT|:vE  
W!SS€n5(HΔ°FT  
Hannover

# Nur ein Leberfleck!

## ODER DOCH HAUTKREBS?

Das maligne Melanom – der schwarze Hautkrebs – ist eine der gefährlichsten Krebsarten, da sich bereits früh Metastasen bilden können. Am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) wird ein handgeführtes, optisches Messsystem entwickelt, mit dem verdächtige Hautläsionen verlässlich diagnostiziert und falls vorhanden, das Tumorstadium ermittelt werden kann – erstmals ohne chirurgischen Eingriff.



Das maligne Melanom der Haut (schwarzer Hautkrebs) ist der gefährlichste Hautkrebsartyp und eine der gefährlichsten Krebsarten überhaupt, da es bereits in einem beschwerdefreien Stadium und bei kleiner Tumorgöße metastasieren kann. Für Patienten im Stadium der Fernmetastasierung, das heißt bei Tochtertumoren in anderen Organen, liegen die 5-Jahres-Überlebensraten unter zehn Prozent und auch neuere Therapieansätze können keine echte Heilung erzielen. In frühen Tumorstadien sind die Heilungschancen nach vollständiger Entfernung (Exzision) des Melanoms hingegen sehr gut. Das im Zuge

der klinischen Diagnostik vermutete Stadium eines malignen Melanoms entscheidet darüber, wie viel gesundes Gewebe sicherheitshalber bei der Operation mit entfernt wird. Die Diagnose eines Melanoms kann erst mit Hilfe von entnommenem Gewebe und der folgenden histopathologischen Untersuchung stattfinden, da es bis heute keine nichtinvasive (gewebeschonende) Methode zur Melanomdiagnose gibt. Die bisherige Diagnose von Hautkrebs beinhaltet eine Begutachtung der betroffenen Hautläsion durch den Dermatologen mit Hilfe eines Dermatoskops. Der Arzt entscheidet dann nach bestimmten

Kriterien (ABCD-Regel) und seiner persönlichen Einschätzung, ob die betroffene Hautläsion chirurgisch entfernt und histopathologisch untersucht werden muss (siehe *Abbildung 1*). Je nach Erfahrung des behandelnden Arztes liegen die Exzisionsraten von gutartigen Hautläsionen zu malignem Hautkrebs bei einem Verhältnis von bis zu 51:1. Es wird also viel zu oft und unnötig gesundes Gewebe entfernt, wobei in den meisten Fällen eine sichtbare Narbe zurückbleibt.

Für die Einteilung des Tumorstadiums ist die Tumordicke beziehungsweise die Invasi-

onstiefe (Eindringtiefe) ein maßgebliches Kriterium und entscheidend für die weitere Behandlung und Prognose. Insbesondere wird hierüber auch die Größe des einzuhal- tenden Sicherheitsabstandes bei der Nachexzision be- stimmt. Bei Invasionsstiefen von beispielsweise 2 mm wird bereits eine Gewebefläche von 2 cm um das eigentliche Melan- om (in der Tiefe oft noch mehr) entnommen, um sicher- zustellen, dass jegliches Tu- morgewebe entfernt wurde. Im Allgemeinen sind daher primäre Entwicklungsziele der Melanomdiagnose und -behandlung die Verbesse- rung der Tumorerkennung verbunden mit der Vermeidung unnötiger Operationen

nen von Hautläsionen, die sich als gutartig herausstellen. Zum anderen können durch eine verbesserte Tumorein- schätzung die Sicherheitsab- stände so angepasst werden, dass weniger gesundes, tu- morumgebendes Gewebe ex- zidiert werden muss.

### Optische Dickenbestimmung von Melanomen

Ein alternativer, auf rein optischen Methoden basierender und somit nicht-invasiver Ansatz zur Melanomdiagnostik wird am Hannoverschen Zen- trum für Optische Technologi- en (HOT) erforscht. Im Rah- men des vom Bundesministe- rium für Bildung und

stimmung der Dicke von melanomverdächtigen Hautläsio- nen gearbeitet, das bereits in verschiedenen präklinischen Studien validiert wurde. Da andere, zumeist sonographi- sche Methoden bisher keine zufriedenstellende Lösung bieten können, ist für diese Aufgabe eine Kombination verschiedener optischer Ver- fahren deutlich besser geeig- net. Das avisierte bildgebende und handgeführte Diagnose- system wird alle Vorteile der Optoakustik (auch Photoakus- tik genannt), der Optischen Kohärenztomographie (OCT) und der Raman-Spektroskopie kombinieren. Dies ermöglicht es Medizinern in Zukunft erstmalig, präoperativ die Tu- mordicke mit einer Genauig-

Abbildung 1  
*Malignes Melanom der Haut im Anfangsstadium. Ärzte achten bei der Einstufung einer Haut- läsion unter anderem auf Asym- metrie der Form, glatte oder raue Begrenzungen, Durchmesser, Gleichmäßigkeit der Farbe und zeitliche Veränderungen. Auf dieser Grundlage entscheidet der Arzt, ob die Hautläsion entfernt wird oder nicht.*

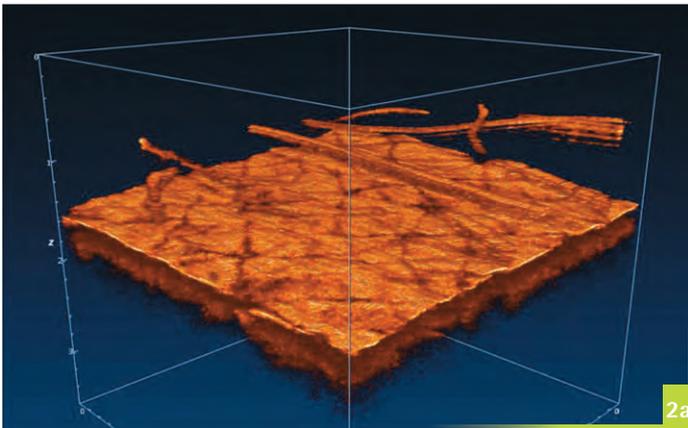


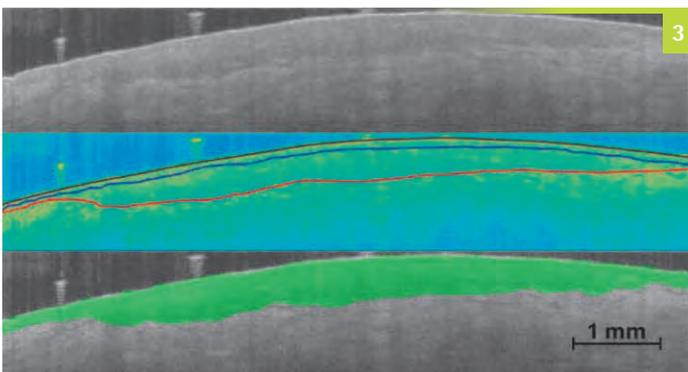
Abbildung 2  
*3D-OCT-Aufnahme der Haut (links) und Auflichtaufnahme der Haut mit rot markiertem OCT- Messfeld (rechts).*

sowie eine zuverlässige prä- operative Tumordickenab- schätzung. Dies bedeutet, dass hierdurch gesundes Gewebe geschont werden kann: Zum einen durch Verringerung der Anzahl an unnötigen Exzisio-

Forschung (BMBF) geförder- ten Projektes »Melanomdi- ckenbestimmung mittels Op- toakustik und Optischer Ko- härenztomographie«, kurz MeDiOO, wird an einem Ver- fahren zur präoperativen Be-

keit von bis zu 15  $\mu\text{m}$  (Mikro- meter) zuverlässig bestimmen zu können, um die Entfernung gesunden Gewebes zu mini- mieren. Darüber hinaus soll das System spektroskopische und morphologische Informa- tionen liefern, die präoperativ eine genauere Bestimmung des Tumorstadiums zulassen, insbesondere ob der Tumor auf die oberste Hautschicht, die Epidermis, begrenzt ist oder eventuell schon tieferlie- gende Blutgefäße (hohe Metas- tasierungsgefahr) erreicht hat. Außerdem wird hierdurch die Möglichkeit geboten, bereits vor der Exzision des Tumors zu bestimmen, ob dieser gut- oder bösartig ist.

Abbildung 3  
*OCT-Querschnittsaufnahme einer melanomverdächtigen Haut- läsion (oben), detektierte Grenz- schichtverläufe in der Haut (Mit- te) und segmentiertes Melanom (unten). Gut zu erkennen ist hier eine morphologische Veränderung im Gewebe. Die Dicke dieser Läsion kann so bestimmt werden.*



### Wie kann Licht Informationen über die Melanomedicke liefern?

Derzeit arbeitet ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am HOT an den technischen und methodischen Grundlagen zur Kombination der optischen Modalitäten mit dem späteren Ziel der Entwicklung eines marktfähigen, medizinischen Produkts.

Aber welche physikalischen Grundlagen ermöglichen die Differenzierung von krebsartigem und gesundem Gewebe und wie lassen sich Aussagen über die Dicke eines eventuell vorhandenen Melanoms treffen? Hierbei nutzen die optischen Messmethoden OCT, Optoakustik und Raman-Spektroskopie unterschiedliche Eigenschaften von biologischem Gewebe. Mittels OCT werden Brechungsindexunterschiede sichtbar gemacht, wie sie beispielsweise auch bei einer Luft-Wasser-Oberfläche auftreten. Optoakustik nutzt gezielt die stärkere Absorption, also Lichtabschwächung, im Melanom im Vergleich zur gesunden Haut aus. Die molekulare Zusammensetzung und damit die Malignität (Gut-beziehungsweise Bösartigkeit) einer Hautläsion lassen sich mittels Raman-Spektroskopie ermitteln.

### Physikalischer Hintergrund der Messtechnik

Die OCT ist ein interferometrisches Verfahren, bei dem die Laufzeit von Licht im Gewebe mit der in Luft verglichen wird. Werden zusätzlich breitbandige Lichtquellen, typischerweise im infraroten Bereich des Lichtspektrums, verwendet, so können 3D-Bilder der Haut aufgenommen werden. Die Eindringtiefe des Verfahrens ist in der Praxis durch Gewebestreuung limitiert und erreicht in menschlicher Haut typischerweise



#### Jenny Stritzel

Jahrgang 1987, ist seit Ende 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Ihre Forschungsinteressen liegen im Bereich der medizinischen Bildgebung und -verarbeitung. Kontakt: [jenny.stritzel@hot.uni-hannover.de](mailto:jenny.stritzel@hot.uni-hannover.de)

Tiefen von bis zu 1,5 mm oder 2 mm. Die OCT ermöglicht insbesondere auch eine 3D-Bestimmung morphologischer Eigenschaften (Gewebestruk-



#### Arthur Varkentin

Jahrgang 1985, ist seit Ende 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Optischen Kohärenztomographie. Kontakt: [arthur.varkentin@hot.uni-hannover.de](mailto:arthur.varkentin@hot.uni-hannover.de)

Metastasierung sehr wahrscheinlich ist, dann muss man von den rein optischen Verfahren hin zu einer Hybridmethode übergehen, wie zum



#### Elias Blumenröther

Jahrgang 1987, ist seit Ende 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der Optoakustik. Kontakt: [elias.blumenroether@hot.uni-hannover.de](mailto:elias.blumenroether@hot.uni-hannover.de)

wieder an die Hautoberfläche gelangen – ähnlich wie bei Ultraschallgeräten. Die Messungen sind ebenfalls nichtinvasiv, können aber im Vergleich zur OCT Informationen aus deutlich tiefer liegenden Schichten im Gewebe liefern, da sich die optischen Eigenschaften der Haut von den akustischen unterscheiden.



turen) (siehe *Abbildung 2* und *Abbildung 3*), was mitunter Aufschluss über die Malignität der Hautläsion geben kann. Das Verfahren ist prädestiniert zur Diagnose von malignen Melanomen mit moderaten Invasionstiefen.

Hat das Melanom bereits tiefere Hautschichten penetriert und somit bereits Invasionstiefen erreicht, bei denen eine

Beispiel der Optoakustik. Bei optoakustischen Messungen wird die zu untersuchende pigmentierte Hautläsion mittels sehr kurzer Laserpulse beleuchtet. Hierdurch kommt es zur thermisch bedingten Ausdehnung und wieder Abkühlung des Gewebes, wodurch eine akustische Schallwelle im Gewebe entsteht. Ein Schalldetektor detektiert dann die akustischen Wellen, die

Neben der morphologischen Darstellung einer Hautläsion ist zusätzlich im Rahmen einer Diagnose eine eindeutige Differenzierung von gesundem und krebsartigem Gewebe notwendig, die mit OCT und Optoakustik nicht eindeutig erreicht werden kann. Hierfür setzen wir als dritte Modalität die Raman-Spektroskopie ein. Mit diesem Verfahren wird ebenfalls die betroffene Hautstelle mit Licht bestrahlt und dessen inelastische Streuung an den Molekülen, die Bestandteil der menschlichen Haut sind, spektroskopisch untersucht. So können verschiedene, in der Haut vorkommende Carotinoide (fettlösliche, gelbe bis rötliche Farbstoffe), Proteine (Eiweiße) und Lipide (Fette) charakterisiert werden. Die Zusammen-



#### Dr.-Ing. Maik Rahlves

Jahrgang 1978, ist seit 2011 Leiter der Arbeitsgruppe »Angewandte Optik« am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen umfassen Mikroskopie, Diffraktive Optik, Holographie und Polymerphotonik. Kontakt: [maik.rahlves@hot.uni-hannover.de](mailto:maik.rahlves@hot.uni-hannover.de)



#### Dr. Merve Wollweber

Jahrgang 1976, ist seit 2010 Arbeitsgruppenleiterin für Laserspektroskopie und Lebenswissenschaften am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien. Ihre Forschungsinteressen reichen von der Optoakustik und Raman-Spektroskopie bis hin zu Fasersensoren. Kontakt: [merve.wollweber@hot.uni-hannover.de](mailto:merve.wollweber@hot.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr. Uwe Morgner

Jahrgang 1967, ist seit 2004 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2013 ist er Sprecher des Vorstandes des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der extrem kurzen Pulse aus Lasern sowie deren Anwendung in Biophotonik und Grundlagenforschung. Kontakt: [morgner@iqo.uni-hannover.de](mailto:morgner@iqo.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr. Bernhard Roth

Jahrgang 1970, ist seit 2012 wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer des Hannoverschen Zentrums für Optische Technologien und seit 2014 Professor für Physik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Laserspektroskopie und -analytik, Fasersensorik, medizinische Optik, Bio- und Polymerphotonik sowie Optiksimulation. Kontakt: [bernhard.roth@hot.uni-hannover.de](mailto:bernhard.roth@hot.uni-hannover.de)

setzung dieser Hautbestandteile kann Aufschluss darüber geben, um welche Art von Hautveränderung es sich handelt. So hat beispielsweise ein gutartiger Leberfleck eine andere Molekülstruktur als ein malignes Melanom.

#### Drei optische Messverfahren – mehr als die Summe ihrer Teile

Die Kombination aus allen drei Methoden bietet also erstmalig die Möglichkeit einer nichtinvasiven, präoperativen Bestimmung der Malignität und Dicke von melanomverdächtigen Hautläsionen, was im Vergleich mit dem heutigen Stand der Technik eine Sprunginnovation darstellt. In ersten klinischen Tests konnte die Machbarkeit des Vorhabens bereits erfolgreich durch Patientennmessungen mit den ersten beiden Demonstratoren gezeigt werden. Momentan gibt es einen gemeinsamen OCT-Raman-

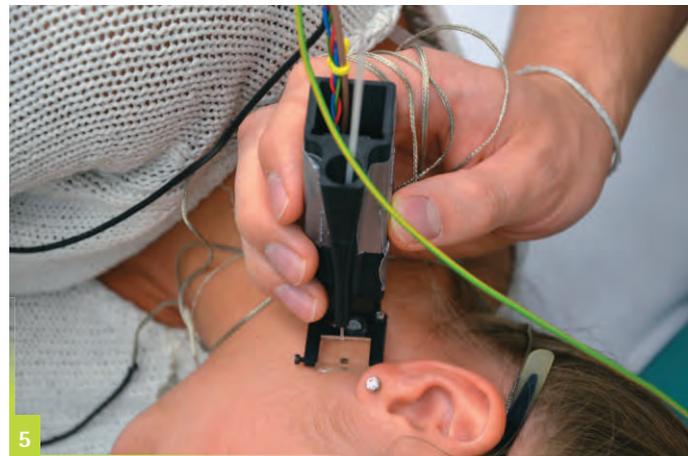


Abbildung 4  
Der kombinierte OCT-Raman-Kopf bietet die Möglichkeit beide Messungen schnell hintereinander durchzuführen. So kann sichergestellt werden, dass dieselbe Hautstelle vermessen wurde.

Messkopf (Abbildung 4) und einen separaten Optoakustik-Messkopf (Abbildung 5). Der Fokus liegt daher weiterhin auf der Verbesserung der Techniken im Einzelnen und deren optimale Kombinierbarkeit, um ein noch kompakteres Gerät herzustellen, welches alle Vorteile der drei Modalitäten kombiniert, um später in Kliniken von den Ärzten eingesetzt werden zu können.

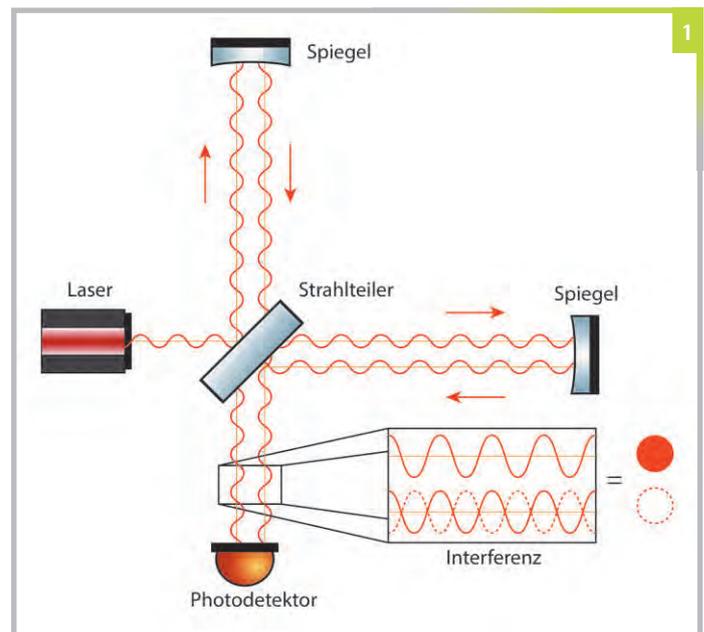
Abbildung 5  
Der optoakustische Aufbau beinhaltet einen handhabbaren Messkopf, der flexibel auf die zu untersuchende Hautstelle aufgelegt werden kann.

# Ein neues Fenster zum Weltall

## STABILISIERTE HOCHLEISTUNGSLASER FÜR DIE GRAVITATIONSWELLENDETEKTION

Am 3. Oktober 2017 wurde der Physik Nobelpreis für die erste direkte Detektion von Gravitationswellen vergeben, mit der ein neues Beobachtungsfenster zum Weltall geöffnet wurde. Einen entscheidenden Beitrag an dieser Entdeckung hatten die an der Leibniz Universität Hannover und am Laserzentrum Hannover entwickelten Hochleistungslaser, welche das Herzstück der Advanced LIGO Interferometer bilden. Dieser Beitrag beschreibt die extremen Anforderungen an derartige Laser und erläutert deren Funktionsweise.

Seit der Entdeckung des Lasers durch Theodor Maiman im Jahre 1960 hat sich eine riesige Zahl von Anwendungen für diese speziellen Lichtquellen ergeben. Eine herausragende Rolle hat der Laser beispielsweise bei der ersten direkten Detektion von Gravitationswellen im September 2015 gespielt und somit zur Entdeckung von zwei verschmelzenden schwarzen Löchern beigetragen. Schwarze Löcher senden keine elektromagnetischen Wellen aus und sind damit für herkömmliche Teleskope unsichtbar. Bei einer Verschmelzung von schwarzen Löchern wird jedoch die von Albert Einstein in seiner allgemeinen Relativitätstheorie eingeführte Raumzeit zu Schwingungen angeregt, welche sich dann wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit ins Universum ausbreiten. Der Effekt solcher Gravitationswellen auf der Erde ist nach ihrer Reise über astronomische Distanzen jedoch so winzig, dass Einstein selbst es für unmöglich hielt, dass Gravitationswellen je von der Menschheit detektiert werden könnten. Mit dieser Einschätzung lag er jedoch im Gegensatz zu seinen vielen bahnbrechenden Vorhersagen falsch. Das lag vermutlich daran, dass sich Einstein nicht vorstellen konnte, welche technologischen Möglichkeiten schon 100 Jahre nach der Entwicklung seiner allgemeinen Relativitätstheorie zur Verfügung stehen würden.



Eine dieser Technologien sind hochpräzise Laser, die in modernen Gravitationswellendetektoren wie zum Beispiel dem deutsch-britischen GEO 600 Detektor oder den US-amerikanischen LIGO Detektoren zum Einsatz kommen. GEO 600 ist ein Laserinterferometer, das von einem Gemeinschaftsinstitut der Leibniz Universität und der Max-Planck-Gesellschaft, dem Albert-Einstein-Institut, in Ruthe bei Sarstedt betrieben wird. In diesem Interferometer wird ein Laserstrahl an einem Strahlteiler aufgespalten und in zwei senkrecht zueinander orientierte, 600 m lange Interferometerarme gelenkt. Eine Prinzipskizze eines solchen Interferometers ist

in *Abbildung 1* zu sehen. Am Ende der Arme wird das Licht durch Spiegel zurück zum Strahlteiler geschickt. Dort werden die beiden Lichtfelder überlagert und erlauben es, über Schwankungen der Lichtleistung am Interferometerausgang Rückschlüsse auf Laufzeitunterschiede des Lichts in den beiden Armen zu gewinnen. Und genau solche Laufzeitunterschiede werden durch Gravitationswellen erzeugt. Die große Herausforderung der Gravitationswellendetektion besteht darin, dass diese Signale unvorstellbar klein sind und nur der Bewegung der Spiegel um weniger als den 1/1000 Bruchteil eines Atomkerndurchmessers entsprechen. Neben ungewoll-

ten Spiegelbewegungen und vielen anderen Störungen können auch Laserschwankungen zu Rauschen am Interferometerausgang führen und damit die winzigen Gravitationswellensignale verbergen. Daher müssen die Leistung und die Frequenz der verwendeten Laser so gut wie möglich stabilisiert werden. Die Laserleistung darf beispielsweise nur um weniger als zwei Milliardenstel der Gesamtleistung schwanken. Eine derart hohe Stabilitätsanforderung gibt es in keinem anderen optischen Experiment weltweit. Die Laserfrequenz muss eine relative Stabilität von  $\Delta\nu/\nu < 10^{-16}$  haben. Würde man das sichtbare Licht in 10 Milliarden Farben aufteilen, so müsste man mit dem Laser also genau eine dieser Farben treffen. Neben dieser extrem hohen Leistungs- und Frequenzstabilität müssen die Laser eine für wissenschaftliche Anwendungen relativ hohe Ausgangsleistung von einigen hundert Watt und ein sehr reines und stabiles räumliches Strahlprofil haben. Derart hohe Anforderungen werden in dieser Gesamtheit weder industriell noch im Wissenschaftsumfeld an Laser gestellt, so dass Spezialentwicklungen für die zurzeit betriebenen Gravitationswellendetektoren nötig waren

und auch für zukünftige Detektoren unabdingbar sind.

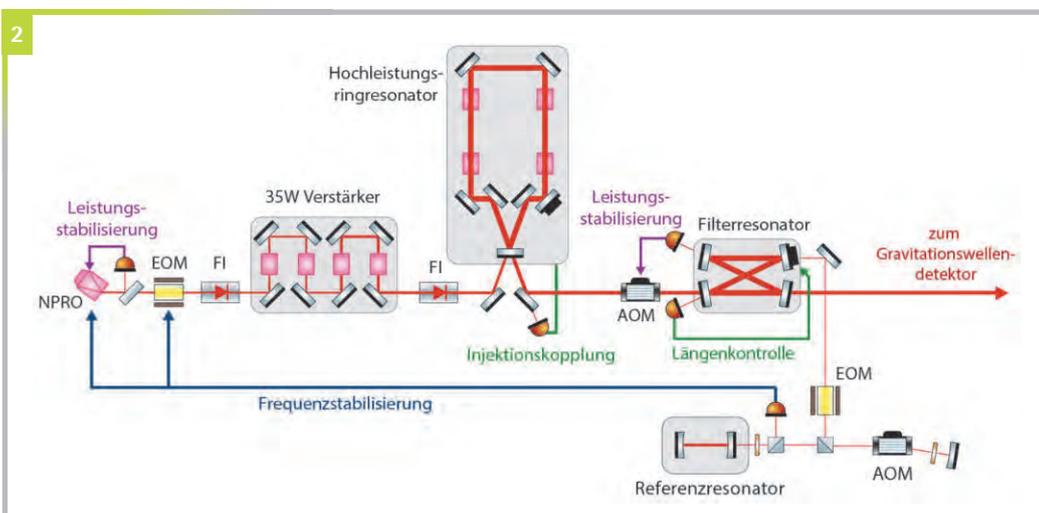
Für solche Spezialentwicklungen steht in Hannover mit dem Albert-Einstein-Institut, dem Laserzentrum Hannover und der Firma neoLASE ein hervorragendes Forschungsumfeld zur Verfügung. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Laserzentrums verfügen über eine mehrere Jahrzehnte lange Erfahrung in der Entwicklung von rauscharmen Hochleistungslasern, während die Forscherinnen und Forscher des Albert-Einstein-Instituts Detailkenntnisse in der Laserstabilisierung haben und durch Design, Bau und Betrieb von Gravitationswellendetektoren ideal für die Systemintegration der Laser qualifiziert sind. In der Kollaboration dieser beiden Institute entstand nach langjähriger Forschungsarbeit ein stabilisierter 12 Watt Laser, der von Ende der 90er Jahre bis 2011 am GEO 600 Detektor betrieben wurde. Nach der Entwicklung und Installation eines 20W Lasersystems für den Virgo Gravitationswellendetektor in Pisa (Italien) wurde 2007 ein 35 Watt Laser entwickelt und an den LIGO Detektoren und an der GEO-HF Weiterentwicklung des GEO 600 Detektors in Ruthe installiert. Basierend auf die-

sem 35 Watt Laser entstand 2007 die Firma neoLASE als Ausgründung des Laserzentrums, die mittlerweile entscheidende Komponenten für die Gravitationswellenlaser liefert. Seit der Installation des Virgo Lasers benutzen alle weltweit in Betrieb befindlichen Gravitationswellendetektoren Laser aus Hannover.

Eine besondere Herausforderung für das Team aus Hannover stellte die Entwicklung des stabilisierten Lasersystems für die Advanced LIGO Detektoren dar, welches eine entscheidende Rolle bei der ersten direkten Gravitationswellendetektion spielen sollte. Dieser deutsche Beitrag für die LIGO Detektoren der 2. Generation wurde von der Max-Planck-Gesellschaft und der Volkswagen Stiftung finanziert und vom Albert-Einstein-Institut der Leibniz Universität zusammen mit dem Laserzentrum Hannover entwickelt und erprobt.

Ein schematischer Aufbau des stabilisierten Lasersystems ist in *Abbildung 2* zu sehen. Das Herzstück des Lasersystems bildet ein monolithischer Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Ringlaser (NPRO), der sich durch eine sehr gute Frequenzstabilität auszeichnet und eine Leistung

*Abbildung 1*  
In einem Laserinterferometer wird das Licht an einem Strahlteiler aufgespalten und in zwei senkrecht zueinander orientierte Messstrecken geschickt. Am Ende dieser Strecken werden die Lichtwellen am Spiegel reflektiert und zum Strahlteiler zurückgesandt. Hier überlagern sich die Wellen und führen am Interferometerausgang zur Interferenz. Je nach Laufzeitunterschied des Lichts in den Messstrecken kann es zur Verstärkung (oberer Teil der Interferenzbox), Auslöschung (unterer Teil der Interferenzbox) oder allen Helligkeitsstufen dazwischen kommen. Eine Analyse der Lichtstärke am Ausgang erlaubt somit Rückschlüsse über Laufzeitunterschiede der Wellen in den Messstrecken.



*Abbildung 2*  
Im Lasersystem des Advanced LIGO Gravitationswellendetektors wird das Licht eines hochstabilen Masterlasers (NPRO) in einer ersten Verstärkerstufe auf 35 W und anschließend mittels eines injektionsgekoppelten Hochleistungsringlasers auf 200 W verstärkt. Über einen Filterresonator wird der Strahl räumlich bereinigt. Verschiedene Stabilisierungsmaßnahmen reduzieren das Leistungs- und Frequenzrauschen der Laserstrahlung und bereiten sie somit für die Verwendung im Gravitationswellendetektor vor.



Abbildung 3  
Die in Hannover entwickelten und gefertigten stabilisierten Hochleistungslaser wurden durch ein Team des Albert-Einstein-Instituts und des Laserzentrum Hannover an den Advanced LIGO Detektoren in drei monatigen Installationsphasen aufgebaut und in Betrieb genommen. Äußerste Sauberkeit und Staubfreiheit ist entscheidend für einen verlässlichen Langzeitbetrieb dieser Lasersysteme. Daher muss während jeglicher Arbeiten Reinraumkleidung getragen werden.

von 2 Watt bei einer Wellenlänge von 1064 nm (Nanometer) emittiert. Dieser Ringlaser wird als Masterlaser bezeichnet. Ein Teil der Ausgangsstrahlung wird auf einen Fotodetektor gelenkt und für eine erste Leistungsstabilisierung benutzt. Ein elektro-optischer Modulator (EOM) kann zusammen mit einem Stillelement im NPRO für die Frequenzstabilisierung verwendet werden. Ein Faraday Isolator (FI) wirkt als optische Diode und verhindert, dass Störstrahlung zurück in den Ringlaser gelangt. Es folgt ein vierstufiger Neodym-Vanadat Laserverstärker, der die Laserleistung auf 35 Watt erhöht und dabei die gute Frequenzstabilität des Masterlasers beibehält. Nach dem Durchstrahlen eines weiteren Faraday Isolators wird das Licht in einen

Hochleistungsringresonator eingestrahlt, der mittels Injektionskopplung die Laserfrequenz des 35 Watt Lasers übernimmt und einen 200 Watt Strahl mit der Frequenzstabilität des Masterlasers erzeugt.

Als nächstes optisches Element folgt ein akusto-optischer Modulator (AOM), bevor das Licht in einen optischen Filterresonator eingekoppelt wird. Durch eine Längenregelung wird dieser Resonanz mit dem Laserlicht gehalten. Am Ausgang dieses Resonators ist das Laserlicht von allen störenden räumlichen Strahlvariationen befreit und kann als reiner Gaußstrahl ins Interferometer der Gravitationswellendetektoren eingestrahlt werden. Der Filterresonator ist als 4 Spiegel Ringre-

sonator ausgelegt. Durch zwei dieser Spiegel tritt jeweils ein Strahl mit einer geringen Leistung von etwa 100 mW (Milliwatt) aus. Einer dieser Strahlen wird direkt auf einen Fotodetektor gelenkt und für die Leistungsstabilisierung des 200 Watt Strahls genutzt. Der zweite Strahl wird für die Frequenzstabilisierung verwendet. Hierfür wird das Licht zunächst in einem elektro-optischen Modulator phasenmoduliert und dann in einem akusto-optischen Modulator frequenzverschoben. Anschließend wird das Licht an einem Spiegel reflektiert, ein zweites Mal durch den AOM geschickt und dann in einen optischen Resonator eingekoppelt. Dieser Resonator wird weitestgehend von äußeren Störungen entkoppelt und als Frequenzreferenz benutzt.

Mittels eines speziellen Ausleseverfahrens wird die Differenz zwischen der Referenz- und der Laserfrequenz gemessen und mittels eines Regelkreises reduziert. Dadurch kann die ohnehin schon gute Frequenzstabilität des Lasersystems weiter verbessert werden. Durch eine Anpassung der Frequenzverschiebung in AOM wird schließlich die hochstabile Laserfrequenz auf das Interferometer angepasst.

Nach erfolgreichem Test des Laserkonzepts und der Stabilisierungsverfahren wurden vier dieser stabilisierten Lasersysteme in einer Kleinserie gefertigt. Einer der Laser wurde als Referenzsystem am Albert-Einstein-Institut installiert und wird dort seit 2010 kontinuierlich betrieben und verbessert. Drei Lasersysteme wurden in die USA geliefert und dort an den Advanced LIGO Gravitationswellendetektoren installiert und in Betrieb genommen. *Abbildung 3* zeigt die Laserinstallation an

einem der LIGO Detektoren durch das Laserteam aus Hannover.

Angespornt durch die Entdeckung von Gravitationswellen und schwarzen Löchern arbeiten zahlreiche Forscher weltweit an der Entwicklung von Gravitationswellendetektoren der dritten Generation. Ziel ist es, die Zahl der erwarteten Detektionen von etwa einem Signal alle zwei Monate auf mehrere Signale täglich zu verbessern. Neben einer Vielzahl von neuartigen Technologien werden auch verbesserte, beziehungsweise neuartige Lasersysteme und Stabilisierungsverfahren benötigt. Für diese Entwicklung ist es dem Albert-Einstein-Institut gelungen, die Finanzierung eines fünfjährigen Forschungsvorhabens einzuwerben. In diesem Forschungsprojekt sollen in bewährter Kollaboration mit dem Laserzentrum neue Konzepte getestet und Prototyp Lasersysteme entwickelt werden. Es wird angestrebt, die Leistung von Lasern

mit einer Wellenlänge von 1064 nm (Nanometer) auf etwa 500 Watt zu erhöhen, wozu kohärent kombinierte Hochleistungsfaserlaser zum Einsatz kommen sollen. Ferner wird an der Entwicklung eines ebenfalls faserbasierten 100 Watt Lasersystems mit einer Wellenlänge von 1550 nm (Nanometer) gearbeitet. Bei dieser Wellenlänge ist Silizium transparent, so dass zukünftige Laserinterferometer dieses vorteilhafte Material für ihre teildurchlässigen Spiegel verwenden können. Parallel sind neue Stabilisierungsmethoden am Albert-Einstein-Institut in der Erprobung, so dass auch die Gravitationswellendetektoren der dritten Generation stabilisierte Hochleistungslaser aus Hannover verwenden können.



#### Apl.Prof. Dr. Benno Willke

Jahrgang 1963, ist Leiter der Lasergruppe am Albert Einstein Institut der Leibniz Universität und der Max-Planck-Gesellschaft. Er forscht seit 1994 an der Gravitationswellendetektion und war an Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme des GEO600 Gravitationswellendetektors beteiligt. Seit 1999 forscht er an der Stabilisierung von Lasern für Gravitationswellendetektoren und leitete die Entwicklung der Laser für GEO600 und Advanced LIGO. Kontakt: [benno.willke@aei.mpg.de](mailto:benno.willke@aei.mpg.de)



brilliance in customized laser solutions



neoLASE GmbH · [www.neolase.com](http://www.neolase.com) · Hollerithallee 17 · 30419 Hannover



- Customized Lasers
- Laser Amplifier
- Industrial Lasers
- Laser Electronics



Laser

AKADEMIE

Ihr Weiterbildungspartner  
in den optischen Technologien

www.lzh-laser-akademie.de  
kontakt@lzh-laser-akademie.de  
0511-2771729



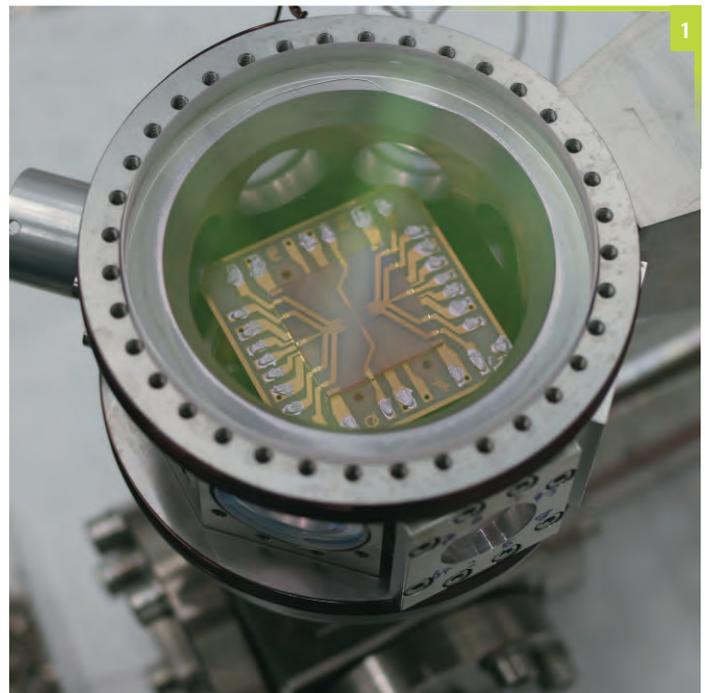
# Meilenstein in der Quantenphysik

ERSTMALS BOSE-EINSTEIN KONDENSATE IM ALL

Am 23. Januar 2017 ist es deutschen Forschern unter Federführung der Leibniz Universität Hannover erstmals gelungen, Bose-Einstein Kondensate (BEK) im Weltraum an Bord einer Forschungsrakete zu erzeugen und diese als Quelle für weitere atom-optische Experimente zu nutzen.

Bose-Einstein Kondensate sind ein spezieller Materiezustand, der entsteht, wenn eine Atomwolke fast bis auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt wird. Dazu wird die Wechselwirkung der Atome mit Licht- und Magnetfeldern ausgenutzt. Sie besetzten daraufhin alle den niedrigsten Energiezustand und sind nun durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschreibbar. Ähnlich wie Laserlicht in der Optik, eignet sich dieser makroskopische Quantenzustand hervorragend für die Materiewelleninterferometrie und ist insbesondere für hoch auflösende Messungen im Weltraum entscheidend. In diesen Interferometern tauschen Materie und Licht die Rollen: Die frei fallenden Materiewellen werden mit Hilfe von Licht kohärent geteilt und wieder zur Interferenz gebracht. Die Genauigkeit der Messung steigt quadratisch mit dieser freien Fallzeit. Auf der Erde in typischen Laboraufbauten kommt das Kondensat bereits nach etwa hundert Millisekunden auf dem Boden auf. Deshalb bergen Weltraummissionen mit quasi unbegrenzter freier Fallzeit großes Potenzial.

Zukünftig sollen Materiewellen-Interferometer genutzt werden, um zum Beispiel das Schwerefeld der Erde zu vermessen oder um mit Präzisionsmessungen fundamentale Theorien wie Einsteins Äquivalenzprinzip zu prüfen.



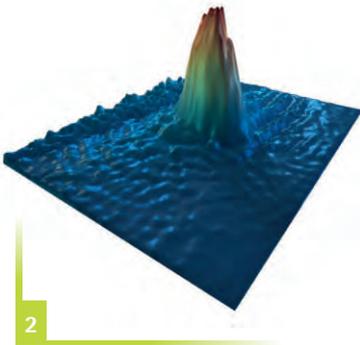
Die Interferometrie im ausgedehnten freien Fall betritt jedoch in vielen Bereichen Neuland und agiert auf Energieskalen äquivalent zu Temperaturen im Picokelvin- ( $10^{-12}$  Kelvin, also 0,000000000001 Kelvin) oder gar Femtokelvinbereich ( $10^{-15}$  Kelvin). Neue methodische Ansätze für die Interferometrie werden benötigt. Schon die Zweifel an der Machbarkeit von Bose-Einstein Kondensaten im Weltall verwiesen Missionsvorschläge zur Materiewelleninterferometrie in den Bereich der Science Fiction Literatur.

Um aus der Fiction Science werden zu lassen, wurde in

der QUANTUS-Kollaboration (Quantengase Unter Schwerelosigkeit) an der Idee von frei fallenden Laboratorien gearbeitet. Hierbei fällt die Apparatur zum Betrieb der Experimente mit den Atomen mit. In den vergangenen Jahren ist es den deutschen Forschern gelungen, im Fallturm Bremen Bose-Einstein Kondensate über eine Zeitspanne von zwei Sekunden in der Schwerelosigkeit zu erzeugen und zu untersuchen. Dabei wurde die ganze Experimentkapsel im evakuierten Turm in einer Höhe von etwa 110 Metern fallen gelassen. Um noch längere Fallzeiten zu realisieren, werden Apparaturen für Welt-

raumanwendungen gebaut. Raketenmissionen eröffnen Zeiten von Minuten und Satelliten bieten zeitlich fast unbegrenzte Schwerelosigkeit.

Die Mission MAIUS-1 (Materiewellen-Interferometrie unter Schwerelosigkeit) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) startete um 3.30 Uhr morgens vom schwedischen Startplatz ESRANGE in der Nähe der



2

Stadt Kiruna nördlich des Polarkreises und flog bis zu einer Höhe von 243 Kilometern. Ein Team aus wissenschaftlichem und technischem Personal von insgesamt elf deutschen Forschungseinrichtungen, darunter Holger Ahlers, Dennis Becker, Maïke D. Lachmann, Thjis Wendrich und Stephan T. Seidel von der Leibniz Universität Hannover sowie der schwedische Startplatzbetreiber überwachten die autonom operierende Nutzlast und den Flug der Rakete vom Boden aus. Während der antriebslosen Flugphase oberhalb von etwa 100 Kilometern bis zum Scheitelpunkt und zurück, standen sechs Minuten Experimentierzeit bei schwerelosen Bedingungen zur Verfügung.

Bereits die Sofortanalyse der während des Fluges übermittelten Daten zeigte, dass es den Forscherinnen und Forschern gelungen war, erstmalig Bose-Einstein Kondensate im All zu erzeugen. Die 275.000 kondensierten Atome

im ersten Versuch übertrafen sogar die Erwartungen. Insgesamt wurden 85 Experimente in der Zeit unter Schwerelosigkeit durchgeführt, welche die Manipulation der Ensembles und verschiedene Schritte für präzise Materiewellen-Interferometrie getestet haben. Zusätzlich wurden schon in der Beschleunigungsphase während des Starts und dem Ausbrennen der Motoren atom-optische Experimente

bedingungen geborgen und den Forschern wieder ausgehändigt. Nach gründlicher Inspektion und kleinen Reparaturen konnte die Nutzlast wieder in Betrieb genommen und es konnten erneut Bose-Einstein Kondensate erzeugt werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Entwicklung neuer Methoden eingehen, wie sie für zukünftige Weltraummissionen notwendig sind.



3

unter diesen hoch-dynamischen Bedingungen demonstriert. Dazu wurde eine kalte Wolke erzeugt, die nur den ersten Kühlschritt auf dem Weg zum BEK durchlaufen ist und sich als Quelle für Materiewellen-Interferometrie auf sehr kurzen Zeitskalen eignet. Die Landung der Nutzlast erfolgte ebenfalls planmäßig an einem Fallschirmsystem im tief verschneiten Nordschweden. Die Apparatur wurde daher mit drei Tagen Verzögerung aufgrund der Wetter-

Auch aus technologischer Sicht war die Mission eine sehr große Herausforderung. Während Laboraufbauten ganze Räume füllen, sehr sensibel auf Temperaturschwankungen und Vibrationen reagieren und bis zu einer Minute für die Erzeugung eines Bose-Einstein Kondensats brauchen, ist der Platz und das Gewicht auf einer Rakete beschränkt und die Anzahl der Experimente in Schwerelosigkeit durch die Experimentzeit limitiert. Zusätzlich

Abbildung 1  
In die aus Titan gebaute Ultra-hochvakuumkammer ist ein dreilagiger Atomchip eingebaut. Mit den darauf geprägten stromführenden Strukturen können die notwendigen Magnetfelder zur Manipulation atomarer Wolken erzeugt werden.

Abbildung 2  
Dreidimensionale Darstellung der atomaren Dichte des ersten im Weltall erzeugten Bose-Einstein-Kondensats. Das BEK wurde 97 Sekunden nach dem Start bei einer Höhe von 132 Kilometern und einer Geschwindigkeit von Mach 4,2 erzeugt.

Abbildung 3  
Die Nutzlast der MAIUS-1 Mission mit dem versammelten Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, der MORABA (Mobile Raketen Basis) sowie den Betreibern der schwedischen ESRANGE.



#### M. Sc. Maike Diana Lachmann

Jahrgang 1990, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Quantenoptik und arbeitet an den MAIUS-Projekten. Sie forscht an quantenmechanischen Systemen für Weltraumanwendungen. Kontakt: [lachmann@iqo.uni-hannover.de](mailto:lachmann@iqo.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr. Ernst M. Rasel

Jahrgang 1965, ist Professor am Institut für Quantenoptik. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Atomoptik, Quantenoptik sowie Präzisionssensoren für Raum und Zeit. Kontakt: [rasel@iqo.uni-hannover.de](mailto:rasel@iqo.uni-hannover.de)

braucht man ein sehr robustes Design, das den Start voll funktionsfähig übersteht. Ein wichtiger Entwicklungsschritt für diese Umstände waren Atomchips, die große Spulenaufbauten platz- und leistungssparend ersetzen. Auf einem Substrat werden dafür sehr dünne Goldstrukturen aufgetragen und mittels Strömen durch die Leiter werden Magnetfelder induziert. Durch geschickte Kombinati-

on von verschiedenen Strukturen können so komplexe Magnetfeldkonfigurationen für die Manipulation der Atomwolken erzeugt werden. Diese Technologie wurde insbesondere von Nobelpreisträger Theodor Hänsch sowie Jakob Reichel und Jörg Schmiedmayer entwickelt. Sie waren der Ausgangspunkt für die Atomchip basierten BEK Interferometer, die an der Leibniz Universität Hannover am Institut für Quantenoptik in der Gruppe von Ernst M. Rasel und Wolfgang Ertmer in engster Kooperation mit dem Theoretiker Wolfgang Schleich in Ulm erforscht werden. Mit dem auf MAIUS-1 eingesetzten Atomchip lassen sich Bose-Einstein Kondensate von mehreren hunderttausend Atomen in weniger als 2 Sekunden erzeugen.

Das Projekt MAIUS-1 steht unter wissenschaftlicher Leitung der Leibniz Universität Hannover im Verbund mit der Humboldt-Universität und dem Ferdinand-Braun-Institut in Berlin, dem ZARM der Universität Bremen, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, der Universität Hamburg, der Universität Ulm und der Technischen Universität Darmstadt. Dem For-

schungsverbund gehörten auch die Institute für Raumfahrtssysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bremen, für Raumflugbetrieb und Astronautentraining – hier die Mobile Raketenbasis MORABA – in Oberpfaffenhofen sowie die DLR Einrichtung für Simulations- und Softwaretechnik in Braunschweig an. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Studierenden, vielen jungen Wissenschaftlern und Ingenieuren sowie Hochschullehrenden betraf alle Subsysteme der Nutzlast, von der Atomchip-apparatur über die Laser, die Elektronik, die Datenspeicherung, die magnetische Abschirmung, die Batterien bis hin zur Flugsoftware. Die Rakete wurde in einer zweistufigen Konfiguration eingesetzt mit Feststoffmotoren aus brasilianischer Produktion. Die Durchführung der Startkampagne oblag der DLR-MORABA.

Das Projekt wurde vom DLR-Raumfahrtmanagement in Bonn mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert. Nach einer detaillierten Auswertung der Experimentdaten ist die nächste Raketenmission für 2020 geplant. Sie dient der Erforschung von Bose-Einstein Kondensaten zweier Atomsorten (neben Rubidium auch Kalium) in einem Interferometer, einem notwendigen Zwischenschritt zum Test des Einsteinschen Äquivalenzprinzips mit Materiewellen. Darüber hinaus sind die MAIUS-Raketenmissionen und die QUANTUS-Experimente im Bremer Fallturm ein wichtiges Bindeglied für die im Mai 2017 gestartete Kooperation mit der NASA für geplanten Experimente zu ultrakalten Atomen auf der Internationalen Raumstation (ISS), an denen die deutschen Wissenschaftler maßgeblich beteiligt sind.

Abbildung 4

*Lift-Off aus dem Skylark-Tower, der Startvorrichtung für die Rakete des Typs VSB-30. Die Nutzlast in rot verlässt gerade oben den Turm.*





Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Nationales Metrologieinstitut



## Wir hängen nicht an der Zeit – aber wir machen sie.

Zeit für Sie, die PTB kennenzulernen:

Die PTB ist ein Arbeitgeber,  
bei dem Kreativität und Spaß an  
der Arbeit sowie persönlicher und  
gesellschaftlicher Nutzen  
zusammenpassen.

Nehmen Sie sich die Zeit und  
informieren Sie sich auf unserer  
Homepage: [www.ptb.de](http://www.ptb.de)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)



Foto: mauritius images

We Support **YOU**  
to Succeed!



Apply for the **EO EDUCATIONAL AWARD**  
and win up to **7.000 €** (in EO products)



Get the **PRODUCTS** you need  
and receive up to **10% DISCOUNT**



Almost **30.000 PRODUCTS** including  
**LASER OPTICS, IMAGING LENSES, PRE-  
CISION OPTICAL COMPONENTS** and more



We offer great **TECHNICAL SUPPORT**  
in **6 LANGUAGES**

Get your **FREE**  
**CATALOG!**

*We want You!*

Contact us

info@edmundoptics.eu

facebook.com/edmundoptics

+49 (0)721 6273730

www.edmundoptics.eu/university



**Edmund**  
optics | worldwide

Join our  
**laser family!**



Optical Frequency Combs

THz Systems

Femtosecond Fiber Lasers

**MenloSystems**

# DEIN KARRIERESTART

Wir bieten für

**Studierende  
und Absolventen**

von Universität, Hochschule oder  
Berufsakademie aus technisch-  
naturwissenschaftlichen Studiengängen  
und aus Wirtschaftsingenieur- und  
Wirtschaftswissenschaften:

- Festanstellungen zum Berufseinstieg
- Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten
- Duales Studium
- Praktika und Jobs für Werkstudenten

Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG  
Hauptstraße 1 | 83413 Fridolfing  
+49 8684 18-0 | personalinfo@rosenberger.com

**Rosenberger**



www.rosenberger.com/jobs

# Light for Innovation



## DAS LASER ZENTRUM HANNOVER

Als unabhängiges gemeinnütziges Forschungsinstitut für Photonik und Lasertechnologie steht das Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) für innovative Forschung, Entwicklung und Beratung. Das LZH wurde 1986 aus den Instituten für Quantenoptik, Werkstoffkunde sowie Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover (seit 2006 Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover) als eingetragener Verein gegründet mit dem Ziel, im Bereich Lasertechnologie interdisziplinäre Forschung und Entwicklung zu betreiben, Forschung und Praxis zusammenzuführen und Fachkräfte industrienah auszubilden.

Im Fokus der angewandten Forschung des Instituts stehen die Themengebiete Optische Komponenten und Systeme, Optische Produktionstechnologien und Biomedizinische Photonik. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren ermöglicht dabei innovative Ansätze in verschiedenen Bereichen: von der Komponentenentwicklung für spezifische Lasersysteme bis hin zu Prozessentwicklungen für Laseranwendungen, zum Beispiel für die Medizintechnik oder den Leichtbau im Automobilsektor. Derzeit sind etwa 180 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am LZH beschäftigt. Das LZH erhält eine Grundförderung durch das Niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr. Der Umsatz lag im Jahr 2016 bei 16,4 Millionen Euro, davon wurden rund 12,5 Millionen Euro Drittmittel eingeworben.

### Wissenschaftliches Netzwerk

Zentral für den Erfolg des LZH ist die enge regionale wissenschaftliche Vernetzung insbesondere mit der Leibniz Universität Hannover: Beteiligungen an den Exzellenz- und Spitzenclustern REBIRTH und Hearing4all, sowie an der Leibniz-Forschungsschule QUEST, Teilnahme an diversen Sonderforschungsbereichen wie zum Beispiel PlanOS und Tailored Forming sowie Partnerschaften mit zahlreichen renommierten Einrichtungen und den niedersächsischen Universitäten zeichnen das LZH aus. Weiterhin ist das LZH Partner im Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT), fungiert beim HITec (Hannover

Institut für Technologie) als Kooperationspartner der Leibniz Universität Hannover und ist in das disziplinübergreifende Laboratorium für Nano und Quantenengineering (LNQE) und das Niedersächsische Zentrum für Biomedizintechnik, Implantatforschung und Entwicklung (NIFE) integriert. Hervorzuheben ist zudem die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Albert-Einstein-Institut im Bereich der Entwicklung von Lasersystemen für die Gravitationswellendetektion.

### Transfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft

Das LZH schafft einen starken Transfer zwischen grundlagenorientierter Wissenschaft, anwendungsnaher Forschung und Industrie. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) profitieren vom Forschungsspektrum und Dienstleistungsangebot des LZH. In Verbundprojekten bekommen sie Zugang zu neuem technologischen Wissen, nationalen und internationalen Netzwerken sowie öffentlichen Fördermitteln. Mit den vom LZH angebotenen Dienstleistungen können die Betriebe fehlende F&E-Kapazitäten ausgleichen. Der Wissenstransfer beinhaltet auch die Vermittlung von LZH-Wissenschaftlerinnen und LZH-Wissenschaftlern in die Wirtschaft sowie andere Forschungseinrichtungen – so ist im Laufe der Zeit ein beachtliches Netzwerk entstanden.

Zudem sind bis heute insgesamt 19 Ausgründungen mit etwa 500 entstandenen Arbeitsplätzen aus dem Institut hervorgegangen. Weiterhin bietet die vom LZH gegründete LZH Laser Akademie GmbH Weiterbildungen auf dem Gebiet der angewandten Lasertechnik für Meister, Techniker und Ingenieure an. Weiterhin hat das LZH 2017 gemeinsam mit dem Institut für Integrierte Produktion Hannover, der LZH Laser Akademie GmbH und der Deutsche Messe Technology Academy GmbH »Niedersachsen ADDITIV – Zentrum für Additive Fertigung« ins Leben gerufen.

**Dr. Dietmar Kracht** ist geschäftsführendes Vorstandsmitglied des LZH. Kontakt: [d.kracht@lzh](mailto:d.kracht@lzh)



1

Ein CO<sub>2</sub>-Laser im Einsatz



2

Das LZH-Gebäude

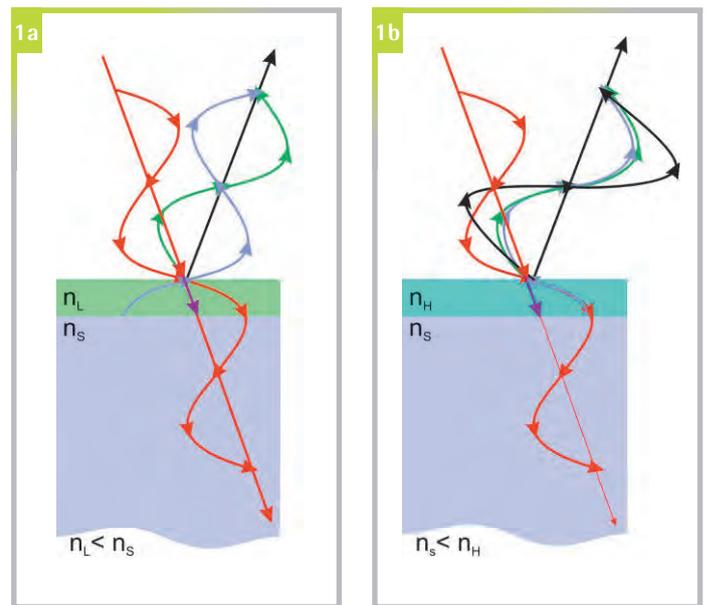
# Unauffällig, aber wirksam

## DIE OPTISCHE DÜNNSCHICHTTECHNOLOGIE

Optische Schichten begegnen uns im Alltag eher unauffällig: Als Antireflexschichten sind sie auf Brillengläsern, Linsen in Fernrohren, Kameraobjektiven oder Mikroskopen zu finden. Auch in der Wissenschaft wird die so genannte optische Dünnschichttechnologie bei Messgeräten, Lasersystemen sowie in der Datenkommunikation und bei der Produktion von Halbleiterchips eingesetzt. Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik und vom Laser Zentrum Hannover erläutern das Verfahren.

Optische Schichtsysteme werden aus einer definierten Folge von Einzelschichten aufgebaut, die aus verschiedenen transparenten Materialien bestehen und Dicken im Bereich der Nutzwellenlängen von wenigen Nanometern bis zu einem Mikrometer aufweisen. Als Funktionsprinzip wird dabei die gegenseitige Überlagerung der an den Grenzen der einzelnen Schichten reflektierten Teilwellen genutzt (siehe *Abbildung 1*). Das jeweils gewünschte spektrale Reflexionsverhalten der optischen Oberfläche kann dann durch geschickte Wahl der Schichtdicken und der eingesetzten optischen Materialien über einen sehr weiten Bereich beherrscht werden. Beispielsweise kann so die Reflexion vollständig in einem gewissen Wellenlängenbereich unterdrückt werden, indem die Oberfläche mit einem Antireflexschichtsystem aus wenigen dielektrischen Schichten ausgerüstet wird. In gleicher Weise ist durch Einsatz eines alternierenden Schichtstapels aus nur zwei Materialien eine Verspiegelung bis zu einer Reflektivität von mehr als 99,999 Prozent möglich, die mit keinem anderen Prinzip erreicht werden kann.

Mit dieser enormen Dynamik in den Gestaltungsmöglichkeiten nimmt die optische Dünnschichttechnik eine Schlüsselposition in der modernen Photonik ein. Heutzutage ist in diesem Bereich



eigentlich kaum noch ein Produkt zu finden, das keine optischen Schichten enthält. Von Antireflexschichten auf Brillengläsern, Linsen in Fernrohren, Kameraobjektiven, Mikroskopen und vielen anderen optischen Instrumenten ausgehend, über Präzisionsbeschichtungen für Messgeräte und die optische Datenkommunikation bis hin zu Hochleistungsbeschichtungen für Lasersysteme oder Stepper in der Produktion von Halbleiterchips deckt die optische Dünnschichttechnologie ein überaus vielfältiges Einsatzspektrum ab.

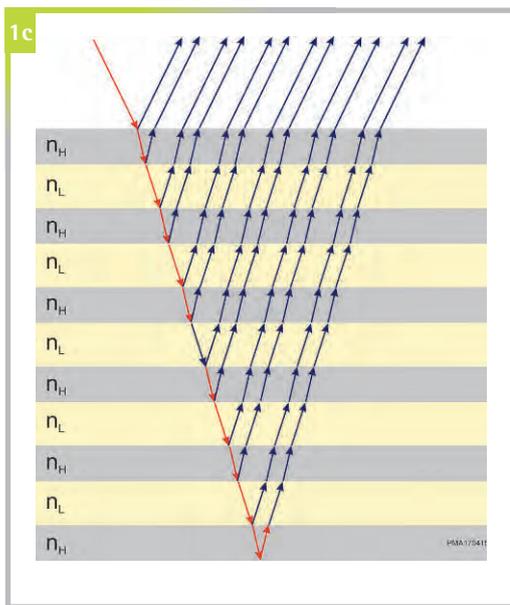
Tatsächlich hat die Natur optische Schichtsysteme schon viele Hunderte von Millionen Jahren vor der Menschheit er-

funden. Eindrucksvolle Beispiele sind die in der tropischen Insektenwelt anzutreffenden großen Schmetterlinge mit ihren prächtigen, in vielen Farben schillernden Flügeln. Der Mensch hingegen brachte es erst in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts fertig, optische Schichtsysteme kontrolliert herzustellen. Dies liegt im Wesentlichen an den zu realisierenden extrem geringen Dicken im Bereich von 1/1.000 einer Haaresbreite und der geforderten optischen Qualität der Einzelschichten. Moderne Herstellungsverfahren beruhen auf der Gasphasenabscheidung, bei der das zu beschichtende Material in die Gasphase gebracht wird und dann auf der optischen Fläche als Schicht kondensiert.

Um ein ausreichende Schichtqualität zu erreichen, muss der Kondensationsprozess im Hochvakuumbereich erfolgen. Die Herstellungsprozesse lassen sich dabei anhand des Verfahrens unterscheiden, mit dem das Beschichtungsmaterial in die Gasphase überführt wird. In der einfachsten Form, bei dem thermischen Aufdampfen, wird das Material in einem geheizten Behälter oder mit einem Elektronenstrahl

höchste Anforderungen an die Präzision und unübertroffene Schichtqualität hat sich hier das Ionenstrahl-Zerstäuben (engl.: Ion Beam Sputtering, IBS, siehe *Abbildung 2*) etabliert, das auch überwiegend in der Abteilung Laserkomponenten erforscht wird. Das IBS-Verfahren besteht durch seine einfache Anordnung aus drei völlig getrennten Einheiten zur Generation des Ionenstrahls mit einer

Ionenquelle, zur Freisetzung des Materials von einer Targetanordnung und schließlich zur Schichtbildung auf den Optiken im Substrathalter. Die Betriebsparameter dieser drei Prozesskomponenten können unabhängig voneinander gesteuert und so die Beschichtung



direkt erhitzt und verdampft. Nachteilig bei diesen thermischen Verfahren ist die geringe Energie des freigesetzten Materials, die letztendlich zur Bildung von relativ porösen, aber für viele optische Anwendungen qualitativ noch ausreichende Schichten führt. Die Schichtqualität kann erhöht werden mit dem Ionen- oder plasmagestützten Aufdampfen, bei dem die fehlende Energie mittels eines auf die wachsenden Schichten gerichteten Ionenstroms nachgeliefert wird. Bei einer anderen Klasse von Beschichtungsverfahren, den Zerstäubungsprozessen, wird das Beschichtungsmaterial von einem Target abgestäubt und erhält so eine für die Schichtbildung optimale Energie. Für

sehr präzise sowie reproduzierbar kontrolliert werden.

Mit diesen Vorzügen wurde das IBS-Verfahren dann auch Vorreiter bei der Entwicklung

von hochflexiblen deterministischen Beschichtungsprozessen, die zur Erringung der enormen Fortschritte der Photonik, Lasertechnologie und auch in vielen spektakulären Experimenten der Grundlagenforschung unentbehrlich wurden. War die optische Dünnschichttechnologie noch bis Ende der 1980er Jahre aufgrund der vielen, teilweise unbeherrschbaren Herstellungsparameter als »schwarze Magie« verschrien, so gelingt heute die routinemäßige Herstellung von Schichtsystemen aus mehreren tausend Einzelschichten mit Schichtdickengenauigkeiten im Bereich von Atomlagen. Ein wesentlicher Meilenstein auf dem Wege hin zu diesen enormen Fähigkeiten war neben dem IBS-Verfahren insbesondere die Erforschung von hochgenauen Kontrollverfahren für die Dicke der Einzelschichten. Die Abteilung Laserkomponenten hat hier mit der Entwicklung eines direkt an dem Beschichtungsprodukt messenden, spektral auflösenden Monitorprinzips einen wesentlichen Beitrag geleistet. In Kombination mit einer angepassten Softwareumgebung begleitet dieses Konzept den gesamten Gestehungsprozess für komplexe optische Schichtsysteme, von der Berechnung der optimalen Schichtenfolge und einer Vorhersage ihrer Herstellbarkeit, über die eigentli-

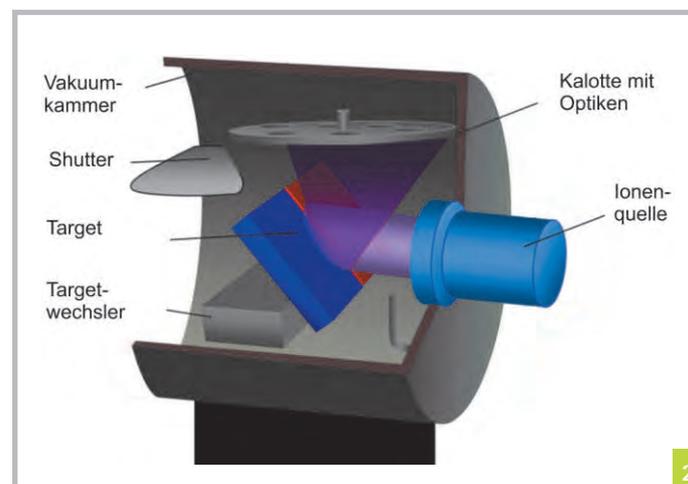


Abbildung 1  
Funktion einer Einzelschicht. Eine Lichtwelle trifft mit definierter Phase und Amplitude auf eine Schicht auf einem Träger. Partielle Reflexionen finden an der Schichtoberfläche und dem Übergang zum Träger statt. Diese Partialwellen interferieren nach der Reflexion.

**1a)** Die beiden reflektierten Wellen haben gegensinnige Phase und löschen sich gegenseitig aus: Prinzip einer einfachen Antireflexbeschichtung.

**1b)** Die beiden Wellen sind gleichphasig und verstärken sich: Steigerung der Reflexion.

**1c)** Prinzip eines dielektrischen Spiegels. Einzelschichten mit angepasster Dicke werden hintereinander geschaltet. Wie bei der Einzelschicht addieren sich die jeweils an den Grenzflächen reflektierten Teilwellen. Bedingt durch die große Anzahl der Teilwellen kann eine hohe Reflektivität beliebig nahe an 100% erreicht werden.

Abbildung 2  
Schematische Darstellung des IBS-Verfahrens: Ionenquelle, Targets und Substrathalter für die zu beschichtenden Optiken.

Abbildung 3

Schematische Darstellung des phasenseparierenden IBS Prozesses in der QUEST-Anlage. Hierbei wieder der klassische IBS-Prozess durch einen Magnetfeldseparator ergänzt, so dass das Beschichtungsmaterial nicht frei in der Kammer propagiert, sondern auf Grund des magnetischen Feldes durch den Separator geführt wird. Ein Vorteil des Konzeptes ist es, dass Partikel, die wegen ihrer größeren Masse dem Feld nicht folgen können, aus dem Teilchenstrahl entfernt werden und somit partikelarme Schichten erzeugt werden können.

che Kontrolle im Herstellungsprozess bis hin zum Qualitätsmanagement der hergestellten Schichtprodukte. Mehr noch ist das System mittlerweile in die Lage versetzt worden, Fehler während eines Beschichtungsgangs zu erkennen und selbständig zu

wird der Erfolg von spektakulären Grundlagenexperimenten und fortschrittlichen Anwendungen in den optischen Technologien sogar direkt durch die Verfügbarkeit angepasster Schichtsysteme begrenzt. Besonders deutlich wird dies beispielsweise für

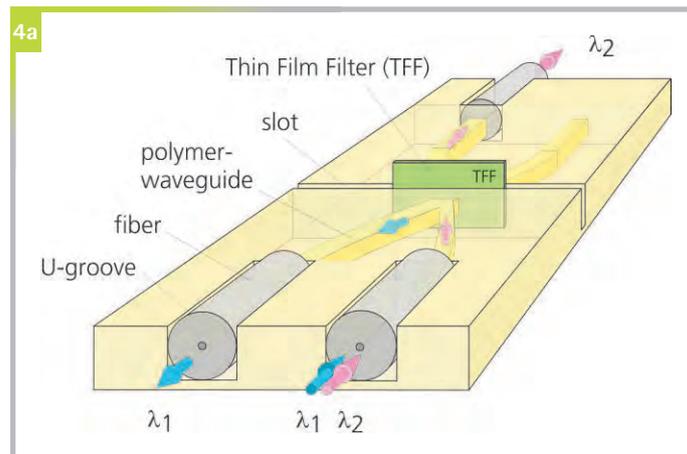
besteht ein immenser kontinuierlicher Forschungsbedarf in der optischen Dünnschichttechnologie, der weit über grundlegende Betrachtungen hinaus konsequente Umsetzungen neuester Technologien und komplexer Modellstellungen erfordert.



Abbildung 4

a) Miniaturisierter 1x2-Multiplexer für die Datenkommunikation: Dünnschicht-Filterelement, integriert in Polymerbaustein mit Wellenleitern zur Anbindung an optische Fasern

Quelle: Fraunhofer HHI



b) Größenvergleich: Polymerbaustein, bestückt mit einem hochkomplexen optischen Filter

Quelle: Fraunhofer HHI

korrigieren. In der optischen Dünnschichtindustrie hat das Konzept, das in Form eines Erweiterungsgeräts in Kooperation mit einem führenden Hersteller für Beschichtungsanlagen vertrieben wird, in den vergangenen Jahren großen Anklang gefunden und einen hohen Verbreitungsgrad erreicht.

Die Grundlagenforschung in der optischen Dünnschichttechnologie begleitet viele herausragende Innovationen in der modernen Quantenphysik und Photonik. In vielen Fällen

den Einsatz von Hochleistungs-Lasersystemen in der Kernfusion, Materialbearbeitung, Medizin oder auch der hochempfindlichen Messtechnik. Gefordert ist hier nicht nur eine hohe optische Qualität, wie unter vielen anderen in den Interferometersystemen für optische Uhren oder die Umweltmesstechnik, sondern auch eine hohe Präzision in der Wellenlängencharakteristik, etwa für Ultrakurzpuls-Lasersysteme, in der optischen Breitband-Kommunikation oder in der Astrophysik. Mit diesen Herausforderungen

Schwerpunkte der Abteilung Laserkomponenten liegen hier beispielsweise auf Entwicklungen für die Kommunikationstechnik, Satelliten zur Umwelterkundung, für die fs-Lasertechnologie und Halbleiterlithographie oder das kürzlich offiziell in seine Bauphase eingetretene European Extremely Large Telescope (E-ELT). Grundlagen werden gegenwärtig zu neuen Prozesskonzepten für eine weitere Qualitätssteigerung, zu Simulationen von Wachstumsprozessen und zu nichtlinearen Effekten in optischen Schichten erarbeitet.

Ein Beispiel für die Erforschung von neuartigen IBS-Prozessen im Rahmen des Exzellenzclusters »Quantum Engineering and Space Time Research«, QUEST, ist in *Abbildung 3* illustriert. Das konventionelle IBS-Verfahren wird hier erweitert durch einen zusätzlichen Filter, mit dem das freigesetzte Material bezüglich Energie und Masse vorsortiert wird, bevor es die Schicht bilden kann. Damit verbunden sind eine Verringerung von Schichtdefekten und eine Steigerung der optischen Transparenz.

»Fiber to the home« ist ein Begriff, der immer dann genannt wird, wenn es um die individuelle Versorgung vieler Haushalte mit schnellem Internet auf optischem Wege geht. Um hier die dem jeweiligen Haushalt zugeordneten optischen Kommunikationskanäle aus dem mit der Faser übertragenen Gesamtspektrum heraus zu sortieren, werden kostengünstige, aber

dennoch hochpräzise Filterkomponenten benötigt. In *Abbildung 4* ist ein Ansatz für eine solche Komponente dargestellt, die vollständig auf Kunststoffbasis realisiert ist und keinerlei optische Abbildungselemente enthält. Möglich wird dies durch das dargestellte optische Filterschichtsystem, das auf einer extrem dünnen Kunststoffolie von wenigen Mikrometern Dicke aufgebracht wird und einfach in den optischen Weg der Faser gesteckt werden kann, ohne die Lichtwege wesentlich zu beeinflussen.

Abschließend sei noch ein Beispiel aus der Erforschung nichtlinearer Effekte in optischen Schichten in *Abbildung 5* vorgestellt. Durch geschickte Anordnung der Schichten und Optimierung der Konversionseigenschaften können Spiegel realisiert werden, die das einfallende Laserlicht als in seiner Frequenz verdreifachte Strahlung reflektieren. In dem dargestellten Beispiel wurde in Kooperation mit der University of New Mexico, Albuquerque, USA, eine Konversionseffizienz von etwa 1 Prozent erreicht. Für eine direkte Generation der verdreifachten Frequenz ist dies ein sehr hoher Wert, der mit anderen Verfahren nur sehr schwer



#### Prof. Dr. Detlev Ristau

Jahrgang 1957, ist Professor am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover sowie Abteilungsleiter Laserkomponenten am Laser Zentrum Hannover e.V. und arbeitet seit über 30 Jahren in der optischen Dünnschichttechnologie. Seine Forschungsschwerpunkte konzentrieren sich auf die Entwicklung und präzise Kontrolle moderner Ionenprozesse für die Fertigung hochwertiger und stabiler optischer Schichten, auf grundlegende Eigenschaften sowie die Charakterisierung von Optikkomponenten. Kontakt: [d.ristau@lzh.de](mailto:d.ristau@lzh.de)



#### Dr. Henrik Ehlers

Jahrgang 1971, Studium und Promotion an der Leibniz Universität, ist Gruppenleiter am Laser Zentrum Hannover e.V. Seit mehr als 15 Jahren arbeitet er auf dem Gebiet der Optischen Schichten mit dem Fokus auf In-situ-Diagnostik, Prozesskontrolle und Automatisierung im Bereich der Ionen- und plasmagestützten Beschichtungsprozesse sowie der Ionenstrahl-Zerstäubung. Kontakt: [h.ehlers@lzh.de](mailto:h.ehlers@lzh.de)



#### Dr. Marco Jupé

Jahrgang 1973, hat an der Leibniz Universität promoviert und beschäftigt sich seit 2001 mit Lasern und optischen Beschichtungen am Laser Zentrum Hannover e.V. Seit 2012 konzentriert sich seine Arbeit auf grundlegende Aspekte, wie Materialentwicklung, numerische Simulation und neuartige, nichtlineare optische Komponenten und fundamentale Beschichtungsprozesse. Kontakt: [m.jupe@lzh.de](mailto:m.jupe@lzh.de)

erreicht werden kann. Die Forschung steht hier noch am Anfang, und es bestehen weitere Steigerungsmöglichkeiten durch Serienschaltung solcher THG (Third Harmony Gene-

ration)-Spiegel. Damit könnte das Verfahren die bisher zur THG eingesetzten hochkomplexen und empfindlichen Konversionssysteme in der Praxis verdrängen.

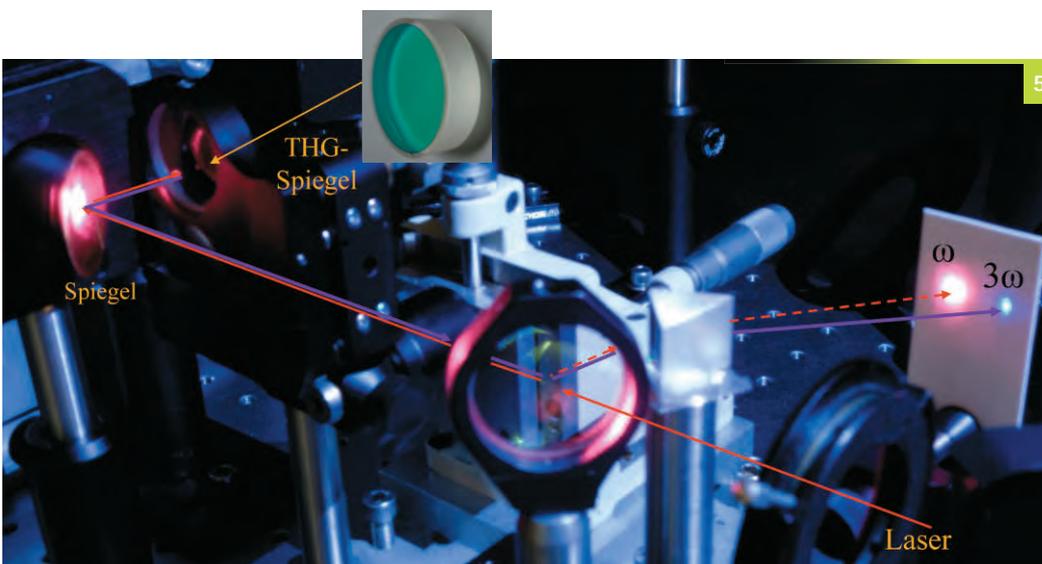


Abbildung 5  
Generation der dritten Harmonischen in einem Schichtsystem unter Bestrahlung mit einem fs-Laser. Der Laserstrahl mit der Grundfrequenz ( $\omega$ ) erreicht den THG-Spiegel und wird teilweise mit verdreifachter Frequenz ( $3\omega$ ) reflektiert. Nach Umlenkung über den Strahlteiler und spektraler Trennung mit einem Prisma ist die dritte Harmonische deutlich auf dem Schirm zu erkennen. Quelle: Wolfgang Rudolph, University of New Mexico

# Der Laser als hochpräzises Werkzeug

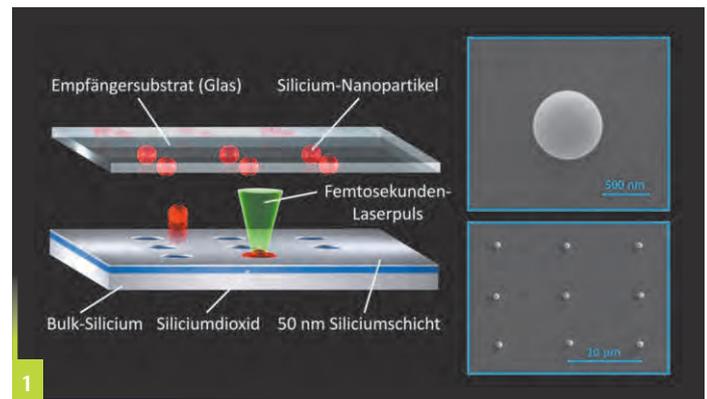
## ÜBER DAS DRUCKEN VON NANOPARTIKELN UND LEBENDEN ZELLEN

Durch laserinduzierten Transfer können sehr kleine und empfindliche Objekte wie Nanopartikel oder lebende Zellen in definierte Muster gedruckt werden. Drei Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität und vom Laser Zentrum Hannover e.V. erläutern die Entwicklung und Funktion des Lasers als ein sehr präzises Werkzeug für Anwendungen in der Nanophotonik und im Tissue Engineering.

3D-Drucker kann man inzwischen für weniger als 500 Euro kaufen. Damit kann man Thermoplastik mit relativ grober Auflösung drucken. Doch auch für viele andere Materialien, unter anderem Polymere, Metalle und Keramik sowie für feinere Auflösungen wurden und werden Drucktechniken entwickelt. Dabei spielen auch Laser-basierte Prozesse eine wichtige Rolle, zum Beispiel beim selektiven Laser-Schmelzen, der Stereolithographie oder der Multiphotonenpolymerisation.

Mit Lasern können aber auch sehr kleine und sehr empfindliche Objekte wie Nanopartikel oder lebende Zellen in definierte Muster gedruckt werden. Die verwendete Technik wird laserinduzierter Vorwärts- oder Rückwärtstransfer genannt. Der laserinduzierte Vorwärtstransfer wird im Laser Zentrum Hannover e.V. zum Drucken lebender Zellen verwendet, während Nanopartikel mit dem laserinduzierten Rückwärtstransfer zugleich erzeugt und gedruckt werden.

Silicium-Nanopartikel mit definierter Form und Größe können als nanophotonische Komponenten dienen, beispielsweise als Nanolaser, Sensoren oder Metamaterialien. Dafür wird ein Verfahren benötigt, das eine sehr präzise Herstellung und Anordnung dieser Nanopartikel ermöglicht. 3D-Konstrukte aus le-



benden Zellen zu drucken ist ein vielversprechender Ansatz für das Tissue Engineering und die Nachbildung natürlicher zellulärer Mikroumgebungen in Organen und Geweben (Zellnischen). Chemische, pharmazeutische und kosmetische Stoffe könnten an gedrucktem menschlichem Gewebe statt in Tierversuchen getestet werden. Für die Zukunft wäre das Drucken lebender Zellen eine Schlüsseltechnologie, mit der komplette funktionelle Ersatzorgane für die Implantation hergestellt werden könnten.

Für das kontrollierte Erzeugen und Drucken einzelner Silicium-Nanopartikel haben wir eine Technik des laserinduzierten Rückwärtstransfers entwickelt. Diese Technik ermöglicht das Drucken kugelförmiger Si-Nanopartikel in definierte Positionen auf einem Substrat (Abbildung 1). Die gedruckten Nanopartikel haben eine einstellbare Größe

und zeichnen sich durch spezifische optische Eigenschaften aus. Bei Größen zwischen 100 und 200 Nanometer (nm) im Durchmesser weisen sie ausgeprägte elektrische und magnetische Dipol-Resonanzen innerhalb des sichtbaren Spektralbereichs auf. Aufgrund dieser Resonanzen zeigen sie leuchtende Farben in einer dunkelfeldmikroskopischen Aufnahme. Die Wellenlängen der Resonanzen und die Effizienz der Streuung hängen dabei stark vom Material der Nanopartikel und deren kristallografischen Phasen ab. Reines Silicium kann in monokristalliner, polykristalliner oder amorpher (= ungeordneter) Phase vorliegen. Die gedruckten Silicium-Nanopartikel befinden sich initial in einer amorphen Phase. Ein zweiter Femtosekunden-Laserpuls kann danach diese Nanopartikel kristallisieren (Abbildung 2). Nach der Kristallisierung ist die optische Resonanz der Silicium-Nano-

partikel wesentlich stärker und sie erscheinen in einer anderen Farbe.

Für das gleichzeitige Erzeugen und Drucken der Nanopartikel werden einzelne Laserpulse (50 Femtosekunden lang; 780 nm Wellenlänge; gaussförmiges Strahlprofil) durch eine »Empfänger«-Glasplatte auf ein Silicium-auf-Isolator (SOI (silicon-on-

stand zum Substrat etwa 5  $\mu\text{m}$  (Mikrometer) – in die Richtung, aus der der Laserpuls kam. An der Oberfläche dieser Glasplatte erstarrt die Siliciumkugel und haftet an. Die erzeugten Silicium-Nanopartikel sind initial in einer amorphen Phase und können danach mit einem zweiten Femtosekunden-Laserpuls kristallisiert werden. In unserem System hat dieser eine

se) beschleunigt und schlägt sich als Tropfen auf der Oberfläche eines Substrats unter dem Glasplättchen nieder. Durch das horizontale Verfahren des Glasplättchens und des Laser-Fokus kann jedes gewünschte zweidimensionale und Schicht-für-Schicht auch dreidimensionale Muster gedruckt werden. In diesem Drucksystem wird ein Laser mit 10 Nanosekunden Puls-

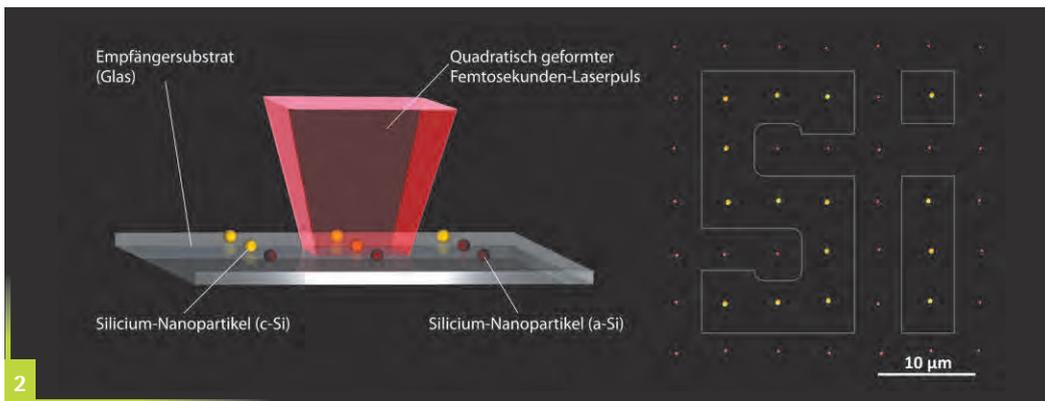


Abbildung 2  
Laser-induzierte Kristallisation amorpher Silicium-Nanopartikel (a-Si) mit einzelnen quadratisch geformten Femtosekunden-Laserpulsen. Die Dunkelfeld-Mikroskop-Aufnahme (rechts) der Silicium-Nanopartikeln auf einem Glassubstrat zeigt innerhalb des eingerahmten Bereichs eine sichtbare Farbänderung durch die Kristallisation von amorphen Silicium-Nanopartikel zu kristallinem Silicium (c-Si).

insulator))-Substrat fokussiert (Abbildung 1). Dieses Substrat besteht aus einem Silicium-Wafer, auf dem eine 200 nm dicke Siliciumdioxid-Schicht und darauf eine 50 nm dicke kristalline Siliciumschicht aufgebracht wurde. Während der Bestrahlung des SOI Wafers durch einen scharf fokussierten Laserpuls führt die Absorption in der oberen Siliciumschicht zu sehr schneller Erhitzung und lokalem Schmelzen dieser Schicht.

Die Siliciumdioxid-Schicht (deren Schmelztemperatur viel höher ist) bleibt unverändert. Flüssiges Silicium hat eine höhere Dichte als festes, was zu einer Volumenabnahme beim Schmelzen führt. Dadurch und aufgrund der Oberflächenspannung zieht sich das geschmolzene Silicium zu einer Kugel zusammen und wird von der Oberfläche des Substrats senkrecht wegbeschleunigt, also zurück zur Empfänger-Glasplatte – Ab-

quadratische homogene (flat top) Intensitätsverteilung (Abbildung 2).

Das System zum Drucken lebender Zellen mit dem laser-induzierten Vorwärtstransfer verwendet ein Glasplättchen oder transparentes Band, das mit einer dünnen Schicht eines die Laserstrahlung absorbierenden Materials und einer zweiten Schicht des zu druckenden Biomaterials beschichtet ist. Das Biomaterial ist üblicherweise ein Sol, die nicht gelierte Vorstufe eines Hydrogels, mit eingemischten Zellen (Abbildung 3). Dieses beschichtete Glasplättchen wird mit den Schichten nach unten im Drucksystem montiert und Laserpulse werden durch das Glasplättchen in die Absorptionsschicht fokussiert, welche im Fokus verdampft wird. Das sich direkt darunter befindliche Biomaterial wird durch den Dampfdruck nach unten (in der Vorwärts-Richtung bezüglich der Laserpul-

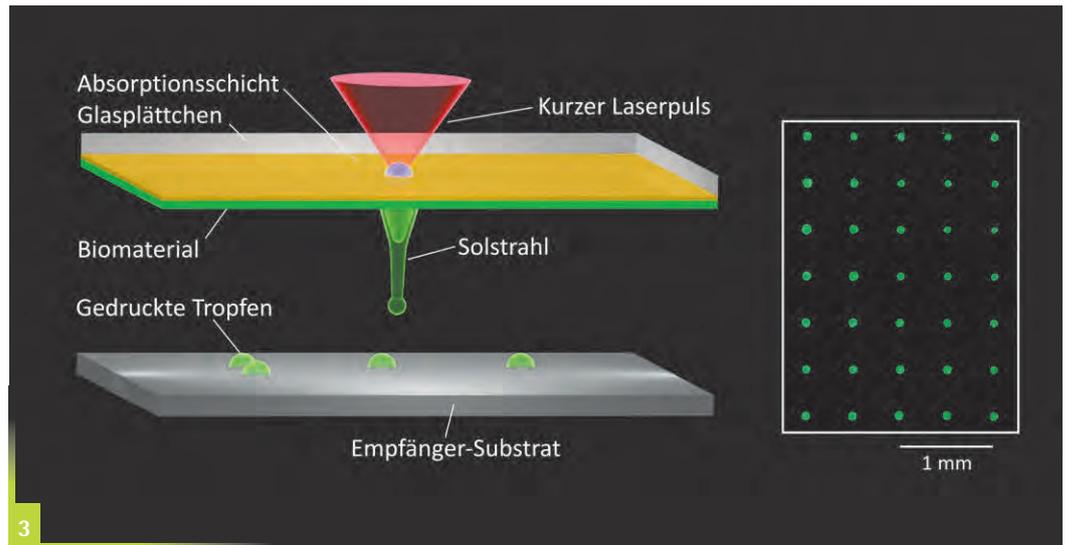
dauer und einer Wellenlänge von 1064 nm verwendet.

In einer Reihe von Untersuchungen konnten wir sicherstellen, dass Zellen durch diesen Druckprozess nicht geschädigt werden. Auch das Differenzierungsverhalten und -potenzial von Stammzellen wird nicht beeinflusst. Stammzellen wurden in definierte Strukturen gedruckt und dann in diesen Strukturen zu Knochen, Knorpel oder Fettgewebe differenziert (Abbildung 4).

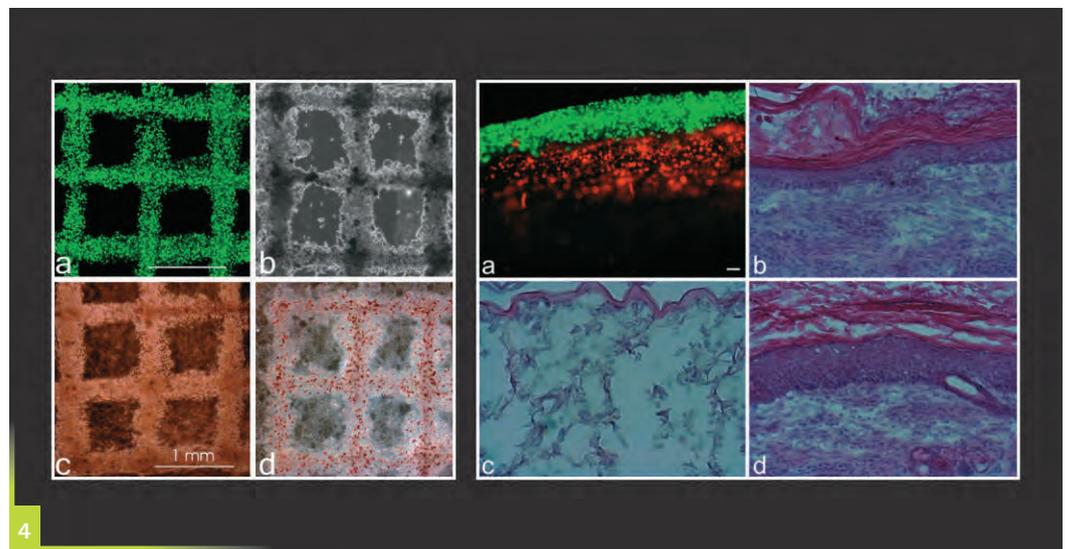
Mit spezifischen Mustern aus verschiedenen Zellen können Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Zellen sowie zwischen Zellen und ihrer Umgebung durchgeführt werden. Mit dieser Technik wurden die gezielte Migration von Stammzellen (aus humanem Fettgewebe) zu Endothelzellen und ihre Interaktion zur Ausbildung von Blutgefäßen beobachtet. Aus Kollagen,

Abbildung 1  
Schematische Darstellung des Laser-Druckens von Silicium-Nanopartikeln von Silicium-auf-Isolator-Substraten. Die transferierten Silicium-Nanopartikel sind in den Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen rechts zu sehen.

**Abbildung 3**  
Schematische Darstellung des Laser-Druckens vitaler Zellen eingebettet in ein Sol. Die fokussierten Laserpulse verdampfen eine Absorptionsschicht im Laserfokus. Der Dampfdruck beschleunigt das Biomaterial darunter als einen Flüssigkeitsstrahl zum Empfänger-Substrat. Der Strahl besteht für einige hundert Mikrosekunden und es verbleibt ein Tropfen. Die Mikroskopaufnahme rechts zeigt Tropfen mit fluoreszierenden Zellen.



**Abbildung 4**  
Beispiele von 3D-gedruckten Zellstrukturen: Stammzellen gedruckt in Gittermuster (links) direkt nach dem Drucken (a) und differenziert zu Knochen (b), Knorpel (c) und Fettgewebe (d). Histologische Schnitte von gedruckter Haut (rechts), bestehend aus Fibroblasten und Keratinozyten direkt nach dem Drucken (a) und nach zehn Tagen implantiert in Mäuse (b) im Vergleich zu natürlicher Maushaut (d) und ohne gedruckte Zellen (c).



Fibroblasten und Keratinozyten wurde Schicht-für-Schicht 3D Hautgewebe gedruckt. Die Gewebekonstruktion wurde durch die Visualisierung funktioneller interzellulärer Verbindungen nachgewiesen; die Ausbildung einer Basalmembran an der Grenzschicht zwischen dermalen und epidermalen Hautzellen wurde beobachtet. Nach Implantation in Mäuse zeigten sich ein Einwachsen von Blutgefäßen und eine Differenzierung der epidermalen Keratinozyten.

Im Vergleich zu anderen Drucktechniken für lebende Zellen, wie Extrusion oder Tintenstrahldrucken, die

durch kleine Düsen drucken, bietet die düsenfreie laserbasierte Drucktechnik den Vorteil, eine hohe Auflösung und geringe Tropfengröße mit dem Drucken hochviskoser Materialien und hoher Zelldichten, wie sie zur Gewebekonstruktion notwendig sind, zu kombinieren. Damit könnten in Zukunft sehr komplexe Gewebe und Organe aus vielen verschiedenen Zellarten sehr detailliert gedruckt werden.

Die hier vorgestellten laserbasierten Drucktechniken sind sehr vielversprechend für einen weiten Anwendungsbereich in der Nanophotonik und im Tissue Engineering.

Der Laser erweist sich hier als sehr präzises Werkzeug, um sehr kleine und empfindliche Objekte mit hoher Auflösung zu drucken.

**Acknowledgements**

Die vorgestellten Forschungsarbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft teilweise im Exzellenz-Cluster REBIRTH (EXC 62/1), im Sonderforschungsbereich Transregio 123 »Planar Optronic Systems« und dem Projekt CH 179/20-1 finanziell gefördert.

**Dr. Lothar Koch**

Jahrgang 1973, ist Leiter der Gruppe Biofabrikation in der Abteilung Nanotechnologie am Laser Zentrum Hannover e.V. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung und Anwendung laserbasierter Verfahren zum 3D Drucken biologischer Zellen zur Erzeugung von Gewebe und Organen. Kontakt: [l.koch@lzh.de](mailto:l.koch@lzh.de)

**Martin Duderstadt**

Jahrgang 1988, ist Doktorand in der Gruppe Nanomaterialien und Nanophotonik am Laser Zentrum Hannover e.V. Sein Arbeitsschwerpunkt ist der 3D-Druck mit Nanopartikeln sowie die Nanopartikelablation von dünnen Schichten in Luft und Wasser. Kontakt: [m.duderstadt@lzh.de](mailto:m.duderstadt@lzh.de)

**Urs Zywietz**

Jahrgang 1986, promovierte über die Erzeugung und Anwendung lasergedruckter Nanopartikel. Er arbeitet heute als Software-Ingenieur in der Valeo Schalter und Sensoren GmbH. Kontakt: [u.zywietz@googlemail.com](mailto:u.zywietz@googlemail.com)

**Prof. Dr. Boris Chichkov**

Jahrgang 1955, ist Professor für Nanoengineering am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in dem Bereich der Entwicklung neuer Lasertechnologien für Photonik und Biomedizin. Kontakt: [chichkov@iqo.uni-hannover.de](mailto:chichkov@iqo.uni-hannover.de)

## Wir suchen dich!

Du studierst Wirtschaftsingenieurwesen, Maschinenbau, Mathematik oder Informatik und hast den Abschluss bald in der Tasche?

Du suchst einen Job in Hannover und hast Lust, praxisnah zu forschen?

Dann bewirb dich bei uns:  
[www.iph-hannover.de](http://www.iph-hannover.de)



| Produktion erforschen und entwickeln |

# Der optomechanische Bildderotator

## OPTISCH DREHEND MESSEN

Am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Gerät entwickelt, mit dem bewegliche Bauteile gemessen werden können, ohne dass in den laufenden Betrieb eingegriffen werden muss oder dieser auf andere Art beeinflusst wird. Im Folgenden wird die Funktionsweise dieses optomechanischen Bildderotators erläutert.

Eine wichtige und stets aktuelle Aufgabe in den Ingenieurwissenschaften ist das Messen technischer Bauteile. Die Motivation dazu ist vielfältig. An erster Stelle dient das Messen der Sicherstellung einer fehlerfreien Funktionsweise. Dies ist zum einen in der Sicherheit für Mensch und Umwelt, zum anderen in den steigenden Anforderungen bezüglich der Leistungsfähigkeit von Maschinen begründet. Ein weiterer Faktor ist die Effizienz: Kosten und Energieverbrauch sollen möglichst gering sein. Das Einhalten dieser Anforderungen wird idealerweise schon in der Konstruktion berücksichtigt. Am zuverlässigsten aber kann es anhand von Messungen nachgewiesen werden.

Die Wissenschaft der Messtechnik – auch Metrologie genannt – beschäftigt sich mit Methoden und Geräten, die dabei helfen, Bauteile auf verschiedenste Art und Weise zu charakterisieren. Dabei gibt es Rahmenbedingungen, die durch die verschiedenen Arten des Vorgehens bei einer Messung vorgegeben sind. Es wird zum Beispiel unterschieden, ob die Messungen während des laufenden Betriebs durchgeführt werden können oder ob sich die Maschine dafür im Stillstand befinden muss. Die Betriebsparameter, also zum Beispiel die Geschwindigkeit, mit der sich die Maschine bewegt oder die Temperatur, auf die



sich das Bauteil erwärmt, beeinflussen das Verhalten der Maschine. Der Vorteil von Messungen während des Betriebs ist demzufolge, dass diese unter realen Bedingungen stattfinden und den Einfluss der Betriebsparameter nicht vernachlässigen. Weiterhin wird differenziert, ob die Messung berührungslos stattfinden kann oder nicht. Das bedeutet, ob das Messgerät an dem Bauteil angebracht werden muss (»berührend«) oder das Bauteil von außerhalb beobachtet werden kann (»berührungslos«). Der Nachteil

bei berührenden Messungen ist, dass diese zum Beispiel durch die Masse des Messgerätes die Messung beeinflussen und somit verfälschen. Dies kann zur Folge haben, dass wichtige Erkenntnisse verloren gehen. Im schlimmsten Fall kann dies langfristig einen Defekt oder die komplette Zerstörung einer Maschine hervorrufen.

Es liegt also auf der Hand, dass berührungslose Messverfahren, die während des Betriebs stattfinden, klare Vorteile aufweisen. Oft stellt eine

Messung während des Betriebs aufgrund der Bewegung der Maschine aber eine große Herausforderung dar. Besonders schwierig ist die Messung schnell rotierender Bauteile, wie zum Beispiel Wälzlager, Schaufelräder oder Bremscheiben. Gerade solche Objekte sind jedoch in vielen technischen Anwendungen zu finden. Um das dynamische Betriebsverhalten rotierender Objekte unter realen Betriebs-

Im Folgenden soll die Funktionsweise des Derotators genauer erläutert werden: Kernstück des Derotators ist ein Spiegelsystem, das sich aus zwei einzelnen Objekten mit insgesamt drei spiegelnden Flächen zusammensetzt. Das erste Element hat annähernd die Form eines geraden Prismas. Dieses besitzt zwei spiegelnde, dreieckige Grundflächen. Bei dem anderen Objekt handelt es sich um einen ge-

ebene auf. Dieses Abbild kann nun einfach mit dem Auge beobachtet oder mit einer Kamera aufgenommen werden.

Interessant wird dieses Prinzip, wenn das Messobjekt mit einer bestimmten Geschwindigkeit rotiert. Bleibt die Spiegelanordnung einfach ruhig stehen, passiert zunächst gar nichts. Wird das Spiegelsystem nun hingegen mit genau der halben Geschwindigkeit

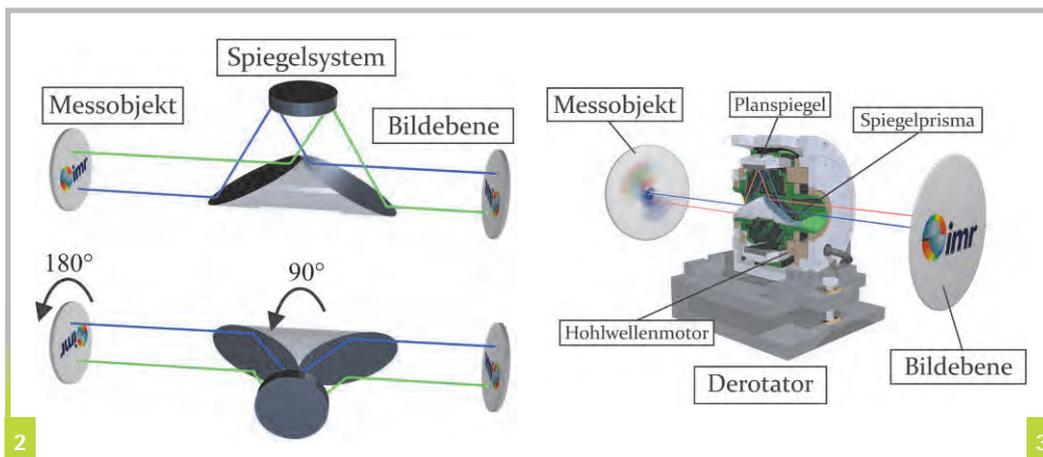


Abbildung 1  
Die Aufnahme zeigt den Derotator, der am IMR entwickelt wurde. Zur Positionierung ist er auf einem Hexapoden gelagert.

Abbildung 2  
Diese Abbildung zeigt den Einfluss auf ein Bild, wenn das Spiegelsystems um den halben Winkel des Messobjektes gedreht wird.

bedingungen zu untersuchen, wird am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) der optomechanische Bildderotator, oder kurz gesagt Derotator, entwickelt. Der Derotator ist in *Abbildung 1* dargestellt. Mit Hilfe optischer Elemente generiert der Derotator eine quasi stehende Abbildung des rotierenden Objekts. Dies hat den gleichen Effekt, als würde das Messgerät, zum Beispiel eine Kamera, mit gleicher Geschwindigkeit mit dem rotierenden Objekt mitdrehen. Der Derotator lässt somit auf einfache Weise Messungen zu, die ohne dessen Einsatz nicht ohne weiteres möglich wären, ist dabei mit vielfältigen Messgeräten kombinierbar und kann somit flexibel für Schwingungsmessungen, Deformationsmessungen, Stabilitätsanalysen oder diverse andere Messmethoden am rotierenden Objekt verwendet werden.

wöhnlichen Spiegel. Das Prinzip ist im oberen Teil der *Abbildung 2* verdeutlicht. Hier ist auch der Strahlengang zweier Lichtstrahlen zu sehen. Von dem Messobjekt treffen die Lichtstrahlen auf die erste spiegelnde Fläche des Prismas. Diese werden im gleichen Winkel zurückgeworfen, mit dem sie eintreffen, sodass sie auf den zweiten Spiegel fallen. Dies ist durch das so genannte Reflexionsgesetz (»Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel«) bestimmt. Der zweite Spiegel wird so angeordnet, dass die Lichtstrahlen zurück auf die zweite Fläche des Prismas gespiegelt werden. Von dort werden die Strahlen (und somit das Abbild des zu messenden Objektes) weiter reflektiert. Die Lichtstrahlen treffen nach der dritten und letzten Reflexion wieder in derselben Richtung, in der sie vom Objekt abgestrahlt wurden, in der Bild-

des Messobjektes gedreht, trifft ein Lichtstrahl, der von einem fixen Punkt auf dem Messobjekt ausgeht, immer auf denselben Punkt in der Bildebene. In *Abbildung 2* ist das im unteren Teil der *Abbildung* verdeutlicht. Rotiert das Messobjekt um einen Winkel von  $180^\circ$ , muss sich das Spiegelsystem um die Hälfte, also  $90^\circ$ , drehen, damit die Abbildung des Messobjektes in der Bildebene ruhend erscheint. Damit die Spiegelanordnung gedreht werden kann, ist sie in einem Hohlwellenmotor platziert (siehe *Abbildung 3*). So ist es möglich, das Spiegelsystem in eine Rotationsbewegung zu versetzen. Die Gesamtheit aus Motor und Spiegelanordnung wird als Derotator bezeichnet, weil sie die Bewegung eines Objektes optisch de-rotiert. Dreht sich der Derotator stetig mit der halben Geschwindigkeit des Messobjektes, entsteht in der

Abbildung 3  
Hier wird der Aufbau des gesamten Derotators deutlich, der neben einem Hohlwellenmotor auch das Spiegelprisma und den Planspiegel beinhaltet.

Bildebene folglich eine quasi stehende Abbildung des rotierenden Objektes. Dieser optische Effekt bietet großes Einsatzpotenzial in der Messtechnik.

Am IMR befindet sich für Messaufgaben der Derotator-Versuchsstand gemäß *Abbildung 4*. Eine zusätzliche Be-

Entscheidend bei Aufnahmen ist eine gute Ausleuchtung des Objektes. So kann die Belichtungszeit der Kamera gering gehalten werden, was eine schnellere Abfolge an Aufnahmen ermöglicht. Aus diesem Grund wird der Versuchsstand mit einem LED-Beleuchtungsring erweitert. Damit im Labor des IMRs Versuche

verhalten von Wälzlager gemessen. Wälzlager sind in einer Vielzahl von Maschinen verbaut, die eine rotatorische Bewegung ausführen. Um einen langen und einwandfreien Betrieb zu garantieren, muss das Wälzlager unter gewissen Bedingungen agieren. Diese implizieren, dass die Wälzkörper im Lager eine Abrollbewegung durchführen. Unter bestimmten Umständen kann es jedoch passieren, dass die Wälzkörper nicht mehr rollen, sondern anfangen durchzurutschen (»Schlupf«). Dies ist eine häufige Ursache für Schäden am Lager, die auf lange Sicht zu einer Zerstörung und einem Ausfall der Maschine führen können. Mit Hilfe des Derotators kann Schlupf gemessen werden, sodass entsprechende Gegenmaßnahmen vorgenommen werden können.

Ein weiteres Problem kann entstehen, wenn sich das Wälzlager zu stark erhitzt. Erwärmungsprozesse werden häufig mit Hilfe einer Wärmebildkamera gemessen. Da das Wälzlager jedoch aus vielen einzelnen Elementen besteht, ist es oft schwer, den genauen Ort der Wärmeentwicklung zu lokalisieren. Auch dieses Problem kann mit Hilfe des Derotators gelöst werden. Bei Wärmestrahlung handelt es sich um Strahlung im Infrarotbereich. Da die Spiegel des Derotators aus poliertem Aluminium gefertigt sind, können sie (im Gegensatz zu Glas) auch Infrarotwellen reflektieren, die dann wiederum gemessen werden können.

Ein weiteres Einsatzgebiet liegt in der Messung des Schwingverhaltens rotierender Objekte. Dafür wird der Derotator mit einem Messgerät (Laser-Scanning-Vibrometer) kombiniert, das Laserstrahlung aussendet. Diese trifft auf das Messobjekt und wird dort durch die Schwingbewegung des Messobjektes

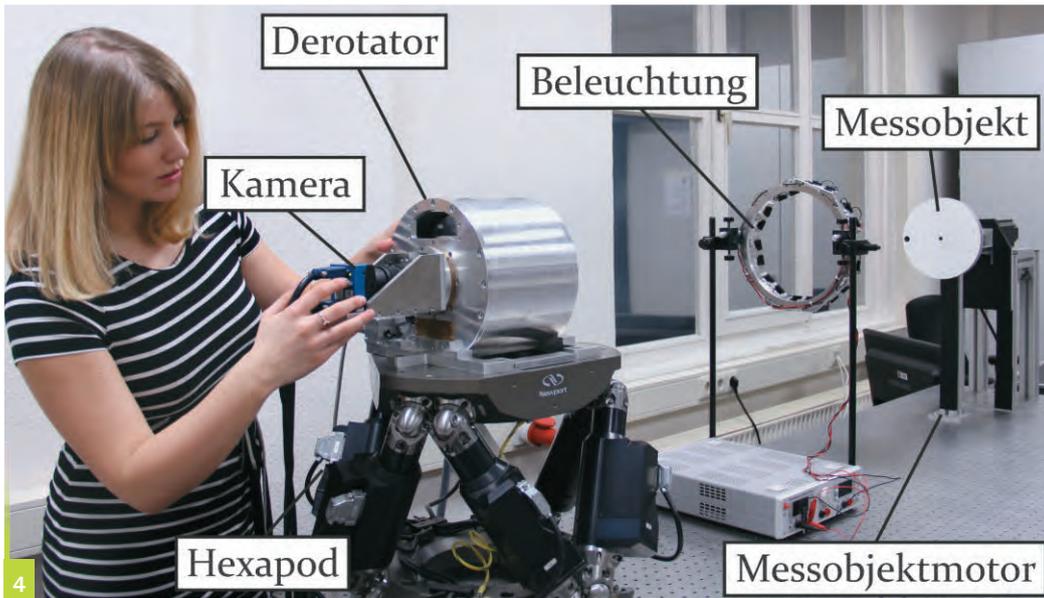


Abbildung 4  
Diese Aufnahme zeigt einen exemplarischen Versuchsaufbau des Derotators am IMR. Die Kamera kann hierbei auch durch andere Messsysteme ersetzt werden.

dingung für eine ruhende Abbildung ist neben dem oben beschriebenen Geschwindigkeitsverhältnis eine Ausrichtung der Rotationsachsen zueinander. Um die Rotationsachse des Derotators mit der Rotationsachse des Messobjektes in Übereinstimmung zu bringen, ist der Derotator auf einem »Hexapod« gelagert. Ein Hexapod ist eine Plattform, die sich mit sechs Beinen veränderlicher Länge im Raum bewegen lässt. Durch Kippen und Verschieben lässt sich der Derotator so automatisiert in die richtige Position bringen. An der Rückseite des Derotators gibt es eine Vorrichtung, um Messgeräte zu befestigen. In der Abbildung ist hier eine Hochgeschwindigkeitskamera angebracht. Dort kann allerdings auch eine Vielzahl anderer Messgeräte montiert werden.

durchgeführt werden können, gibt es einen Messobjektmotor. Mit diesem können beliebige Objekte in Rotationsbewegungen versetzt und dann im Betrieb gemessen werden. Die Geschwindigkeit des Objektes wird entweder mit Hilfe eines am Motor eingebauten Sensors oder über Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmt, sodass der Derotator jederzeit um den richtigen Winkel gedreht wird. Neben dem Einsatz im Labor kann der Derotator aber auch flexibel an anderen Versuchsständen betrieben werden, um dort Messungen im realen Betrieb vorzunehmen.

Eine Möglichkeit der Anwendung des Derotators ist, ein zu messendes Objekt in Videoaufnahmen zu untersuchen. So wurde in der Vergangenheit zum Beispiel das Betriebs-

beeinflusst bevor sie zurück zum Messgerät geworfen und mittels eines Interferometers ausgewertet wird. So können die Schwinggeschwindigkeit und der Schwingweg eines fixen Punktes auf dem Messobjekt gemessen werden.

Mit dem Derotator steht dem IMR ein optisches System zur Verfügung, das Messungen an rotierenden Systemen entscheidend vereinfacht, ergänzt und erweitert. Das Einsatzgebiet liegt hier sowohl in Videoaufnahmen eines Messobjektes, als auch in Thermografie- und Schwingungsmessungen. Durch die Umsetzung berührungsloser Messungen während des Betriebs kann Sicherheit, Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit einer Maschine überprüft und sichergestellt werden.



#### Bettina Altmann

Jahrgang 1990, ist seit 2015 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Mess- und Regelungstechnik. Ihre Forschungsinteressen liegen hauptsächlich in der Regelungstechnik, industriellen Bildverarbeitung und optischen Messtechnik. Kontakt: [bettina.altmann@imr.uni-hannover.de](mailto:bettina.altmann@imr.uni-hannover.de)



#### Dr.-Ing. Christian Pape

Jahrgang 1978, ist seit 2011 Arbeitsgruppenleiter für Regelungstechnik und Akustik am Institut für Mess- und Regelungstechnik. Seine Forschungsinteressen liegen hauptsächlich in der bildrückgeführten Regelung und aktiven Schallkompensation. Kontakt: [christian.pape@imr.uni-hannover.de](mailto:christian.pape@imr.uni-hannover.de)



#### Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Jahrgang 1957, ist seit 1996 Direktor des Instituts für Mess- und Regelungstechnik. Seine aktuellen Forschungsinteressen liegen in der Regelungstechnik, Biomedizintechnik, Fertigungs-, Oberflächen- und optischen Messtechnik. Kontakt: [sekretariat@imr.uni-hannover.de](mailto:sekretariat@imr.uni-hannover.de)

## Drive your career at WABCO



Wir suchen engagierte, kreative Köpfe, die sich und ihre Ideen verwirklichen möchten – wenn Sie mit uns richtig Gas geben wollen, freuen wir uns auf Ihre Bewerbung!

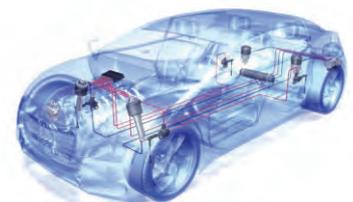
- **Maschinenbau**
- **Informatik**
- **Wirt.-Ing.**
- **Mechatronik**
- **Elektrotechnik**
- **Projektmanagement**
- **Betriebswirtschaft**

Sind Sie bereit zu erfahren, wie weit **Ihr Wissen, Ihr Talent und Ihr Ehrgeiz** Sie in der globalen Welt der Nutzfahrzeuge bringen können?

Sie möchten in einem **internationalen Umfeld** mit vielen **Entwicklungsmöglichkeiten** und **Gestaltungsfreiraum** arbeiten?

WABCO ist einer der weltweit führenden Anbieter von Technologien & Regelsystemen für die Sicherheit und Effizienz von Nutzfahrzeugsystemen.

Zu unseren Kunden gehören die führenden Lkw-, Anhänger- und Bushersteller der Welt. Aber wussten Sie schon, dass wir auch im Pkw-Premium-Segment mit unseren Produkten vertreten sind?



[www.wabco-auto.com/karriere](http://www.wabco-auto.com/karriere)

**WABCO**

# Autonomes Fahren und Beleuchtung

## SIND HEUTIGE SCHEINWERFER GUT GENUG FÜR SELBSTFAHRENDE AUTOS?

Sehen und gesehen werden – dieser Grundsatz ist seit den Anfängen der motorisierten Fortbewegung die Basis für einen sicheren und komfortablen Straßenverkehr. Wissenschaftler vom Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) erläutern, welche innovativen Technologien (Laserlicht) und Funktionen (blendfreies Fernlicht) bereits in aktuellen Fahrzeugen zum Einsatz kommen, um eine sichere Koexistenz konventioneller und autonomer Fahrzeuge sowie mit Passanten im Straßenverkehr zu ermöglichen.

### Scheinwerfer mit Beamertechnologie

Für eine optimale Sicht des Fahrers müssen die Straße und deren nähere Umgebung hell beleuchtet werden. Bei Einbezug des entgegenkommenden Verkehrs wird sofort klar, dass eine helle Ausleuchtung nicht das einzige Ziel sein kann. Das Bestreben in der Lichtentwicklung ist also vielmehr, die optimale Sicht für alle Verkehrsteilnehmer in jeder Fahrsituation zu ermöglichen und insbesondere die Blendung für andere zu minimieren. Das klassische Abblendlicht und Fernlicht wird zunehmend durch adaptive Lichtfunktionen ersetzt. Für die Auswahl der passenden Lichtverteilung werden Fahrzeug- und Kameradaten ausgewertet.

Übersicht adaptiver Lichtfunktionen:

- Landstraßenlicht (entspricht dem klassischen Abblendlicht, also einer asymmetrischen Verteilung mit weiter Ausleuchtung des rechten Fahrbahnrandes)
- Stadtlicht (breite, aber nicht so weite Ausleuchtung der Straße wie beim Landstraßenlicht)
- Autobahnlicht (sehr schmale und weitreichende Lichtverteilung; am IPeG im Rahmen der Dissertation von Herrn Wolf als Lasersatzfernlicht umgesetzt)



- Kurvenlicht (Hineinleuchten in die Kurve)
- Blendfreies Fernlicht (Ausblendung von Gegenverkehr und reduzierte Beleuchtung von Verkehrsschildern)
- Markierungslicht (Beleuchtung oder Markierung von Gefahrenstellen)

Mit einem adaptiven Scheinwerfer in Kombination mit einer Frontkamera oder einem Radarsensor kann die Lichtverteilung so angepasst werden, dass entgegenkommende Fahrzeuge aus dem Lichtkegel ausgespart werden, um eine Blendung der Insassen zu vermeiden. Das Fernlicht kann damit zeitlich länger und häufiger genutzt werden. Diese Funktion des blendfreien Fernlichts wurde 2015 in PKW der Kompaktklasse mit acht einzeln schaltbaren LEDs eingeführt. Aktuelle Modelle der Oberklasse können mit 84

LEDs pro Scheinwerfer bereits eine Vielzahl adaptiver Scheinwerferfunktionen umsetzen.

Die nächste Innovation bahnt sich an: Die Integration einer bewährten Technologie aus Videoprojektoren führt zu einem Sprung der einzeln steuerbaren Elemente oder »Pixel« in einem Scheinwerfer auf 1.000.000 und mehr. An Universitäten und in Unternehmen wird momentan intensiv an der Integration dieser Technik in Scheinwerfer gearbeitet.

Konkret arbeitet das Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) an Technologien, mit denen diese hochauflösenden Scheinwerfer umgesetzt werden können. Um die aus Videoprojektoren bekannten LCD-Panels (LCD: Liquid Crystal Display) und Mikrospiegelarrays (DMD:

Digital Micromirror Device) zu integrieren, müssen die unterschiedlichen Anforderungen an einen Videoprojektor und an einen Scheinwerfer beachtet werden. Anforderungen bezüglich der Einsatztemperatur, Vibrationen und Verschmutzung sind für Fahrzeuge restriktiver. Auch ist die homogene (gleichmäßige) Ausleuchtung des Bildes, die für Videoprojektoren ein Qualitätsmerkmal ist, für Schein-

Fahren zwischen der Straße und dem Armaturenbrett wechselt. Die ständige Akkommodation an die veränderte Distanz führt zu einer Ermüdung der Augen. Eine Lösung dafür sind Head-Up Displays, die wichtige Informationen, zum Beispiel die aktuelle Geschwindigkeit, auf eine virtuelle Ebene vor dem Fahrzeug projizieren, sodass die Akkommodation entfällt. Der nächste Entwicklungs-

kommunizieren, überhaupt aufwändige und teure Scheinwerfer benötigen.

Die Antwort darauf ist eindeutig: Solange der Verkehrsraum ein offener und zugänglicher Bereich ist, wird es Verkehrsteilnehmer geben, die nicht digital vernetzt sind. Die Forschungen zum sogenannten kooperativen autonomen Fahren werden intensiver und untersuchen die spannende Frage, wie autonom agierende Fahrzeuge mit »analogen« Verkehrsteilnehmern kommunizieren können. Die Kommunikation über Licht bietet vielfältige und vielversprechende Lösungen, die in zwei Gruppen gegliedert werden können:

- Systeme, die Informationen direkt am Fahrzeug über leuchtende Elemente anzeigen: Das können einfache LED-Leisten sein, die bereits im Fahrzeuginnenraum als Zierleisten eingesetzt werden, aber auch großflächige organische LED-Panels (OLEDs) oder LC-Displays. Der Vorteil dieses Ansatzes ist der hohe Kontrast, der eine Nutzung auch tagsüber erlaubt.
- Systeme, die Informationen auf die Straße projizieren oder in das Sichtfeld anderer Verkehrsteilnehmer projizieren.

Die Anforderungen an projizierende Lichtsysteme ähneln denen an adaptive Scheinwerfer. Im Unterschied zu der Projektion von Informationen für den Fahrer des projizierenden Fahrzeugs, sollen autonome Autos mit externen Verkehrsteilnehmern kommunizieren. Wie in *Abbildung 2* dargestellt ist, eignet sich für den Bereich direkt vor dem Fahrzeug ein hochauflösender Scheinwerfer. Neben oder hinter dem Fahrzeug bieten andere Systeme Vorteile – ein Beispiel dafür ist ein scannen-



Abbildung 1  
Projektion von Symbolen auf die Straße  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

werfer dagegen eher hinderlich. Hier ist eine inhomogene Lichtverteilung mit einem Hotspot in der Mitte gefordert. Nur mit einer speziellen verzerrenden Optik, die am IPeG entwickelt und patentiert wurde, kann das erreicht werden.

Auch auf dem Gebiet der Entwicklung von Lichtassistenzsystemen ist das IPeG aktiv: Herr Jürgens entwickelte für seine Dissertation einen kontrastadaptiven Scheinwerfer, der eine an die aktuelle Adaption der Augen des Fahrers angepasste Lichtverteilung generiert, um die Eigenblendung durch Verkehrsschilder zu verhindern.

Die sehr hohe Auflösung des Systems ermöglicht eine weitere Funktion – die Projektion von Informationen oder Symbolen direkt auf die Straße. Das ist sinnvoll, da die Blickrichtung des Fahrers beim

schritt ist die Anzeige kontaktanaloger Informationen, also zum Beispiel Navigationshinweise, die direkt auf der realen Fahrbahn zu sehen sind (*Abbildung 1*). Hier zeigt sich das Potenzial der projizierenden Scheinwerfer für zukünftige Assistenzsysteme, da es möglich wird, Informationen für den Fahrer in die reale Welt, also auf die Straße, zu schreiben.

### Autonome Fahrzeuge im Straßenverkehr

Die zuvor erwähnten adaptiven Lichtfunktionen unterstützen hauptsächlich den Fahrer des Fahrzeugs, indem sie situativ angepasst den Verkehrsraum ausleuchten. Es stellt sich die Frage, ob autonome Autos, die per GPS navigieren und per Funk mit anderen Fahrzeugen, Ampeln und Infrastruktur (Car-2-X)

Abbildung 2  
Projizierter Zebrastreifen  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau



### Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer

Jahrgang 1963, ist seit 2011 Leiter des Instituts für Produktentwicklung und Gerätebau. Außerdem ist er Vorstandsmitglied des Hannoverischen Zentrums für Optische Technologien (seit 2012) und im wissenschaftlichen Direktorium des Laser Zentrums Hannover (seit 2016). In Forschung und Lehre liegen seine Schwerpunkte im Gerätebau, der rechnergestützten Produktentwicklung und der Optomechatronik. Kontakt: [lachmayer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:lachmayer@ipeg.uni-hannover.de)

der Laserscheinwerfer, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

Zusammen mit Designern der Hochschule Hannover haben Maschinenbaustudenten am IPeG in einer semesterbegleitenden Veranstaltung (»Masterlabor«) zum Thema »Licht spricht« Konzepte zur Kommunikation autonomer Fahrzeuge erarbeitet. In *Abbildung 3* projiziert ein Fahrzeug Symbole auf die Straße, die einem Fahrradfahrer zeigen, dass dieser von der Sensorik des Fahrzeugs erkannt wurde

scanner farbige Symbole erzeugen und erreicht bei einer kleinen Fläche eine höhere Beleuchtungsstärke. Außerdem ist der Scanner räumlich unabhängig von den Scheinwerfern im Fahrzeug integrierbar, er kann also auch hinter oder neben dem Fahrzeug projizieren.

Damit der Scanner auch bei heller Umgebung sichtbare Symbole erzeugen kann, muss die Ausgangsleistung des Systems erhöht werden. Hierfür ist insbesondere weitere Forschung an Laserdioden nötig.

Abbildung 3  
Konzept zur Lichtkommunikation autonomer Fahrzeuge  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

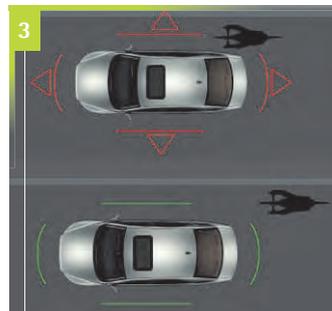


Abbildung 4  
Designentwurf einer Leuchtfläche zur Kommunikation  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau



und der Sicherheitsabstand groß genug ist. *Abbildung 4* zeigt einen Designentwurf für eine Leuchtfläche, über die eine Kommunikation stattfinden kann.

### Laserprojektion auf der Straße

In *Abbildung 5* wird ein Symbol von einem Prototyp eines Laserscanners (*Abbildung 6*) auf die Straße projiziert. Im Gegensatz zu der Projektion mit einem hochauflösenden Scheinwerfer kann der Laser-

Neben funktionalen Überlegungen spielt auch die Lasersicherheit eine wichtige Rolle bei der Entwicklung eines laserbasierten Lichtsystems. Das optische System zur Formung des Laserstrahls sollte so ausgelegt sein, dass die Divergenz des Strahls mit zunehmender Entfernung möglichst groß ist, die Flächenleistung nimmt damit ab. Auf Systemebene kann ein laserbasiertes Lichtsystem so integriert werden, dass ein Einschalten nur bei ausreichender Geschwindigkeit des Fahrzeugs möglich ist. Durch die zeitlich begrenzte Exposi-

tion der Augen mit Laserlicht wird eine Gefährdung reduziert.

### Ausblick

Der am IPeG entwickelte hochauflösende Scheinwerfer vereint die Funktionen eines konventionellen Scheinwerfers und die eines Projektionsystems und ist damit bereits heute für autonome Fahrzeuge gerüstet. Auch der Laserscanner kann nicht nur für Projektionen für den Fahrer genutzt werden, sondern auch für die

**Dipl.-Ing. Gerolf Kloppenburg**

Jahrgang 1984, ist Gruppenleiter der Forschungsgruppe Optomechatronik und arbeitet seit 2012 am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau. Seine Arbeitsschwerpunkte in Forschung und Lehre sind Fahrzeugscheinwerfer und laserbasierte Beleuchtungssysteme. Das Thema seiner Doktorarbeit ist die Konzeptionierung einer scannenden Laser-Projektionseinheit für den Einsatz am Fahrzeug. Kontakt: [kloppenburg@ipeg.uni-hannover.de](mailto:kloppenburg@ipeg.uni-hannover.de)

**Dr.-Ing. Alexander Wolf**

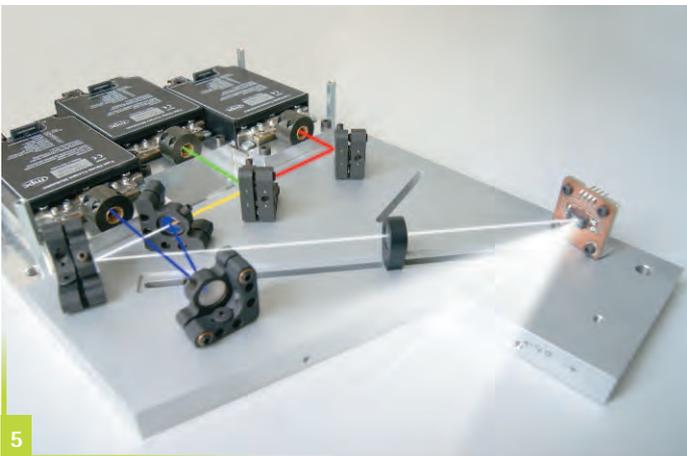
Jahrgang 1984, arbeitet seit 2011 am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau. Seine Arbeitsschwerpunkte in Forschung und Lehre sind die Simulation und Konzeptionierung angepasster optischer Systeme. Kontakt: [wolf@ipeg.uni-hannover.de](mailto:wolf@ipeg.uni-hannover.de)

**M. Sc. Marvin Knöchelmann**

Jahrgang 1988, Maschinenbaustudium an der TU München, arbeitet seit 2016 am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die Entwicklung hochauflösender Fahrzeugscheinwerfer. Kontakt: [knoechelmann@ipeg.uni-hannover.de](mailto:knoechelmann@ipeg.uni-hannover.de)

**Dipl.-Ing. Peer-Phillip Ley**

Jahrgang 1988, Maschinenbaustudium an der Leibniz Universität Hannover, arbeitet seit 2016 am Institut für Produktentwicklung und Gerätebau. Er befasst sich in der Forschung mit der Simulation optischer Beleuchtungssysteme für Fahrzeugscheinwerfer. Kontakt: [ley@ipeg.uni-hannover.de](mailto:ley@ipeg.uni-hannover.de)



Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern. An die Entwicklung der optischen Geräte muss nun eine Validierung im Verkehrsraum folgen, in der viele spannende Fragen beantwortet werden können:

- In welchen Situationen ist eine Kommunikation sinnvoll und notwendig?
- Wo und wie groß müssen Symbole angezeigt oder

projiziert werden?

- Welche Symbole sind erkennbar und schnell verständlich?
- Welcher Kontrast (und damit welche Beleuchtungsstärke der entwickelten Systeme) ist notwendig, um die Sichtbarkeit sicherzustellen?
- Wie werden die Projektionen von Verkehrsteilnehmern akzeptiert?

Um diese Fragen zu beantworten und um die entwickelten Prototypen im Einsatz zu validieren, wurde am IPeG ein Versuchsträger ausgerüstet, mit dem Messungen und Probandenstudien im realen Straßenverkehr durchgeführt werden (Abbildung 7). Erste erfolgreiche Testfahrten lassen interessante Forschungsergebnisse in der Zukunft erwarten.

Abbildung 5

*Ein kleiner Laserscanner  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau*

Abbildung 6

*Versuchsfahrzeug mit hochauflösenden Scheinwerfern  
Quelle: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau*

# »Das virtuelle Labor«

## ÜBER DAS PROJEKT HYMNOS

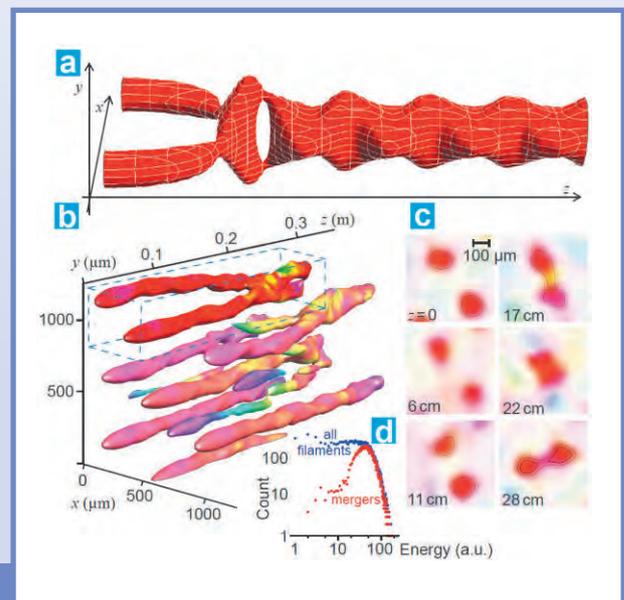
Seit sich Menschen mit optischen Phänomenen beschäftigen, versuchen sie, ihre Beobachtungen in theoretischen Modellen, in Gleichungen und Formalismen erfassbar und beschreibbar zu machen. Ganz am Anfang der Modellbildung in der Optik stand die strahlenoptische Beschreibung, in der Licht als unendlich ausgedehnter gerader Strahl dargestellt wurde. Anfang des 19. Jahrhunderts weitete sich das Bild zur Wellenoptik, in der Lichtwellen und Wellengleichungen zur Erklärung von Lichtauslöschungs- und -ablenkungsphänomenen erfolgreich herangezogen wurden. Diese Näherung hielt bis weit in das 20. Jahrhundert, als die Quantenphysik eine Neubewertung erforderlich machte und das Lichtteilchen, das Photon, postuliert wurde.

Die Verbindung der Wellenphänomene mit der Quantennatur des Lichts ist abstrakt und man begnügt sich in der Anschauung damit, die beiden Welten als Welle-Teilchen-Dualismus, bei dem je nach Experiment das eine oder das andere Erklärungsmodell zum Zuge kommt, nebeneinander zu sehen. Trifft Licht schwacher Intensität auf Materie, sind die Formalismen extrem gut verstanden und die Modelle passen perfekt zu den entsprechenden Messungen. Komplexität und aktueller Forschungsbedarf entstehen hier zum Beispiel durch komplizierte Geometrien wie in der Beleuchtungstechnik oder in der Mikroskopie stark streuender Gewebeprobe. Trifft Licht hoher Intensität hingegen auf Materie, werden die mathematischen Beschreibungen schnell sehr kompliziert, da verschiedene zusätzliche Effekte berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise reißt das intensive Licht Elektronen aus dem Atomverbund und dieses neu entstandene freie Elektronengas verändert die Lichtpropagation und die Lichtabsorption. Die heißen Elektronen heizen das Medium auf, das Medium schmilzt oder verdampft, was wiederum die Lichtausbreitung verändert. In so einer Situation wird eine akkurate Modellierung nur durch die gleichzeitige Berücksichtigung all dieser Phänomene gerecht. Man betritt den Bereich der Multiphysik-Optiksimulation, die im Beispiel die Wellenoptik mit der Elektronen- und der Thermodynamik verbindet. Sie profitiert maßgeblich von aktuellen Trends in der Computertechnik, wodurch eine ganz neue Qualität von bisher nur in Supercomputerzentren erreichbarer Rechenleistung für ein überschaubares universitäres Budget zur Verfügung steht. Numerische Verfahren zum Gewinn eines tieferen Verständnisses komplexer Systeme und zur Vorhersage ihres Verhaltens gewinnen damit eine immer größere Bedeutung. Die Simulation von Lichtfeldern in optischen Medien ist fester Bestandteil der hannoverschen Forschung und erstreckt sich dabei von der theoretischen Physik über die Experimentalphysik bis hin zu den Ingenieurwissenschaften.

Hier in Hannover arbeiten Gruppen aus der Physik, dem Maschinenbau, dem Laserzentrum und federführend dem Zentrum für Optische Technologien (HOT) im VW-Vorabgeforderten Verbundprojekt HYMNOS an vielen Schritten in Richtung dieser Multiphysik-Optiksimulation. Von den daraus resultierenden wesentlich akkurateren Modellen profitieren die Grundlagenforschung und vor allem die verschiedenen Anwendungsfelder, die sich über Lasermaterialbearbeitung, Beleuchtungs-, Kommunikations-, Laser- oder Medizintechnik erstrecken. Hier entsteht das virtuelle Optiklabor der Zukunft, in dem komplizierte neue optische Systeme im Vorfeld bereits genau geprüft und durchgerechnet werden, bevor ein Experiment angegangen wird. Hannover ist auf diesem Themenfeld gut aufgestellt und es ist geplant, weitere Großprojekte zu initiieren.

**Prof. Dr. Uwe Morgner** ist Professor am Institut für Quantenoptik. Kontakt: [morgner@iqo.uni-hannover.de](mailto:morgner@iqo.uni-hannover.de)

Weitere Informationen unter [www.hymnos.uni-hannover.de](http://www.hymnos.uni-hannover.de)



Simulation der räumlichen Lichtverteilung in einem gasförmigen Medium. Die Intensität des Laserstrahls ist so groß, dass das Licht sich eigene Propagationskanäle durch das Gas »brennt« und in ihnen geführt wird (ein sogenanntes Filament). Quelle: Institut für Quantenoptik



Niedersächsische Landesbehörde  
für Straßenbau und Verkehr



## Ihr Weg ist unser Ziel

Wir planen, bauen und erhalten Bundesfernstraßen und Landesstraßen in Niedersachsen.

Wir suchen Ingenieurinnen und Ingenieure mit Master- oder Bachelor-Abschluss als Baureferendare bzw. Bauoberinspektor-Anwärter. Außerdem vergeben wir Stipendien für Bachelor-Studentinnen und Studenten.



Werden Sie Teil unseres Teams!  
[www.strassenbau.niedersachsen.de](http://www.strassenbau.niedersachsen.de)



Niedersachsen. Klar.



ZENTRALE POLIZEIDIREKTION  
NIEDERSACHSEN

Wir bieten Ihnen vielfältige Beschäftigungsmöglichkeiten innerhalb des innovativen Dienstleisters der Landespolizei Niedersachsen in den Bereichen:

- Informatik
- Elektrotechnik
- Informationstechnik
- Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Nachrichtentechnik
- u.v.m

*... für Sicherheit durch Vielfalt im Team!*

### Wir haben Ihr Interesse geweckt?

Weiterführende Informationen zu verschiedenen Berufen, Beschäftigungsmöglichkeiten, Entwicklungsmöglichkeiten sowie Aufgabengebieten innerhalb der Zentralen Polizeidirektion Niedersachsen finden Sie auf unserer Internetseite: [www.zpd.polizei.nds.de](http://www.zpd.polizei.nds.de)

Gern beraten wir Sie auch persönlich.



### Kontakt:

Zentrale Polizeidirektion Niedersachsen  
Tannenbergallee 11  
30163 Hannover  
Tel.: 0511-96 95 12 65  
[pressestelle@zpd.polizei.niedersachsen.de](mailto:pressestelle@zpd.polizei.niedersachsen.de)

## STADTENTWÄSSERUNG HANNOVER WIR FÖRDERN STUDENTISCHEN NACHWUCHS

**Wir bieten für Studenten Themenvorschläge für Bachelor- und Masterarbeiten zum Thema Abwasser an und unterstützen sie fachlich.**

Als größter Umweltbetrieb im Bereich Abwasserreinigung in Niedersachsen sind wir ständig auf hochqualifizierte Mitarbeiter angewiesen. Bewerben Sie sich bei uns!

Stadtentwässerung



Wir klären das.



**Stadtentwässerung Hannover**

Sorststraße 16

30165 Hannover

Telefon: (0511) 168-47401

[68@Hannover-Stadt.de](mailto:68@Hannover-Stadt.de)

[www.stadtentwaesserung-hannover.de](http://www.stadtentwaesserung-hannover.de)

**HANNOVER**

# Der Sonderforschungsbereich Transregio 123

## ZUR ERFORSCHUNG FUNKTIONALER POLYMEROPTIKEN

Das Team des Sonderforschungsbereichs hat es sich zum Ziel gesetzt, eine neue Generation ausschließlich polymerbasierter optischer Folien zu entwickeln, auf welchen großflächig optische Sensoren integriert werden.

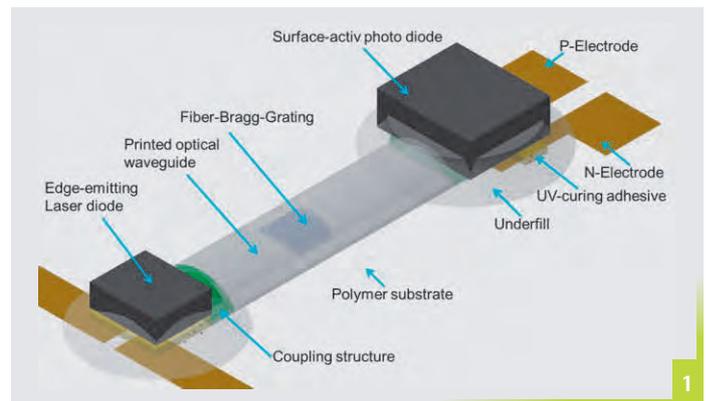
Drei Promovierende vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, vom Institut für Mikroproduktionstechnik sowie vom Institut für Quantenoptik stellen ihre Arbeiten vor.

### Funktionale Polymeroptiken

Von der Medizintechnik bis zur Verpackungsindustrie, von der Bauwerksüberwachung bis zur Molekularanalytik: Polymeroptiken ermöglichen ein kosteneffizientes Messen, Analysieren und Überwachen einer Reihe von physikalischen und chemischen Parametern. Zu diesen Messgrößen gehören etwa die Konzentration von Stoffmengen in der flüssigen beziehungsweise gasförmigen Phase, Druck, Vibration, Verformung, Temperatur und Feuchte, um nur einige zu nennen. Da zum Beispiel ein modernes Mobiltelefon über eine Lichtquelle sowie optische Sensoren verfügt, ergeben sich hier ebenso vielfältige Sensorlösungen (vergleiche den Text »*Labordiagnostik für jedermann – Wie Smartphones das Gesundheitswesen revolutionieren können*« in diesem Heft).

### Sonderforschungsbereich Transregio 123

Das Team des Sonderforschungsbereichs »Transregio 123 – Planare Optronische Systeme« (PlanOS) legte in den vergangenen fünf Jahren die Grundlagen für die Forschung der nächsten Promovierendengeneration. PlanOS wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert und setzt sich aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Leibniz



Universität Hannover, der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, dem Laser Zentrum Hannover e.V. sowie den Technischen Universitäten Clausthal und Braunschweig zusammen. Seit 2013 wurden in dem Programm mehr als 25 Promovierende in den unterschiedlichsten Forschungsgebieten begleitet: Chemiker haben maßgeschneiderte Polymere für die Herstellung von optischen Wellenleitern gebaut, Physiker und Ingenieure konnten Lichtquellen und Detektoren entwickeln, die so zu einer innovativen Sensortechnologie geführt haben. Andere entwickelten Konzepte, um Licht in neuartigen Sensornetzwerken zu verarbeiten oder arbeiteten daran, die Ergebnisse in eine kosten- und ressourcenschonende Massenproduktion zu überführen. Eine schematische Darstellung eines Gesamtsystems mit Quellen, Sensoren, Detektoren und Übertragungsstrecke ist in *Abbildung 1* zu sehen.

### Promovierende bilden erfolgreiche Basis

Die spezifische Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem Gebiet der Polymeroptik ist ein zentraler Aspekt von PlanOS. Nachfolgend werden drei Arbeiten von Promovierenden vorgestellt. Neben diesen Forschungsthemen gab es im Rahmen von PlanOS weitere, die am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT) von Mitgliedern des Integrierten Graduiertenkollegs bearbeitet wurden. So gab es unter anderem Fortschritte bei den polymerfolienbasierten Sensoren für die Messung von Druck und Temperatur (siehe den Beitrag »*Auf dem Weg zur künstlichen Haut – Lichtwellenleiterfolie zum optischen Messen von Druck und Temperatur*« in diesem Heft) sowie bei Sensoren für die Molekularanalytik in der flüssigen Phase (der Beitrag »*Analytik mit flüsterndem Licht*«

in diesem Heft). Darüber hinaus wird am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik an der Hochdurchsatz-Produktion von multimodalen Lichtwellenleitern mittels Flexodruck geforscht. Hierbei wird in einem Rolle-zu-Rolle-fähigen Verfah-

105 °C und PET mit 71 °C, ist ein kalter beziehungsweise Niedrigtemperatur-Fügeprozess erforderlich. Hierfür wurde am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik das neuartige Optische Bonden unter Verwendung UV-härtender Klebstoffe

funktionsfähige mechanische, elektrische und optische Leistungsverhalten erfüllen zu können.

**Thema 2:**  
**Die Kontaktierung und Kühlung von Halbleiterbauteilen auf Polymerfolien (Sebastian Bengsch, Institut für Mikroproduktionstechnik)**

Abbildung 1  
 Schematische Darstellung eines Sensorsystems auf Polymerfolie (Wang, 2013)

Im Zusammenhang mit PlanOS beschäftigt sich das Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) mit Kontaktierungsverfahren von Halbleiterbauteilen auf Polymerfolien. Am Beispiel von Laserdioden konnten bereits

Abbildung 2  
 Multimode-Lichtwellenleiter auf Polymerfolie (Wolfer, 2016)



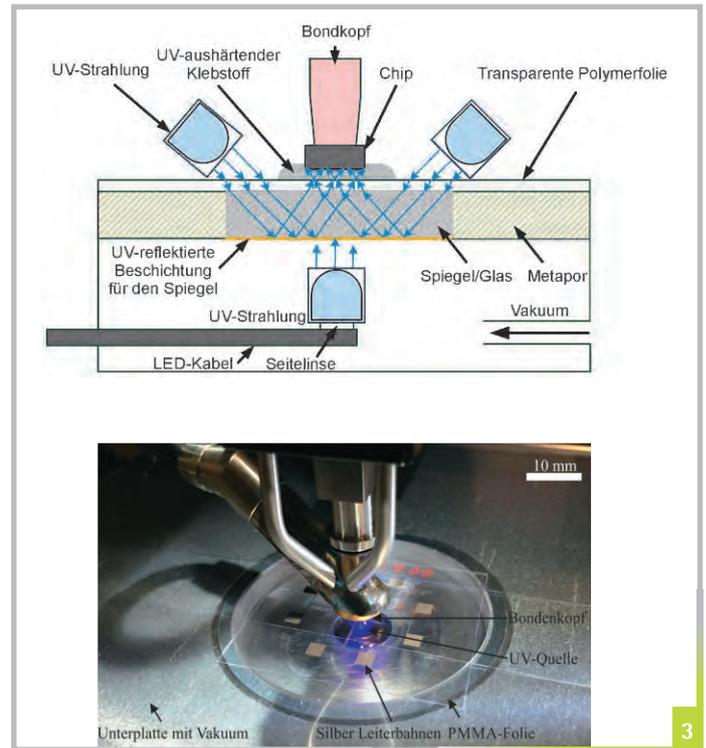
2

ren flüssiges Polymer ähnlich wie Tinte in Wellenleiterbahnen auf eine Polymerfolie mit unterschiedlichen Brechungsindex gedruckt und anschließend mit ultravioletten Licht ausgehärtet (Abbildung 2).

entwickelt, um die als Lichtquellen oder -detektoren eingesetzten opto-elektronischen Komponenten auf die Polymerfolien aufzubringen und anschließend mit diesen zu kontaktieren (vgl. Abbildung 3). Die zentrale Fragestellung beim Optodischen Bondprozess ist neben der Gewährleistung der im Prozess zu erreichenden mechanischen Festigkeit, elektrischen Leitfähigkeit und thermischen Stabilität, auch die Herstellung der optischen Kopplung zwischen opto-elektronischen Komponenten und Lichtwellenleitern. Eine optische Übertragungsstrecke mit optodisch gebondeter Laserdiode und flexografisch gedrucktem Multimode-Lichtwellenleiter wurde demonstriert. Außerdem hat die Wärmeableitung im anschließenden Betrieb der aktiven opto-elektronischen Komponenten einen wesentlichen Einfluss auf die Performanz. Diese Ableitung ist Grundvoraussetzung, um das

**Thema 1:**  
**Das Optodische Bonden von Halbleiterbauteilen auf Polymerfolien (Yixiao Wang, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik)**

Wenn man sich eine Folie als ein Sensornetzwerk mit vollintegrierten optischen Funktionalitäten zur Erfassung diverser physikalischer Größen vorstellt, dann müssen Lichtquellen und -detektoren auf oder in die Folie integriert und mit der Außenwelt verbunden werden. Aufgrund der extrem niedrigen »Schmelztemperaturen« der meisten kostengünstigen transparenten Polymerfolien, wie zum Beispiel PMMA mit



3

Erfolge mittels Löten erzielt werden. Die Bauteile konnten mechanisch und elektrisch auf beschichteten PET, PMMA und PC-Folien kontaktiert und angesteuert werden. Eine große Herausforderung ist die Entwicklung einer Legierung, die eine zuverlässige Kontaktierung unterhalb der

Abbildung 3  
 Schematische Darstellung (oben) und das Foto (unten) des optodischen Bondens (Wang, 2015)

»Schmelztemperatur« der Polymerfolie erzeugt, ohne diese dabei zu beschädigen. Eine Legierung aus den Metallen Indium und Zinn hat sich hierbei als erfolgversprechend herausgestellt.

Laserdioden wandeln den Großteil des Stroms in Wärme um und können auf der verwendeten Folie ohne Kühlkonzept nicht ihren optimalen Arbeitspunkt erreichen. Daher musste eine zuverlässige Wärmeableitungsstruktur entwickelt und untersucht werden, um eine mechanische und elektrische Kontaktierung zu gewährleisten, ohne die Trägerfolie zu beschädigen. Zur passiven Wärmeableitung auf dünnfilmtechnischer Grundlage wurden verschiedene metallische Schichten auf den Polymerfolien, welche im Vorfeld simuliert wurden, aufgetragen und die eingebrachte Wärme erfolgreich abgeführt.

Abbildung 4  
60 Peltierelemente in Reihe geschaltet  
(Bengsch, 2017)

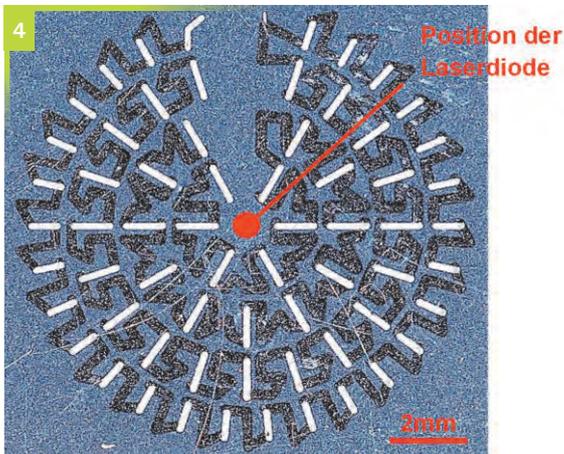


Abbildung 5  
Schematische Darstellung des Laserdirektschreibens  
(Pätzold, 2016)

Um die zur Kühlung benötigte Fläche weiter zu reduzieren, wird außerdem an einem aktiven Wärmeableitungskonzept durch Peltierelemente gearbeitet (vgl. *Abbildung 4*). Hierbei wird mittels Stromfluß ein Temperaturgefälle in einer metallischen Schicht erzeugt. Bei der aktuellen Lösung ist es gelungen, nach Berechnungen die Temperatur um weitere

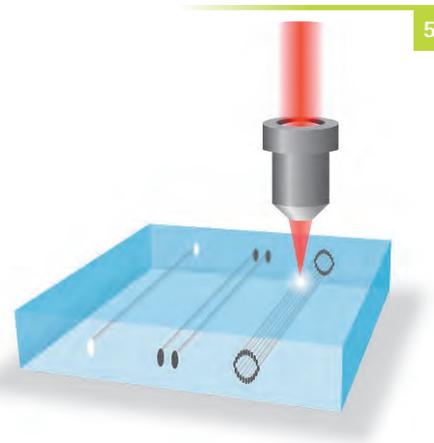
sieben Grad Celsius zu senken und dabei die Kühlfläche um etwa 50 Prozent zu verkleinern.

### Thema 3: Das Laserdirektschreiben von Singlemode-Wellenleitern (Welm Pätzold, Institut für Quantenoptik)

Das Direktschreiben von Wellenleitern in transparenten Polymermaterialien mittels Femtosekundenlaser bedient sich des physikalischen Konzeptes der nichtlinearen Absorption von Licht in einem Medium, das ansonsten durchlässig für die eingestrahlte Wellenlänge ist. Dieser Effekt tritt nur bei sehr hohen Intensitäten auf, die experimentell dadurch erreicht werden, dass die ultrakurzen Laserpulse auf ein wenige Mikrometer großes Volumen fokussiert werden. Wenn das Fokusvolumen im Inneren des



**Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**  
Jahrgang 1964, ist Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik sowie Sprecher des Sonderforschungsbereichs »Transregio 123 – Planare Optronische Systeme«. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Automatisierung von Förderanlagen und innerbetrieblichen Transportsystemen sowie die Integration innovativer Sensortechnologien in diese Anlagen.  
Kontakt: [ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de](mailto:ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de)



mere dreidimensional auf der Mikrometerskala zu bearbeiten. Diese Technik ist extrem flexibel in Bezug auf die Geometrie der erzeugten Struktur und somit hervorragend geeignet zur schnellen Prototypenherstellung. Während der Arbeit für PlanOS ging es im Speziellen um das Erzeugen von lichtleitenden Strukturen, sogenannte optische Wellenleiter. Die Funktionsweise sollte dabei dieselbe sein wie bei handelsüblichen Glasfaserkabeln. Bei diesen ist ein Kern mit hoher optischer Dichte (auch Brechungsindex genannt) umgeben von einem Mantel mit niedrigerer optischer Dichte, was dazu führt, das Lichtstrahlen im Kern gefangen bleiben und über weite Strecken verlustarm geleitet werden können. Die Herausforderung war nun, entsprechende kontinuierliche Brechungsindexmodifikationen im Polymer zu erzeugen, die als Lichtwellenleiter geeignet

**Dr. Sebastian Dikty**

Jahrgang 1978, ist seit 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik sowie Geschäftsführer des Sonderforschungsbereich »Transregio 123 – Planare Optische System«. Unter anderem koordiniert er die zentralen PlanOS-Aktivitäten sowie sämtliche Sonderprojekte. Kontakt: [sebastian.dikty@ita.uni-hannover.de](mailto:sebastian.dikty@ita.uni-hannover.de)

**Dr. Welm Pätzold**

Jahrgang 1985, ist seit 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Quantenoptik. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt in der Polymerprozessierung mittels fs-Laserstrahlung. Kontakt: [paetzold@iqo.uni-hannover.de](mailto:paetzold@iqo.uni-hannover.de)

**M. Sc. Yixiao Wang**

Jahrgang 1986, ist seit 2012 Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik. Ihr Arbeitsschwerpunkt ist die opto-elektronische Aufbau- und Verbindungstechnik. Kontakt: [yixiao.wang@ita.uni-hannover.de](mailto:yixiao.wang@ita.uni-hannover.de)

**Dipl.-Ing. Sebastian Bengsch**

Jahrgang 1987, ist seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Mikroproduktionstechnik. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Metallisierungsverfahren und Sensorik auf flexiblen Substraten. Kontakt: [bengsch@impt.uni-hannover.de](mailto:bengsch@impt.uni-hannover.de)

sind. Die im Rahmen von PlanOS erzeugten Wellenleiter sind die Basis für zukünftige Sensornetzwerke auf Polymerfolienbasis. Die Wellenleiter dienen dazu, die optikbasierten Sensoren mit Licht zu versorgen und die modifizierten Signale weiterzuleiten.

**Blick in die Zukunft**

Inhaltlich folgt PlanOS den wissenschaftlichen Fragestellungen (i) der Integration erforschter Komponenten und Strukturen in dünne Polymerfolien, (ii) der Realisierung von orts aufgelöster, verteilter flächiger Sensorik sowie integrierbarer Polymerlichtquellen, (iii) der Weiterentwicklung der Materialien, Prozesse und Sensorkonzepte hinsichtlich hoher Sensitivität, Spezifität, Verlässlichkeit und Robustheit unter Berücksichtigung einer Rolle-zu-Rolle-Fertigung, (iv) der signaltheo-

retischen Beschreibung aller Komponenten und der Erforschung und Realisierung polymerer Sensornetzwerke sowie (v) der Entwicklung von Konzepten zur Kalibrierung der Sensorfolien unter realen Anwendungsbedingungen. Diese Fragestellungen werden auch in Zukunft an der Leibniz Universität adressiert werden, wobei es von Vorteil ist, eng mit den langjährigen Partnern der anderen PlanOS-Standorte zusammen zu arbeiten.

Die Leibniz Universität ist laut DFG-Forschungsatlas 2015 führend auf den Gebieten der Optik (1. Platz) und der Produktionstechnik (2. Platz). Die Expertise der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Leibniz Universität wird durch die Forschung an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg auf den Gebieten der Polymerchemie, der Polymer-technik sowie der Mikrosys-



temtechnik sinnvoll ergänzt (siehe *Abbildung 6* »PlanOS-Team«). So besteht durch den Transregio 123 sowie durch das Schwerpunktprogramm 1337 »Aktive Mikrooptik« bereits ein enges Netzwerk auf allen Hierarchieebenen. Diese optimalen Voraussetzungen, die auch in der komplementären Lehre in den Schwerpunktgebieten wiederzufinden sind, werden auch in Zukunft eine entscheidende Rolle bezüglich der Erforschung funktionaler Polymeroptiken spielen.

Abbildung 6  
Das PlanOS-Team beim Statusseminar 2016  
(Prucker, 2016)



# Promotionsprogramm Tailored Light

AUF DEM WEG ZUM IDEALEN LICHT

**Was ist ideales Licht? Und wie kann man es erzeugen? Das sind die Kernfragen, mit denen sich die Stipendiatinnen und Stipendiaten des Promotionsprogrammes »Tailored Light« befassen. In diesem Rahmen fördert das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur seit Oktober 2016 mit mehr als einem Dutzend Georg-Christoph-Lichtenberg-Stipendien hochqualifizierte und ausgewählte Nachwuchsforscherinnen und -forscher.**

Das Motto des Programms Tailored Light lautet »Räumlich, zeitlich und spektral maßgeschneidertes Licht für Anwendungen«. Erste Beispiele für derart angepasstes Licht ziehen bereits in unseren Alltag ein: Fahrzeugscheinwerfer schalten automatisch zwischen Fern- und Abblendlicht um und schwenken bei Kurvenfahrt mit (räumliche Anpassung). Straßenlaternen registrieren Passanten und reduzieren ihre Helligkeit, wenn niemand in der Nähe ist (zeitliche Anpassung). Handydisplays emittieren abends weniger blaues Licht, um den menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus nicht zu stören (spektrale Anpassung).

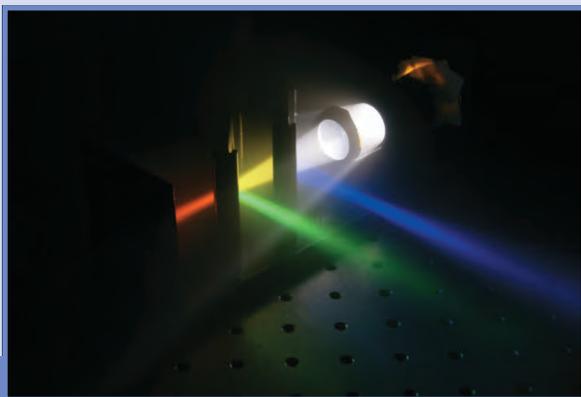
Doch wie lassen sich die Möglichkeiten, die sich beispielsweise durch energieeffiziente LEDs und neue Fertigungsverfahren ergeben, in zukünftige Anwendungen implementieren? Welche Wellenlängen sind besonders geeignet, um spezielle Hautkrankheiten für eine Kamera sichtbar zu machen? Wie kann ein autonomes Fahrzeug über Licht mit seiner Umgebung kommunizieren? Diesen und ähnlichen Fragen gehen die drei Stipendiatinnen und 13 Stipendiaten nach. Die grundlagenorientierten Projekte befassen sich mit den Themen Halbleiterlichtquellen und Manipulation von

Licht durch optische Komponenten während die anwendungsorientierten Projekte Schwerpunkte in der Fahrzeugtechnik, Medizintechnik, Prozess-, Mess- und Beleuchtungstechnik aufweisen. Das international aufgestellte Team von Tailored Light arbeitet dabei nicht nur an sieben Forschungseinrichtungen der Universität Hannover (HOT, IPeG, IDS, ITA, imes, IQO und IfT), sondern auch an der Hochschule Hannover, dem Laser Zentrum Hannover sowie dem Institut für Halbleitertechnik der TU Braunschweig. Organisatorisch angesiedelt ist das Niedersächsische Promotionsprogramm am Hannoverschen Zentrum für Optische Technologien (HOT).

Ein Schwerpunkt des Programms ist die Balance zwischen der eigenen wissenschaftlichen Arbeit an den jeweiligen Instituten und dem Austausch im Tailored Light-Team. Hierzu gibt es neben regelmäßigen fachlich orientierten Teamtreffen und Summer Schools gemeinsame Aktionen wie Kegeln oder Exkursionen. Um der vergleichsweise kurzen Promotionszeit von drei Jahren gerecht zu werden, wird auf existierende Lehrveranstaltungen aller beteiligten Einrichtungen zurückgegriffen. Softskill-Seminare runden die Ausbildung der Promotionsstudenten ab.

Weitere Informationen: [www.tailored-light.uni-hannover.de](http://www.tailored-light.uni-hannover.de)

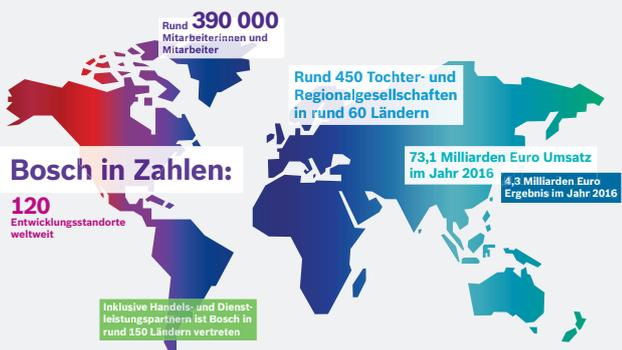
- Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer ist Sprecher des Promotionsprogramms. Kontakt: [lachmayer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:lachmayer@ipeg.uni-hannover.de)
- Dr.-Ing. Alexander Wolf ist Tutor des Promotionsprogramms. Kontakt: [wolf@ipeg.uni-hannover.de](mailto:wolf@ipeg.uni-hannover.de)



1 RGB: Spektrale Aufspaltung von weißem Licht im Labor. Bild: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau.



2 Das Tailored Light-Team zum Kickoff im Oktober 2016. Bild: Institut für Produktentwicklung und Gerätebau.



## Lieber bewegen statt stillstehen? Willkommen bei Bosch.

Die Bosch-Gruppe gehört zu den Global Playern im Technologie- und Dienstleistungsbereich: Wir setzen pro Jahr rund 73 Milliarden Euro um – mit insgesamt über 390.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern weltweit. Wo wir aktiv sind: in den vier Unternehmensbereichen Mobility Solutions, Industrial Technology, Consumer Goods sowie Energy and Building Technology. Wie wir agieren: mit rund 450 Tochter- und Regionalgesellschaften in rund 60 Ländern. Was uns antreibt: Lösungen für das vernetzte Leben zu entwickeln und so weltweit die Lebensqualität der Menschen zu verbessern – mit innovativen und begeisternden Produkten und Dienstleistungen. Was Sie bei Bosch erwartet: die Möglichkeit, wirklich Großes zu bewegen und gemeinsam mit uns aktiv die Zukunft zu gestalten. Als Teil eines Teams, das mit sinnstiftenden Produkten neue Impulse setzt.

**Starten auch Sie etwas Großes.**  
Für mehr Informationen zu Ihren  
Karrieremöglichkeiten bei Bosch:  
[www.bosch-career.de](http://www.bosch-career.de)

Let's be remarkable.



Die **Automotive Safety Technologies GmbH (ASTech)** wurde 2009 als **Joint Venture** zwischen der Andata Entwicklungstechnologie GmbH (Andata) und der Audi Electronics Venture GmbH (AEV) gegründet. Sie entwickelt Softwarelösungen für die Integrale Fahrzeugsicherheit basierend auf dem Technologieansatz von Andata und dem Know-how der Audi Fahrzeugsicherheit.

### Woran wir arbeiten

- Integrale Sicherheit
- Fahrerassistenzsysteme
- Absicherung/Testing
- Simulation uvm.

### Was Dich bei uns erwartet

- Flexible Arbeitszeitgestaltung
- Erfolgreiches Teamwork
- Mitarbeitererevents
- Offene Feedback-Kultur
- Eigenverantwortliches Arbeiten
- Breites Themenspektrum
- Vielfältige Weiterentwicklungsmöglichkeiten

Im Bereich **Virtuelle Absicherung** suchen wir für unseren Standort in **Wolfsburg** zur Unterstützung immer nach **motivierten Mitarbeitern – Berufseinsteigern und Studenten:**

Bestandteil der Absicherung autonomer Fahrfunktionen ist das virtuelle Testen. Hierbei werden Fahrzeugmodelle durch Fahrermodelle in einem Computermodell der Umwelt gesteuert. Dadurch können Algorithmen und Software schon erprobt werden, bevor ein Prototyp überhaupt gebaut wird. Das ermöglicht, viele Millionen Kilometer zurückzulegen – aber eben virtuell.

Für mehr Informationen besuch  
uns unter [www.astech-auto.de](http://www.astech-auto.de).

**Wir freuen uns auf Euch!**



# MACH MAL KARRIERE...

## ...IN EINEM RICHTIG GUTEN TEAM.

Karrieren wachsen in Unternehmen, die in das Know-how ihrer Mitarbeiter investieren. Als Unternehmen für hochwertige Engineering-Services erkennen wir die Potenziale unseres Teams – und fördern sie. Mit unserem SALT AND PEPPER Karriereprogramm treiben wir deine Zukunft an neun Standorten mit anspruchsvollen Projekten und bei deutschlandweit namhaften Kunden voran.

Neugierig? Dann schalte in den Karriereturbo unter  
[www.salt-and-pepper.eu/de/karriere](http://www.salt-and-pepper.eu/de/karriere)  
und werde Teil unseres Teams.

Ansprechpartnerin: Nicole Talaska  
[n.talaska@salt-and-pepper.eu](mailto:n.talaska@salt-and-pepper.eu)

**SALTANDPEPPER**  
technology consulting



## Motiviert und neugierig?

Wir suchen Sie! Wachsen Sie mit uns über sich hinaus!

Seit der Etablierung im deutschen Gastransportmarkt baut Gasunie ihre starke Position als zentraler Pfeiler der nordwest-europäischen Gasdrehzscheibe zukunftsorientiert weiter aus.

- Sie haben Ihr wirtschaftswissenschaftliches, technisches oder naturwissenschaftliches Hochschulstudium erfolgreich abgeschlossen und möchten jetzt mit viel Einsatzwillen den Grundstein für Ihren beruflichen Erfolg in der Energiebranche legen?
- Wir bieten Ihnen ein anspruchsvolles Aufgabengebiet mit hoher Eigenverantwortung in einem engagierten Team, eingebettet in ein attraktives Vergütungssystem mit umfangreichen betrieblichen Sozialleistungen.

**Bleiben Sie neugierig! Besuchen Sie unsere Karriereseite unter [www.gasunie.de](http://www.gasunie.de) und bewerben sich bei uns!**

Haben Sie Fragen? Dann nehmen Sie Kontakt auf:  
[Esther.Wigger-Martens@gasunie.de](mailto:Esther.Wigger-Martens@gasunie.de)

[www.gasunie.de](http://www.gasunie.de)



# Personalia und Preise

## BERUFUNGEN

### Rufe an die Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. **Lidia Becker** hat den Ruf auf die W3-Professur für Romanische Sprachwissenschaft/Hispanistik erhalten und angenommen.

PD Dr. iur. **Christian Becker**, Bucerius Law School Hamburg, hat den Ruf auf die W2-Professur auf Zeit für Strafrecht und Strafprozessrecht erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Nadja-Carola Bigall** hat den Ruf auf die W2-Professur für Funktionale Nanostrukturen erhalten und angenommen.

Dr. **Alexander Bogner**, Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, hat den Ruf auf die W3-Professur für Wissenschaft und Gesellschaft erhalten und abgelehnt.

Dr. **Sandra Buchholz**, Otto-Friedrich-Universität Bamberg und Leibniz-Institut für Bildungsverläufe, hat den Ruf auf die W3-Professur für Quantitative Lebensverlaufssoziologie erhalten.

Prof. Dr. **Hans-Josef Endres**, Hochschule Hannover, hat den Ruf auf die W3-Professur für Kunststofftechnik erhalten.

Dr. **Anna Kosmützky**, Universität Kassel, hat den Ruf auf die W3-Professur für Methodologie der Hochschul- und Wissenschaftsforschung erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Michael Mehring**, Technische Universität Chemnitz, hat den Ruf auf die W3-Professur für Anorganische Molekül- und Materialchemie abgelehnt.

Dr. **Katharina Müller**, Leuphana Universität Lüneburg, hat den Ruf auf die W2-Professur für Schulpädagogik mit dem Schwerpunkt Lehr-Lernforschung erhalten.

Dr. **Astrid Nieße**, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, hat den Ruf auf die W2-Professur mit Tenure Track auf W3 für Energieinformatik erhalten und angenommen.

Dr. **Julian Roelle**, Ruhr-Universität Bochum, hat den Ruf auf die W2-Professur für Schulpädagogik mit dem Schwerpunkt Lehr-Lernforschung erhalten und abgelehnt.

Prof. Dr. **Maik Schmeling**, City University London, hat den Ruf auf die W3-Professur für Volkswirtschaftslehre mit dem Schwerpunkt Geld und internationale Finanzwirtschaft erhalten und abgelehnt.

PD Dr. **Lysann Zander**, Freie Universität Berlin, hat den Ruf auf die W3-Professur für Empirische Bildungsforschung erhalten und angenommen.

### Rufe nach außerhalb

Prof. Dr. **Nadja-Carola Bigall**, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, hat den Ruf auf die W3-Professur für Physikalische Chemie der Nanomaterialien im Fach-

bereich Mathematik und Naturwissenschaften der Universität Kassel erhalten.

Prof. Dr. **Beatrice Brunhöber**, Kriminalwissenschaftliches Institut, hat den Ruf auf die W3-Professur für den Lehrstuhl für Strafrecht, Strafprozessrecht, Rechtsphilosophie und Rechtsvergleichung unter besonderer Berücksichtigung interdisziplinärer Rechtsforschung der Juristischen Fakultät der Universität Bielefeld erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Nikolaus Forgó**, Institut für Rechtsinformatik, hat den Ruf auf die W3-Professur für Technologie- und Immaterialgüterrecht der Rechtswissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Stefan Huber**, Institut für Internationales Recht, hat den Ruf auf eine W3-Professur für Bürgerliches Recht, Zivilprozess- und Insolvenzrecht, Europäisches und Internationales Privat- und Verfahrensrecht an der Juristischen Fakultät der Universität Tübingen erhalten und angenommen.

Prof. Dr. **Bettina Lindmeier**, Institut für Sonderpädagogik, hat den Ruf auf die W3-Professur für Schulentwicklung, Lernbegleitung und sonderpädagogische Professionalität im Kontext von Inklusion an der Universität Leipzig erhalten und abgelehnt.

Prof. Dr. **Ulrike Lüdtke**, Institut für Sonderpädagogik, hat den Ruf auf die W3-Professur für Sprachbehindertenpädagogik von der Humboldt-

Bitte lesen Sie weiter auf Seite 69!



The image shows three people sitting around a table in a modern office or meeting room. A man in a light-colored shirt is on the left, a woman with curly hair in a black blazer is in the middle holding a tablet, and a man in a blue shirt is on the right. They are all smiling and looking at each other. The background shows large windows and office furniture. In the top left corner, there is a blue square logo with the Tchibo logo and the word "Tchibo" below it. In the top right corner, the website "www.tchibo.com" is written in black. The text "Ideen. Neu. Gestalten." and "Dein Impuls für die Tchibo Welt von morgen!" is written in large, bold, white letters across the middle. At the bottom, there is a white box with black text: "Noch mittendrin im Studium und Lust darauf, mit deinen Ideen nicht nur deine Dozenten zu bewegen? Dann entscheide dich für ein Praktikum oder einen Werkstudentenjob bei Tchibo! Wir laden dich ein, unser einzigartiges Geschäftsmodell mit seinen hochwertigen Kaffees und wöchentlich wechselnden Produkten zu entdecken – und mit deinen guten Ideen, deiner Nase für Kaffee und das gewisse Extra für Begeisterung (bei Kunden und Kollegen) zu sorgen!"

Eigenstudium und Präsenzunterricht sinnvoll kombiniert:

# In nur 9 Tagen zum Fachanwaltstitel!

## BLENDED LEARNING

- ▶ geringere Reisekosten
- ▶ weniger Kanzleiabwesenheit
- ▶ flexibler Zeiteinsatz im Eigenstudium
- ▶ praxisorientierte Darstellung der Inhalte
- ▶ Präsenzunterricht ab 2018 auch in Hannover!

Nähere Informationen finden Sie unter [www.fachseminare-von-fuerstenberg.de](http://www.fachseminare-von-fuerstenberg.de) oder unter Tel. 0221 93738-08.



Fachseminare  
von Fürstenberg

FernstudiumCheck  
Teilnehmerbewertung



GUT

96% Weiterempfehlung

Stand: 23.08.2017



GRADUIERTEN  
AKADEMIE



Leibniz  
Universität  
Hannover



## Promotion plus<sup>+</sup>

Ein Programm der Graduiertenakademie für  
Promovierende und frühe Postdocs

- Managementkompetenzen
- berufsbezogene Trainings
- Mentoring & Coaching
- Unternehmenskontakte

Graduiertenakademie  
Leibniz Universität Hannover  
Wilhelm-Busch-Straße 22, 30167 Hannover  
Tel.: +49 511 762 3876  
Fax: +49 511 762 19491  
E-Mail: [graduiertenakademie@zuv.uni-hannover.de](mailto:graduiertenakademie@zuv.uni-hannover.de)

Rund 95 Kooperationspartner aus den verschiedensten Branchen der regionalen Wirtschaft und des Non-Profit Sektors unterstützen uns bereits bei Angeboten in den Bereichen arbeitsmarkt-relevante Kompetenzen und berufliche Netzwerke für Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.  
Werden auch Sie Teil dieses Netzwerkes!

Universität zu Berlin erhalten und abgelehnt.

### Juniorprofessuren

Dr.-Ing. **Avishek Anand**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wurde zum 1. Juli 2017 zum Juniorprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Dr.-Ing. **Kristian Förster**, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, wurde zum 1. September 2017 zum Juniorprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Dr. **Lin Zhang**, Fakultät für Mathematik und Physik, wurde zum 13. Juli 2017 zur Juniorprofessorin an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Dr.-Ing. **Amir Ebrahimi**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wurde zum 1. Dezember 2017 zum Juniorprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Dr.-Ing. **Jens Friebe**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, wird zum 1. Januar 2018 zum Juniorprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

### Ernennung zur Universitätsprofessorin / zum Universitätsprofessor

Prof. Dr. rer. nat. **Sören Auer**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Direktor der Technischen Informationsbibliothek, wurde mit Wirkung zum 1. Juli 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. **Lidia Becker**, Philosophische Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zur Universitätsprofessorin an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. rer. nat. **Sven Beuchler**, Fakultät für Mathematik und Physik, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. rer. nat. **Nadja-Carla Bigall**, Naturwissenschaftliche Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zur Universitätsprofessorin an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. rer. pol. **Peter Dirksmeier**, Naturwissenschaftliche Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. phil. **Nils Neumann**, Philosophische Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. rer. nat. **Thomas Wick**, Fakultät für Mathematik und Physik, wurde mit Wirkung zum 1. Oktober 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

Prof. Dr. **Boris Zizek**, Philosophische Fakultät, wurde mit Wirkung zum 1. Juni 2017 zum Universitätsprofessor an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

### Ernennung zur Universitätsprofessorin / zum Universitätsprofessor auf Zeit

Prof. Dr. **Willem F. Wolkers**, Fakultät für Maschinenbau, wurde mit Wirkung zum 1. November 2017 bis zum 31. Dezember 2018 zum Universitätsprofessor auf Zeit an der Leibniz Universität Hannover ernannt.

### Bestellung zur Honorarprofessorin / zum Honorarprofessor

Dr. jur. **Jens Bormann**, LL. M., Juristische Fakultät, wurde mit Wirkung zum 14. September 2017 zum Honorarprofessor der Leibniz Universität Hannover bestellt.

Dr.-Ing. **Roman Schwartz**, Fakultät für Maschinenbau, wurde mit Wirkung zum 1. Juli 2017 zum Honorarprofessor der Leibniz Universität Hannover bestellt.

### RUHESTAND

Akademischer Direktor Dipl.-Ing. Dr.-Ing. **Wilfried Reimche**, Institut für Kerntechnik und Zerstörungsfreie Prüfverfahren, trat mit Ablauf des 30. September 2017 in den Ruhestand.

Akademischer Direktor Dipl.-Ing. **Hans Rich**, Institut für Berufswissenschaften im Bauwesen, trat mit Ablauf des 30. September 2017 in den Ruhestand.

Oberstudiendirektor **Rüdiger Schreiber**, Leiter des Niedersächsischen Studienkollegs, trat mit Ablauf des 31. Juli 2017 in den Ruhestand.

Prof. Dipl.-Math. Dr. rer. nat. **Franz-Erich Wolter**, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, trat mit Ablauf des 30. September 2017 in den Ruhestand.

### BEENDIGUNG DES DIENSTVERHÄLTNISSSES ALS PROFESSOR/IN

Prof. Mag. iur. Dr. iur. **Nikolaus Forgó**, Juristische Fakultät, ist auf eigenen Antrag mit Ablauf des 30. September 2017 als Universitätsprofessor ausgeschieden.

#### BEENDIGUNG DES DIENST- VERHÄLTNISSES ALS JUNIOR- PROFESSOR/IN

Jun.-Prof. Dr. rer. nat. **Martin Werner**, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, wurde mit Ablauf des 31. Juli 2017 auf eigenen Antrag aus seinem Dienstverhältnis als Juniorprofessor entlassen.

Jun.-Prof. Diplom-Kaufmann Univ. Dr. rer. pol. **Sebastian Bunnenberg**, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, wurde auf eigenen Antrag mit Ablauf des 31. Oktober 2017 aus seinem Dienstverhältnis als Juniorprofessor entlassen.

#### VERSTORBEN

Akad. Rätin a. D. Dr. phil. **Irmela Reimers-Tovote**, ehemals Institut für Erziehungswissenschaften, verstarb am 12. Mai 2017 im Alter von 74 Jahren.

Akad. Oberrat a. D. Apl. Prof. Dr. jur. habil. **Joachim Nocke**, ehemals Fachbereich Rechtsdidaktik, verstarb am 18. August 2017 im Alter von 74 Jahren.

Prof. Dr. phil. **Wolfgang Manz**, ehemals Institut für Berufspädagogik und Erwachsenenbildung, verstarb am 21. September 2017 im Alter von 74 Jahren.

Prof. Dr. phil. **Rudolf Wolfgang Müller**, ehemals Institut für Politische Wissenschaft, verstarb am 6. Oktober 2017 im Alter von 82 Jahren.

#### PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

Prof. **Karsten Danzmann**, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) und Direktor des Instituts für Gravitationsphysik der Leibniz Universität Hannover, hat den mit 50.000 Euro dotierten Otto-Hahn-Preis erhalten. Der Physiker wird für seine wegweisende Forschung zum direkten Nachweis von Gravitationswellen ausgezeichnet. Darüber hinaus erhielt er den mit 750.000 Euro dotierten Körber-Preis für Europäische Wissenschaft.

Der Soziologe Hon.-Prof. Dr. **Gunter A. Pilz** ist mit dem Bundesverdienstkreuz ausgezeichnet worden. Der Orden der Bundesrepublik Deutschland wurde ihm für seine Verdienste in den Bereichen der Gewaltprävention und der Arbeit gegen Rechtsextremismus im und durch den Sport, speziell im Fußball, verliehen.

**Jaayke Lynn Fiege**, Institut für Mineralogie, erhielt für ihre Leistungen im Bereich der Lagerstättengeochemie den Bernd-Rendel-Preis 2017 von der Deutschen Geologischen Gesellschaft.

Prof. Dr. **Georg Guggenberger**, Leiter des Instituts für Bodenkunde, wurde für den Europäischen CULTURA-Preis 2017 für zukunftsgerichte Landnutzung der Alfred Toepfer Stiftung F.V.S. ausgewählt. Mit dem CULTURA Preis werden europaweit innovative und beispielhafte Ansätze auf den Gebieten Naturschutz, Land- und Forstwirtschaft ausgezeichnet.

Prof. Dr.-Ing. **Sami Haddadin**, Institut für Regelungstechnik, und sein Team wurden als einer von drei Finalisten für den Deutschen Zukunftspreis nominiert. Die Gewinner der Auszeichnung für innovative technische, ingenieur- und naturwissenschaftliche Leistung wurden am 29. November in Berlin bekanntgegeben. Der Deutsche Zukunftspreis ist der Preis des Bundespräsidenten für Technik und Information.

Prof. em. **Klaus Kowalski**, Institut für Gestaltungspraxis und Kunstwissenschaft, hat den Hilde-Broër-Preis für Medaillenkunst der DGMK und der Kulturgemeinschaft Kressbronn/Bodensee erhalten. Der Preis wird alle zwei Jahre für ein »herausragendes Lebenswerk auf dem Gebiet der Medaillenkunst« vergeben und gilt als wichtigste Auszeichnung für Künstler der Bundesrepublik, die sich um das zeitgenössische Medaillenschaffen verdient gemacht haben.

Dr. **Antonia Lavrentieva**, Institut für Technische Chemie, erhielt ein Max-Buchner-Stipendium.

Die **Fakultät für Maschinenbau** wurde für drei weitere Jahre mit dem Gütesiegel des Fakultätentages für Maschinenbau und Verfahrenstechnik ausgezeichnet.

# Heimat

ist da, wo man richtig  
anpacken kann

Karrierestart  
bei der VGH!  
[www.vgh.de/  
karriere/studenten](http://www.vgh.de/karriere/studenten)

Finden Sie Ihre berufliche Heimat bei der VGH. Sie haben den Abschluss in der Tasche und brennen darauf, Ihr Wissen anzuwenden? Dann willkommen im Team! Hier ist Ihr Können gefragt, nicht nur hinter dem Schreibtisch, sondern auch vor Ort. Das ist Ihre Chance – packen Sie es an!

#### Individuelle Anforderungen verlangen individuelle Lösungen.

Gemeinsam mit Ihnen realisieren wir für Ihre künftigen Aufgaben einen maßgeschneiderten Karriereestieg. In unserem Traineeprogramm werden Sie ressortübergreifend eingesetzt und durch bestimmte Fördermaßnahmen gezielt und professionell auf Ihren beruflichen Weg vorbereitet. Hierbei bieten wir Ihnen einen verantwortungsvollen Freiraum, Ihr Können zu entfalten und sich fachlich und persönlich weiterzuentwickeln.

Für unser **18-monatiges Traineeprogramm** in unserer Hauptverwaltung in Hannover suchen wir

## Hochschulabsolventen / Hochschulabsolventinnen der Rechtswissenschaften (2. Staatsexamen)

Einsatzmöglichkeiten bestehen nach Beendigung des Traineeprogramms bedarfsabhängig in verschiedenen Bereichen, z. B. in der Schadenbearbeitung, Produktentwicklung oder in der zentralen Rechtsabteilung. Hier werden Sie nach intensiver Einarbeitung unmittelbar in die Bearbeitung von Großschäden, die Vertragsgestaltung und die Produktentwicklung sowie die Bewertung juristischer Fragen im Kontext sich ständig ändernder Gesetze und Rechtsprechungen eingebunden.

Das Traineeprogramm beruht von Beginn an auf einer unbefristeten Vertragsbasis.

Neben einem qualitativ hochwertigen Abschluss zeichnen Sie sich durch unternehmerisches Denken, lösungsorientiertes und engagiertes Handeln, einen teamorientierten Arbeitsstil und kommunikative Fähigkeiten aus. Hohes Engagement und Flexibilität runden Ihr Profil ab.

Sind Sie bereit, zu zeigen, was in Ihnen steckt? Dann freuen wir uns auf Ihre aussagekräftige Bewerbung über unser Online-Portal unter:  
[www.vgh.de/karriere/studenten](http://www.vgh.de/karriere/studenten)

**VGH Versicherungen**  
Personalentwicklung  
Christiane Besa-Schmidt  
Schiffgraben 4 30159 Hannover  
Telefon: 0511 362-2152  
[www.vgh.de](http://www.vgh.de)



**PHIL & CHILL**  
SA 21.04.2018 | 21.30 UHR | NDR FUNKHAUS

**BRUCKNER 4. SINFONIE**  
NDR RADIOPHILHARMONIE | ANDREW MANZE DIRIGENT  
**LIVE ACT MAX GIESINGER**  
KUHLAGE UND HARDELAND MODERATION

**NDR RADIOPHILHARMONIE** **NJOY**

Foto: Michael Alpat / picture alliance



**Deutsch für die Uni**  
**Abendkurse Deutsch**  
**Deutsch für Mediziner**

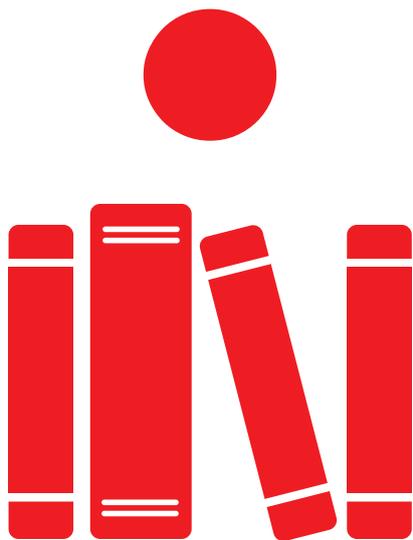
ISK | Lützwstraße 7 | 30159 Hannover  
05 11. 12 35 63 60 | [www.isk-hannover.de](http://www.isk-hannover.de)



**Institut für Sprachen**  
**und Kommunikation**



# Studieren ist einfach.



**Wenn man eine Finanzpartnerin hat, die sich ums Geld kümmert.**

Mit uns liegen Sie richtig – vor, während oder nach dem Studium. Sprechen Sie uns an! Zum fairen KfW-Studienkredit genauso wie zu allen anderen Fragen rund um Ihre Finanzen. Infos und Beratung auch online oder im Chat.

[WWW.STARTING-BUSINESS.DE](http://WWW.STARTING-BUSINESS.DE)

# TRÄUMEN ODER MACHEN?

JETZT EIGENES **STARTUP** GRÜNDEN  
UND FÖRDERUNG SICHERN!